



11주 2강.

광수신기의 잡음 특성, 성능 평가



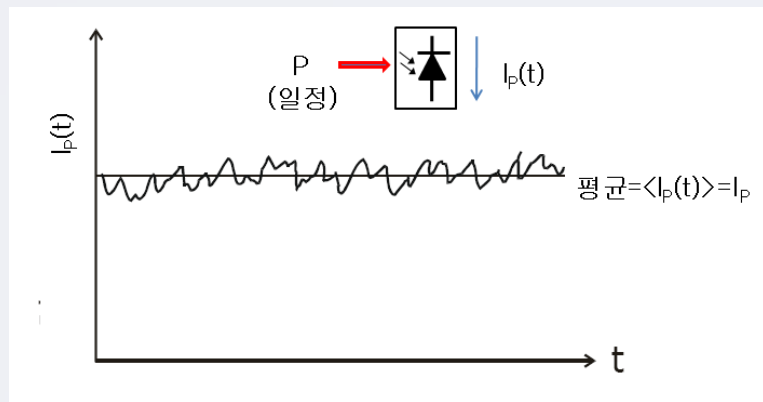
송실사이버대학교

송실사이버대학교의 강의콘텐츠는
저작권법에 의하여 보호를 받는바, 무단
전재, 배포, 전송, 대여 등을 금합니다.

* 사용서체 : 나눔글꼴

광수신기의 잡음 특성

■ 잡음을 고려한 광다이오드의 출력



$$I_P(t) = \langle I_P(t) \rangle + i_n(t) = I_P + i_n(t)$$

잡음 { 산탄 잡음
열 잡음

■ 광다이오드의 잡음원

• 산탄 잡음(shot noise)

- 불규칙한 전자의 생성 때문에 발생하는 광전류의 잡음 성분
- 산탄 잡음의 영향을 포함한 광전류

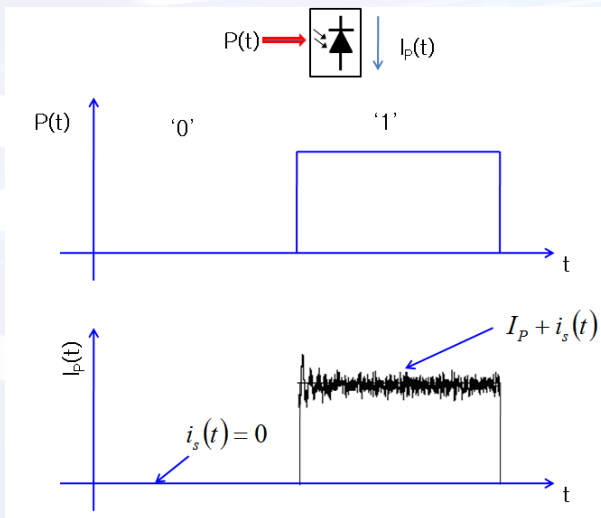
$$I_P(t) = I_P + i_s(t)$$

광수신기의 잡음 특성

- 산탄 잡음의 특성

- 전력 스펙트럼 밀도(power spectral density) $S_S(f)$ 가 주파수에 대해 일정한 백색 잡음(white noise)으로 취급 가능
 - 광전력이 없을 때는 $I_p=0$ 이므로 산탄 잡음이 존재하지 않음

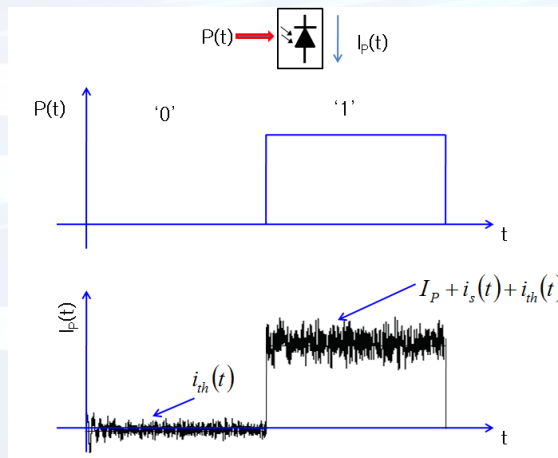
광신호가 존재할 때만
산탄 잡음 발생



광수신기의 잡음 특성

- 열잡음(thermal noise)
 - 열에너지에 의해 불규칙하게 움직이는 전자 때문에 발생
 - 산탄 잡음과 서로 독립적
 - 열잡음을 포함한 광다이오드의 전류 $I_P(t) = I_P + i_s(t) + i_{th}(t)$
- 열잡음의 특성
 - 가우시안 랜덤 과정으로 모델링 가능
 - 수신기의 대역폭 $\Delta f < 100\text{GHz}$ 에서는 백색 잡음으로 취급 가능
 - 열잡음의 분산

