

---

# 파장 분할 다중화 시스템의 수신감도 개선

김선엽\* · 박형근\*

Receive Sensitivity Improvement of Wavelength Division Multiplexing System

Sun-youb Kim\* · Hyoung-keun Park\*

## 요 약

본 논문에서는 스펙트럼분할된 WDM시스템의 성능해석시, 광전치 증폭기를 사용하여 일반적인 핀(PIN) 다이오드를 채용한 수신기를 통해 얻을 수 있는 수신감도를 개선하는 방법에 대해 해석하였다. 또한 온-오프키잉(OOK : On Off Keying)과 주파수 천이키잉(FSK : Frequency Shift Keying) 전송을 이용하여 표준에러률을 유지하기 위해 필요로 하는 비트당 광자의 수를 계산한 후 수신기에서 광신호와 전기신호의 다양한 대역폭 비가 변화하는 경우에 대하여 위의 값을 다시 도출함으로써 수신감도를 해석하였다.

## ABSTRACT

In this study, we analysis an optical receivers using the optical preamplifier in a spectrum-sliced WDM systems. The average numbers of photons/bit, for an  $10^{-9}$  error probability, counts using the OOK and FSK transmission. As a result, the theoretical sensitivity for PIN receiver and optical preamplifier receiver are approximately  $9.2 \times 10^4$  and  $7.2 \times 10^2$  in the m=20, respectively. Also, the average numbers of photons/bit, for a given error probability, theoretical receiver sensitivity for Gaussian method and k-square method are approximately  $9 \times 10^2$  and  $2.16 \times 10^2$  in the m=40, respectively. And the average numbers of photons/bit, for a given error probability, theoretical receiver sensitivity, OOK and FSK transmission are approximately  $1.9 \times 10^2$  and  $3.1 \times 10^2$  in the m=20, respectively.

## 키워드

파장분할다중화(WDM), 광전치증폭기, OOK, FSK

## I. 서 론

컴퓨터 통신을 위한 계층형 최상위 레벨인 백본(backbone)이 광통신을 기반으로 구축되고 있으며 특히 광통신망의 스펙트럼분할시스템에서 신호와 부가적인 잡음의 통계적인 특성에 대해 다양한 방법으로 평가하는 것은 시스템의 성능 최적화를 위해 필수적이다.

따라서 본 논문에서는 광통신망에서 스펙트럼분할기법을 채용한 시스템 중 광 전치 증폭수신기의 수신감도 해석에 대해 연구를 수행한다.

스펙트럼분할 방식은 다른 데이터 채널들에 대해 광증폭기로부터 발생하는 자연증폭방출(ASE : Amplified Spontaneous Emission)인 광대역 잡음소스의 효율적인 스펙트럼 분할을 통해 WDM의 응용과 같은 다중 코히어런트 레이저를 이용하는 경우에 저가의 시스템을 구현할 수 있도록 하는 매력적인 기술이다.[1]-[3]

스펙트럼분할시스템에서 신호와 부가적인 잡음의 통계적인 특성에 대해 다양한 방법으로 평가하는 것은 시스템의 성능 최적화를 위해 필수적인데, 본 논문에서는 스펙트럼분할된 WDM시스템의 성능해석에서 수신부에 광전치증폭기를 포함시켜 수신된 신호 비트에 대한 여러한 계 측, 비트에 려률(BER : Bit Error Rate)을 유지하기 위해 필요한 평균 광전력을 비트당 포함되는 광자의 수로 나타낸다.

또한 광검출기 앞에 광전치 증폭기를 사용하여 일반적인 펀(PIN) 다이오드를 채용한 수신기를 통해 얻을 수 있는 수신감도를 개선하는 방법에 대해 해석한다. 광전치증폭기는 코히어런트 레이저 기반 시스템에서 수신기의 감도를 개선하는데 사용되었지만, 본 논문에서는 유사잡음 인코하이런트(incoherent) WDM시스템에 광전치증폭기를 포함시켜 수신부 결정회로에서 다양한 신호와 잡음 항들에 대해 확률밀도함수를 적용하고, 에러가 존재하는 경우에 그에 해당하는 확률을 계산하여 시스템의 수신감도가 개선됨을 보인다.

