

논문 2011-4-20

## 마크-젠더 변조기와 광 필터를 사용한 광 듀오바이너리 송신기의 분산 내성에 관한 연구

### Dispersion Tolerance for Optical Duobinary Transmitters based on a Mach-Zehnder Modulator and an Optical Filter

이동수\*

Dong-Soo Lee

**요 약** 마크-젠더 변조기와 광 필터를 사용하여 광 듀오바이너리 신호를 생성하는 광 듀오바이너리 송신기의 분산 내성을 이론적으로 분석하였다. 송신기의 전송 성능은 마크-젠더 변조기와 광 간섭계를 사용하고 구동 전압 조정으로 최적화하여 분산 내성을 향상 시킨 광 듀오바이너리 송신기와 비교하였다. 그 결과 광 필터를 사용한 광 듀오바이너리 송신기는 좁은 스펙트럼 대역폭을 유지하면서 광 간섭계를 사용한 광 듀오바이너리 송신기보다 개선된 수신 감도와 더 높은 분산 내성을 나타냈다.

**Abstract** We theoretically investigated dispersion tolerance of an optical duobinary transmitter employed a Mach-Zehnder modulator and an optical filter. Compared to the optical transmitter based on a Mach-Zehnder modulator and an optical delay interferometer by optimizing the applied voltage for improving the dispersion tolerance, the demonstrated duobinary transmitter provides improved receiver sensitivity and higher dispersion tolerance while maintaining narrow spectral bandwidth.

**Key Words :** Optical duobinary transmitters, Mach-Zehnder modulator, Optical filter, Optical interferometer, Dispersion tolerance

## 1. 서 론

광 듀오바이너리 변조 기법은 NRZ(nonreturn-to-zero) 변조 기법에 비해 색 분산에 대한 높은 내성과 좁은 스펙트럼 대역폭(spectral bandwidth)을 제공하기 때문에 DWDM(dense wavelength-division-multiplexed) 전송 시스템에서 대단히 각광을 받고 있다. 일반적으로 광 듀오바이너리 송신기는 전기적인 저 대역 필터(low-pass filter)를 사용하여 세 레벨 신호를 생성하고 이 신호로 마크-젠더 변조기를 구동하여 두 레벨을 가진 광 듀오바이너리 신호를 구현하였다. 그러나 이러한 방법을 사용한 광 듀오바이너리 송신기는 저 대역 필터 고유의 불완전

한 응답으로 인하여 신호 왜곡이 발생할 뿐만 아니라 변조기와 구동기(driver)에 대하여 신호에 대한 완전한 대칭적 조건을 요구한다<sup>[1]</sup>. 최근에 이러한 불리한 조건들을 극복할 수 있도록 마크-젠더 변조기와 광 간섭계를 이용하여 비트(bit) 지연과 합산(delay and add) 연산으로 광 듀오바이너리 신호를 생성하는 방법이 제안되었다<sup>[2][3]</sup>. 이 방법은 세 레벨 신호를 위한 전기적 저 대역 필터를 필요로 하지 않아서 필터의 불안정성을 피할 수 있을 뿐만 아니라 구현 방법도 간단하다. 그러나 저 대역 필터를 사용하는 기존의 광 듀오바이너리 송신기 구현 방식에 비해 전송 거리가 증가함에 따라 수신 감도가 저하되는 단점을 나타냈다. 이러한 구조적 결함 해결 모색과 더불어 분산 내성과 수신 감도를 개선하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있는데 그 중에서도 특히 마크-젠더 변조기의 비선형 함수 특성을 이용한 연구로서 마크-젠더 변

\*정희원, 김포대학 IT학부

접수일자 2011.2.20, 수정완료 2011.6.17

게재확정일자 2011.8.12

조기의 구동 전압을 감소시키면 소광비의 개선 효과가 있어서 결과적으로 분산 내성을 증대 시킨다는 결과가 발표되었다<sup>[4][5]</sup>. 본 논문에서는 이러한 연구들을 근거로 하여 마크-젠더 변조기와 좁은 대역폭을 지닌 광 필터를 사용하여 구성된 송신기를 제안하고 송신기의 수신 감도와 분산 내성을 측정하여 광 필터의 영향을 이론적으로 분석하였다. 제안한 송신기의 성능 파악을 위해서 마크-젠더 변조기에서 출력된 신호의 1-비트 지연과 합산을 이용하여 광 듀오바이너리 신호를 생성하는 광 간섭계를 사용하여 구성된 광 듀오바이너리 송신기<sup>[2]</sup>와 비교하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안한 송신기 시스템의 구성, 3장에서는 모의실험 결과, 4장에서는 결론을 기술하였다.