광신호가 존재하지 않을
때도 열잡음 발생





◆ 광수신기의 신호 대 잡음비

- SNR은 같은 부하저항 R_L 에서 소모되는 신호의 전력과 잡음의 전력비로 정의
- 광신호가 광다이오드에 의해 전기 신호로 변환된 이후의 SNR을 말하므로 광신호의 SNR(optical SNR)이 아니라 전기 신호의 SNR을 의미

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{\text{신호 전력}}{\text{잡음 전력}}$$



2G

3G

4G

5G

◆ 성능 평가 방법

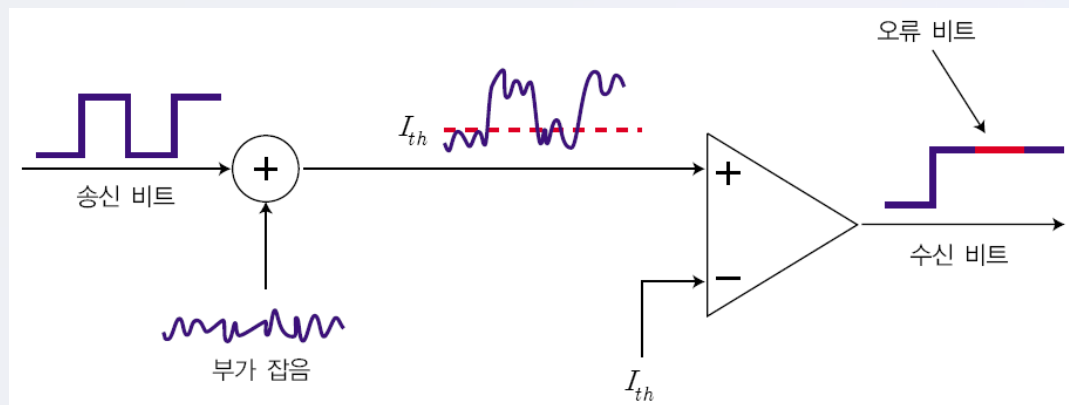
■ 비트오율(BER)

- 디지털 통신시스템의 성능을 결정하는 궁극적 지수
- BER은 수신기의 판별회로가 송신 비트와 다른 비트로 잘못 판별할 확률
 - ✓ $BER = 1 \times 10^{-6}$ 은 백만 개의 비트를 수신하면 확률적으로 하나의 비트에서 오류가 발생
 - ✓ BER 을 증가시키는 원인: 분산에 의한 ISI, 잡음 등
- 수신기는 판단 순간 ($t=t_D$) 에서의 입력 신호 $I(t)$ 를 임계값 I_{th} 와 비교하여 만약
 - $I > I_{th}$ 이면 '1'로 판별하고, $I < I_{th}$ 이면 '0'으로 판별
- 판별회로로 입력되는 전기 신호 $I(t)$ 의 표본 값($I(t=t_D)$)은 잡음 등의 영향으로 확률적인 양이 됨

성능 평가 방법과 수신 감도

◆ 성능 평가 방법

■ 비트오율(BER)

