

김 성 진 이 진
 한국항공대학 통신공학과

A Study on the Performance of Optical Receiver with Avalanche Gain

Sung Jin KIM Jin
 Dept. of Communication Eng., Hankuk Aviation College

Abstract

The excess noise factor of APD defined in different manner has been studied. And the signal to noise ratio, error probabilities of the OOK(on-off keying) optical receiver have been presented in terms of avalanche gain

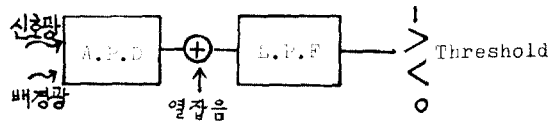


그림 1. 광수신기의 Block Diagram
 The Block Diagram of the OOK optical receiver.

1. 서론

광통신 시스템은 크게 3부분 즉, 송신부, 전송계, 수신계로 구성되어 있다. 그 중 수신계에서 중요한 부분을 차지하는 수광소자는 크게 PIN 다이오드와 APD로 나누어지는데 장거리 통신에 적합한 APD에 대한 연구는 많이 행해졌다.(1, 2, 3)

APD에서 크게 문제가 되는 것은 광전변환에 의해 발생하는 과잉잡음이다. 이에 대한 연구로는 McIntyre(4)와 Melchior(5)가 과잉잡음 지수 F를 각각 정의했다.

본 논문에서는 위의 APD의 과잉잡음 지수 F에 대한 뒤의 서로 비교하고 이식들을 사용하여 이득의 관점에서 S/N와 OOK 광수신기의 오류특성을 Si-APD와 Ge-APD에 대하여 도표를 통하여 제시하였다.

2. OOK(On Off Keying) 광수신기의 구성모델

그림1은 OOK 광수신기의 Block Diagram이다.

광검파기에 입사되는 입사광 평균 광도 $I(t)$ 는 On(mark 신호), Off(space 신호)에 대해서 다음과 같이 표현된다.

$$I(t) = \begin{cases} I_s(t) + I_B & \text{mark 신호시, } 0 \leq t \leq T \\ I_B & \text{space 신호시, } 0 \leq t \leq T \end{cases}$$

여기서 T: 펄스의 송신시간

$I_s(t)$: 신호광 평균광도

I_B : 배경광의 평균광도.

광검파기는 광신호를 전기신호로 변환하는 중요한 소자이다. APD 검파기는 내부증배 이득으로 인하여 PIN 다이오드보다 높은 전류를 발생하게 된다. 그러나 이러한 앰벌런스 증배과정은 신호전류와 잡음전류가 같이 증배되기 때문에 과잉잡음을 발생한다.

그 양은 동주이득과 검파기의 재료와 구조에 달려 있다.(6)

Webb 등에(7) 의하면, 3가지 형태의 APD 모델이 존재한다. 즉, 전자주입형, 정공주입

결, 본관주입결이다. 본 연구에서는 전자주입결을 다룬다.

3. APD 의 Excess Noise Factor

Excess Noise Factor 는 APD 의 중요한 인자이다. 이것은 이온화율이 전계강도에 의존하므로 재료의 성질에 달려 있다. McIntyre 에 의해서 유도된 Excess Noise Factor 는 다음과 같이 정의된다.(4)

$$F = \frac{\langle g^2 \rangle}{\langle g \rangle^2} = KG + (2 - 1/G)(1 - K) \quad (1)$$

여기서 g : random avalanche noise

$\langle g \rangle (=G)$: (평균 avalanche gain)

$K (= \beta/\alpha)$: (α : 전자이온화율, β : 정공이온화율)

(1)식에 대한 가장 간단한 근사식으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F = KG \quad (2)$$

또한 Melchior⁽³⁾ 등에 의해 유도된 식으로는 다음과 같다.

$$F = G^x \quad (3)$$

여기서 $0 \leq x \leq 1$

K 와 x 의 값들은 Si-APD 에서는 $K = 0.01 - 0.1, x = 0.3 - 0.5$, Ge-APD 에서는 $K = 0.1 - 0.5, x = 1$ 로 주어진다.