여기에 온-오프키잉(OOK : On Off Keying)과 주파수 천이키잉(FSK : Frequency Shift Keying) 전송 방식을 이용하여 표준에러확률을 유지하기 위해 필요한 비트당 광자의 수를 계산하고, 수신기에서 광신호와 전기신호의 다양한 대역폭 비가 변화하는 경우에 대해 위의 값을 다시 계산한다.

시스템의 성능을 해석하기 위해 실제의 잡음 분포를

이용하여 광 전치 증폭수신기의 성능을 가우시안근사와 κ-자승근사를 이용하여 해석한 후 그 결과를 서로 비교하고, 일반적으로 사용되는 PIN 수신기의 결과와 비교한다. 사용된 신호의 전송방식은 OOK와 FSK 전송을 이용하였다.

## II. OOK 전송에 대한 수신감도

본 절에서는 가우시안 해석법과 κ-자승분포를 이용하여 신호와 잡음 전류가 동시에 존재하는 OOK시스템의 전치증폭기에 대한 해석에 대해 고찰한다. OOK 전송을 적용하기 위한 광 전치 증폭수신기의 구조는 그림 1과 같다.

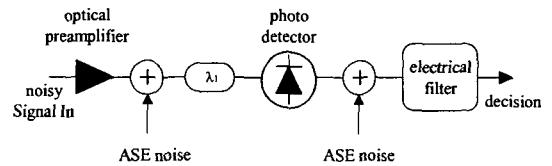


그림 1. OOK 전송을 위한 광전치 증폭수신기  
Fig. 1 Optical preamp. receiver for OOK transmission

광 전치 증폭수신기의 경우에서 수신된 광전류는 종폭기의 이득이 충분히 클 경우에는 열잡음을 무시할 수 있으므로 수신기에 '1'이 수신되는 경우에는 식 (1), '0'이 수신되는 경우에는 식 (2)와 같이 표현된다. 다음 식에서  $\sigma_s$ 와  $\sigma_n$ 은 신호와 잡음에 대한 열잡음항으로 식 (3)과 같다.

$$\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_n^2 \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \sigma_n^2 \quad (2)$$

$$\sigma_s^2 = \bar{N}_p \eta q R_b G, \quad \sigma_n^2 = n_{sp} \eta q (G-1) B_o \quad (3)$$

여기서,  $n_{sp}$ 는 자연방출 인자이고  $G$ 는 광전치증폭기의 이득이다.  $G \gg 1$ 이라면 식 (3)을 이용하여 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} = \frac{\bar{N}_p}{n_{sp}} \frac{R_b}{B_o} = \frac{\bar{N}_p}{mn_{sp}} \quad (4)$$

광전류의 평균치와 분산치는 다음 식과 같다.

$$\mu_1 = 2(\sigma_s^2 + \sigma_n^2), \mu_0 = 2\sigma_n^2 \quad (5)$$

$$\sigma_1^2 = \frac{2}{m}(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2, \sigma_0^2 = \frac{2}{m}(\sigma_n^2)^2 \quad (6)$$

위 식으로부터 다음 식을 도출할 수 있다.

$$\overline{N_p} = \frac{2n_{sp}m}{\left(\frac{\sqrt{2m}}{Q} - 1\right)} \quad (7)$$

그러므로 가우시안 근사의 경우에는  $m$ 의 최소치가  $Q^2/2$ 로 의해 주어지므로  $Q$ 가 6인 경우에는  $m_{\min}$ 이 18로 된다.

앞에서 고찰한 바와 같이 전치증폭기의 ASE 잡음이 열잡음보다 훨씬 큰 경우, 1 상태와 0 상태 모두의 광전류는  $\kappa$ -자승 분포로 수정할 수 있다. 에러확률이 1비트를 전송하는 경우와 0비트를 전송하는 경우에 동등한 값을 갖는다고 가정하면, 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.[6]

