

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.3.43>

IIBC 2014-3-6

40Gbps에서 광 듀오바이너리 송신기의 전송 특성에 관한 연구

A Study on Transmission Performance for Optical Duobinary Transmitters at 40Gbps

이동수*

Dong-Soo Lee *

요 약 마크-젠더 변조기와 저역 통과 필터를 사용하여 광 듀오바이너리 신호를 생성하는 광 듀오바이너리 송신기의 전송 특성을 40Gbps에서 이론적으로 분석하였다. 광 듀오바이너리 시스템의 전송 성능은 송신기를 구성하는 저역 통과 필터와 광 필터 그리고 수신기내 필터의 대역폭에 따라 차이를 보였으며 각 필터들은 광 파워 스펙트럼에 각기 다른 영향을 주었다. 필터들의 최적화된 대역폭을 선택함으로써 광 듀오바이너리 신호 전송 시 부엽 발생과 리플을 억제시키고 분산 내성을 개선 할 수 있었다.

Abstract This paper presents a theoretical study of transmission performance for an optical duobinary transmitter employed a Mach-Zehnder modulator and a electrical low pass filter at 40Gbps optical communication links. It depends on the bandwidth of the low pass filter in the transmitter, the optical filter and the filter in the receiver. Also, each filter affected to the various parts of the optical power spectrum. By optimizing the bandwidth of each filter, we could control the side lobes and the ripples and improve the dispersion tolerance of the transmission system.

Key Words : Optical duobinary transmitter, Mach-Zehnder modulator, Electrical low pass filter, Optical band pass filter, Optical power spectrum, Dispersion tolerance, BER

1. 서 론

최근 급성장하는 통신 수요는 현재보다 더 증대된 용량과 효율적인 광 통신망을 요구하고 있다. 특히 광전송 시스템에서 파장 분할 다중 방식(WDM: Wavelength Division Multiplexing)이 상용화됨에 따라 이에 부응하기 위하여 시스템의 전송 용량을 위한 꾸준한 연구가 진행되고 있다. 용량 증대를 위해서는 하나의 광섬유를 통

해서 전송되는 광신호의 채널수를 증가 시키거나 단위 채널 당 광신호의 전송 속도를 증가시켜야 한다. 그러나 다중화해서 전송 할 수 있는 채널수는 광증폭기의 이득 대역폭에 의하여 제한되고 단위 채널의 전송 속도를 증가 시킬 경우 신호의 대역폭이 증가 되어 광증폭기의 제한된 대역폭 내에서 수용할 수 있는 채널의 수가 상대적으로 감소하게 된다. 이러한 한계를 극복하기위해서 광신호의 대역폭을 최소화하여 스펙트럼 효율을 증가 시키

*정회원, 김포대학 IT학부

접수일자 2014년 5월 7일, 수정완료 2014년 6월 5일

게재확정일자 2014년 6월 13일

Received: 7 May, 2014 / Revised: 5 June, 2014

Accepted: 13 June, 2014

*Corresponding Author: dslee@kimpo.ac.kr
School of IT, Kimpo University, Korea

는 방법이 활발히 연구되어지고 있는데 특히 최근에 대역폭을 최소화하여 다중화해서 채널수를 늘리는 방법으로 듀오바이너리(duobinary) 코딩 전송 기술이 각광을 받고 있다. 1960년대 Lender에 의해서 처음 제안된 이 코딩 방식은 현재 10Gbps 및 40Gbps 광전송에 적용될 뿐 아니라 널리 연구되고 있다.

광 듀오바이너리 코딩 기술의 가장 큰 특징 중에 하나는 적은 대역폭으로 인해 색 분산(chromatic dispersion)을 낮은 페널티로 하여 신호를 전달할 수 있다는 점이다. 특히 40Gbps 전송에서는 색 분산이 전송 거리를 제한하는 가장 큰 요인 중에 하나이므로 광 듀오바이너리 기법은 매력적인 기법이 아닐 수 없다. 일반적으로 이러한 광 듀오바이너리 신호를 생성하는 송신기 제작 방법 중의 하나는 마크-첸더 변조기와 작은 대역폭을 가진 저역 통과 필터 그리고 프리코더(precoder)를 사용하는 것인데 다른 방법에 비해 광 스펙트럼 효율이 양호하고 색 분산 내성도 높아 아직까지 널리 사용되고 있으나 필터의 불안정성 등으로 성능의 최적화를 이루기 위한 조건이 까다롭다.

