

論文 91-28A-10-5

Michelson간섭계를 이용한 광 FSK 송신기 특성검출 (Diagnosis of Optical FSK Transmitter Output Characteristics Using Michelson Interferometer)

朴相泳*, 李揆松*, 林鎬根*, 全光錫**, 金昌敏**, 洪玩憲**

(Sang Young Park, Kyu Song Lee, Ho Geun Lim, Kwang Sug Chun, Chang Min Kim,
and Woan Hue Hong)

要 約

본 논문에서는 Michelson간섭계를 이용하여 반도체 레이저 다이오드의 주입전류변조에 의한 직접주파수변조효과를 이용하여 설계 제작된 코히어런트/헤테로다인 광통신 시스템에서의 송신기의 특성검출방법을 제시하였다.

반도체 레이저 다이오드와 시준 렌즈를 포함하는 항온기를 제작하여 광 FSK 통신 시스템의 발광원으로 사용하였으며, LD-FM 회로모델을 이용하여 최적의 이퀄라이저를 설계 제작함으로써 코히어런트 광 FSK 송신기를 제작하였다. 제작된 송신기의 특성 검출을 위하여 최대 100Mbit/s 의 PRBS (pseudo random bit sequence) 신호로 변조하였다.

마이켈슨 간섭계를 광주파수 변별기로 사용하여 송신기의 출력을 직접검파하는 방법에 의해 송신기에 이퀄라이저를 사용하였을 경우와 사용하지 않은 경우에 수신된 정보를 재생하여 송신된 정보와 비교함으로써 이퀄라이저의 효과와 성능을 알아보았다. 그리고 송신되는 정보의 eye pattern과 수신된 정보의 eye pattern을 비교함으로써 송신기의 성능을 평가하였다. 실험결과 제작된 송신기가 100Mbit/s 의 정보전송능력을 가짐을 알 수 있었다.

Abstract

In this paper, we suggested the diagnosis of the optical FSK transmitter output characteristics using the Michelson interferometer.

The transmitter is designed by the direct frequency modulation effect of a semiconductor laser diode. The optical FSK transmitter consists of a temperature stabilized semiconductor laser diode and an optimally designed equalizer. It is modulated by 100Mbit/s PRBS Generator to diagnosis of Optical FSK transmitter output characteristics.

The Michelson Interferometer is used for the optical frequency discriminator which transforms the output frequency of the transmitter to the amplitude of light. The measurement of the performance of the transmitter compare the transmitted data and their eye pattern with the simulation results, the received data and their eye pattern. As the result of experiment, the data transfer rate of the transmitters is 100Mbit/s.

**正會員, *準會員, 서울시立大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Seoul City Univ.)
接受日字: 1991年 5月 11日

I. 서 론

최근 IM/DD(Intensity Modulation/Direct Detection) 광통신 방식에 비해 헤테로다인 수신방식에 의

해 수신기의 감도를 향상시켜 장거리 전송이 가능하고, 코히어런트하고 광주파수를 선택할 수 있는 성질을 이용하여 막대한 정보량을 전송할 수 있는 코히어런트/헤테로다인(coherent/heterodyne) 광통신 시스템에 대한 연구가 시작되었다.¹³⁻⁹⁾ 최근에는 2Gbit/s에서 8Gbit/s라는 높은 정보전송율(bit rate)을 가지는 시스템이 실험되어지고 있다.¹²⁻⁸⁾ 코히어런트/헤테로다인 광통신방식이 더욱 각광을 받는 것은 단일 모드 파이버(single mode fiber)에 여러가지의 정보를 전송하여 불특정 다수의 사용자가 각자 원하는 정보를 텔레비전의 채널을 선택하듯이 선택하도록 할 수 있는 FDM(frequency division Multiplexing)의 실현에 의한 "Fiber to the home"이라는 꿈의 광통신을 이룰 수 있기 때문이다.

