

전기적 시분할 다중 방식을 이용한 20 Gb/s 광 송·수신기의 제작 및 성능 평가

임상규[†] · 조현우 · 류갑열 · 이종현

한국전자통신연구원 광통신연구부

Ⓣ 대전광역시 유성구 가정동 161

(2002년 3월 14일 받음, 2002년 6월 10일 수정본 받음)

20 Gb/s 광 전송 시스템을 위한 광 송신기와 수신기를 전기적 시분할 다중 방식으로 제작하고 그 특성을 측정하였다. 특히 광 수신기의 핵심 회로인 클럭(19.906 GHz) 추출 회로의 구현을 위해 반파장 지연 선로와 상용화된 EX-OR 소자를 이용한 NRZ-PRZ 변환기와 유전체 공진기를 이용한 협대역 대역통과 필터 및 마이크로스트립 대역통과 필터를 설계, 제작하였으며, 최종적으로 수신부에서 1:2로 역다중화된 10 Gb/s 신호의 비트 오류(BER)를 측정하였다. 제작된 송·수신기를 직접 연동하였을 때, 수신기의 수신 감도는 BER 1×10^{-12} 에서 -26.2 dBm을 나타내었다.

주제어 : optical transmitter/receiver, clock extraction circuit.

I. 서 론

일반적으로 광통신 시스템에서 전송 용량을 증가시키는 방법에는 크게 서로 다른 여러 개의 파장을 갖는 신호들을 하나의 광섬유로 전송하는 파장 분할 다중 방식(WDM; Wavelength Division Multiplexing)과 단일 채널에 대해 신호의 전송 속도를 높여 주는 시분할 다중 방식(TDM; Time Division Multiplexing)이 있으며, TDM 방식은 다시 다중역다중을 광학적 방법으로 하는 광학적 시분할 다중 방식(OTDM; Optical Time Division Multiplexing)과 전자 소자를 이용하여 수행하는 전기적 시분할 다중 방식(ETDM; Electrical Time Division Multiplexing)으로 구분할 수 있다.

그러나 실제적으로 전송 용량의 증대는 앞서 서술한 개별 방법들의 이용 가능한 기술적인 한계와 가격적인 측면들이 함께 고려되어 TDM과 WDM 방식이 적절히 융합되어 이루어지고 있다.^[1-4] 따라서 현재 TDM 측면에서 채널 당 전송 속도를 40 Gb/s로 증가시키기 위한 노력과 함께 이를 기반으로 WDM 기술을 이용하여 테라급 전송 시스템을 구현하기 위한 시도들이 빠르게 진행되고 있다.^[5-8]

본 논문에서는 40 Gb/s 광 전송 시스템의 선행적 단계로서 단일 채널 20 Gb/s ETDM 광 송·수신기를 제작하였고, 그 특성을 측정하였다. 송·수신기는 시스템에 장착하여 연동이 가능하도록 각각 하나의 보드(340 mm×265 mm) 위에 구현되었다. 특히 수신부에서는 데이터 재생 및 역다중화를 위해 필수적인 클럭 추출 블록을 직접 설계, 제작하였고, 추출된 클럭(19.906 GHz) 신호를 이용하여 10 Gb/s로 역다중화된 신호의 아이 다이어그램 및 비트 오류를 측정하여 제작된 송·수신기의 성능을 평가하였다.

II. 20 Gb/s 광 송·수신기의 구성

단국형 20 Gb/s TDM 시스템은 크게 송신부, 링크부, 수신부로 나눌 수 있으며, 본 실험에서는 ETDM 방식을 이용하여 광 송신기와 수신기를 구성하였다.

그림 1에 20 Gb/s 광 송신기(20G OTX)를 포함한 송신부의 기능 구성도를 나타내었다. 송신부는 전기적 다중화기(multiplexer; MUX), 구동 증폭기, LiNbO₃ 간섭계형 외부 변조기 및 파장이 1554.94 nm인 DFB 레이저 다이오드 등으로 구성하였으며, 상용 장비인 2:1 MUX를 제외한 나머지 전자 및 광 소자를 하나의 보드(20G OTX) 위에 실장하였다.

MUX의 출력 신호인 20 Gb/s NRZ(nonreturn-to-zero) 전기 신호는 구동 증폭기를 통해 5 V_{pp}으로 증폭되어 외부 변조기를 구동한다. 구동 증폭기와 변조기 입력 경로에는 바이어스 회로를 삽입하여 변조기의 DC 동작점을 조절할 수 있도록 하였고, 레이저 다이오드의 온도에 따른 특성 변화를 제어하기 위한 온도 제어 회로를 마이크로 프로세서를 이용하여 구현하였다. 그림 2는 이와 같이 구성된 송신기 보드의 실제 형상을 나타낸 것이다.