이러한 점들을 극복하기 위하여 전송 성능 평가 및 필터의 영향 조사는 필수적이다. 물론 이와 함께 적절한 광 듀오바이너리 송신기를 제작하기 위해 여러 연구가 진행되고 있는데 필터의 의존성뿐만 아니라 변조기의 한정된 소광비(extinction ratio) 때문에 수반되는 잔류 처핑(residual chirp)과 변조기의 두 전극에 가해지는 전압비로 발생하는 적용 처핑(applied chirp)사이의 상호 작용에 대한 연구를 통한 송신기 성능 개선 실험이 진행되었으며 광 간섭계를 이용하여 성능 향상을 시도한 연구도 있다^[1-3]. 본 논문에서는 저역 통과 필터로 신호를 생성하는 방법을 선택하고 이 시스템의 전송 최적화를 위하여 송신기의 저역 통과 필터와 광섬유 통과 후 연결된 광 필터 및 수신기내의 필터가 전송 성능에 어떠한 영향을 미치는지를 구체적으로 알고자 하였다. 특히 40Gbps 전송 시스템에 대하여 이러한 연구를 진행함으로써 이를 통하여 40Gbps 전송 광 듀오바이너리 시스템에서 성능 개선을 위한 필터 간의 상호 관련성을 제시하고자 한다.

2장에서는 광 듀오바이너리 송신기와 모의실험을 위한 전송 시스템을 구성하였다. 3장에서는 송신기의 저역 통과 필터, 광 필터 그리고 수신기내의 필터가 전송 성능에 미치는 영향을 광 파워 스펙트럼으로 그리고 거리에 따른 전송 성능은 눈 열림 패턴(eye diagram)과 비트 오

류율(BER: bit error rate)의 결과로 특성을 분석하였다. 마지막 4장에는 결론을 기술하였다.

II. 광 듀오바이너리 시스템

1. 광 듀오바이너리 송신기

그림 1은 마크-첸더 변조기와 저역 통과 필터를 사용한 광 듀오바이너리 송신기의 개념도이다. 송신기는 1550nm로 동작되는 DFB(Distributed Feedback) 레이저, 프리코더(precoder), LiNbO₃ 마크-첸더 변조기와 두 개의 저역 통과 필터(LPF)로 구성된다. 프리코더를 통과한 2원(binary) 신호는 저역 통과 필터를 거치면서 3레벨 신호로 변환되며 이 신호는 외부 변조기를 사용하여 크기와 위상을 변조한 optical 3-state +1, 0, -1로 매핑(mapping)된다. 이 신호 중 +1과 -1은 크기가 같고 위상 차이가 180°이며 외부 변조기의 투과 특성이 1인 상태가 된다. 즉 변조기를 통해 얻어지는 광 듀오바이너리 신호는 위상이 부호화 된 것을 제외하면 일반적인 이진 신호와 같다. 이처럼 얻어진 신호는 3레벨 신호에 비해 수신 감도 열화가 작고 색 분산의 영향을 적게 받아 장거리 전송에 유리하다. 마크-첸더 변조기의 출력 전기장 E_0 은 아래와 같이 표현된다^[4].

$$E_0 = E_i \cos \frac{\pi(V_1 - V_2)}{2V_\pi} \exp[j \frac{\pi(V_1 + V_2)}{2V_\pi}] \quad (1)$$

E_i 는 입력 전기장이고, V_π 는 변조기의 스위칭 바이어스 전압이다. V_1 과 V_2 는 변조기 두 전극(arm) 각각에 가해지는 전압으로 $V_1 = -V_2$ 의 값을 가진다.