코히어런트/헤테로다인 광 FSK 송신기는 "0"과 "1"의 정보에 대한 주파수(tone frequency)가 일정하여야 하나 실제 송신기에 사용되는 발광원인 반도체 레이저 다이오드(semiconductor laser diode)는 주입 전류변조에 의한 주파수변조특성이 일정하지 않다.^{9,10)} 이러한 반도체 레이저 다이오드를 그대로 송신기에 사용하면 두 신호주파수의 변화(tone drift)에 의해 전체 통신 시스템의 BER(bit error rate)가 증가하고, 누화(crosstalk)에 의해 전체 통신 시스템의 성능이 저하된다.¹¹⁾ 따라서 통신 시스템의 성능을 개선하기 위해서는 반도체 레이저 다이오드의 주입전류변조에 의한 주파수변조특성이 일정하도록 하여야 한다. 본 연구에서는 반도체 레이저 다이오드의 직접주파수변조특성을 일정하게 하기 위해 저자가 발표한 바 있는 기존의 LD-FM(laser diode-frequency modulation) 회로 모델을 이용하여 반도체 레이저 다이오드 바이어스 전류의 최적치를 설정하고 그에 따른 캐패시터와 저항으로 이루어진 이퀄라이저(equalizer)를 부가시 송신훈성을 예측하기 위해 시뮬레이션하였다.

마이켈슨 간섭계(michelson interferometer)를 제작하여 광 주파수 변별기(optical frequency discriminator)로 사용하여 제작된 코히어런트 광 FSK 송신기로부터 전송된 정보를 재생하였다. 시뮬레이션 결과 및 재생된 정보의 eye pattern을 실제 변조신호의 eye pattern과 비교하여 송신기의 성능을 평가하였다.

II. 데이터 전송에 따른 광 FSK 송신기의 성능평가 시뮬레이션

광 FSK송신기의 개략도는 그림 1과 같다. 반도체 레이저 다이오드는 주변 온도에 의해 발진파장이 변화하므로 온도에 의한 동작조건을 안정화를 위하여

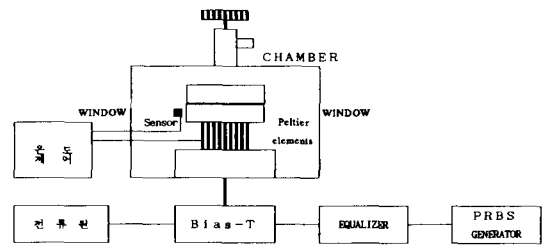


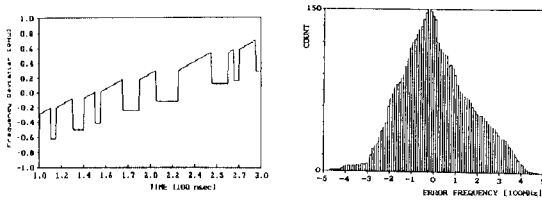
그림 1. 광 FSK 송신기의 개략도

Fig. 1. Schematic diagram for the optical FSK transmitter.

항온기를 제작하였다!¹²⁾ 항온기 내부에는 실험에 사용하고자하는 반도체 레이저 다이오드인 HLP1600과 출력률 시준(collimation)하기 위한 그린로드 렌즈(grin-rod lens)와 볼록 렌즈(biconvex lens)를 장착하였고, 항온기 내부, 특히 반도체 레이저 다이오드의 온도변화를 측정하기 위한 반도체 온도 센서인 AD590과 온도의 새어를 위한 펠티어(peltier) 소자를 장착하였다. 열전도도를 높이기 위하여 항온기 내부를 진공으로 만들었고 진공밸브를 설치하였다. 반도체 레이저 다이오드의 출력 광은 두개의 시준 렌즈로 평행광이 되어 항온기 덮개에 있는 두개의 창(window)을 통하여 항온기 밖으로 출력되도록 설계하여 제작하였다.

온도안정화는 항온기 내부를 10^{-6} torr 정도의 진공 상태로 유지시키고 IBM-PC를 이용하여 적응온도 제어 알고리즘을 사용하여 $\pm 5m^{\circ}C$ 의 안정도를 이루었다!^{14,15)} LD를 직접변조하기 위하여 Bias-T를 부착하였고 equalizer는 참고문헌[12]의 그림5와 같이 제작하여 부착하였으며, 정전류원으로 최적 bias전류를 설정한 후 100Mbit/s의 PRBS(pseudo-random bit sequence) 발생기로 주파수변조 하였다.

