

논문 2010-6-17

# 광 간섭계를 이용한 광 듀오바이너리 송신기의 전송 성능 향상에 관한 조건 연구

## Requirements for Improvement in Transmission Performance for an Optical Delay Interferometer based Optical Duobinary Transmitters

이동수\*

Dong-Soo Lee

요 약 마크-젠더 변조기와 광 간섭계를 이용한 10Gb/s 광 듀오바이너리 송신기의 전송 성능을 고찰하였다. 전송 거리를 증가시키기 위해서 전송 시스템이 받는 영향을 변조기의 구동 전압비와 광 간섭계의 시간 지연 관점에서 컴퓨터 모의실험을 통하여 이론적 분석을 하였다. 구동 전압비를 줄이고 부분 비트 시간 지연을 최적화하여 보다 향상된 전송 성능을 확인하였다.

**Abstract** The transmission performance of 10Gb/s optical duobinary transmitters implemented by using a Mach-Zehnder(MZ) modulator and an optical delay interferometer is presented. We investigated the theoretical impact of transmission systems by the modulator driving voltage ratio(=driving voltage/switching voltage) and the optical interferometer time delay to improve transmission distance using computer simulation. By reducing the driving voltage ratio and optimizing the partial bit time delay, the transmission performance has been improved greatly.

**Key Words :** Optical duobinary transmitter, Driving voltage ratio, Bit time delay, Eye diagram, Bit error rate(BER)

### I. 서 론

광 듀오바이너리 변조 방식은 기존의 NRZ(Non-Return Zero) 변조 방식에 비해 색 분산(chromatic dispersion) 허용치가 높고 변조 시 좁은 대역폭을 차지하기 때문에 전송 용량 증대를 위해서 증폭 대역 내에 많은 광 신호를 밀집 시킬 필요가 있는 메트로(metro) 전송 시스템에서 상당히 매력적이다<sup>[1]</sup>. 기존의 광 듀오바이너리 신호의 발생은 전기적으로 발생된 세 개 레벨의 신호를 빠른 속도로 저 대역 필터(low-pass

filter)에 통과 시켜 두 레벨의 이진 전기 신호로 변환하고 이를 LiNbO<sub>3</sub> 마크-젠더 변조기(Mach-Zehnder modulator)에 입력하여 이진 광 듀오바이너리 신호를 발생시킨다. 이러한 방법으로 발생된 광 듀오바이너리 신호는 기존 NRZ 방식보다 색 분산 제한 전송 거리를 약 3배 정도 증가 시킬 수 있다. 그러나 이러한 전송 속도의 1/4 대역폭을 지닌 저 대역 필터의 사용은 필터 자체의 불완전한 결합으로 대부분의 경우 상당한 신호의 왜곡을 초래한다<sup>[2]</sup>. 최근에는 저 대역 필터를 사용하지 않고 마크-젠더 변조기에 의해 발생한 광 DPSK(Differential Phase Shift Keying) 신호를 광 간섭계(optical interferometer)내의 비트 지연-합산 연산을 이용하여 광 듀오바이너리 신호로 변환하는 연구가 진행 되었다<sup>[3,4]</sup>.