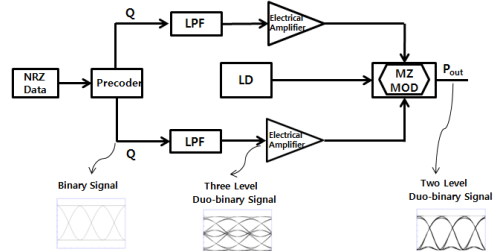


그림 1. 광 듀오바이너리 송신기
Fig. 1. Schematic diagram of the duobinary transmitter

2. 전송 시스템의 구성

광 듀오바이너리 신호 전송 모의실험을 위하여 그림 2 처럼 광 링크(optical link) 구성하였다. 광 신호는 1550nm 파장을 사용하였고 광섬유는 단일 모드 광섬유(SMF: single mode fiber)를 사용하여 20km이상까지 전송하였다. 외부 변조기는 마크-젠더 변조기를 사용하여 40Gbps에서 변조하였다. 광 듀오바이너리 송신기에서 사용한 저역 통과 필터로는 차단 주파수가 11.2(0.28B: B는 bit rate)GHz에서 16.8(0.48B)GHz인 4차 베셀-토슨(Bessel-Thomson) 필터를 사용하였다. 마크-젠더 변조기의 스위칭 전압은 일반적인 상용 변조기에서 사용하는 4V를 사용하였고 Gain-flattened EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)를 booster 증폭기로 사용하였다. 광 감쇠기는 SMF의 launch power를 조절하기위해 사용하였다. 전송 성능의 측정은 PIN 수신기를 사용하여 10^{-12} BER에서 수신 감도(receiver sensitivity)를 측정 평가하였다. 단일 모드 광섬유내의 펄스 전송은 split-step method에 의해서 비선형 Schrödinger 방정식을 풀이하였다^[5].

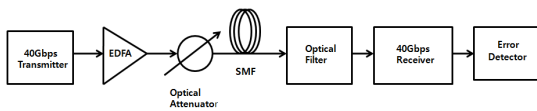


그림 2. 광 듀오바이너리 신호 전송을 위한 광 링크 구성도
 Fig. 2. A link configuration of duobinary systems

SMF의 색 분산 계수는 17ps/nm/km이고 분산 기울기(slope)는 0.0593 ps/nm²/km이었다. 색 분산의 비선형 현상은 배제하였고 각 필터의 영향을 관찰하기 위해서 광 파워 스펙트럼을 일정한 기준에 따라 관찰하였다. 각 필터의 대역폭은 적당한 값을 찾은 후 다른 필터의 값을 변화 시키가면서 최적의 값을 찾아 나갔다. 필터의 최적화를 이룬 후에는 수신 감도와 눈 열림 패턴으로 전송 시 분산 내성을 관찰하였다.

III. 모의실험 및 결과

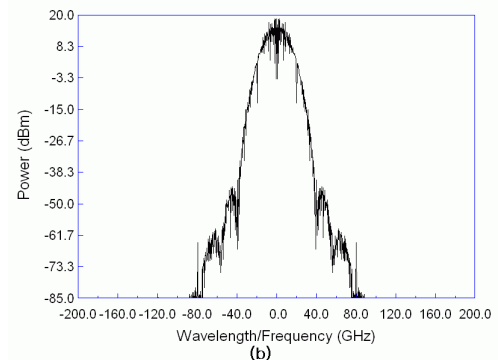
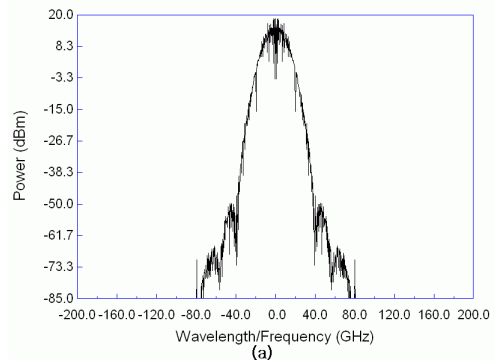
그림 3에서는 저역 통과 필터의 대역폭에 따른 송신기에서 출력된 광 파워 스펙트럼을 보여준다. 저역 통과 필터의 대역폭이 0.28B에서 0.42B사이 일 때 수신측의 광 필터와 정합(matched)을 위한 최적 조건이 된다는 이론

을 기반으로 모의실험 하였다^[6]. 최적화되었을 때 수신기 입력으로서의 듀오바이너리 펄스 형태는 아래와 같은 식으로 주어진다.

$$y(t) = \frac{\sin\left(\frac{\pi t}{T_b}\right)}{\frac{\pi t}{T_b}\left(1 - \frac{t}{T_b}\right)} \quad (2)$$

($T_b = 1/B$ 는 비트 주기(bit period))

좁은 스펙트럼 대역폭은 효율적인 광통신망을 구축하는 데 중요한 요소이다. 그림에서 보듯이 대역폭의 증대는 부엽(side-lobe)의 파워를 증가 시키고 16GHz(0.42B)까지 대역폭이 확장되면서 추가적인 부엽까지 생성되어 광 파워의 분산이 가중되었다. 이러한 현상은 수신측의 광 필터와의 정합에 불리하다.