따라서 본 논문에서는 Si-APD 에서 $K = 0.028, x = 0.3$, Ge-APD 에서 $K = 0.5, x = 1$ 을 대표적인 값으로 정했다.^(5,8) 다음 그림 2는 이들 값에 대한 G 들 속으로 얻은 Excess Noise Factor F 를 나타내었다.

그림 2에 나타낸 바와 같이 $K = 0.5$ 에서 (2) 식은 (1)식에 비교적 잘 근사한다. 그러나 (3)식은 꽤 많은 차이를 보이고 있다.

$K = 0.028$ 에서 (2)식은 G 가 충분히 클 때만 근사함을 알 수 있으나 (3)식은 비교적 매우 근사함을 알 수 있다.

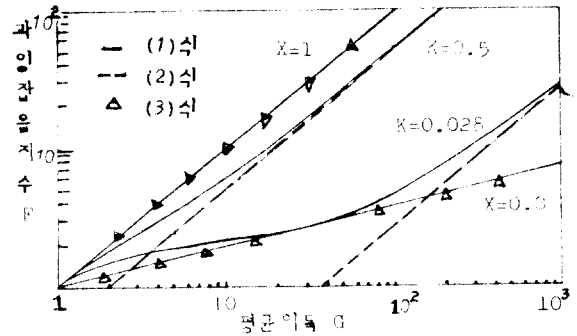


그림 2. APD의 평균이득 G 와 과잉잡음 지수 F

4. GxK 광 수신기의 오율과 S/N 특성

(1) S/N 와 오율의 유도

APD 의 Ensemble 평균 출력 전류는

$$\langle X(t) \rangle = \frac{nG\eta}{h\nu} (I_S + I_B) + \gamma I_D \quad (4)$$

여기서 I_D : APD 의 1차 암전류 직류분 (A)

h : 플랑크 상수

γ : 광 주파수

η : 광 검파기의 양자 효율

η : 전하 ($= 1.602 \times 10^{-19}$ C)

대역폭 B 를 갖는 이상적인 L.P.F (Low Pass Filter) 의 임펄스 출력을 $h(t)$ 라고 하면 출력 $y(t)$ 와 산란 잡음 분산 $n_1(t)$ 는 각각 다음과 같다.(9)

$$y(t) = \int \langle X(\tau) \rangle h(t - \tau) d\tau = \frac{n\eta}{h\nu} \gamma (I_S + I_B) + \gamma I_D \quad (5)$$

여기서 $S = \frac{n\eta}{h\nu} \gamma I_S$ 능는다.

$$n_1^2(t) = [y(t) - \langle y(t) \rangle]^2 = \sigma_S^2 + \sigma_B^2 + \sigma_D^2 \quad (6)$$

여기서

$$\sigma_S^2 = 2 \frac{n\eta^2}{h\nu} \gamma^2 F I_S B$$

$$\sigma_B^2 = 2 \frac{n\eta^2}{h\nu} \gamma^2 F I_B B$$

$$\sigma_D^2 = 2 \eta^2 \gamma^2 F I_D B$$

한편, 일차 잡음 분산 $n_2^2(t)$ 는

$$n_2^2(x) = \sigma_x^2 = \frac{4k\theta}{R} B \quad (7)$$

여기서 k : Boltzman 상수 ($=1.379 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)
 θ : 절대온도 ($^{\circ}\text{K}$)
 R : 등가저항 (Ω)

따라서 전체 잡음 분산 $n^2(x)$ 는
 $n^2(x) = n_1^2(x) + n_2^2(x) \quad (8)$

$n^2(x)$ 에 대한 확률분포는 근사적인 방법으로

Gauss 분포한다고 가정한다.

mark 와 space 신호시의 p.d.f $P(z)$ 은

$$P(z)_{1,0} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \langle n^2(x)_{1,0} \rangle}} \text{Exp} \left[-\frac{(z - S_{1,0})^2}{2 \langle n^2(x)_{1,0} \rangle} \right] \quad (9)$$

mark 와 space 송신확률의 동등할 때

오류는

$$P_E = \frac{1}{2} \text{Erfc} \left(\frac{S}{\sqrt{2} (\sqrt{\langle n^2(x)_1 \rangle} + \sqrt{\langle n^2(x)_0 \rangle})} \right) \quad (10)$$