## II. 시스템 구성

### 1. 마크-젠더 변조기와 광 필터를 사용한 송신기

그림 1은 마크-젠더 변조기와 광 필터를 사용한 광 듀오바이너리 송신기의 개략도이다. 송신기는 1550nm로 동작되는 DFB(Distributed Feedback) 레이저, 차등 인코더, LiNbO<sub>3</sub> 마크-젠더 변조기와 좁은 대역폭을 가진 광 필터로 구성된다. 광 듀오바이너리 신호를 생성하기 위해서는 먼저 인코더의 전기 신호에 의하여 0 또는  $\pi$ 의 위상에 일정한 광 전력을 가진 광 DBPSK(Differential Binary Phase Shift Keying) 신호가 만들어진다. 인코더의 2<sup>7</sup> PRBS(pseudorandom bit sequence)로 구동되는 마크-젠더 변조기의 출력 전기장은 아래와 같은 식으로 표현 할 수 있다<sup>[6]</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 입력 전기 장(electric field),  $v_1(t)$ 와  $v_2(t)$ 는 인가 전기 신호이고 두 인가 신호 중 한 쪽은 바이어스 전압  $v_\pi$ 를 가진다. 이러한 DBPSK 신호는 3dB 대역폭이 0.046nm인 광 필터에 의해 광 듀오바이너리 신호로 변환되는데 이때 사용한 슈퍼 가우시안(super Gaussian) 형태의 광 필터 특성은 아래 식으로 표현된다<sup>[7]</sup>.

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

$f$ 는 주파수,  $f_{3dB}$ 는 광 필터의 3dB 대역폭이고  $m$ 은 가우스 인수(factor)이며  $m \cong 0.2393/\log(f_{3dB}/f_{1dB})$ 에서 계산 할 수 있다.

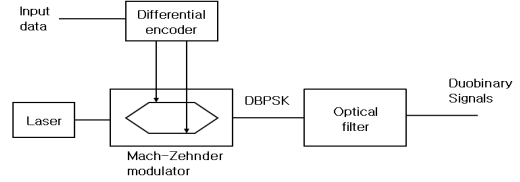


그림 1. 마크-젠더 변조기와 광 필터를 사용한 광 듀오바이너리 송신기의 개략도

Fig 1. Schematic diagram of the optical duobinary transmitter based on a Mach-Zehnder modulator and an optical filter

### 2. 전송 시스템

전송 링크의 구성은 SSMF(standard single-mode fiber)와 EDFA(erbium-doped fiber amplifier)를 사용하여 구성하였다. SSMF의 색 분산 계수는 17ps/nm/km이었고 색 분산외의 비선형 현상은 배제하였다. 광섬유를 따라 전파한 신호는 비선형 Schrödinger 방정식으로 모델링되었으며 느리게 변화하는 포락선(slowly varying pulse envelope)  $A(t)$ 는 다음 식으로 표현된다<sup>[7]</sup>.

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} - \frac{a}{2} A + i\gamma |A|^2 A \quad (3)$$

$\beta_1$ 은 군속도(group delay)의 역수,  $\beta_2$ 와  $\beta_3$ 는 첫 번째와 두 번째 군속도 분산(group velocity dispersion) 관련 상수,  $a$ 는 손실 상수(absorption coefficient),  $\gamma$ 는 비선형 상수(non-linearity coefficient)이고  $|A|^2$ 은 광 전력을 나타낸다. 식(3)과 같은 비선형 부분 차등 방정식(nonlinear partial differential equation)은 분석적 방법(analytic solution)으로는 일반적인 해를 구하기 어렵기 때문에 Split-step Fourier 방법(SSFM)으로 수치 해석하여 컴퓨터 모의실험을 하였다<sup>[7]</sup>. 광섬유의 보상을 위해 사용한 EDFA(erbium doped fiber amplifier)의 이득은 30dB로 하였으며 잡음 지수(noise figure)는 40dB로 하였다. 광 수신기의 경우 광 검출기(photodetector)로는 PIN을 선택하고 수신기의 주파수 반응 함수는 3dB 대역폭이 7.5GHz인 4차 베셀-طوم슨(Bessel-Thomson) 필터로 모델링된 전기 필터를 사용하였다. 전송 성능 평가 지표로서 비트 오류율(bit error ratio, BER) 10<sup>-9</sup>에서 측정된 수신 감도를 전송 거리 함수로 표시하였다.