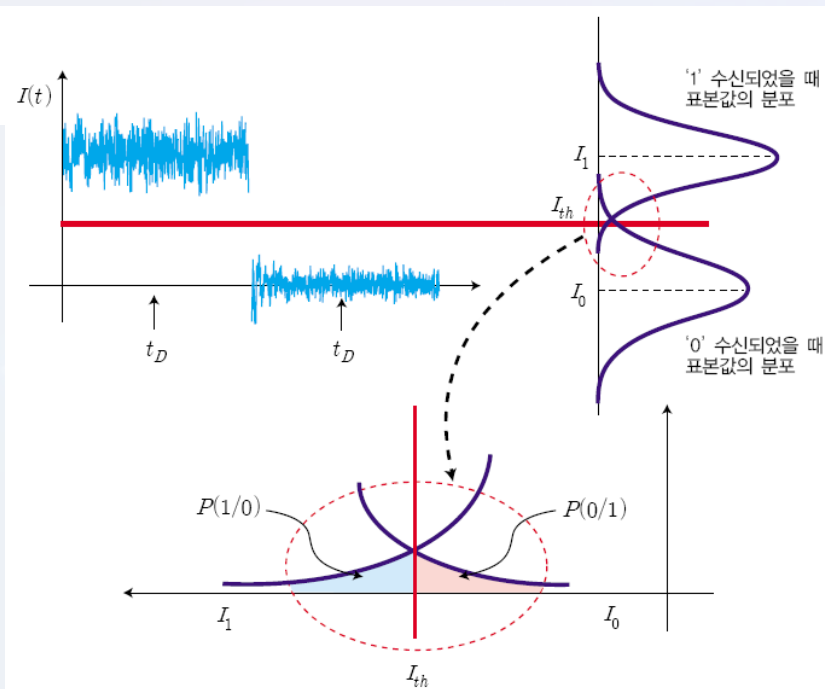


성능 평가 방법과 수신 감도

■ 비트오율(BER)

- 표본값의 확률 분포는 가우시안 분포로 근사적으로 모델링
- 가우시안 분포의 확률밀도함수(pdf)

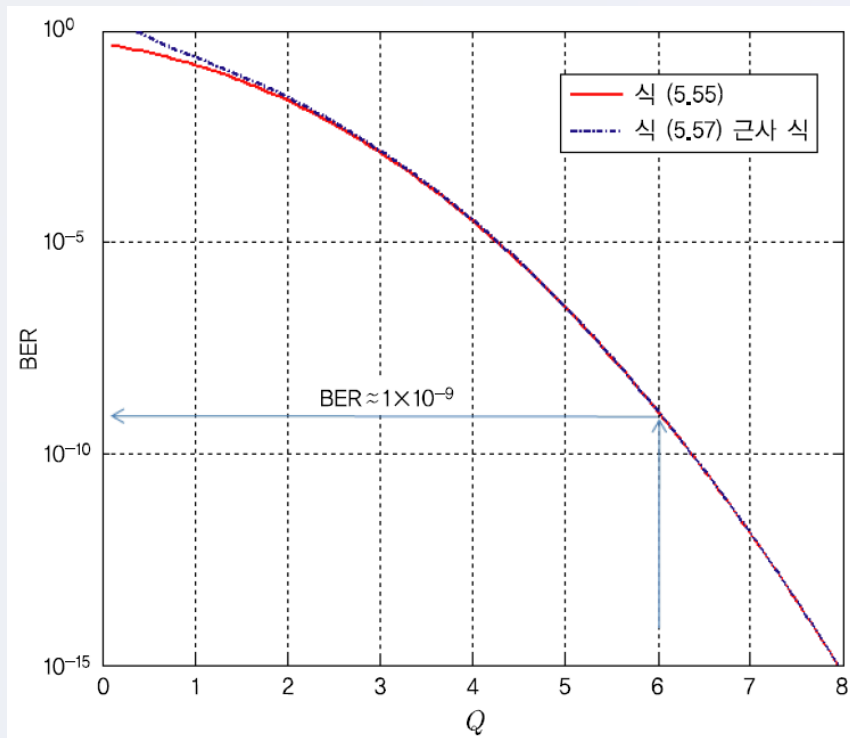
$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_X^2}} \exp\left(-\frac{(x - m_X)^2}{2\sigma_X^2}\right)$$



성능 평가 방법과 수신 감도

- 성능분석

$Q=6 \rightarrow \text{BER}=1 \times 10^{-9}$ 에 해당



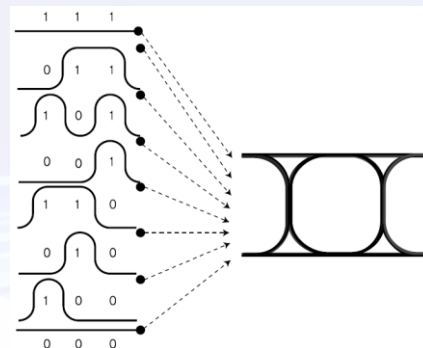
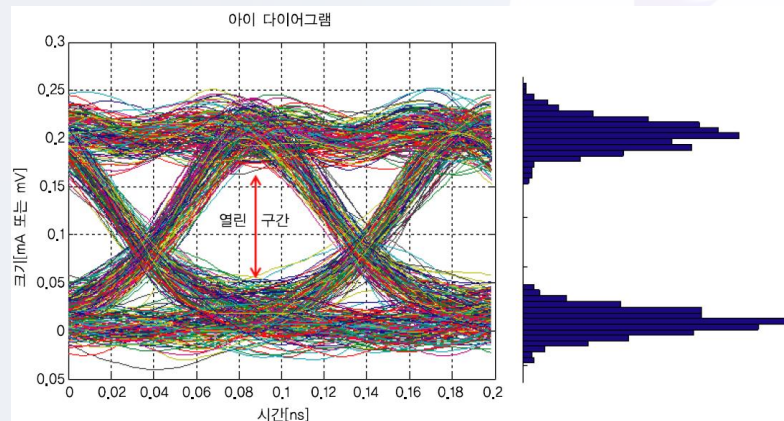
- SNR과 BER
 - 어떤 광통신 링크의 성능을 제한하는 주요 요인이 잡음이라면, BER은 SNR에 의해 결정