\*정회원, 김포대학 IT학부

접수일자 : 2010.9.12, 수정완료일자 : 2010.11.12

게재확정일자 2010.12.15

이러한 방법은 저 대역 필터가 필요하지 않아 필터와 구동기의 결합으로부터 자유로울 수 있다. 그러나 이처럼 다소 간단한 방법으로 광 듀오바이너리 신호를 발생 시킨다고 해서 이러한 방법이 색 분산 허용치까지 높여서 전송 거리를 증대 시켜 주는 것은 아니다. 통상 1550nm 대역에서 동작하는 10Gbit/s 광통신 시스템의 경우 표준 단일 모드 광섬유에 60km 이상 전송하면 처핑이 없는 외부 변조기를 사용하여도 광섬유의 색 분산에 의해 열화가 발생하여 전송 성능을 저하시키는 것으로 알려져 있다. 이러한 신호의 열화 발생 거리를 늦추기 위해 마크-젠더 변조기에 음의 처핑(negative chirping)을 인가한다든지 변조기의 구동 전압비(driving voltage ratios)를 줄여서 전송하는 방법을 사용하여 시스템 성능을 개선하려는 연구 또한 활발히 진행되고 있다<sup>[5,6,7]</sup>. 본 논문에서는 잔여 처핑(residual chirping)이 존재하지 않는 이상적인 마크-젠더 변조기를 고려하고 변조기의 구동 전압비와 광 간섭계의 시간 지연을 이용하여 광 신호를 전송하였을 때 색 분산 하에서 최대 전송이 가능하도록 광 송신기 성능을 최적화할 수 있는 조건을 제안한다.

## II. 광 간섭계를 이용한 듀오바이너리 송신기

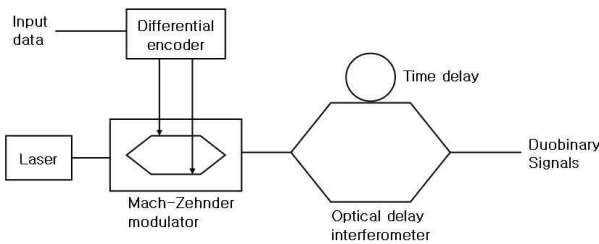


그림 1. 간섭계를 사용한 광 듀오바이너리 송신기  
Fig. 1. Optical duobinary transmitter based on an optical delay interferometer

그림 1은 광 간섭계를 이용한 10Gbit/s 광 듀오바이너리 송신기의 개략도로서 레이저 광원(laser source), 차등 인코더, 마크-젠더 변조기, 광 간섭계로 구성되었다. 인코더는 저 대역 필터를 사용하는 기존 듀오바이너리 송신기에서 사용하는 프리코더(precoder)와 동일한 역할로 마크-젠더 변조기의 구동을 위한 NRZ 데이터의 프리코드를 위해 사용된다. 마크-젠더 변조기는 인코더의 전기 신호에 따라 0과  $\pi$ 의 위상을 가진 일정한 광 전력을

지닌 광 DPSK 신호를 산출한다. 이러한 신호가 광 간섭계에 의하여 듀오바이너리 신호로 변환된다.

마크-젠더 변조기의 출력 전기장  $E_{out}$ 은 아래와 같은 식으로 표기된다<sup>[8]</sup>.

$$E_{out} = \frac{E_0}{2} \exp\left(\frac{j\pi V_1(t)}{V_\pi}\right) + \frac{E_0}{2} \exp\left(\frac{j\pi V_2(t)}{V_\pi}\right) \quad (1)$$

$E_0$ 는 레이저 광원의 전기장,  $V_1(t)$ 와  $V_2(t)$ 는 마크-젠더 변조기의 두 전극에 가해진 구동 전압이고  $V_\pi$ 는 변조기의 스위칭 전압이다. 구동 전압비는 구동 전압을 스위칭 전압으로 나눈 값으로 정의하였다. 두 전극 사이에 가해진 전압에 의한 인가 처핑  $\alpha$  (applied chirping)는 아래와 같은 식으로 표기될 수 있다.

