

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.2.89>

IIBC 2017-2-14

25Gbps 광 신호 전송을 위한 광 듀오바이너리 송신기 특성에 관한 연구

A Study on Performance of Optical Duobinary Transmitters for 25Gbps Transmission

이동수*

Dong-Soo Lee*

요 약 본 논문은 마크-첸더 변조기를 사용하여 광 신호를 생성하는 광 듀오바이너리 송신기들의 전송 특성을 이론적으로 분석하였다. 특히 단일 모드 광섬유를 통하여 분산 보상 방법에 대한 고려 없이 1550nm 파장에서 25Gbps 광 듀오바이너리 신호를 전송하는 여러 가지 형태의 송신기들에 대한 성능을 평가하였다. 각 송신기의 특성에 따라 광 듀오바이너리 신호 생성 방법이 다르기 때문에 광 파워 스펙트럼과 광 신호의 눈 열림에 특징이 있었으며 이로 인하여 전송 거리에 따른 분산 내성도 차이를 보였다. 모의실험 결과와 송신기 구조의 복잡성 및 제한 조건을 고려하여 25Gbps 전송에 적합한 송신기를 확인 할 수 있었다.

Abstract This paper presents a theoretical study of transmission performance for optical duobinary transmitters employed a Mach-Zehnder modulator. Especially, we have investigated the performance of the various transmitters for transmitting 25Gbps optical duobinary signals at a wavelength of 1550nm without any dispersion compensation methods over single mode fiber. Due to the characteristics of generating their duobinary signals, each transmitter has a distinct optical power spectrum and an eye opening shape. By these, there was a difference in the dispersion tolerance. We could find a suitable transmitter for 25Gbps transmission considering the structure complexities and the restricted conditions with the simulation results.

Key Words : optical duobinary transmitter, Mach-Zehnder modulator, dispersion tolerance, optical power spectrum, eye diagram, BER

1. 서 론

인터넷 데이터 교통량의 폭발적 증가로 인하여 고속의 광통신 시스템이 크게 각광 받고 있다. 빠르고 신뢰할 수 있는 광 통신 기술의 발전과 광 통신이 타 통신 수단에 비해 가지고 있는 여러 장점들로 그 적용 영역을 점차

넓혀가고 있다. 특히 요즘에는 25Gbps 광 신호에 기반을 둔 고속 광통신 기술이 표준화되어 급속한 발전 양상을 보이고 있는데 그 이유는 25Gbps 광 신호가 100Gbps 이더넷(Ethernet)망에 포함된 100GBase-LR4와 100GBase-ER4등의 형태로 4채널 WDM(Wavelength Division Multiplexing)에 널리 사용되고 있기 때문이다

*정희원, 김포대학교 항공전기전자과
접수일자: 2017년 2월 8일, 수정완료: 2017년 3월 8일
게재확정일자: 2017년 4월 7일

Received: 8 February, 2017 / Revised: 8 March, 2017 /
Accepted: 7 April, 2017

*Corresponding Author: dslee@kimpo.ac.kr
Dept. of Aircraft Electric and Electronic Engineering, Kimpo University, Korea