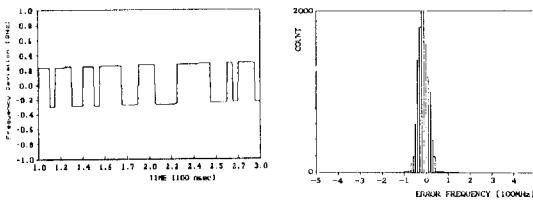
그림 1의 개략도와 같이 설계된 광 FSK 송신기의 송신훈성을 알아보기 위해 등화기가 없는 반도체 레이저 다이오드의 회로 모델과 등화기가 포함된 반도체 레이저 다이오드의 회로 모델을 이용하여 시뮬레이션한 결과를 비교하여 그림 2,3에 보였다. 그림 2(a)는 등화기를 포함하지 않은 송신기의 100Mbit/s의 무작위 정보 펄스 입력(pseudo random data pulse)에 대한 출력주파수편이를 시뮬레이션한 것이고 그림 2(b)는 순시주파수오차(instantaneous frequency error)를 막대그래프로 그린 것으로 시뮬레이션한 출력주파수편이를 0.1 nesc 주기로 계수한 것이다. 그림 3(a)와 (b)는 2차의 등화기를 포함한 광 FSK 송신기의 출력주파수 편이와 순시주파수오차를 시뮬레



(a) 출력주파수편이 (b) 순시주파수오차

그림 2. 등화기가 없는 경우 무작위 정보에 대한 출력

Fig. 2. Output for pseudo random data without equalizer.



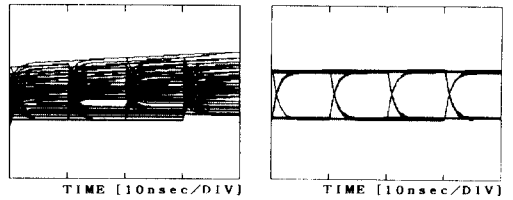
(a) 출력주파수편이 (b) 순시주파수오차

그림 3. 등화기가 있는 경우 무작위 정보에 대한 출력

Fig. 3. Output for pseudo random data with equalizer.

이션한 것이다. 그림 2와 3을 비교해 볼 때 등화기를 포함한 광 FSK 송신기의 주파수변조특성이 상당히 개선된 것을 알 수 있다.

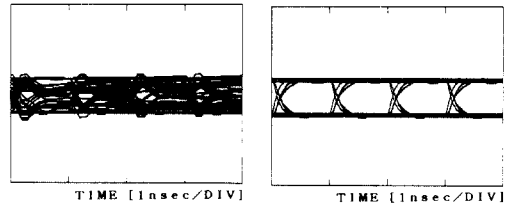
설계된 송신기의 성능이 수신기에 미치는 영향을 알아보기 위해 마이켈슨 간섭계를 광대역 광주파수 변별기로 사용하고 수신기의 응답속도가 Insec인 모델을 선정하여 eye pattern을 시뮬레이션하였다. 그림 4 (a)는 등화기를 사용하지 않은 시스템의 eye pattern이고 (b)는 2차의 등화기를 사용한 시스템의 eye pattern이다. 두개의 eye pattern을 비교해 보면 등화기를 사용하지 않은 경우는 두 신호를 결정할 수 있는 문턱치를 설정할 수 없을 정도로 심각한 결과를 보이나 등화기를 사용한 경우는 문턱치는 물론 신호의 분간을 확실하게 할 수 있을 정도로 깨끗한 결과를 얻어 등화기를 사용한 송신기를 사용할 경우 송신기에 의한 통신 시스템의 성능저하는 무시할 수 있음을 알 수 있다. 그림 5의 (a)와 (b)는 각각 1Gbit/s에 대하여 등화기를 사용하지 않은 경우와 등화기를 사용한 경우의 eye pattern이다. 이 시뮬레이션 결과를 통해서 1Gbit/s의 데이터 전송이 가능하다는 것을 알 수 있다.



(a) 등화기가 없는 경우 (b) 등화기가 있는 경우

그림 4. eye pattern 시뮬레이션 결과

Fig. 4. Simulation result of eye pattern.



(a) 등화기가 없는 경우 (b) 등화기가 있는 경우

그림 5. 1Gbit/s에 대한 eye pattern 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Simulation result of eye pattern for 1Gbit/s.