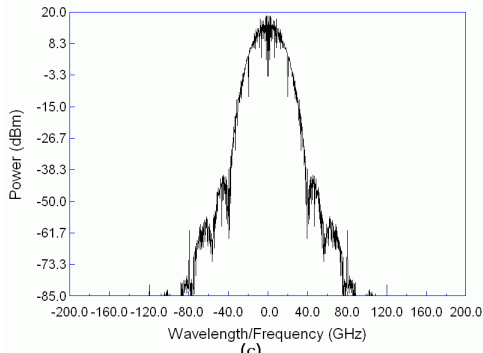


그림 3. 저역 통과 필터의 대역폭에 따른 마크 젠더 변조기의 출력 광 파워 스펙트럼 (a)12GHz (b)14.4GHz (c)16GHz

Fig. 3. Optical power spectra of the Mach-Zehnder modulator depending on the LPF bandwidth (a)1.2GHz (b)14.4GHz (c)16GHz

표 1은 전송 성능 최적화를 위해서 정합된 필터의 대역폭을 찾기 위해 여러 광 필터 통과 대역에 대하여 송신기의 저역 통과 필터 및 수신기내의 필터 대역폭을 변화 시켜 가면서 BER을 측정한 결과이다. 저역 통과 필터의 대역폭이 클수록 광 필터의 통과 대역이 좁은 경우가 BER 값이 양호하였다. 그러나 모든 경우 수신기내 필터의 대역폭이 28GHz일 때 가장 좋은 성능을 보여 이론적 결과와 일치하였다^[7]. 이 때 광 파워 스펙트럼을 살펴본 결과로는 수신기내 필터의 대역폭이 커질수록 광 스펙트럼의 리플(ripple) 발생도 다소 증가하는 현상을 보였다.

표 1. 광 송신기의 LPF 대역폭과 광 수신기내 필터 대역폭 변화에 따른 BER 값 (1)광 필터 통과 대역 0.3nm (2)0.2nm (3)0.4nm

Table 1. BER for variation in the bandwidth of the LPF of the transmitter and in the bandwidth of the electrical filter of the receiver with (1)passband of the optical filter 0.3nm (2)0.2nm (3)0.4nm

B-to B		BER						
OP 0.3		LPF(Receiver)						
LPF BW	GHz	7	9	14	21	28	35	
0.28B	11.2	closed	-9.81	-15.73	-17.03	-17.05	-16.8	
0.29B	11.6	closed	-9.92	-15.75	-17.04	-17.07	-16.85	
0.3B	12	closed	-10	-15.75	-17.05	-17.08	-16.85	
0.32B	12.8	closed	-8.65	-15.74	-17.04	-17.08	-16.87	
0.34B	13.6	closed	-10.12	-15.72	-17.01	-17.06	-16.84	
0.36B	14.4	closed	-10.12	-15.69	-16.98	-17.02	-16.8	
0.38B	15.2	closed	-10.14	-15.65	-16.95	-16.97	-16.77	
0.40B	16	closed	-10.15	-15.62	-16.91	-16.94	-16.72	
0.42B	16.8	closed	-10.15	-15.59	-16.88	-16.9	-16.69	

(a)