$$P_e = 0.5[\Pr{x > x_{th}|0} + \Pr{x < x_{th}|1}] \quad (8)$$

여기서,  $x_{th}$ 는 확률 밀도 함수를 인식하는데 이용되는 결정 한계치이며, 식 (4), (6)을 이용하여 에러확률을 다시 쓰면 식 (9)와 같다. 또한, 식 (9)의 에러확률  $p_e$ 에서 첫 번째 적분항의 적분변수를  $p = x/\sigma_0^2$ 으로 바꾸고, 두 번째 적분항의 적분변수를  $p = x/\sigma_1^2$ 로 바꾼 후, 확률밀도 함수의 성질을 이용하면 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$P_e = \frac{0.5m^{2m}}{(2m-1)!} \left[ \int_{K_1\sigma_0^2}^{\infty} \frac{x^{2m-1}}{\sigma_0^{4m}} \exp\left(-\frac{mx}{\sigma_0^2}\right) dx + \int_0^{K_2\sigma_1^2} \frac{x^{2m-1}}{\sigma_1^{4m}} \exp\left(-\frac{mx}{\sigma_1^2}\right) dx \right] \quad (9)$$

$$P_e = \frac{0.5}{(2m-1)!} \times \left[ \int_0^{\infty} p^{2m-1} \exp(-p) dp - \int_0^{mK_1} p^{2m-1} \exp(-p) dp + \int_0^{mK_2} p^{2m-1} \exp(-p) dp \right] \quad (10)$$

이 적분식은 다음과 같은 gamma 함수를 이용하여 쉽게 계산할 수 있다.[7]

$$\Phi(K, p) = \frac{1}{\Gamma(p)} \int_0^K t^{p-1} \exp(-t) dt \quad (11)$$

식 (11)을 이용하여 에러확률을 식 (12)와 같이 간략화 할 수 있다.

$$P_e = 0.5[1 - \Phi(mK(1, 2m)) + \Phi(mK(2, 2m))] \quad (12)$$

### III. FSK 전송에 대한 수신감도

가우시안 해석법과  $\kappa$ -자승 분포를 이용하여 신호와 잡음 전류가 동시에 존재하는 FSK 방식 시스템의 전치 증폭기의 해석에 대해 고찰한다. FSK 전송을 적용하기 위한 수신기의 구조는 그림 2와 같다.

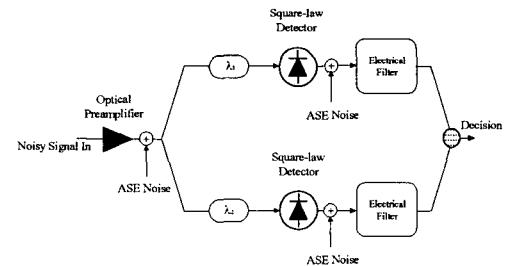


그림 2. FSK 해석을 위한 수신기  
Fig. 2 Receiver for FSK analysis

먼저 가우시안 분포를 적용한 경우 광전류의 실효치와 분산은 식 (13), (14)과 같다.

$$\mu_1 = 2\sigma_s^2, \mu_0 = -\mu_1 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sqrt{var1} &= \sqrt{var0} \\ &= \sqrt{\frac{2}{m}(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2 + \frac{2}{m}(\sigma_n^2)^2} \end{aligned} \quad (14)$$

FSK 시스템의 경우  $Q$ 는 식 (15)와 같고 수신기의 감도는 식 (16)과 같다.

$$Q = \frac{2(\sigma_s^2)}{2\sqrt{\frac{2}{m}(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2 + \frac{2}{m}(\sigma_n^2)^2}} \quad (15)$$

$$\overline{N_p} = \frac{2n_{sp}mQ^2}{2m-Q} \left[ 1 + \frac{1}{Q} \sqrt{4m-Q^2} \right] \quad (16)$$

식 (16)에 일반 수신기의 파라미터인  $n_{sp}=2$  와  $P_e = 10^{-9}$ 을 대입하면 평균 수신기 감도는  $m$ 의 함수로 식 (17)과 같고 결과는 그림 3과 같다.

$$\overline{N_p} = \frac{72m}{m-18} \left[ 1 + \frac{1}{3} \sqrt{2m-18} \right] \quad (17)$$

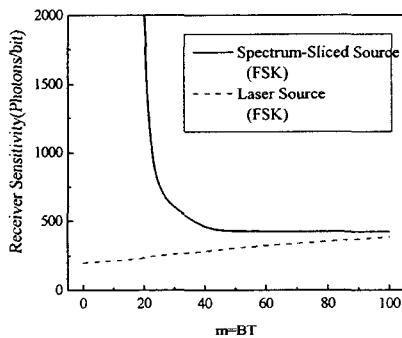


그림 3. 가우시안 근사를 이용한 수신기 감도

Fig. 3 Receiver sensitivity using Gaussian approximation

그림 3에서 실선은 스펙트럼 분할된 광원을 이용한 FSK 시스템의 수신기 감도  $\overline{N_p}$ 를 나타내고, 점선은 본 논문에서  $\overline{N_p}$ 와 비교하기 위해 코히어런트 레이저를 이용한 결과이다.