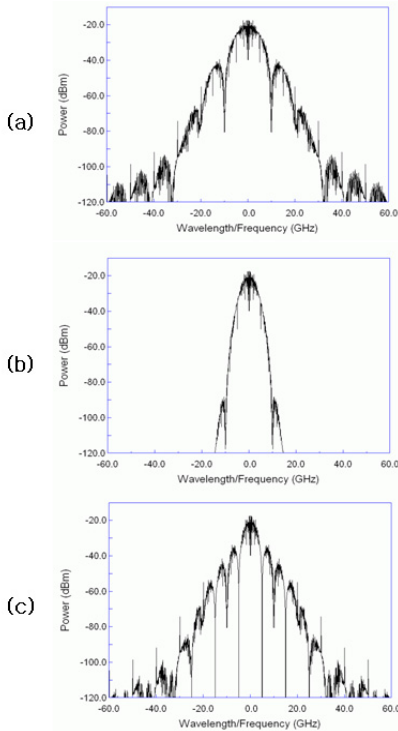


그림 2. 광 파워 스펙트럼 (a) 마크-젠더 변조기 출력 (b) 광 필터를 사용한 광 듀오바이너리 신호 (c) 광 간섭계를 사용한 광 듀오바이너리 신호

Fig. 2. Optical power spectra (a) output of the Mach-Zehnder modulator (b) duobinary signals using an optical filter (c) duobinary signals using an optical interferometer

### III. 모의실험 결과

#### 1. 광 파워 스펙트럼(optical power spectrum)

그림 2에서는 광 듀오바이너리 송신기에서의 광 파워 스펙트럼을 보여준다. 좁은 스펙트럼 대역폭은 효율적인 DWDM 시스템을 구축하기 위해서 광 듀오바이너리 신호에 요구되는 중요한 요소이다. 그림 2(a)는 마크-젠더 변조기의 출력인 DBPSK 신호의 광 파워 스펙트럼을 나타낸다. 그림 2(b)는 듀오바이너리 신호 생성을 위해 광 필터를 통과한 후의 광 파워 스펙트럼을 나타내는데 신호의 대역폭이 DBPSK 신호의 광 파워 스펙트럼에 비해 크게 감소하였다. 그림 2(c)는 광 간섭계를 사용하여 1-비트 지연 후 합산 하였을 경우<sup>[2]</sup> 광 파워스펙트럼을 나

타내는데 비트 지연의 영향으로 DBPSK 신호에 비해 주 로브(main lobe)가 첨예해지고 전체적으로 대역폭이 다소 감소한 것을 볼 수 있다. 광 스펙트럼에서 좁은 스펙트럼 폭이 DWDM 시스템의 효율을 판단하는 중요한 요소임을 감안하면 광 필터를 사용하는 송신기가 광 간섭계를 사용하는 송신기보다 효율적임을 알 수 있다.

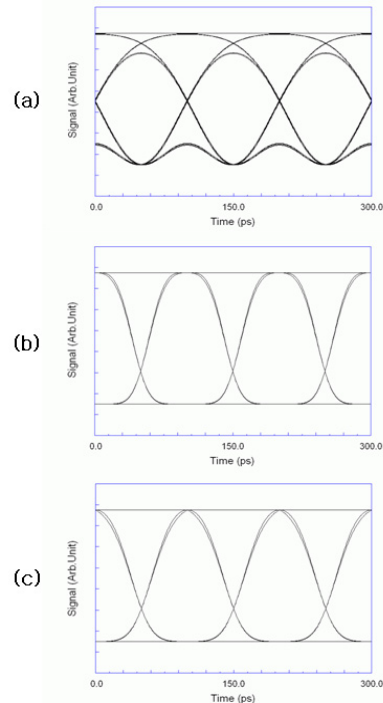


그림 3. back-to-back에서의 광 아이 다이어그램 (a) 광 필터 사용 (b) 광 간섭계 사용(구동 전압=100%) (c) 광 간섭계 사용(구동 전압=70%)