[1]. 그러나 단일 모드 광섬유(SMF: Single Mode Fiber)를 통한 1550nm 파장의 25Gbps 광 신호의 전송은 GVD(Group Velocity Dispersion)에 의해서 심각한 신호 왜곡이 발생한다. 이러한 광 섬유내의 색분산(chromatic dispersion)은 신호가 광섬유를 진행해 갈 때 성능 저하를 초래하게 되고 결국 광 시스템의 전송 거리와 데이터 전송률에 커다란 제약을 가져온다. 그러므로 이를 극복할 수 있는 많은 분산 보상 방법이 제안되었다. 연구자들은 여러 가지 특별한 신호 변조 방식을 도입하여 극복하고자 하였는데^[2-3] 이를테면 RZ(return-to-zero), CSRZ(carrier suppressed return-to zero), DQPSK(differential quadrature phase shift keying)등이 그 것이다. 그 중 한 방법인 광 듀오바이너리 신호 변조가 대역폭 감소를 통하여 분산 효과를 크게 개선할 수 있음을 인지하게 되었고 현재는 증가하는 고속 시스템과 광범위한 회로망에서 상당히 중요한 전송 방식(format)으로 자리 매김하게 되었다. 이러한 광 듀오바이너리 신호를 구현하는 방법은 다양하다. 그 중 본 논문에서는 전통적으로 사용하는 저역 통과 대역 필터(LPF: Low Pass Filter)로 구현하는 방법(유형 1), 광 간섭계(optical interferometer)를 이용하여 구현하는 방법(유형 2) 그리고 광 필터(optical filter)로 구현하는 방법(유형 3)등 3가지의 다른 방법으로 광 듀오바이너리 신호를 구현하는 송신기의 특성을 비교하여 25Gbps 광 신호 전송 시 분산 내성이 가장 양호한 방법을 찾고자 하였다. 2장에서는 광 듀오바이너리 송신기에 대한 이론을 3장에서는 모의실험을 위한 전송 시스템을 구성하여 각 송신기의 광 파워 스펙트럼을 비교하였고 전송 성능에 미치는 영향을 광 아이 다이어그램(eye diagram)과 비트 오류율(BER: bit error rate)로 분석하였다. 마지막 4장에서는 결론을 기술하였다.

II. 광 듀오바이너리 송신기 이론

1980-90년대에는 광 신호 전송 시 직접 변조 방식을 사용하였다. 그러나 이러한 방식은 원하지 않는 chirp을 발생시켜 신호의 스펙트럼 퍼짐 현상(spectral broadening)이 일어나 심각한 분산이 초래되었다. 그 후로는 외부 변조기를 사용하여 이러한 chirp 현상을 크게 줄일 수 있었다. 이러한 외부 변조기중 electro-optic 변조기(EOM)는 가해진 전자장으로 밴드 갭 에너지를 변화

시키는 방식으로 매우 작은 구동 전압으로 고속의 변조가 가능하여 대단히 선호되고 있다. 본 논문에서는 EOM 중에서 데이터 변조를 광세기(optical intensity modulation)로 하는 마크-젠더 변조기(MZIM: Mach-Zehnder intensity modulator)를 사용한다. 유형 1의 송신기는 MZIM과 함께 DFB(Distributed Feedback) 레이저, 프리코더(precoder), 두 개의 저역 통과 대역 필터로 구성되는 데 저역 통과 대역 필터를 거친 3레벨 신호가 MZIM의 두 전극(arm)로 들어가고 이 두 신호는 서로 constructive 또는 destructive하게 결합 되어 크기와 위상이 변조된 출력을 내놓게 된다. 이러한 dual-arm MZIM의 출력 전자장 E_{out} 은 아래 식과 같다^[4].

$$E_{out} = \frac{E_o}{2} \exp\left(\frac{j\pi V_1(t)}{V_\pi}\right) + \frac{\gamma E_o}{2} \exp\left(\frac{j\pi V_2(t)}{V_\pi}\right) \quad (1)$$

E_o 는 입력 전기장, $V_1(t)$ 와 $V_2(t)$ 는 변조기 두 전극에 인가된 전기 신호이고 V_π 는 변조기의 스위칭 전압, γ 는 0과 1사이의 값을 갖는 scaling factor로서 소광비(extinction ratio) ϵ 과는 $\gamma = (\sqrt{\epsilon} - 1) / (\sqrt{\epsilon} + 1)$ 의 관계를 갖는다. dual-arm MZIM은 고속 데이터 전송을 위한 송신기에서 흔하게 사용하지만 저역 통과 대역 필터와 함께 전기 신호를 만들어 낸 후 듀오바이너리 신호를 생성할 때는 대칭성(symmetry)에 대한 엄격한 제약 조건이 있다. 유형 2의 MZIM과 광 간섭계를 사용하여 송신기를 구성할 경우 inverter, EX-OR gate와 1-bit delay feedback tap으로 구성된 인코더(encoder)를 사용하는 데 저역 통과 대역 필터로 구현하는 송신기에서 사용하는 프리코더와 동일한 구조로 볼 수 있다. 광 간섭계는 이러한 인코더를 사용해 만들어진 DPSK(differential binary phase shift keying)신호를 듀오바이너리 신호로 변환한다^[5].