$$\alpha = \frac{V_1(t) - V_2(t)}{V_1(t) + V_2(t)} \quad (2)$$

실험에 사용된 송신기는 1550nm 파장에서  $2^7$  PRBS(pseudorandom bit sequence)를 만들어 내고 마크-젠더 변조기에 가해진 전압은 구동 전압비로 표시되어 20%에서 100%까지 변화시켰다. 마크-젠더 변조기로부터 나온 신호는 광 간섭계에서 동일한 크기로 분기된다. 분기된 신호의 한 쪽 부분은 다른 쪽에 비해 1-비트 또는 그 이하 크기의 비트로 시간 지연된 뒤 커플러 내에서 합쳐지도록 하였다. 전송 링크를 구성하는 광섬유내의 색 분산 계수는  $D=17\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 이고 색 분산외의 비선형 현상은 배제하였다. 광섬유를 따라 전파한 신호는 비선형 Schrodinger 방정식으로 모델링 되었으며 Split-step Fourier 방법<sup>[9]</sup>으로 수치 해석하여 컴퓨터 모의실험을 하였다. 광섬유의 보상을 위해 사용한 EDFA(erbium doped fiber amplifier)의 이득은 30dB로 하였으며 잡음 지수(noise figure)는 40dB로 하였다. 수신기는 PIN과 4차 베셀-툼슨(Bessel-Thomson) 필터로 모델링된 전기 필터를 사용하였다. 전송 성능 평가 지표로서 비트 오류율(bit error ratio, BER)  $10^{-9}$ 에서 측정된 수신 감도를 전송 거리 함수로 표시하였다.

## III. 본 론

### 1. 최적화(Optimization)

전송 성능 향상을 위해 광 듀오바이너리 송신기내의 마크-첸더 변조기의 구동 전압비의 변화와 광 간섭계의 시간 지연을 통하여 전송 성능 최적화를 시도하였다. 첫째로 전송 성능을 증대시키기 위한 시간 지연 비트의 최적 값을 찾기 위해 구동 전압비 100%에서 전송 거리 0, 100, 150km에 대한 수신 감도를 살펴보았다. 그림 2는 각각의 시간 지연 비트에 대하여 전송 거리에 따른 수신 감도를 나타낸다. BTB(back-to-back)에서는 시간 지연 비트 값이 커짐에 따라 수신 감도가 개선되었으나 150km 까지 진행되면서는 0.6-비트에서 가장 양호한 수신감도를 나타냈다.

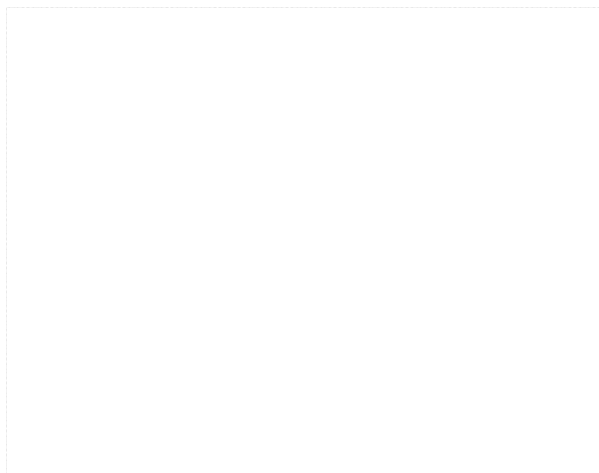


그림 2. 구동 전압비 100%일 때 시간 지연 비트에 따른 수신 감도

Fig. 2. Receiver sensitivities as a function of relative time delay bit for 100% driving voltage ratio.

둘째로 마크-첸더 변조기의 구동 전압비 중에서 전송 성능 향상을 위한 최적 값을 찾았다. 그림 3은 시간 지연 비트를 0.6-비트로 고정하고 구동 전압비의 함수로서 수신감도를 측정된 결과이다. BTB의 경우 구동 전압비가 줄어들수록 수신 감도가 양호해졌으나 이 때 구동 전압비에 따른 영향은 그다지 크지 않았다. 그러나 전송 거리가 커지면서 구동 전압비 감소가 수신 감도 개선에 영향을 주었다. 특히 구동 전압비 20-30%에서 가장 양호한 수신 감도를 보였으며 이러한 구동 전압비 범위에서 전송 거리 증가에 따른 수신 감도 저하는 150km에서 BTB 대비 0.1dB 정도 편차의 범위에 있었다. 최적 값은 전압 구동비의 감소가 클수록 더 큰 삽입 손실을 유도하므로 이를 고려하였다<sup>[7]</sup>.