성능 평가 방법과 수신 감도

■ 아이 다이어그램(Eye Diagram)

- 시스템의 동작 상태나 신호의 왜곡 정도 및 BER을 저하하는 원인을 밝히기 위해서는 수신 신호의 파형을 관찰하는 것이 중요
- 수신 신호를 2~3비트 구간에서 중첩
 - 아이 다이어그램 또는 아이 패턴이라고 함

<10Gb/s NRZ 신호의 아이 다이어그램과 히스토그램>



<아이 다이어그램의 구성>

열잡음이 지배적인 경우

성능 평가 방법과 수신 감도

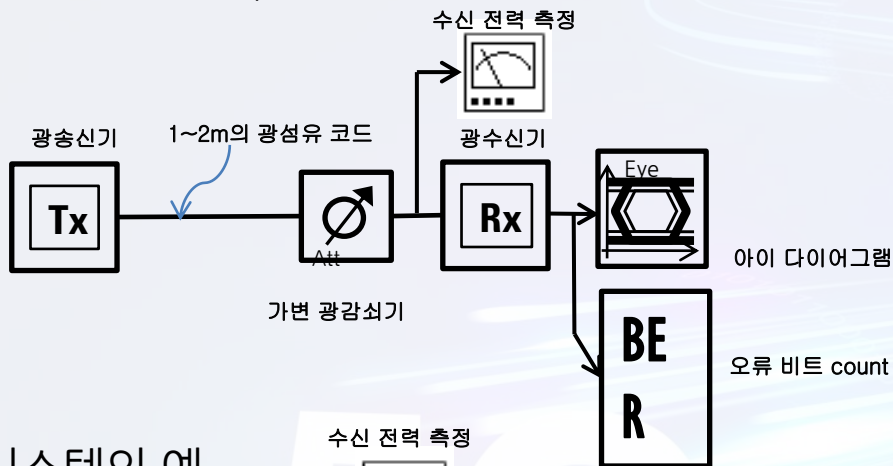
- 눈열림 페널티(EOP, Eye Opening Penalty)
 - 짧은 시간에 성능 분석을 하기 위해 사용
 - 아이 다이어그램에서 '1'과 '0'사이의 열린 구간을 측정하여 성능 예측
 - EOP 정의

$$\text{EOP [dB]} = -10 \log \left(\frac{EO_{test}}{EO_{ref}} \right) \left\{ \begin{array}{l} EO_{test} = \text{측정할 시스템의 눈열림 크기} \\ EO_{ref} = \text{기준 시스템의 눈열림 크기} \end{array} \right.$$

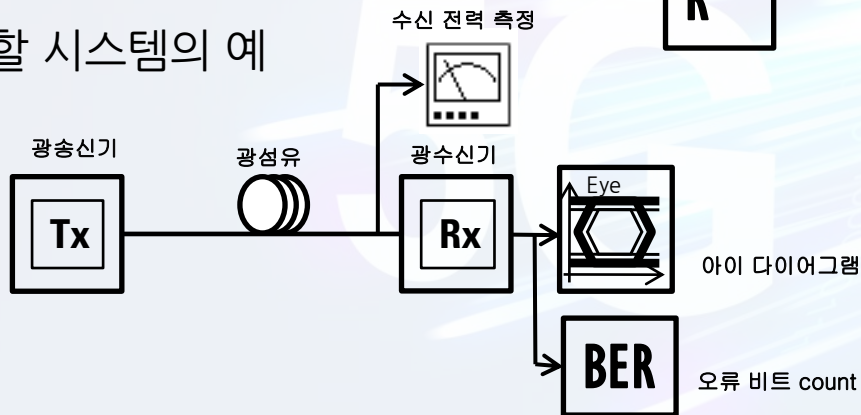
- 기준이 되는 시스템의 아이 다이어그램보다 열린 구간이 몇 dB 감소했는지 측정
- 흔히 사용하는 기준 시스템은, 송신기와 수신기 사이를 광섬유 없이 직접 연결한 시스템
 - 백투백(back-to-back) 시스템이라고 부르며, 광감쇠기를 사용하여 수신기에 입력되는 광전력이 비교할 시스템의 수신 전력과 동일하도록 조절