마지막으로 광 필터를 이용해서 듀오바이너리 신호를 생성해 내는 송신기의 경우는 MZIM과 광 간섭계를 사용하는 유형 2의 송신기처럼 인코더로 DBPSK 신호를 생성한 후 작은 대역폭을 가진 광 필터(optical filter)를 통과시켜 듀오바이너리 신호로 변환한다. 이때 사용하는 광 필터의 특성은 아래 식과 같다^[6].

$$H(f) = \exp\left[-\frac{\ln 2}{2} \left(\frac{f}{f_{3dB}}\right)^{2k}\right] \quad (2)$$

f 는 주파수, f_{3dB} 는 광 필터의 3dB 대역폭, $k \cong 0.2393/\log(f_{3dB}/f_{1dB})$ 이다.

III. 모의실험 및 결과

광 듀오바이너리 신호의 전송 모의실험을 위하여 그림 1처럼 광 링크(optical link)를 구성하였다. 실험을 위한 전송 시스템은 전형적인 세부분 즉 송신기부분, 광 섬유부분, 수신기부분으로 구성된다.

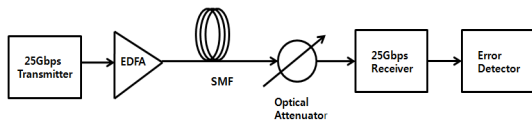
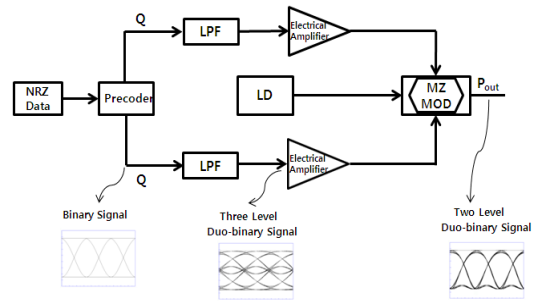


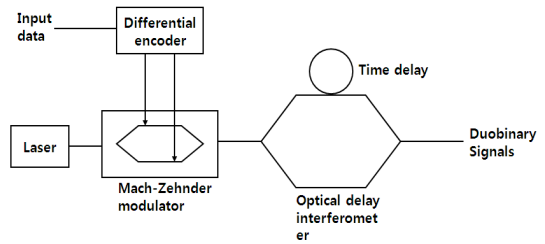
그림 1. 광 듀오바이너리 신호 전송을 위한 광 링크 구성도
 Fig. 1. A link configuration of the optical duobinary system

송신기 부분에서는 그림 2에서처럼 외부 변조기로 dual-arm MZIM에 기초한 LiNbO₃ 마크-젠더 변조기를 사용하여 25Gbps에서 변조하였다. 변조기의 전기 구동 신호는 raised cosine 형태로 1550nm 파장에서 2⁷ PRBS(pseudo-random bit sequence)를 생성하였다. 유형 1의 송신기에 사용한 저역 통과 대역 필터는 6.5GHz 대역폭을 가진 5차 베셀-투스 필터, 유형 2의 송신기는 시간 지연(time delay)이 1 비트인 광 간섭계를 사용하였다. 그리고 유형 3은 3dB 통과 대역폭이 0.115nm인 광 필터를 사용하여 구성하였다.

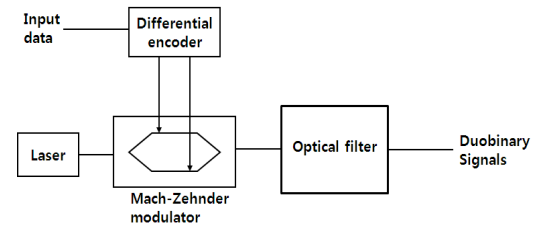
전송에 사용한 광섬유는 단일 모드 광섬유를 사용하였는데 감쇠 손실(attenuation loss)은 0.22dB/km, 색 분산 계수는 17ps/nm/km, 분산 기울기는 0.0593 ps/nm²/km, 유효 면적(effective area)은 78μm²로 설정하였고 Gain-flattened EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)를 사용하여 광섬유 입사 전력(launching power)을 조절하였다. 단일 모드 광섬유 내에서 펄스 전송은 Split-step Fourier method(SSFM)에 의해서 비선형 Schrödinger 방정식을 풀이 한 것을 모델로 하였다^[6]. 수신 부분의 전송 성능의 측정에는 18.7GHz 대역폭을 가진 4차 베셀투스 필터와 함께 p-i-n 수신기를 사용하여 10⁻⁹ BER에서 수신 감도(receiver sensitivity)를 측정 평가하였다. 색 분산의 비선형 현상은 배제하였다.