여기서

$$\langle n^2(x)_1 \rangle = \sigma_s^2 + \sigma_B^2 + \sigma_D^2 + \sigma_x^2$$

$$\langle n^2(x)_0 \rangle = \sigma_B^2 + \sigma_D^2 + \sigma_x^2$$

또한 $S/N = \frac{S^2}{\sigma_s^2 + \sigma_B^2 + \sigma_D^2 + \sigma_x^2} \quad (11)$

(2) S/N 과 오류특성

모든 그림에서 특별한 언급이 없는 한 $I_G = -50 \text{ dBm}$, $I_B = -60 \text{ dBm}$, $I_D = 10^7 \text{ A}$, $R = 100 \Omega$, $\theta = 300^{\circ}\text{K}$, $\eta = 0.5$ 로 가정한다.

그림 3은 APD 의 평균 이득 G 에 따른

OOK 의 S/N 특 나타낸다. 각각의 경우에

S/N 가 최대도 되는 optimum 한 G 값이 존재함을 알 수 있다.

그림 4는 평균 이득에 따른 오류율 $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ 와 $1.3 \mu\text{m}$ 에서 (1), (2), (3) 식을 사용하여 나타내었다. 그림 2에서와 마찬가지로 오류율이 최소가 되는 G 값이 S/N 보다는 약간 높게 존재함을 알 수 있다.

한편 근사식으로 주어진 (2)식을 사용한 오류특성은 (1)식과 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 이득 G 가 작은 값에서는 장파장대에 적합한

Ge-APD 가 Si-APD 보다 감도가 뛰어남을 알 수 있다.

그림 5는 S/N 가 최대도 되는 optimum G

값에 대해서 평균 신호광 전력에 대한 오차를 $G = 100$ 인 값과 비교하여 $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ 와

$1.3 \mu\text{m}$ 에서 나타내었다. 동일한 오차를

얻기 위해서는 optimum 한 이득 G 에서

APD 를 동작시키는 것이 신호광 선택이 위함 때에 매우 유리함을 잡 알 수 있다.

그림 6에서는 $G = 100$ 일때 Si-APD 에 대하여 배경광에 의한 오차를 나타내었다.

일정한 신호 선택에 대해 배경광이 불수록 오류율이 크게 악화됨을 알 수 있다.

그림 7은 신호전력이 일정할때 평균 이득에 대한 온도에 의한 영향을 $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ 와

$1.3 \mu\text{m}$ 에 대해서 오차를 나타내었다.

Ge-APD 보다는 Si-APD 가 온도에 훨씬 민감함을 알 수 있다.

5. 결 론

(1) Excess Noise Factor F 를 서로

다른 정의식을 사용하여 Ge 과 Si-APD 에 대하여 비교해 보았다. G 가 작은 값에서는

(3)식이 $x = 0.3$ 에서 (1)식의 $K = 0.028$

일때에 매우 근사하고, G 가 충분히 큰 값에서는 (2)식의 $K = 0.5$ 일때에 (1)식에 매우

근사함을 S/N 와 오류율 특 통하여 알 수 있었다.

(2) APD 를 사용한 OOK 광 수신기의 오류특성은 신호광 전력보다는 이득 G 값에 크게 의존함을 알 수 있었다.

(3) 최대의 S/N 와 최소의 오류율을 얻기 위해서는 G 값이 optimum 한 값에서 동작시키는 것이 매우 바람직하다.