Fig. 3. Calculated eye-diagrams with back-to-back (a) using an optical filter (b) using an optical interferometer(driving voltage =100%) (c) using an optical interferometer (driving voltage=70%)

#### 2. 광 아이 다이어그램(optical eye diagram)

그림 3은 back-to-back 상태에서의 광 아이 다이어그램을 나타낸다. 그림 3(a)는 송신기에 광 필터를 사용했을 때, 그림 3(b)는 광 간섭계를 사용했을 때 그리고 그림 3(c)는 광 간섭계 사용과 마크-젠더 변조기의 구동 전압 감소를 동시에 적용했을 때의 광 아이 다이어그램을 나타낸다. 광 필터를 사용했을 때는 광 간섭계를 사용했을 때 관찰 되지 않았던 0 레벨의 리플(ripple)이 존재하는

것을 볼 수 있다. 이러한 리플이 분산 내성을 증대시키는 결과를 가져온다<sup>[8]</sup>. 특히 그림(c)의 경우는 마크-첸더 변조기를 구동하는 전압을 70%로 감소 시켰을 때의 모습인데 구동 전압 감소의 영향으로 광 듀오바이너리 신호의 상승과 하강 시간(rise and fall times)이 증대되었다. 이 현상은 광 신호의 광 스펙트럼의 대역폭을 감소시키고 이러한 대역폭 감소가 분산 내성을 개선한다.

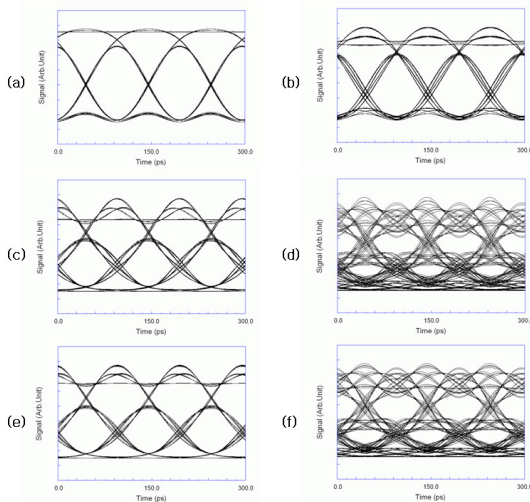


그림 4. 누적 분산 값 1360ps/nm와 2720ps/nm일 때의 광 아이 다이어그램 (a),(b): 광 필터 사용 (c),(d): 광 간섭계 사용(구동 전압=100%) (e),(f): 광 간섭계 사용 (구동 전압=70%)

Fig. 4. Eye-diagrams after an accumulated dispersion of 1360ps/nm and 2720ps/nm (a),(b): using an optical filter (c),(d): using an optical interferometer(driving voltage=100%) (e),(f): using an optical interferometer(driving voltage=70%)

그림 4는 누적 분산(accumulated dispersion) 값이 1360ps/nm 와 2720ps/nm(거리 80km와 160km)에서의 광 필터(그림(a),(b)), 광 간섭계(그림(c),(d)), 그리고 광 간섭계와 함께 마크-첸더 변조기 구동 전압을 감소 시켰을 때(그림(e),(f))의 광 아이 다이어그램을 보여준다. 광 간섭계를 사용했을 때는 그림 4(e), (f)처럼 광 간섭계 사용과 함께 구동 전압을 감소 시켰을 때가 그림 4(c), (d)처럼 광 간섭계만 사용하였을 때보다 눈 열림이 다소 양호하였다. 반면에 그림 4(a), (b)처럼 광 필터 사용 했을 때는 광 간섭계 사용 시와는 달리 광 아이 다이어그램의 눈이 확연히 열려 있었다. 이는 0 레벨에서 위상 차  $\pi$ 가 있는 리플들 사이의 상쇄적인 간섭(destructive

interference)에 기인한 것이다. 결과적으로 back-to-back 상태에서의 리플 생성이 신호 전송 시 분산 내성 개선에 큰 도움을 주었다.