(a)



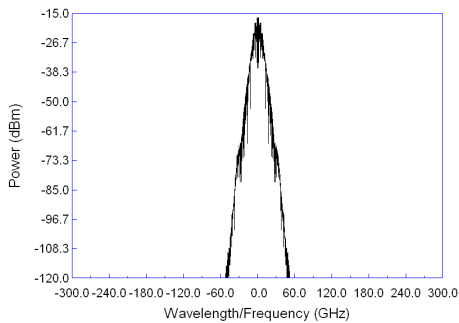
(b)



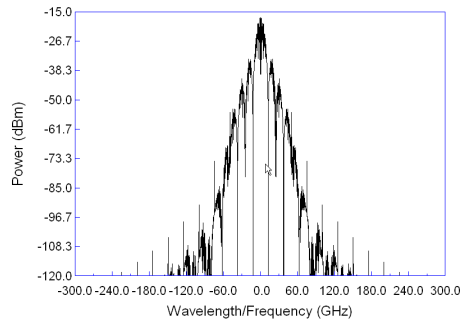
(c)

그림 2. 광 듀오바이너리 송신기(a)유형 1 (b)유형 2 (c)유형 3
 Fig. 2. Schematic diagrams of the optical duobinary transmitters(a)model 1 (b)model 2 (c)model 3

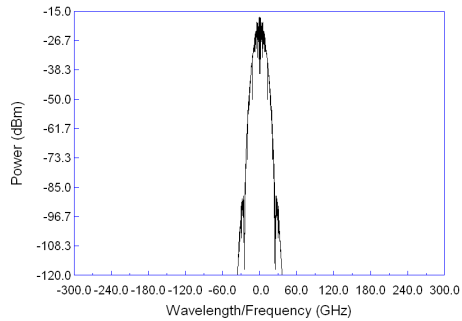
그림 3은 세 가지 광 듀오바이너리 송신기의 광 파워 스펙트럼을 나타낸다. 효율적 시스템 구축을 위해서는 좁은 스펙트럼 대역폭이 필수 요소임을 감안하면 주엽(main lobe)은 침묵하고 부엽(side lobe)이 상대적으로 작은 유형 1과 3이 광 간섭계를 사용하여 1-비트 지연 후 합산하는 방식의 유형 2 송신기보다 광 신호 전송 시 효율적임을 알 수 있다.



(a)



(b)

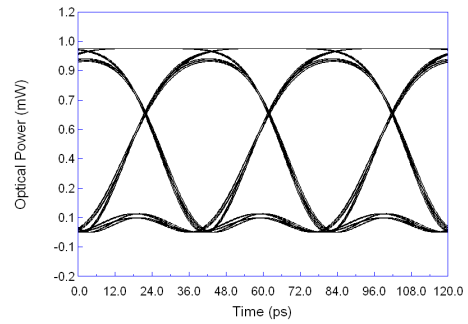


(c)

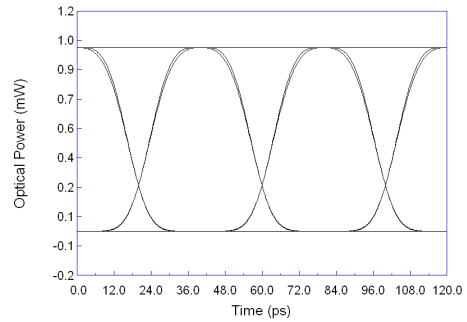
그림 3. back-to-back에서 각 송신기 모델에 따른 광 파워 스펙트럼 (a)유형 1 (b)유형 2 (c)유형 3

Fig. 3. Calculated optical power spectra at back-to-back (a)model 1 (b)model 2 (c)model 3