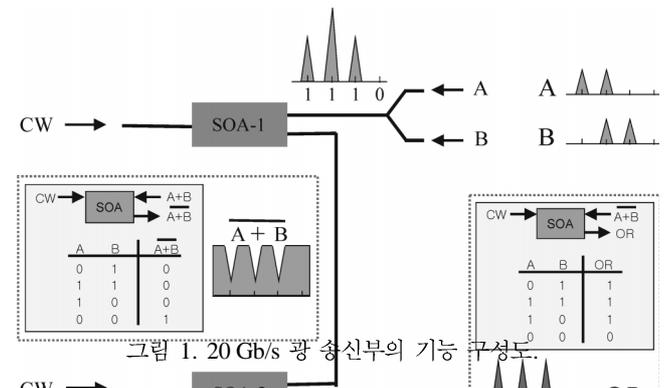


그림 1. 20 Gb/s 광 송신부의 기능 구성도.

[†]E-mail: sklim@etri.re.kr

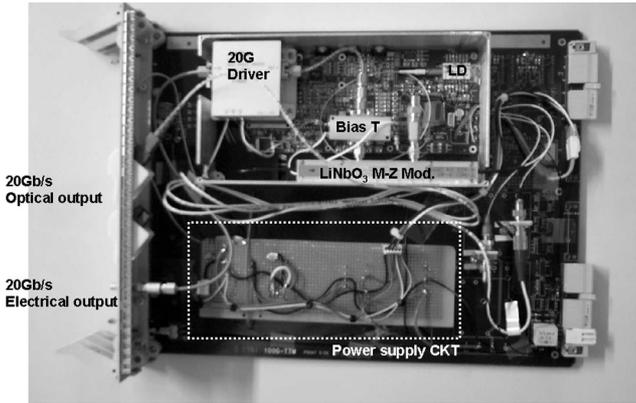


그림 2. 제작된 20 Gb/s 광 송신기 (20G OTX).

수신부는 20 Gb/s 광 신호를 전기 신호로 변환하고 증폭하는 부분과 역다중화 및 데이터 재생시 필요한 클럭(19.906 GHz) 신호를 추출하는 부분, 그리고 1:2 전기적 역다중화기 (demultiplexer; DEMUX)로 구성하였으며, 그림 3에 20 Gb/s 광 수신기(20G ORX)를 포함한 수신부의 기능 구성을 나타내었다.

수신부에 입력되는 20 Gb/s NRZ 광 신호는 광/전 변환기 (DC Responsivity=0.65A/W@1550 nm), 광대역(100 kHz~20 GHz) 증폭기를 거쳐 20 Gb/s NRZ 전기 신호로 변환된 후 전력 분배기를 통해 하나는 20 Gb/s 데이터 자체의 재생에 쓰이게 되고, 나머지 하나는 클럭 추출부에 입력된다. 특히 광/전 변환기는 3 dB 광학적 대역폭이 20 GHz 이상이고 변환이득이 1550 nm에서 32.5 V/W인 PIN 형태의 변환기를 사용하였다.

한편, 본 실험에서는 DEMUX가 입력 데이터의 판별 기능을 포함하고 있어 추가적인 판별 회로는 구현하지 않았으며, DEMUX의 입력 전에 입력 데이터(20 Gb/s)의 수신 감도와 논리 레벨을 조절하기 위한 광대역 증폭기와 바이어스 회로를 삽입하였다. 클럭 추출 회로는 클럭 성분이 없는 NRZ 신호를 클럭 성분이 내재된 의사 RZ 신호(pseudo return-to-zero; PRZ)로 변환시키는 NRZ-PRZ 변환기, 클럭 성분을 추출하기 위한 유전체 공진기(dielectric resonator; DR) 필터와 마이크로스트립 대역 통과 필터 및 추출된 클럭 신호를 증폭하기 위

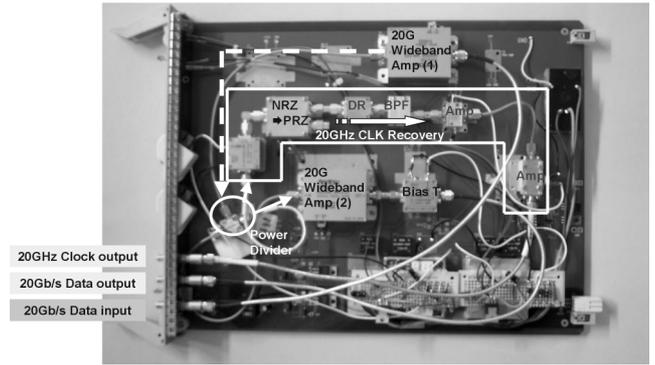


그림 4. 제작된 20 Gb/s 광 수신기 (20G ORX).