Ⅲ. 마이켈슨 간섭계의 주파수 변별특성

1. 마이켈슨 간섭계의 원리

마이켈슨 간섭계는 원리적으로 Fabry-Perot 간섭계와 같으며, Fabry-Perot 간섭계는 거울사이에서 광이 다중반사를 하는 동안 일어나는 간섭에 의해 고분해능의 분광기 역할을 하나 마이켈슨 간섭계는 광분할기에서 두 거울에 이르는 거리의 차이에 의한 간섭에 의해 출력이 나타나므로 Fabry-Perot 간섭계보다 정밀하지 못하나 제작이 쉬우며 자유 스펙트럼 영역 (free spectral range)의 넓은 범위에 대해 입력되는 광의 주파수 변화를 검출해 낼 수 있는 잇점이 있다.

그림 6의 마이켈슨 간섭계에서 광분할기로부터 두개의 거울에 이르는 거리 L_1 과 L_2 의 차이를 d 라 하면 출력에서 최대치가 얻어지는 조건은 두개의 거울에서 반사된 입사광이 광분할기에서 다시 만날 때의 위상차가 0일 때 출력이 최대가 되며 이러한 출력특성은 그림 7과 같다.

마이켈슨 간섭계가 광대역의 광주파수 변별기로 사용되는 원리를 살펴본다. 주입전류의 변조에 의해 주파수변조된 반도체 레이저 다이오드의 출력은 전송

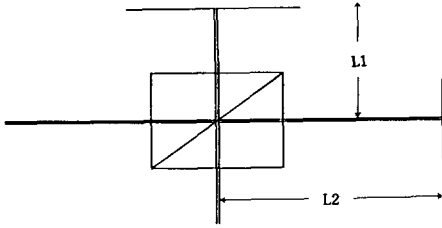


그림 6. 마이켈슨 간섭계의 개략도
Fig. 6. Schematic diagram for the Michelson interferometer.

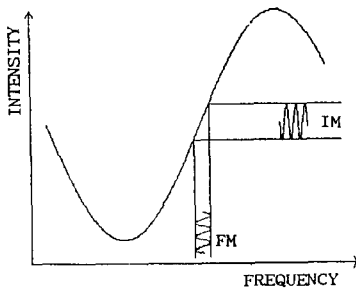


그림 7. 마이켈슨 간섭계의 출력특성 및 변별특성
Fig. 7. Output and discrimination characteristic of MI.

한 바와 같이 진폭변조와 주파수변조가 함께 나타나며 각각 다음과 같다.

$$I(t) = I_0 \{ 1 + m \sin(\omega_m t) \} \quad (1)$$

$$f(t) = f_0 - \Delta f \sin(\omega_m t + \Phi) \quad (2)$$

여기서 I_0 는 광세기의 진폭, m 은 진폭변조지수, ω_m 은 변조주파수, f_0 는 광주파수, Δf 는 주파수변조에 의한 최대주파수편이 그리고 Φ 는 진폭변조와 주파수변조 사이의 위상지연이다. (1)식과 (2)식으로 주어지는 레이저 출력에서 진폭변조의 크기가 작다고 가정하면, 즉 변조지수 m 이 매우 작다고하면 마이켈슨 간섭계에 입사되어 나타나는 간섭무늬(interference fringe)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I(t) = I_0 \{ 1 + \cos \left[2\pi f_0 \tau + \frac{\omega_m \Delta f}{2\pi} (\sin(\omega_m(t+\tau)) - \sin(\omega_m t)) \right] \} \quad (3)$$

여기서 τ 는 간섭계의 거울 사이에서 일어나는 지연시간이다. 만일 간섭계가 $2\pi f_0 \tau = (2n+1)\pi/2$ 인 조건으로 동작한다면 (3)식은 Δf 에 대한 식이 된다. 주

어진 조건에서 n 은 정수이며, 이러한 조건은 반도체 레이저 다이오드를 변조시키지 않은 상태에서 마이켈슨 간섭계의 거울사이를 가변하여 출력의 최대치와 최소치의 중간이 되는 지점에 거울을 고정시켜 놓으면 만족된다. 이 지점이 간섭계가 가지는 자유 스펙트럼 영역의 1/4이 되는 지점(quadrature point)이다.