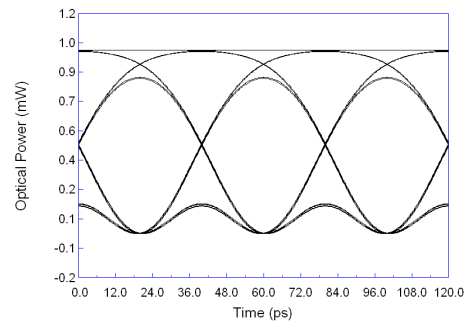
그림 4에서는 back-to-back에서 세 가지 형태의 광 듀오바이너리 송신기의 광 아이 다이어그램을 보여준다. 유형 1과 유형 3은 광 간섭계를 사용한 유형 2의 송신기에서는 관찰 되지 않는 0 레벨의 리플(ripple)이 나타나는데 이러한 리플은 신호 왜곡을 초래하여 분산 내성을 감소시키는 결과를 가져 온다^[7]. 반면에 유형 1과 3의 유형 2보다 상대적으로 긴 상승과 하강 시간(rising and falling time)은 좁은 스펙트럼 분포를 갖게 하여 분산 개선에 도움이 된다.



(a)



(b)



(c)

그림 4. back-to-back에서 각 송신기 유형에 따른 광 아이 다이어그램 (a)유형 1 (b)유형 2 (c)유형 3

Fig. 4. Calculated optical eye-diagrams at back-to-back (a)model 1 (b)model 2 (c)model 3

그림 5는 각 송신기 유형에 대하여 전송 거리에 따른 수신 감도를 나타낸다. 광 간섭계를 사용한 유형 2의 송신기의 경우 구성이 가장 간단한 NRZ(Non-return zero) 송신기의 전송 거리 및 수신감도와 별반 다르지 않았다. 유형 1과 3의 경우는 유형 1이 20km까지는 유형 3에 비하여 다소 양호한 수신 감도를 보였으나 그 후 전송거리가 증가할수록 유형 3이 유형 1보다 오히려 0.1dB정도 수신감도가 양호하였다.

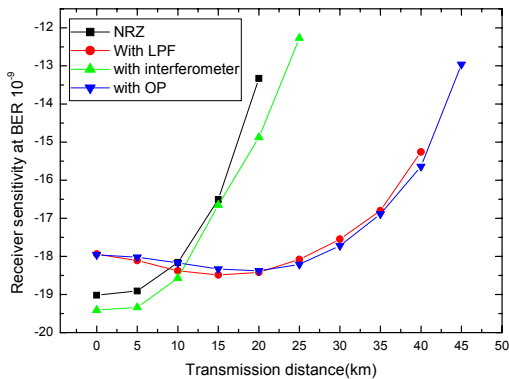


그림 5. 비트 오율 10^{-9} 에서 여러 송신기들의 전송 거리에 따른 수신 감도

Fig. 5. Receiver sensitivities as a function of a transmission distance with the various transmitters at the BER of 10^{-9}

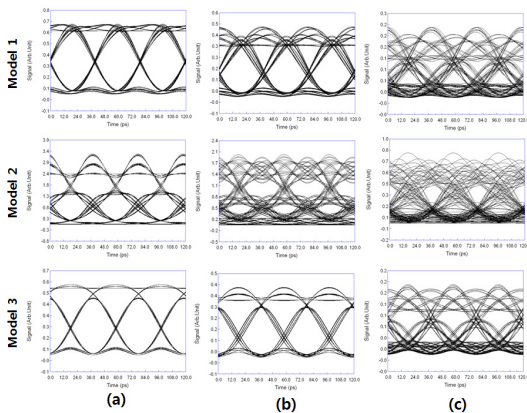


그림 6. 비트 오율 10^{-9} 에서 여러 송신기들의 전송 거리에 따른 광 아이 다이어그램 (a)15km (b)25km (c)45km
 Fig. 6. Calculated optical eye-diagrams as a function of a transmission distance with the various transmitters at the BER of 10^{-9} (a)15km (b)25km (c)45km