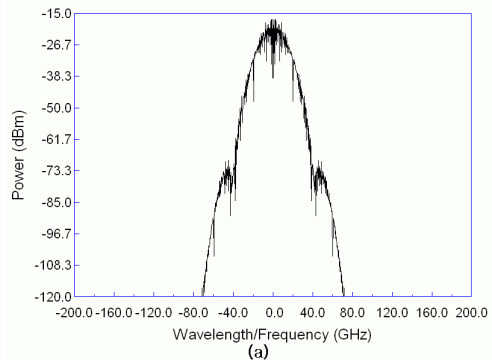
B-to B		BER						
OP 0.2		LPF(Receiver)						
LPF BW	GHz	7	9	14	21	28	35	
0.28B	11.2	closed	-7.53	-15.28	-16.67	-16.61	-16.35	
0.3B	12	closed	closed	-15.4	-16.78	-16.75	-16.5	
0.32B	12.8	closed	closed	-15.47	-16.84	-16.85	-16.6	
0.34B	13.6	closed	closed	-15.51	-16.87	-16.89	-16.66	
0.36B	14.4	closed	closed	-15.54	-16.89	-16.92	-16.71	
0.38B	15.2	closed	closed	-15.56	-16.9	-16.94	-16.73	
0.40B	16	closed	closed	-15.57	-16.92	-16.95	-16.74	
0.42B	16.8	closed	closed	-15.58	-16.93	-16.96	-16.75	

(b)

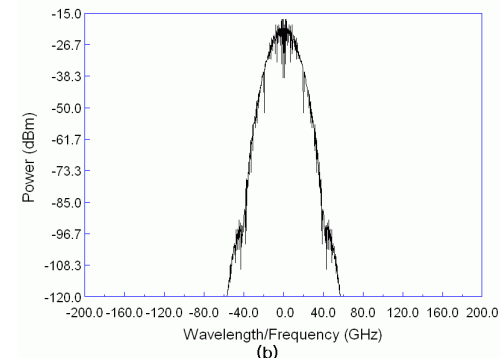
B-to B		BER						
OP 0.4		LPF(Receiver)						
LPF BW	GHz	7	9	14	21	28	35	
0.28B	11.2	closed	-10	-15.72	-17.01	-17.04	-16.82	
0.3B	12	closed	-8.77	-15.7	-16.98	-17.04	-16.83	
0.32B	12.8	closed	-7.35	-15.64	-16.94	-16.98	-16.77	
0.34B	13.6	closed	-7.55	-15.58	-16.86	-16.9	-16.69	
0.36B	14.4	closed	-7.74	-15.52	-16.8	-16.83	-16.62	
0.38B	15.2	closed	-9.2	-15.45	-16.73	-16.75	-16.54	
0.40B	16	closed	-9.22	-15.39	-16.66	-16.67	-16.47	
0.42B	16.8	closed	-9.24	-15.33	-16.6	-16.61	-16.4	

(c)

그림 4는 수신기내의 필터 대역폭을 28GHz로 고정 한 후 광 필터의 여러 3dB 통과 대역에서의 광 파워 스펙트럼을 보여준다. 통과 대역이 좁아지면 부엽의 크기도 작아지지만 동시에 광 파워의 크기도 감소되었다. 또한 송신기 측의 저역 통과 필터의 대역폭이 작을수록 주엽(main-lobe)이 중심부로 집중되고 부엽이 급속히 사라졌다. 정합된 광 필터가 부엽 제거에는 얼마나 효과적인가를 단적으로 보여준다.



(a)



(b)

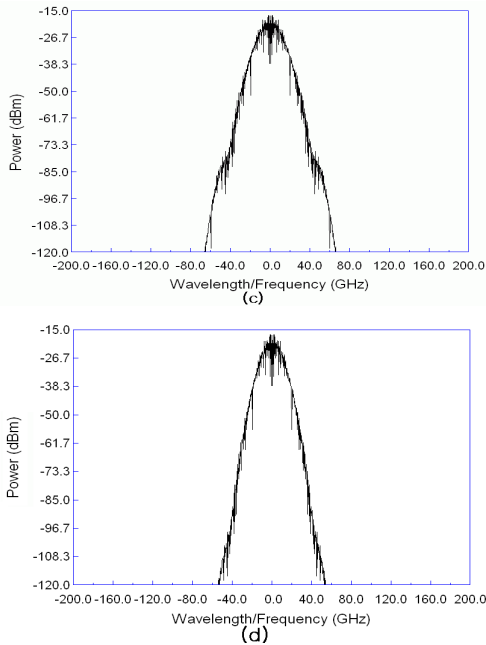


그림 4. 송신측의 LPF 와 광 필터의 3dB 통과 대역에 따른 B-to-B에서의 광 파워 스펙트럼(a)16GHz_0.3nm(b)16GHz_0.2nm (c)12GHz_0.3nm (d)12GHz_0.2nm