마이켈슨 간섭계의 자유 스펙트럼 영역은 $c/2d$ 이며, (3)식에서 자유스펙트럼 영역의 어떠한 범위에서 Δf 가 변화될 때 변별기로서의 역할을 수행할 수 있는지를 그림 8에서 알아보았다. 일반적으로 Fabry-Perot 간섭계는 자유 스펙트럼 영역의 1/100 이하의 범위에서 변별기로 사용할 수 있어 비효율적이나 그림 8에서 보는 바와 같이 마이켈슨 간섭계는 자유스펙트럼 영역의 1/5이하의 범위에서 변별기로서의 역할을 해낼수 있다.

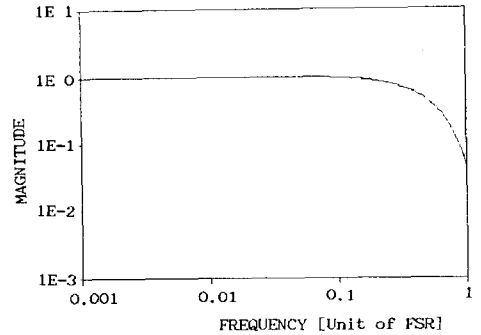


그림 8. 마이켈슨 간섭계의 광주파수 변별특성
Fig. 8. Optical frequency discrimination characteristic of MI.

2. 마이켈슨 간섭계의 제작 및 특성

마이켈슨 간섭계는 정육면체형 광분할기(cubic beam splitter) 한개와 두개의 coner curved mirror를 사용하여 제작하였다. 한개의 거울은 고정시키고 다른 한개의 거울은 micro translator에 고정시켜 거울사이의 거리를 조정할 수 있도록 하였다. 일반 평면거울을 사용하지 않고 coner curved mirror를 사용한 것은 거울에서 반사된 광이 다시 발광원 쪽으로 귀환되는 것을 막기 위해서이다.

정육면체형 광분할기를 사용하여 광 분할기 내로 입사하여 분할되는 광의 진행거리를 같도록하여 평면형 분할기에서 생기는 분할기 매질에 의한 광 강도 손실의 영향을 없애기 위해 삽입하는 보충판(compensation plate)을 사용하지 않고 간단하게 간섭계

를 제작하였다.

그림 9는 micro translator쪽의 거울을 PZT에 고정시키고 얻어낸 출력이다. 이때 두 거울 사이의 거리 차는 8cm 이고 HLP1600을 90mA ($\lambda=830.1nm$, $I_{th}=49.5mA$)로 구동시켰다. 그러나 광 주파수 변별기로 사용하려고 제작한 간섭계는 micro translator 에 거울을 고정시키고 바이어스 전류를 송신기에 주입한 상태에서 간섭계의 출력이 최대와 최소치의 중간에 있도록 조절하고, 송신기에 전송할 정보를 인가하였다. 간섭계의 출력은 응답속도가 Insec인 NEC의 NDL202 APD(avalanch photo diode)를 사용하여 검출하여 오실로스코프로 전송된 정보를 확인하는 방법을 사용하였다. APD의 출력을 오실로스코프로 직접 확인하기 위하여 부하저항을 크게하고 역전압을 최대치로 인가하여 장치의 정렬에 상당한 주의를 기울였다.

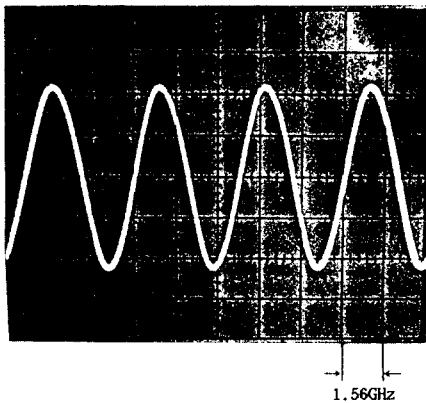


그림 9. 측정된 마이켈슨 간섭계의 출력특성
Fig. 9. Measured output characteristic of MI.

IV. 송신기의 성능평가 실험 및 결과고찰

무작위 데이터 열을 전송하고 전송된 정보를 제공하는 실험을 위해 그림10과 같이 장치를 꾸몄다. 100M bit/s의 속도를 가지고 PRBS 길이가 7인 무작위 데이터 펄스 발생기를 플립-플롭(flip-flop)의 토글(toggle) 주파수가 200MHz인 AS 타입의 D-F/F(74AS374)와 exclusive OR(74AS86)를 사용하여 제작하였으며 파형은 그림 11과 같다.