성능 평가 방법과 수신 감도

- 백투백(back-to-back) 시스템



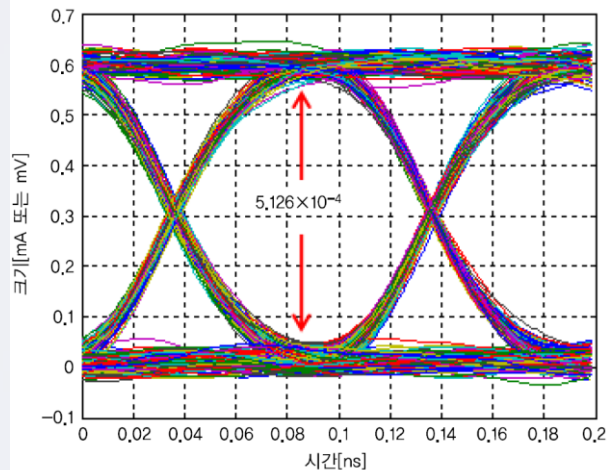
- 측정할 시스템의 예



성능 평가 방법과 수신 감도

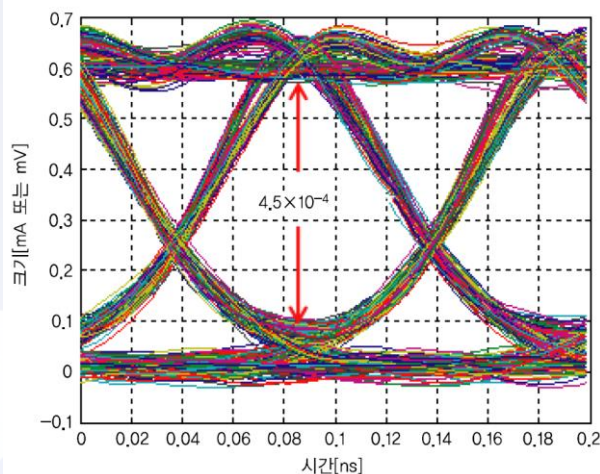
- 눈열림 페널티 계산 예

백투백 시스템



(a) 기준 시스템의 아이 다이어그램과 눈열림 EO_{ref}

50km 광섬유로 전송한 경우



(b) 측정할 시스템의 아이 다이어그램과 눈열림 EO_{test}

$$EOP = -10 \log \left(\frac{4.5 \times 10^{-4}}{5.13 \times 10^{-4}} \right) = 0.57 \text{ dB}$$



◆ 수신기의 성능 비교

■ 이상적인 수신기

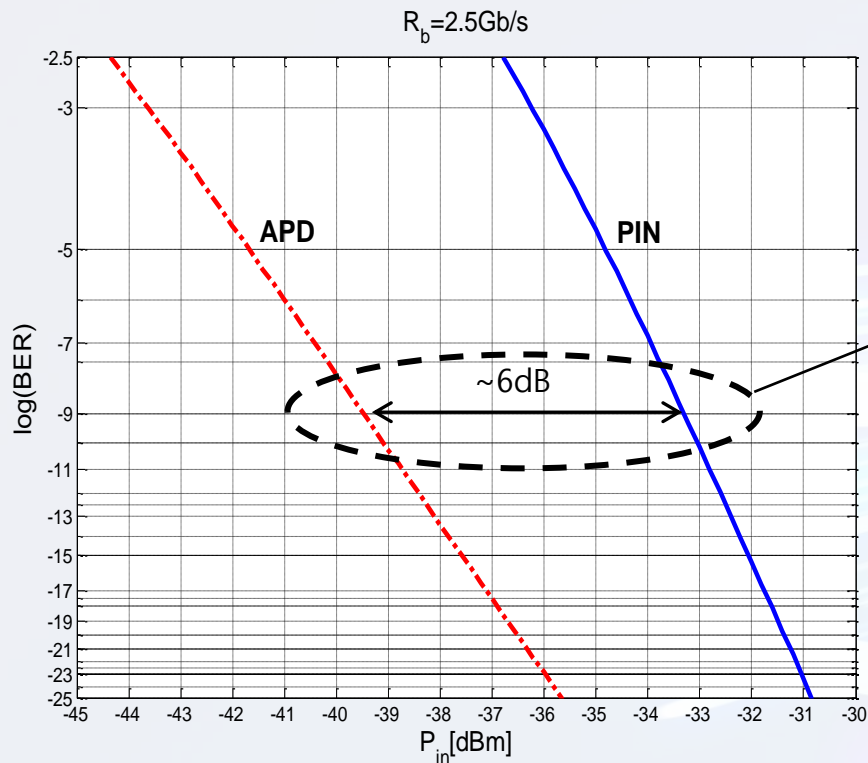
- 수신기의 성능을 비교하기 위한 기준 수신기
- 열잡음과 암전류가 없으며, 양자효율이 100%인 수신기
- 입력 전력이 일정하더라도 특정한 순간에 도달하는 정확한 광자 수는 알 수 없으므로, 산탄 잡음은 존재
- 수신된 '1' 비트에 있는 평균적인 광자 수를 N_p 라고 한다면 이들 광자에 의해 k 쌍의 전자-정공 쌍이 발생할 확률