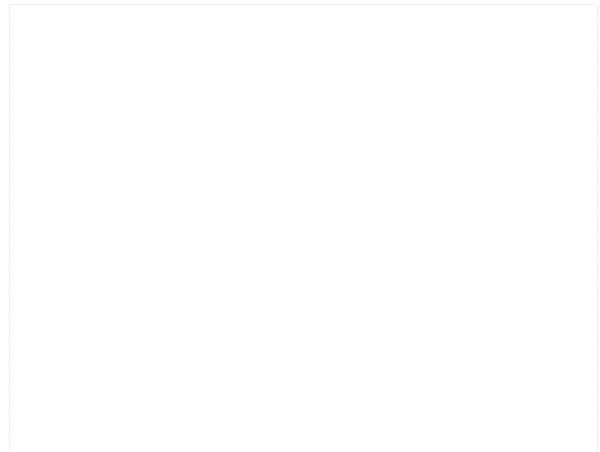


그림 3. 시간 지연 비트 0.6-비트일 때 구동 전압비에 따른 수신 감도

Fig. 3. Receiver sensitivities as a function of the driving voltage ratios for 0.6-bit time delay.

## 2. 아이 다이어그램(Eye-Diagrams)

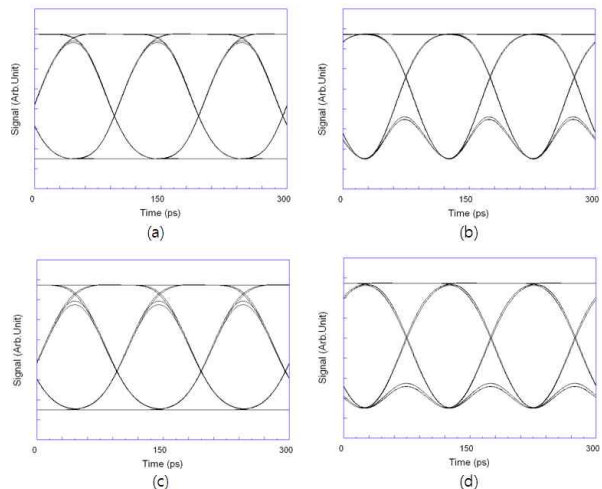


그림 4. BTB에서 구동 전압비와 시간 지연 비트에 따른 아이 다이어그램 (a)100%, 1-bit (b)100%, 0.6-bit (c)30%, 1-bit (d)30%, 0.6-bit

Fig. 4. Calculated optical eye diagrams of the duobinary transmitter for various MZ modulator driving voltage ratios and optical interferometer time delay bits at BTB (a)100%, 1-bit (b)100%, 0.6-bit (c)30%, 1-bit (d)30%, 0.6-bit

그림 4(a), (b)는 구동 전압비가 100% 일 때 그림 4(c), (d)는 구동 전압비가 30%일 때 아이 다이어그램이다. 한편 그림 4(a), (c)는 시간 지연 비트가 1-비트일 때 그림 4(b), (d)는 시간 지연 비트가 0.6-비트 일 때를 나타낸다. 그림에서 구동 전압비의 감소는 소광비(extinction ratio)

의 감소를 야기하여 이로 인해 시간 지연 1-비트에서는 “1” 레벨의 크기를 감소시키고 0.6-비트에서는 “0” 레벨 리플(ripple)의 크기를 작게 하였다. 또한 이 경우에는 상승과 강하 시간(rise and fall time)도 증가 시켰는데 이것은 광 신호의 스펙트럼 선폭을 감소시키는 결과를 초래하여 “0” 레벨의 리플 감소와 더불어 전송 성능 개선에 관여한다. 그림 4(d)의 경우에는 감소된 구동 전압비와 1-비트보다 작은 부분 시간 지연 비트의 영향이 동시에 적용되어 대칭에 가까운 눈 열림을 보여준다.