그림 6은 전송 거리에 따른 각 송신기의 광 아이 다이어그램의 변화를 나타낸다. 전송 거리가 20km 이내에서 유형 2의 경우는 눈 열림이 다른 두 송신기보다 확연히 작았다. 유형 3의 경우도 유형 1에 비해 눈 열림은 작았지만 분산 내성을 저해하는 0 레벨의 리플이 back-to-back의 경우에서보다 현저히 감소한 것을 볼 수 있다. 이러한 광 필터의 영향으로 전송 거리가 증가하면서 유형 1에 비해 상대적으로 눈 열림이 작았던 유형 3의 경우가 분산 보상 없이도 더 멀리까지 눈 열림이 지속 되

었다. 이것은 0 비트와 1 비트의 광 전력 차이에 의해서 정해지는 소광비(extinction ratio)가 순간(instantaneous) chirp의 크기를 결정할 수 있기 때문이다^[8]. 즉 작은 눈 열림이 상대적으로 과도한 순간 chirp의 크기를 줄일 수 있었기 때문에 유형 3의 경우 전송거리가 증가할 때 유형 1보다 분산 내성에 더 양호한 결과를 나타냈다. 45km 지점에서 유형 3의 경우는 BER 값이 측정된 반면 유형 1의 경우는 측정되지 않았다.

IV. 결론

마크-첸더 변조기를 사용하여 25Gbps 광 듀오바이너리 리 신호를 전송하는 여러 유형의 광 송신기를 분산 내성의 관점에서 성능 비교하였다. 저역 통과 대역 필터와 광 필터를 사용하여 구성된 송신기가 광 간섭계를 사용하여 광 듀오바이너리 신호를 생성하여 전송하는 송신기보다 분산 내성이 양호했다. 광 필터를 사용하는 송신기는 저역 통과 대역 필터를 사용하여 전송하는 송신기와 비교할 때 광 신호의 0 레벨 리플과 상승-하강 시간은 유사한 점이 있었으나 소광비로 인하여 전송 거리 측면에서 유리하였다. 게다가 분산 보상 방법 없이 전송하는 경우 저역 통과 대역 필터를 사용하는 송신기는 다른 송신기에 비해 장치의 복잡성이 크고 대칭성에 대한 제한 조건이 까다롭다는 점을 감안하면 단일 모드 광섬유를 통하여 25Gbps 신호를 전송하는 경우 광 필터의 좁은 대역폭을 최적화하여 구성된 광 듀오바이너리 송신기가 비교된 송신기 중에서 분산 내성 측면에서 가장 유리함이 확인되었다.

References

[1] Beomsoo Shin, Jichai Jeong, Jaehoon Lee, "25-Gb/s optical NRZ transmission over 40km of single-mode fiber at 1550nm without dispersion compensation," *Optical Fiber Technology* 20(2014) 461-466
 [2] P.J. Winzer, R.J. Essiambre, Advanced optical modulation formats, *Proc. IEEE* 94(2006) 952-985
 [3] G. Charlet Progress in optical modulation formats

- for high bit rate WDM transmissions, *IEEE J. Select. Top. Quant. Electr.* 12(2006) 469-483
- [4] Debabrata sikdar, Vinita Tiwari, V.K. Chaubey, "Optimized transmitter module for NRZ-duobinary in long-haul optical transmission link," *Optik* 124(2013) 2597-2601
- [5] J. Lee, K. Kim, D. Heo, J. Ko, J. Jeong, "Improved dispersion tolerance of an optical duobinary transmitter based on Mach-Zehnder modulator and an optical delay interferometer," *Optics Comm.* 282(2009) 2354-2357
- [6] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, Wiley, New York 2010.
- [7] J. Lee, H. Jang, Y. Kim, S. Choi, S. G. Park, J. Jeong, "Chromatic dispersion tolerance of new duobinary transmitters based on two intensity modulators without using electrical low-pass filters," *IEEE J. Lightwave Technol.* vol. 22 pp. 2264-2270, 2004
- [8] H. Yoo, J. Song, Y. Kim, J. Jeong, J. Lee, "Improved dispersion tolerance of Mach-Zehnder modulator by optimizing the modulator voltage and time delay," *Optics Comm.* 283(2010) 1316-1319

저자 소개

이 동 수(정회원)



- 1981년 고려대학교 전자공학사
- 1987년 Univ of Minnesota 공학석사
- 1999년 고려대학교 공학박사
- 2000년~현재 김포대학교 항공전기전자과 교수

<주관심분야 : wire-wireless communications, optical devices>