➤ 이상적인 수신기의 BER

- $BER=10^{-9}$ (양자한계(quantum limit)라 부름)

수신기의 성능 비교와 전력 페널티

■ PIN 수신기와 APD 수신기 비교 예



APD의 수신 감도가 PIN보다 약 6dB 개선



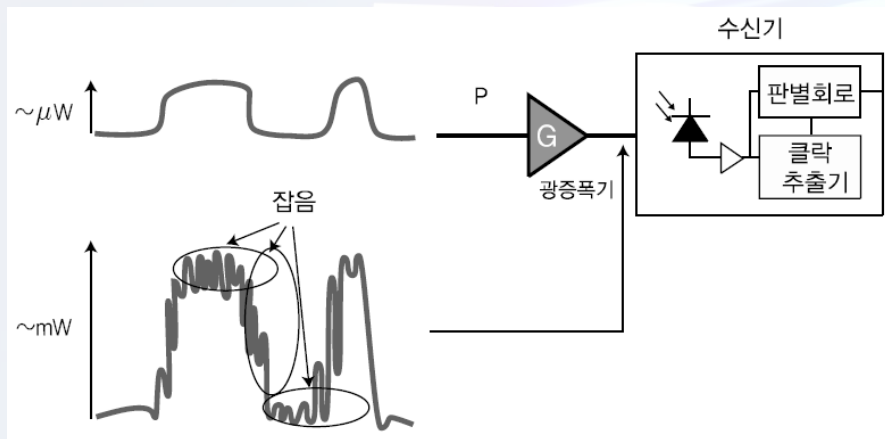
◆ 전력 페널티

- 광통신 시스템에서는 수신기 잡음 외에 BER을 증가시키는 수많은 원인이 존재
- 따라서 $BER=10^{-9}$ 을 유지하기 위해서는 수신 전력을 증가시켜야 할 필요가 있음
- 증가된 전력을 **전력 페널티**(power penalty)라고 부름

수신기의 성능 비교와 전력 페널티

◆ 성능 개선 방법

- 광 전치증폭기(optical preamplifier)를 사용하는 방법
 - 수신기 앞에 놓인 광증폭기로, 수신 신호를 증폭한 후 수신기에 입력
 - 광증폭기는 신호를 증폭할 뿐만 아니라 잡음도 부가되므로, 수신 감도가 광증폭기의 이득만큼 개선되지는 않음
 - 수신 감도가 10~15dB 정도 개선될 수 있으며, WDM 시스템에서는 여러 채널을 동시에 증폭할 수 있으므로 선호되고 있음





◆ 성능 개선 방법

- 수신기 안에서 전자 회로를 통해 수신 감도를 향상
 - DSP 기술을 이용하여 ISI에 의해 왜곡된 수신 신호를 바로잡는 방법
 - 비트율이 10Gb/s 이상으로 올라가면, 사용하기 어려움
- 오류 정정 코드를 사용하는 방법
 - 송신기가 잉여 비트를 송신하면, 수신기는 이를 이용하여 오류 비트를 정정
 - 10^{-12} 이하의 BER이 요구되는 고성능 WDM 시스템에서 유용

수고하셨습니다.