그림 11의 데이터펄스는 최대 100Mbit/s의 데이터 열로 진폭 2.1mA의 전류 펄스로 변환되어 송신기에 주입되고 이때 주파수 응답은 210MHz이다. 그림 11

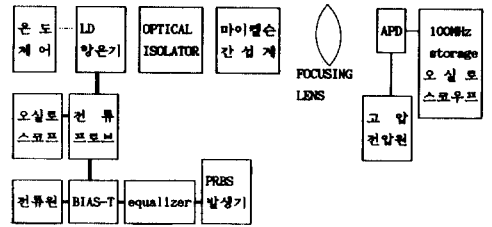


그림 10. 송신훈성을 측정하기 위한 실험 장치
Fig. 10. Experimental set up for the transmission characteristics measurement.

에서 보는 바와 같이 송신기에 주입되는 전류 펄스 열은 이퀄라이저를 통과하게 된다.

그림 12는 송신기에서 이퀄라이저를 사용하지 않은 상태에서의 송신기 출력으로 "0"과 "1"의 정보에 대한 주파수편이가 상당히 크게 변화하고 있어 전송된 정보를 제대로 재생시킬 수 없다. 이는 레이저 다이오드의 주파수 변조 특성이 10MHz이하에서는 주입전류에 대한 주파수편이가 10MHz이상에서보다 더 크게 일어나서 고주파 응답은 감소시키고 저주파에서의 큰 주파수 편이는 신호를 드리프트시키기 때문에 나타난 결과이다. 그림 13은 2차의 이퀄라이저를 포함한 송신기의 출력으로 전송된 정보를 무리없이 재생할 수 있을 정도로 주파수편이가 일정해진 것을 알 수 있다. 그러나 이퀄라이저를 구성하고 있는 저항과 캐피터를 설계치와 똑같은 값을 사용하지 못하고 상용소자를 사용하여 근사적으로 구성함으로써 주파수 성분이 높은 펄스 열의 재생율이 조금 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이퀄라이저 제작을 좀더 정확하게 하면 이러한 문제는 해결할 수 있을 것이다.

그림 14, 15, 16은 각각 전송한 펄스 열, 이퀄라이저가 포함되지 않은 송신기의 출력 그리고 2차의 이퀄

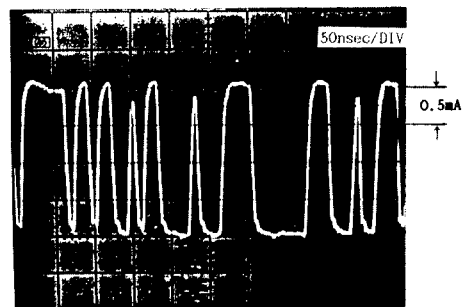


그림 11. 무작위 펄스 열
Fig. 11. Pseudo random pulse train.

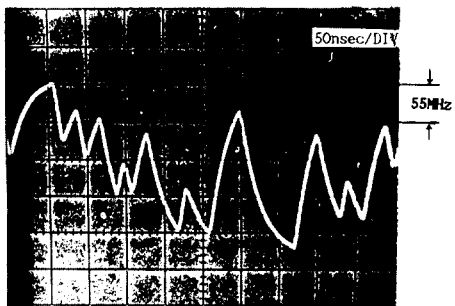


그림 12. 마이켈슨 간섭계 출력(이퀄라이저를 사용하지 않은 경우)

Fig. 12. Output of MI(without equalizer).

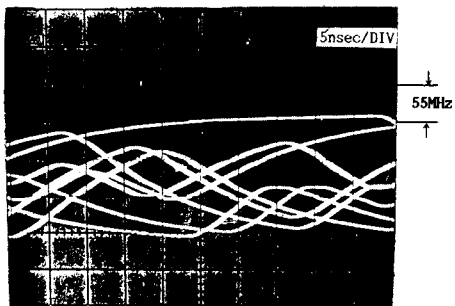


그림 15. 이퀄라이저를 사용하지 않은 경우의 eye pattern

Fig. 15. Eye pattern without equalizer.