Fig. 4. Optical power spectra of the optical filter depending on the passband width at B-to-B (a)16GHz_0.3nm (b)16GHz_0.2nm (c)12GHz_0.3nm (d)12GHz_0.2nm

이 값은 송신기 지역 통과 필터 대역폭의 이론적 최적화 값과 거의 일치하였다. 예상대로 광 파워 스펙트럼의 결과에서도 그림 6과 같이 전송거리가 증가될수록 광 파워의 크기가 감소하고 주엽의 중심부에 리플이 증가되는 모습을 보여 전송 성능이 거리에 따라 크게 제한적이었다.

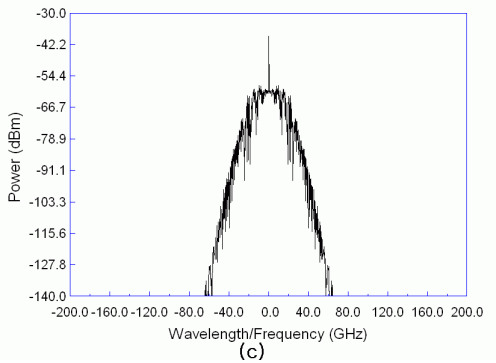
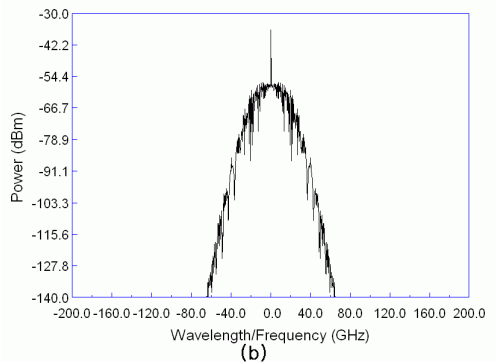
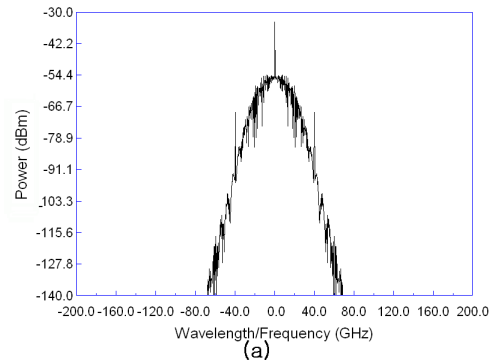


그림 5는 송신기의 지역 통과 필터 대역폭과 광 필터의 통과 대역이 최적화되었을 때 거리에 따른 수신 감도를 측정 한 결과이다. 5km까지는 송신기의 지역 통과 필터의 대역폭이 작고 광 필터의 통과 대역이 큰 경우가 유리하였으나 전송 거리가 증가함에 따라 지역 통과 필터 대역폭이 12GHz, 광 필터의 통과 대역이 0.3nm일 때 가장 양호한 결과를 보였다.

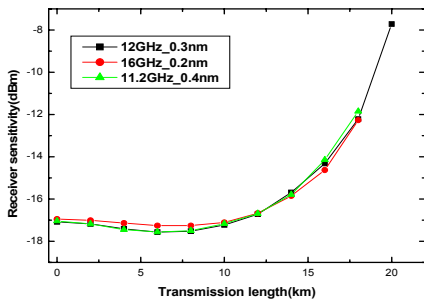


그림 5. 전송 거리에 따른 수신 감도
 Fig. 5. Receiver sensitivities as a function of a transmission length

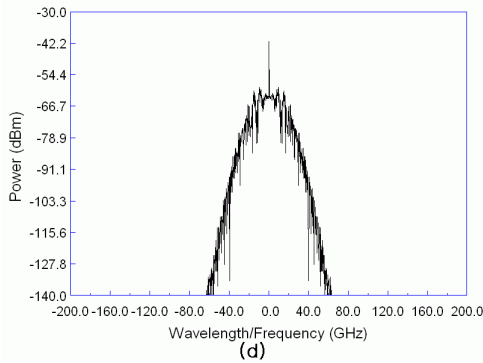


그림 6. 저역 통과 필터 대역폭 12GHz와 광 필터 통과 대역 0.3nm일때 전송 거리에 따른 수신측 광 파워 스펙트럼(a)B-to-B (b)6km (c)12km (d)18km