한 협대역 증폭기로 구성하였다. 그림 4는 수신기의 실제 형상을 나타낸 것이다.

III. 20 Gb/s 광 송신기 및 수신기 실험결과

3.1. 20 Gb/s NRZ 광 신호의 생성

10 Gb/s 펄스 패턴 발생기(pulse pattern generator; PPG)로부터 출력된 두 채널의 10 Gb/s NRZ 전기 신호(PRBS, 2⁷-1)는 2:1 MUX를 통해 20 Gb/s 전기 신호로 다중화되며, 이때 PPG는 2:1 다중화에 필요한 10 Gb/s 데이터와 클럭을 MUX에 제공한다. 20 Gb/s 광 송신기는 MUX 출력을 이용하여 20 Gb/s NRZ 광 신호를 생성하게 되는데, 이 때 송신기의 출력 광신호를 샘플링 오실로스코프로 관찰하면서 아이 열림(eye opening)이 양호하고, 소광비(extinction ratio)가 최대가 되도록 변조기의 동작점을 조절하였다. 그림 5에 20 Gb/s 광 송신기의 입·출력 신호인 20 Gb/s NRZ 전기 신호(그림 5(a) 참조)와 광 신호(그림 5(b) 참조)의 아이 다이어그램을 나타내었다. 광 신호의 최종 출력은 2.86 dBm, 소광비는 11 dB 이고, 아이가 모두 잘 열려 있음을 확인하였다.

3.2. 클럭 신호의 추출

광선로를 통해 전송되어 온 데이터는 수신부에서 광/전 변환 후 판별 및 재생되어 하위 계층의 신호로 역다중화되는 과정을 거쳐지게 되는데, 이 때 양질의 데이터를 재생하기 위해서

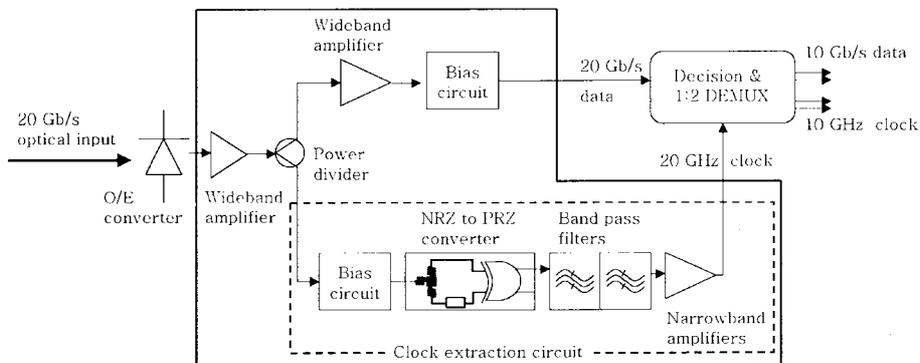


그림 3. 20 Gb/s 광 수신부의 기능 구성도.

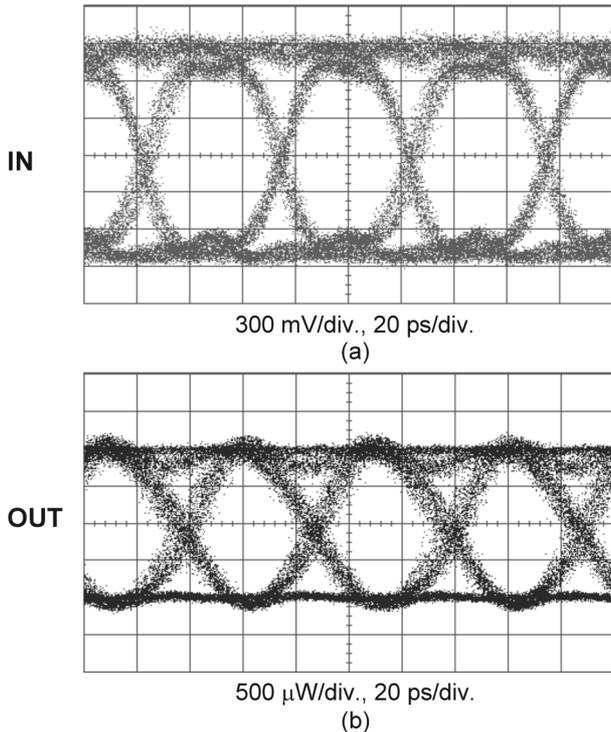


그림 5. (a) 송신기 입력 전기 신호의 아이 다이어그램.
(b) 송신기 출력 광 신호의 아이 다이어그램.