### 3. 전송 성능

그림 5는 전송 거리에 따른 수신 감도를 나타냈다. 구동 전압비 감소의 영향은 전송 거리가 증가함에 따라 전송 성능 향상에 다소 기여하였으나 전체적으로는 그림에서처럼 구동 전압비에 따른 영향보다는 시간 지연 비트의 영향이 더 크게 나타났다. 즉 전송 거리가 커질수록 시간 지연에 대한 성능 개선이 크게 나타났는데 시간 지연 0.6-비트의 경우 BTB에서 일정 시점까지는 시간 지연 1-비트 경우보다 수신 감도가 다소 좋지 않았으나 대략 60-80km 근처를 기점으로 반전되어 160km에서는 0km에 비해 부분 시간 지연 비트인 0.6-비트의 경우가 1-비트의 경우에 비해 약 5dB정도 큰 차이의 양호한 수신 감도를 나타냈다.

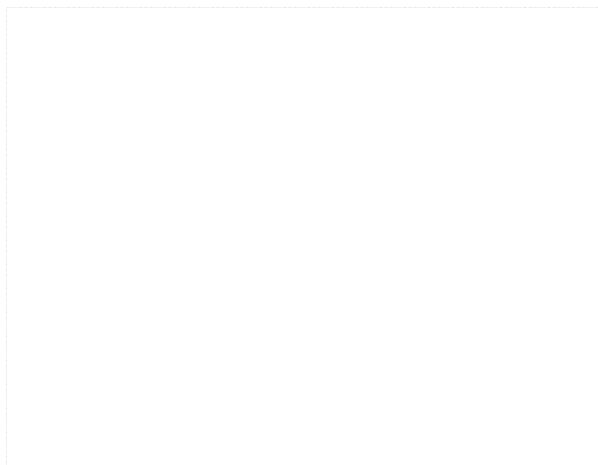


그림 5. 전송 거리에 따른 수신 감도  
Fig. 5. Receiver sensitivities as a function of a transmission length

이러한 현상은 거리 증가에 따른 아이 다이어그램을 통해서도 확인할 수 있다. 그림 6(a),(b),(c)는 구동 전압비 100%, 시간 지연 1-비트에 대한 아이 다이어그램이고

그림 6(d),(e),(f)는 구동 전압비 30%, 시간 지연 0.6-비트에 대한 아이 다이어그램이다. 구동 전압비 100%, 시간 지연 1-비트의 경우 0km에서는 눈 개방 상태가 양호한 것을 볼 수 있으나 80km을 지나 160km 지점에서는 심각한 왜곡이 발생한 것을 볼 수 있다. 그러나 구동 전압비 30%, 시간 지연 0.6-비트 경우는 거리 증가에 따른 급격한 눈 열림 왜곡은 나타나지 않았다.

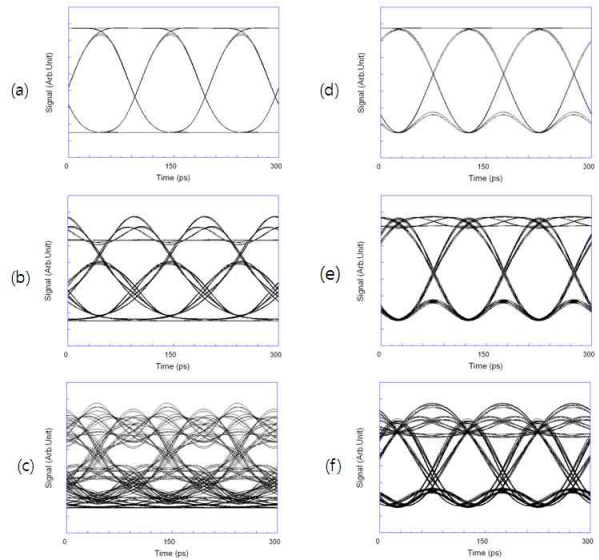


그림 6. 구동 전압비와 광 간섭계 시간 지연 비트에 대한 전송 거리에 따른 듀오바이너리 송신기의 아이 다이어그램. (a)100%, 1-비트, 0km (b)100%, 1-비트, 80km (c)100%, 1-비트, 160km (d)30%, 0.6-비트, 0km (e)30%, 0.6-비트, 80km (f)30%, 0.6-비트, 160km