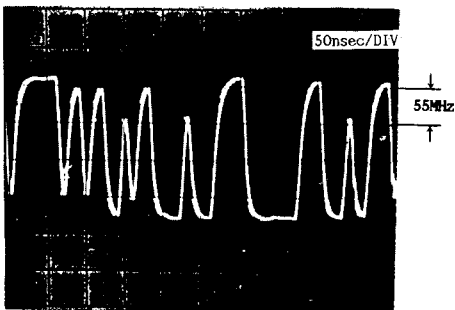


그림 13. 마이켈슨 간섭계의 출력(2차 이퀄라이저를 사용한 경우)

Fig. 13. Output of MI(with 2nd order equalizer).

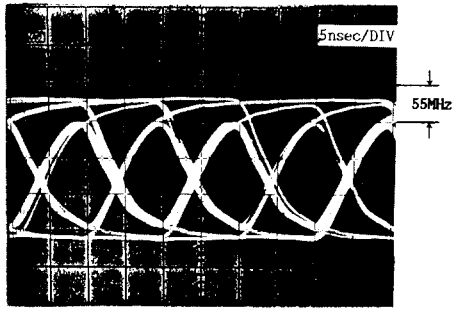


그림 16. 2차 이퀄라이저를 사용한 경우의 eye pattern

Fig. 16. Eye pattern with 2nd order equalizer.

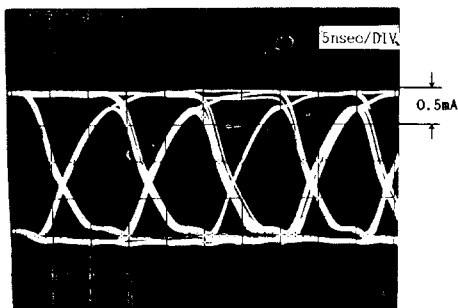


그림 14. 전송할 정보의 eye pattern.

Fig. 14. Eye pattern of input data.

라이저를 포함한 송신기의 출력을 eye pattern 으로 관측한 것이다. 그림에 나타난 eye pattern들은 전송 정보의 길이가 한정되어 있는 관계로 조금은 불완전하나 정보의 길이를 길게하면 좀 더 확실한 eye pattern을 얻을 수 있다. 그림 15의 이퀄라이저를 사용

하지 않은 경우는 최적의 검출 시간은 물론 “0”과 “1”의 데이터 준위의 설정도 어려울 정도로 eye pattern이 닫혀있다. 그림 16은 그림 14에 비해서 “0”과 “1”의 데이터 준위는 조금 넓어졌으나 최적의 검출 시간을 얻을 수 있어 전송된 정보를 재생하는 데는 문제가 없다.

V. 결 론

코히어런트/헤테로다인 광통신 방식을 위한 100M bit/s의 정보전송율을 가지는 광 FSK 송신기를 CSP형 반도체 레이저인 HLP1600을 사용하여 설계, 제작하였다.

LD-FM 회로모델에 의해 설계된 이퀄라이저(equalizer)를 제작하여 반도체 레이저 다이오드의 온도안정화를 위하여 제작한 항온기와 결합하여 광 FSK 송신기를 구성하고 시뮬레이션하였다. 제작된 광 FSK 송신기로부터 전송된 정보특성검출을 위하여 Michelson 간섭계를 제작하여 주파수 변별기로 사용하였다.

광 FSK 송신기에 100Mbit/s의 PRBS 길이가 7인 무작위 정보를 전송하고 Michelson 간섭계를 이용하여 재생시킨 후에 전송한 정보와 비교하였으며, 또한 전송되는 정보와 재생된 정보의 eye pattern을 발생시키는 실험을 하여 제작된 광 FSK 송신기의 성능을 평가하였다.

시뮬레이션과 실험을 통하여 본 논문에서 제시한 방법에 의하면 광 FSK 송신기의 특성이 최대 1Gbit/s의 정보전송율을 가지는 송신기의 설계 및 제작이 가능함을 엿볼 수 있었으며(그림 5), Michelson 간섭계를 이용한 광 FSK 송신기의 특성검출이 매우 적절함을 알 수 있었다.