그림 3을 통해 다음과 같은 결과를 알 수 있다. 즉, 스펙트럼 분할된 광원과 코히어런트 레이저를 이용하는 경우 모두, 수신기의 감도는  $m$ 에 의존적으로 나타나면서 스펙트럼 분할된 광원에서  $m$ 값이 적은 경우 성능이 코히어런트 광원인 레이저를 이용하는 경우보다 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 논의한 바와 같이 신호에너지의 변동은 낮은  $m$ 값에서 우세한 값이고, 광 전자 증폭기의

ASE 잡음은 높은  $m$ 값에서 우세하므로 나타나는 결과이다. 출력에 관련된  $\kappa$ -자승 확률밀도함수는 식 (18)과 같다.

$$P(S) = \frac{\left(\frac{m}{\sigma^2}\right)}{(2m-1)!} S^{2m-1} \exp\left(\frac{mS}{\sigma^2}\right) \quad (18)$$

비트 값이 '1'인 신호가 전송된다고 가정하면 에러확률은 식 (19)와 같다.

$$P_e = \Pr\{S_1 - S_0 < 0\} = \Pr\{S_1 < S_0\} \quad (19)$$

여기서,  $S_1, S_0$ 는 두 채널의 출력이다. 수신기에서 수신된 신호의 판별은 두 신호의 차에 따른다. 여기서  $S_0 = x$ 와  $S_1 = y$ 라면 비트 값이 1인 신호가 전송될 때 에러는  $y < x$  동안 발생한다. 이것을 확률 밀도함수로 표현하면 식 (20)과 같다.

$$\begin{aligned} P_e &= \int \int_{y < x} \Pr(S_1 = y) \Pr(S_0 = x) dx dy \\ &= \int_0^\infty \left[ \int_0^x \Pr(S_1 = y) dy \right] \Pr(S_0 = x) dx \end{aligned} \quad (20)$$

$\kappa$ -자승 분포의 확률밀도함수 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{m^{4m}}{[(2m-1)!]^2} \times \\ &\quad \int_0^\infty \left[ \int_0^x \frac{1}{\sigma_1^{4m}} y^{2m-1} \exp\left(\frac{-my}{\sigma_1^2}\right) dy \right] \times \\ &\quad \frac{1}{\sigma_0^{4m}} x^{2m-1} \exp\left(\frac{-mx}{\sigma_0^2}\right) dx \end{aligned} \quad (21)$$

또한 식 (21)을 간단히 표현하기 위해 식 (22)의 정의를 이용하면 식 (23)과 같이 쓸 수 있다.

$$u = \frac{my}{\sigma_1^2}, \quad \nu = \frac{mx}{\sigma_0^2}, \quad \beta = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{1}{[(2m-1)!]^2} \int_0^\infty \nu^{2m-1} \exp(-\nu) d\nu \\ &\quad \times \int_0^{\nu\beta} u^{2m-1} \exp(-u) du \end{aligned} \quad (23)$$

식 (23)의 형태는 Jacobs에 의한 결과이다.[7] 위 식을 다음과 같이 급수형태로 변환할 수 있다.

$$P_e = 1 - \frac{1}{(1+\beta)^{2m}} \sum_{i=0}^{2m-1} C_i \left( \frac{\beta}{1+\beta} \right)^i \quad (24)$$

신호가 채널 1에 있다고 가정하고, FSK 전송에 대해 표현하면 광전류의 분산은 식 (25)와 같다.

$$\sigma_1^2 = \sigma_s^2 + \sigma_n^2, \quad \sigma_0^2 = \sigma_n^2 \quad (25)$$