Fig. 6. Calculated optical eye diagrams of the duobinary transmitter for various MZ modulator driving voltage ratios and optical interferometer time delay bit as a function of transmission length (a)100%, 1-bit, 0km (b)100%, 1-bit, 80km (c)100%, 1-bit, 160km (d)30%, 0.6-bit, 0km (e)30%, 0.6-bit, 80km (f)30%, 0.6-bit, 160km

## IV. 결론

광 간섭계를 이용한 광 듀오바이너리 송신기에서 색 분산으로 인한 전송 거리 제한을 개선하고자 하였다. 마크-젠더 변조기의 구동 전압비와 광 간섭계의 시간 지연을 최적화하여 최대 전송 거리를 위한 조건을 구하였다.

광 간섭계의 경우 1-비트보다 작은 부분 비트 지연 (partial bit delay)을 사용했을 때 전송 성능이 크게 개선 되었으며 구동 전압비의 감소와 함께 더 향상된 수신 감도를 나타냈다. 특히 구동 전압비 30%, 시간 지연 비트 0.6-비트에서 가장 개선된 전송 성능을 나타냈다.

### 참 고 문 헌

[1] T. Ono, Y. Yano, K. Fukuchi, T. Ito, H. Yamazaki, M. Yamaguchi, and K. Emura, "Characteristics of optical duobinary signals in terabit/s capacity, high-spectral efficiency WDM systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, pp. 788-796, 1998.

[2] A. Royset and D. R. Hjelm, "Symmetry requirements for 10-G/s optical duobinary transmitters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, pp.273-275. Feb.1998..

[3] X. Wei, X. Liu, S. Chandrasekhar, A.H. Gnauck, G. raybon, J. leuthold, P.J. Winzer, in: *proceedings of the ECOC*, Paper 9.6.3, 2002.

[4] Jaehoon Lee, Kyungsoo Kim, Duchang Heo, Jeongyun Ko, Jichai Jeong, "Improved dispersion tolerance of an optical duobinary transmitter based on a Mach-Zehnder modulator and an optical delay interferometer," *Optics Communications 282* (2009) pp. 2354-2357

[5] J. M. Gené, R. Nieves, A. Buxens, C. Peucheret, J. Prat, and P. Jeppesen, "Reduced Driving Voltage Optical Duobinary Transmitter and Its Impact on Transmission Performance Over Standard Single-Mode Fiber," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 843-845, 2002.

[6] Yu Chang Lu, Chia Chien Wei, Jason Chen, Kai Ming Feng, "Effects of filter bandwidth and driving voltage on optical duobinary transmission systems," *Optical Fiber*

*Technology* vol. 13, pp. 231-235, 2007

[7] Byungiik Kim, Jichai Jeong, " Improvement of dispersion tolerance for electrical-binary-signal-based duobinary transmitters," *OPTIC EXPRESS 5100*, vol. 13, No. 13, 2005

[8] Sung Kee Kim, Jaehoon Lee and Jichai Jeong, "Transmission Performance of 10Gbps Optical Duobinary Transmission Systems Considering Adjustable Chirp of Nonideal LiNbO<sub>3</sub> Mach-Zehnder Modulators Due to Applied Voltage Ratio and Filter Bandwidth," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, No. 4, pp. 465-470, 2001

[9] Agrawal, G. P. *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, New York, 1989

### 저자 소개

이 동 수 (정회원)



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

<주관심분야 : 유·무선 통신, 광소자 >

※ 이 논문은 2010학년도 김포대학 연구 지원비에 의하여 연구되었음.