Fig. 6. Optical power spectra of the receiver with LPF bandwidth 12GHz and 0.3nm passband of the optical optical filter depending on transmission length at (a) B-to-B (b)6km (c)12km (d)18km

그림 7은 전송 거리에 따른 눈 열림 패턴을 보여준다. Back-to-back에서는 광 듀오바이너리 신호에서 볼 수 있는 전형적인 눈 열림 모습을 보이고 있다. 전송 거리가 약간 증가 될 때는 BER 향상으로 전송 성능이 다소 개선 되는 모습을 보였는데 이는 변조기의 고유 처핑(residual chirp)에 기인한 것으로 사료된다. 그러나 전송 거리가 더 증가 될수록 눈 열림이 작아져 20km 이후에는 결국 닫히게 되었다.

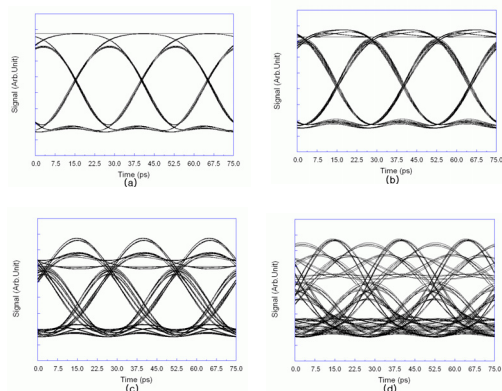


그림 7. 저역 통과 필터 12GHz와 광 필터 통과 대역 0.3nm 일 때 전송 거리에 따른 광 아이 다이어그램 (1)0km (2)6km (3)12km (4)18km

Fig. 7. Calculated optical eye diagrams of the duobinary system for LPF 12GHz and optical filter passband 0.3nm at (1)0km (2)6km (3)12km (4)18km

IV. 결 론

마크-젠더 변조기와 저역 통과 필터를 사용하여 40Gbps 광 듀오바이너리 신호를 전송하는 송신기와 수신측의 광 필터 및 PIN 수신기 구성된 시스템에서 전송 성능을 필터의 관점에서 살펴보았다. 그 결과 각 필터가 가진 특성을 고찰하여 적절한 필터의 값을 찾아내어 최적화함으로써 전송 특성이 개선됨을 입증하였다. 저역 통과 필터의 대역폭과 광 필터의 통과 대역을 정합시켜서 광 스펙트럼의 부엽 발생을 억제하고 이와 더불어 수신기내 필터 대역폭과 함께 최적화를 이루어 광 스펙트럼에서 리플을 줄이고 광 파워를 집중시킴으로써 전송 시 분산 내성 측면에서 개선된 성능을 나타냈다.

References

- [1] 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* 13(2007) 231-235
- [2] 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
- [3] Dong Soo Lee, "Requirements for Improvement in Transmission Performance for an Optical Delay Interferometer based Optical Duobinary transmitters," *Journal of IIBC*, vol.10, no 6 pp. 119-123, Dec. 2010.
- [4] Debabrata Sikdar, Vinita Tiwari, V.K. Chaubey, "Investigation of RZ and NRZ pulse shape for optimum Duobinary transmission at 40 Gbp," *Optik* 124 (2013) pp. 1148-1151
- [5] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communications*, Wiley, New York 2002.

- [6] Cheng-Chung Chien, Ilya Lyubomirsky, "Comparison of RZ Versus NRZ Pulse Shapes for Optical Duobinary Transmission," Journal of Lightwave Technology, vol. 25, no 10 pp. 2953-2958, Oct. 2007.
- [7] Ilya Lyubomirsky, Bharath Pitchumani, "Impact of Optical Filtering on Duobinary Transmission," IEEE Photonics Tech. Letters, vol. 16, no. 8, Aug. 2004.

저자 소개

이 동 수(정회원)



- 1981년 고려대학교 전자공학사
- 1987년 Univ of Minnesota 공학석사
- 1999년 고려대학교 공학박사
- 2000년~현재 김포대학 IT학부 교수
<주관심분야 : 유무선 통신, 광소자 >

※ 이 논문은 2014학년도 김포대학 연구 지원비에 의하여 연구되었음.