식 (25)에서 첨자  $s$ 와  $n$ 은 신호와 잡음 광전류를 의미한다. 그러므로 식 (22)를 이용하면  $\beta$ 는 식 (26)과 같다.

$$\beta = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2 + \sigma_n^2} = \frac{1}{1 + \left( \frac{N_p}{4m} \right)} \quad (26)$$

#### IV. 모의실험

WDM의 환경에 일반적인 OOK 전송과 FSK 전송과의 유사한 점과 차이점에 대해 논의한다. 이러한 비교가 필요한 이유는 예상 전력, 필요한 첨두전력등으로 표현되는 전송 품질에 대한 비교를 위해서이다. 이를 위해 수치적인 해석을 통해 유사한 설정하에서 OOK 전송과 FSK 전송을 서로 비교한다.

코히어런트 광섬유시스템은 직접검출법이나 인코딩 어런트 수신기에 비해 높은 수신기감도를 갖게 되는데, 이것은 수신기의 열잡음을 무시할 수 있을 정도로 큰 고출력 국부발진기로부터의 산탄잡음과 매우 높은 주파수 선택도를 갖는 필터에 의한 것이다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 현재의 수많은 시스템들은 이론적인 검출 감도가 우수하지 못하고, 코히어런트 광원이 필요하지 않은 직접검출방식을 이용한다. 또한 수신기의 전치증폭기로 이용되는 EDFA의 등장은 코히어런트 수신기가 갖는 산탄 잡음의 대한 장점을 감소시켰다. OOK 전송과 FSK 전송의 효율을 계산하기 위해 사용한 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 전송효율 계산을 위한 파라미터  
Table 1. Parameter to compute of transmission efficiency

항 목	값
잡음 정전용량 ( $C_T$ )	$0.1pF$
대역폭 비 ( $B_e/R_b$ )	0.5
광전치 증폭기의 이득 ( $G$ )	$G \gg 1$
비트 에러율 ( $Q=6$ )	$10^{-9}$
자연방출 잡음 지수 ( $n_{sp}$ )	2
전치증폭기단 뒤의 편광필터	없음

표1에 주어진 파라미터를 이용한 OOK 전송과 FSK 전송의 전력효율 즉, OOK 전송과 FSK 전송을 위한 평균 수신기 감도는 표 2와 같다.

표 2. 레이저 기반 시스템의 평균 수신감도  
Table 2. Average receive sensitivity of laser based system

시스템 형태	프와송 분포	가우시안 분포	광 전치증폭기 수신기
OOK (ph/b)	10	2732	$100.8 + \frac{28.4}{\sqrt{12.6 + m}}$
FSK (ph/b)	20	3864	1.5
페널티 (dB)	3	1.5	$m = 1 : 2.31$ $m = 100 : 1.2d$ $m \gg 100 : 1.5$

표 1의 파라미터하에서 열잡음의 한계치를 적용한 PIN 수신기의 성능은 잡음 정전용량에 의존하지만 수신기의 광신호에 대한 대역폭에는 독립적이다. 이러한 결과는 OOK전송과 FSK 전송 모두에 해당한다. 그럼 4는 레이저 소스와 광전치증폭기를 사용한 경우 OOK과 FSK 전송 시스템의 수신기 감도를  $m$ 의 함수로 나타낸 것으로 광 전치 증폭수신기는 수신기의 광신호에 대한 대역폭이 증가하면 성능이 저하된다.

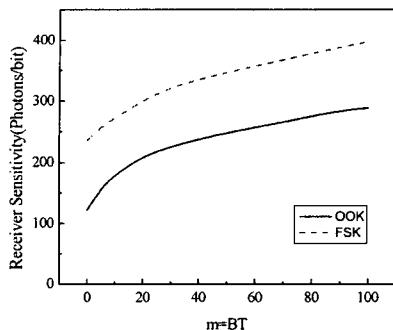


그림 4. 수신기 감도의 가우시안 근사

Fig. 4 Gaussian approximation of receiver sensitivity

$m$ 이 무한대로 가면 앞에서 논의한 바와 같이 수신기의 감도  $\bar{N}_p$ 는  $\sqrt{m}$ 에 대해 비례하며 FSK 전송이 OOK 전송에 비해 1.5dB 정도 더 크다.