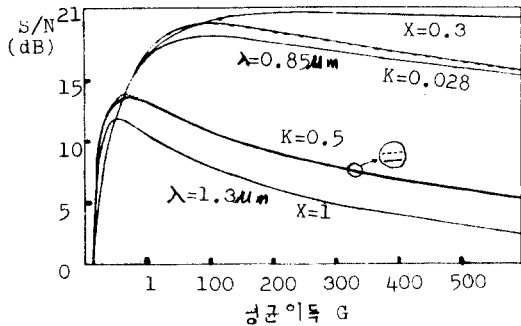


그림3 평균이득과 S/N

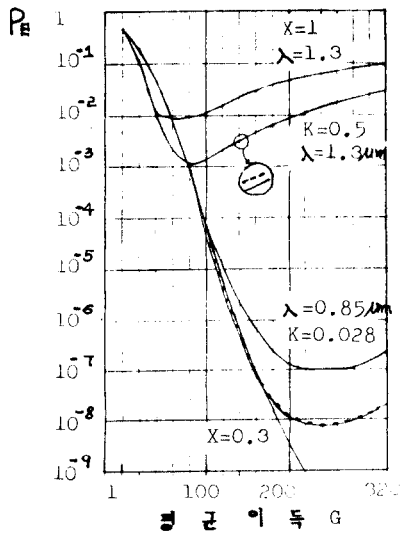


그림4. APD의 평균이득 G와 오류율

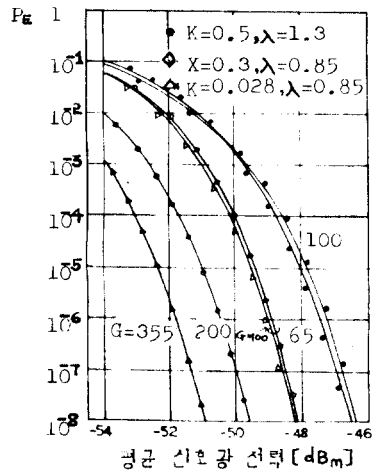


그림5. optimum. G 값과 오류율

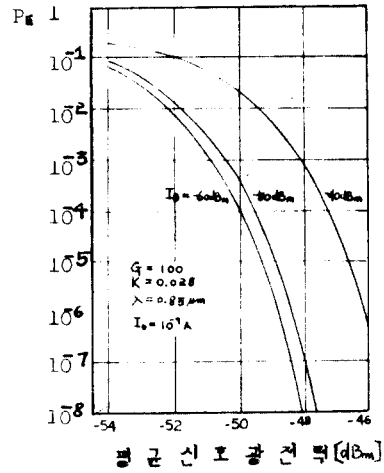


그림6. 배경광에 따른 오류율

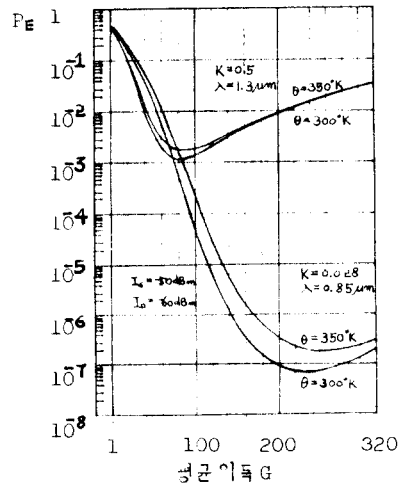


그림7. 입자수 예측한 평균이득 G와 오류율

참 고 문 헌

1. H. Melchior, "Signal and noise response of high speed germanium avalanche photodiodes," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-13, no. 12, pp. 829-838, Dec. 1966
2. H. Melchior, "Photodetectors for optical communication systems," Proc. IEEE, vol. 58, no. 10, pp. 1466-1486, Oct. 1970
3. L.K. Anderson and B.J. McMurty, "High speed photodetectors," Proc. IEEE, vol. 54, no. 10, pp. 1335-1349, Oct. 1966
4. R.J. McIntyre, "Multiplication noise in uniform avalanche diodes," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-13, no. 1, pp. 164-168, Jan. 1966
5. H. Melchior and L.K. Anderson, "Noise in high speed avalanche photodiodes," International Electron Devices Meeting, Washington, D.C., 1965
6. H. Kressel, "Semiconductor devices for optical communication," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1980
7. P.P. Webb et al., "Properties of avalanche photodiodes," RCA Review, vol. 35, pp. 234-278, June 1974
8. N. Sorensen and R. Gagliardi, "Performance of optical receivers with avalanche photodetection," IEEE Trans. Comm., vol. COM-27, no. 9, pp. 1315-1321 Sep. 1979
9. S.D. Personick, "Receiver design for digital fiber optic communication systems 1,2" Bell syst. Tech. J., vol. 52, no. 6, pp. 843-886, July-Aug. 1973