### 3. 수신 감도(receiver sensitivity)

그림 5는 비트 오류  $10^{-9}$ 에서 광 필터와 광 간섭계를 송신기에 각각 사용 했을 때 수신감도를 나타낸다. 광 간섭계를 사용 하였을 때는 광 간섭계의 비트 지연과 함께 구동 전압을 감소 시켰을 경우 신호의 상승과 하강 시간의 증대에 기여한 스펙트럼 대역폭 감소가 광 듀오바이너리 신호의 전송 성능을 다소 개선하였다. 그러나 광 간섭계를 사용 했을 때와 광 필터를 사용 했을 때를 비교하면 누적 분산 1020ps/nm까지는 광 간섭계를 사용 했을 때가 광 필터를 사용 했을 때보다 수신 감도에서 약 0.5-1.4dB정도 양호하였으나 전송 거리가 증가할수록 광 필터를 사용 하였을 때가 광 간섭계를 사용 했을 때보다 양호한 수신 감도 보였다. 수신 감도의 차이는 누적 분산 1360ps/nm에서 약 0.7dB 정도의 양호함을 보였으나 2380ps/nm에서는 4dB이상의 차이를 나타냈다.

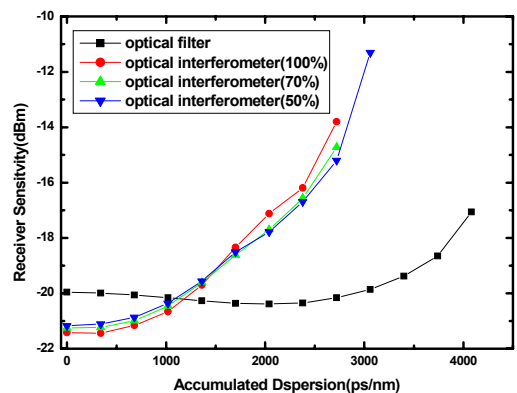


그림 5. 비트 오류  $10^{-9}$ 에서 광 필터와 광 간섭계를 사용한 듀오바이너리 송신기의 수신 감도 비교

Fig. 5. Comparison of receiver sensitivities of the duobinary transmitters using an optical filter and using an optical interferometer at the BER of  $10^{-9}$

## IV. 결론

마크-첸더 변조기와 광 필터를 사용한 광 듀오바이

너리 송신기를 제안하여 기존의 마크-젠더 변조기와 광 간섭계를 사용한 송신기보다 전송 특성이 양호함을 입증하였다. 특히 누적 분산 1020ps/nm이상에서 전송 성능이 앞서 나갔다. 광 필터를 사용하여 광 스펙트럼 대역폭을 감소시키고 0 레벨의 리플을 생성한 것이 광 간섭계의 지연 합산 사용과 함께 구동 전압을 감소시키는 방법보다 광 듀오바이너리 신호를 생성하여 전송할 때 수신 감도와 분산 내성 측면에서 더 효율적임을 보였다.

### 참 고 문 헌

- [1] A. Roysset and D. R. Hjelle, "Symmetry requirements for 10-Gbs/s optical duobinary transmitter," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, pp. 273-275, 1998
- [2] 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
- [3] 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, pp. 2354-2357, 2009
- [4] J.M. Gene, R. Nieves, A. Buxens, C. Peucheret, J. prat, P. Jeppesen, "Reduced driving voltage optical duobinary transmitter and its impact on transmission performance over standard single mode fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, No. 6, pp. 843-845, 2000
- [5] Yu Chang Lu, Chia Chien Wei, Jason Chen, Kai Ming Feng, Pao Chai Yeh, Tzu Yen Huang, Ching Cheng Chang, Cheng Tsao, Sien Chi, "Effects of filter bandwidth and driving voltage on optical duobinary transmission systems," *Optical Fiber Technology* vol. 13, pp. 231-235, 2007
- [6] S. K. Kim, J. Jeong, "Transmission performance on frequency response of receivers and chirping shape of transmitters of 10 Gb/s LiNbO<sub>3</sub> modulator based lightwave systems," *Opt. Commun.*, vol. 175, pp. 109-123, 2000
- [7] Agrawal, G. P. *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, New York, 1989
- [8] 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

### 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 2011학년도 김포대학 연구 지원비에 의하여 연구되었음