가우시안 근사를 이용한 PIN 수신기의 감도는 식 (27)과 같다.

$$\bar{N}_{p, OOK} = \frac{2732}{1 - \frac{18}{m}} \quad \bar{N}_{p, FSK} = \frac{3864}{\sqrt{1 - \frac{18}{m}}} \quad (27)$$

윗 식에서 상대전력페널티는 식 (28)과 같고 결과는 그림 5와 같다.

$$\alpha_{rel}(m) = 1.5 + 5 \log \left( 1 - \frac{18}{m} \right) \quad (28)$$

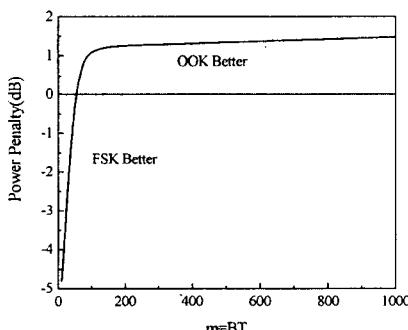
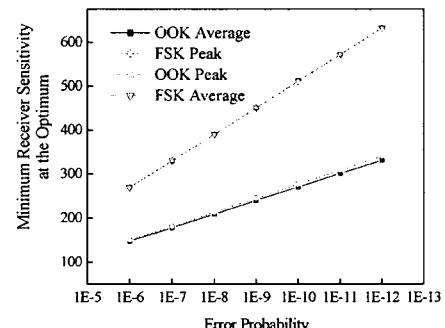
그림 5.  $m$ 에 따른 전력 페널티Fig. 5 Power penalty by  $m$ 

그림 5에서  $m$ 값이 작은 경우 수신기의 감도에 대해 FSK가 OOK보다 우수함을 보인다. 그러나  $m$ 의 증가에 따라 그항이 0에 접근하고 상대적인 전력 페널티는 1.5dB로 주어진다. 또한 수신기 감도  $\bar{N}_p$ 는 FSK의 경우  $1/\sqrt{1 - Q^2/2m}$ 으로 변화되고, OOK의 경우에는  $1/(1 - Q^2/2)$ 로 변화된다. 이러한 변화는  $m$ 이 감소되면 FSK 전송의 성능이 저하되지만, 저하되는 변이량은 OOK에 비해 적다. 따라서 가우시안 근사는  $m$ 값이 큰 경우 수신기 감도의 계산에 적합하며 PIN 수신기를 이용하는데 필요한 수신기의 감도는 적어도 수천 광자/비트가 됨을 알 수 있다.

그림 6.  $\kappa$ -자승 분포를 이용한 수신기 감도Fig. 6 Receiver sensitivity using  $\kappa$ -square distribution

광전치증폭 수신기를 이용하여 신호를 검출할 때의 수신기의 감도는 그림 6과 같다. 광전류의 평균치와 첨두치에 대한 결과를 나타낸다. 이를 통해 FSK 전송이 OOK 전송보다 더 높은 평균 광전력을 요구하지만 피크치의 경우에는 OOK에 비해 낮은 것을 확인할 수 있다. 이러한 장점은 광대역 잡음원으로 이용되는 반도체 소자나 EDFA는 높은 ASE 전력을 만들지 못하기 때문에 실제의 광대역 잡음원을 통해 시스템을 구현할 때 중요한 요소가 된다.

그림 7은 에러확률에 대한 OOK 전송과 FSK 전송의 최적의  $m$ 값을 나타내며, 동일한 에러확률에 대해 FSK가 OOK에 비해 더 낮은  $m$ 을 갖게 된다. 그러나 FSK는 WDM 채널당 밴드의 수가 OOK에 비해 두 배로 필요하게 되므로 이것은 식 (29)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left( m_{FSK-WDM} = 2m_{opt, FSK} \right) \\ & > \left( m_{OOK-WDM} = m_{opt, OOK} \right) \end{aligned} \quad (29)$$

여기서,  $m_{FSK/OOK-WDM}$ 은 필요한 WDM 채널을 위한 최적의  $m$ 이다.

식 (31)은 FSK 전송이 '1' 또는 '0'을 전송하는데 더 낮은  $m$ 의 값을 필요로 하지만, 전체 채널 대역폭은 OOK보다 더 커짐을 의미한다.