參 考 文 獻

- [1] H. Tsuchida, T. Tack and M. Motoichi, "A novel technique for measuring the frequency deviation of semiconductor lasers under direct modulation," *Japanese J. Applied Physics*, vol. 22, no. 1, pp. 19-21, Jan, 1983
- [2] E. Eichen, P. Melman and W.H. Nelson, "Intrinsic lineshape and FM reponse of modulated semiconductor lasers," *Electronics Letters* vol. 21, no. 19, pp. 849-850, Sep., 1985.
- [3] T. Okoshi, "Heterodyne and coherent optical fiber communications: recent progress," *IEEE Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-30, no. 8, pp. 1138-1148, Aug., 1982.
- [4] R.A. Linke and A.H. Gnauck, "High-capacity coherent lightwave systems," *IEEE J. Lightwave Technology*, vol. 6, no. 11, pp. 1750-1769, Nov., 1988.
- [5] J.L. Gimlett, R.S. Vodhanel, M.M. Choy, A.F. Elrefair, N.K. Cheung and R.E. Wagner, "A 2-Gbit/s optical FSK heterodyne transmission experimental using a 1520-nm DFB laser transmitter," *IEEE J. Lightwave Technology*, vol. LT-5, no. 9, pp. 1315-1323, Sep., 1987.
- [6] R.S. Vodhanel, J.L. Gimlett, I. Curtis and N.K. Cheung, "1Gbit/s optical FSK heterodyne experiment over 100km of single-mode fibre," *Electronics Letters*, vol. 22, no. 16, pp. 829-830, Jul., 1986.
- [7] Y. Mamamoto and T. Kimura, "Coherent optical fiber transmission systems," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. QE-17, no. 6, pp. 919-1102, Jun. 1981.
- [8] L.G. Kazovsky, "Multichannel coherent optical communications systems," *IEEE J. Lightwave Technology*, vol. LT-5, no. 8, pp. 1095-1102, Aug., 1987.
- [9] S. Kobayashi, Y. Yamamoto, M. Ito and T. Kimura, "Direct Frequency modulation in AlGaAs Semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. QE-18, no. 4, pp. 582-595, Apr., 1982.
- [10] D. Welford and S.B. Alexander, "Magnitude and phase characteristics of frequency modulation in directly modulated GaAlAs semiconductor diode lasers," *IEEE J. Lightwave Technology*, vol. LT-3, no. 5, pp. 1092-1099, Oct., 1985.
- [11] S.B. Alexander, D. Welford and D.L. Marquis, "Passive equalization of semiconductor diode laser frequency modulation," *IEEE J. Lightwave Technology* vol. 7, no. 1, pp. 11-23, Jan., 1989.
- [12] 소준호, 박상영, 이규송, 임호근, 김성환, 홍완희, "LD-FM 회로모델을 이용한 광 FSK 송신기의 설계," 대한전자공학회 논문지, 27권, 4호, 4월, 1990.
- [13] 소준호, 송우영, 김성환, 홍완희, "반도체 레이저의 주파수변조특성에 대한 등가회로 모델," 대한전자공학회 논문지, 26권, 6호, pp. 102-113, 6월, 1989
- [14] 임호근, 박상영, 이규송, 김성환, 홍완희, "LD 주파수 안정화를 위한 디지털 온도 제어 시스템 설계," 대한전자공학회 광파 및 양자전자연구회 학술발표 논문집, 5월, 1990
- [15] 임호근, 박상영, 이규송, 김성환, 홍완희, "주기형 계수방식을 이용한 LD 항온기의 적응 온도제어," 대한전자공학회 회로 및 시스템 연구회 학술발표 논문집, 13권, 1호, pp. 71-74, 9월 1990,

 著 者 紹 介

朴 相 泳 (準會員) 第28卷 A編 第4號 參照
 현재 한국전자통신연구소 근
 무중

●

李 揆 松 (準會員) 第27卷 第10號 參照
 현재 국방과학연구소 근무중

●

金 昌 敏 (正會員) 第23卷 第4號 參照
 현재 서울시립대학교 전자공
 학과 조교수

金 光 錫 (正會員) 第28卷 A編 第4號 參照
 현재 서울시립대학교 석사과
 정

●

林 鎬 根 (準會員) 第27卷 第10號 參照
 현재 한국과학기술원 근무중

●

洪 玩 憲 (正會員) 第27卷 第10號 參照
 현재 서울시립대학교 전자공
 학과 교수