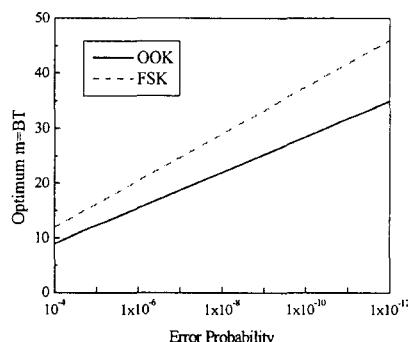


그림 7.  $\kappa$ -자승 분포를 이용한 최적의  $m$   
Fig. 7 Optimization  $m$  using  $\kappa$ -square distribution

## V. 결 론

스펙트럼 분할기법은 이산 코히어런트 레이저소스를 이용하는 송신기에 관한 안정성과 복잡성 문제를 피하는 방법으로 제시되었지만, 스펙트럼분할을 위해 이용되는 광대역소스로부터 발생하는 초과잡음(excess noise)을 제거하는데 비싼 대가를 지불해야만 했다.

따라서 본 논문에서는 스펙트럼분할 WDM시스템에 광전치증폭기를 도입하고, 이에 대한 해석을 수행하여 일반적인 PIN 수신기의 수신감도와 비교하였다. 그 결과, 각각  $m=20$ 인 경우, PIN 수신기의 수신 감도는 대략  $9.2 \times 10^4$  광자/비트인 반면에 광전치증폭기의 경우는  $7 \times 10^2$ 정도의 비트당 광자수를 갖는 것을 확인하였다.

또한 광 전치 증폭기의 해석을 위해 가우시안근사법을 적용한 경우  $m = 40$ 인 조건에서 대략  $9 \times 10^2$  광자/비트, 그리고  $\kappa$ -자승해석법을 적용한 경우에는  $2.16 \times 10^2$  광자/비트의 수신감도를 얻었다.

일반적인 디지털전송 기법인 OOK와 FSK 전송을 이용하여 표준 에러 확률인  $10^{-9}$ 의 에러확률을 유지하기 위해 필요로 하는 비트당 광자의 수를 계산하였는데,  $m = 20$ 인 경우, OOK의 수신감도는  $1.9 \times 10^2$ 정도이었고, FSK

의 경우에는  $3.1 \times 10^2$  정도 이었다. 그리고 다양한 에러확률에 대해 계산된 최적의  $m$ 과 최소 수신기 평균 감도  $N_p$ 를 계산한 결과, 두 가지 값 모두 에러확률  $P_e$ 의 함수임을 확인하였다. 이를 통해 상대적으로 낮은 BER에서 동작시키거나 FEC를 이용하면, 시스템의 용량이 증가되고, 또한 더 큰 광전력을 사용할 수 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems. Wiley, 1992.
- [2] W. B. Carter, President AT&T Submarine Systems Inc., "Global undersea fiber optic network: trends and implications," Plenary address at the Optical Fiber Comm. Conf., San Jose(CA), Feb. 1996.
- [3] K. C. Kao, G. A. Hockham, "Dielectric fiber surface waveguides for optical frequencies," Proc. of the IEEE, vol.133, pp.1151-1158, July. 1966.
- [4] A. M. Vengsarkar, et. al., "Long-period Fiber-grating-based gain equalizers," Optics Letters, vol.21, no.5, pp.336-338, Mar. 1996.
- [5] H. Onaka et al. "1.1 Tb/s WDM transmission over a 150km  $1.3\mu\text{m}$  zero-dispersion singlemode fiber," Optical Fiber Comm. Conf., paper PD-19, SanJose(CA), Feb. 1996.
- [6] T. Li, M.C. Teich, "Photon point process for travelling-wave laser amplifiers," J. Quantum Elect., vol.29, no.9, pp.2568-2578, 1993.
- [7] M. A. Scobey, D. E. Spock, "Passive DWDM components using Micro-Plasma optical interference filters," Proc. Optical Fiber Comm. Conf., paper ThK1, p242, 1996.

## 저자소개

김선업(Sun-youb Kim)

제 10 권 제 2호 참조

박형근(Hyoung-keun park)

제 10 권 제 2호 참조