는 입력되는 데이터와 동기가 잘 맞은 클럭 신호가 필수적이며, 이를 위한 클럭 추출은 수신부의 주요 기능 중 하나이다.

한편, 전송되어진 NRZ 데이터에는 클럭 주파수 성분이 내재되어 있지 않기 때문에 우선 클럭 성분이 포함된 신호로의 변환이 필요하며, 통상 전력 소모가 큰 단점이 있는 반면 상용화된 집적소자를 이용하여 구현이 용이하다는 장점 때문에 EX-OR 소자를 이용한다.^[9,10]

변환 후 신호는 클럭 성분만을 추출하기 위해 주파수 영역에서 필터를 거치게 되는데, 필터의 구현 방법에 따라 크게 PLL(phase-locked loop)을 이용한 능동형 방식과 수동 필터 회로를 이용한 방식으로 나눌 수 있다. PLL을 이용한 능동형 방식은 지터 특성이 우수한 고품질의 클럭을 얻을 수 있고 이용 가능한 집적회로 소자를 통해 소형화 할 수 있다는 장점이 있으나, 초고주파 대역에서는 제작하는데 많은 어려움이 있다.^[11] 한편 수동형 방식에서는 주파수 영역에 따라 구현 가능한 소자들이 달라지므로 다시 저주파 대역과 고주파 대역으로 나누어진다. 저주파 대역에서는 R, L, C를 이용한 탱크 회로나 SAW 필터 등이 사용되고 있으며, 초고주파 대역에서는 디스크형의 고주파 특성이 우수한 유전체 DR을 이용하여 저손실의 높은 Q 값을 지닌 필터를 구현하고 있다.^[12-14]

본 실험의 클럭 추출 회로는 반파장 지연 선로와 NEL사의 EX-OR(NLG 4003) 소자를 이용한 NRZ-PRZ 변환기, 협대역 DR 대역통과 필터, 광대역 대역통과 필터 및 협대역 증폭기로 구성하였으며, 그림 6에 제작된 NRZ-PRZ 변환기의 입·출력 주파수 특성을 나타내었다. 그림 6(a)는 광 수신기의 NRZ-PRZ 변환기에 입력되는 20 Gb/s NRZ 전기신호의 주파

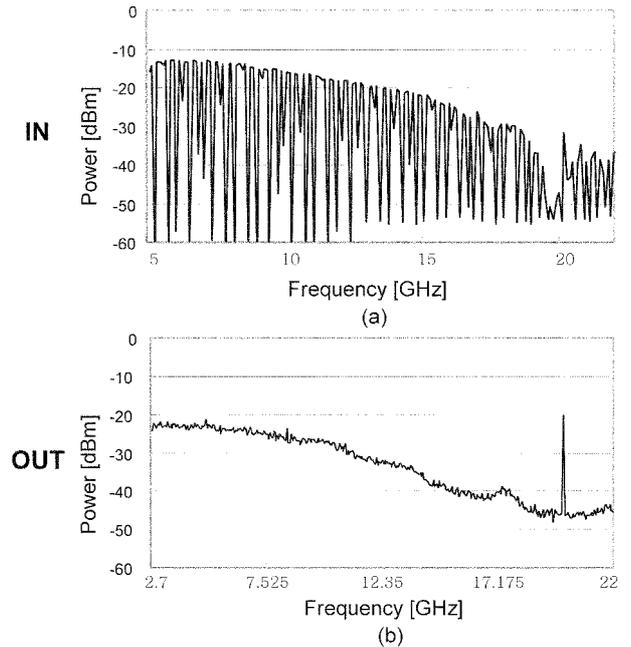


그림 6. (a) NRZ-PRZ 변환기에 입력되는 20 Gb/s NRZ 신호의 주파수 특성.
(b) NRZ-PRZ 변환기 출력 신호의 주파수 특성.

표 1. Coupled-line 대역통과 필터의 설계 사양

Center Frequency	20 GHz
Fractional Bandwidth	0.025
Number of Coupled-line Sections	3 sections
Ripple Value	0.5 dB
Filter Response	Chebyshev
Characteristic Impedance Z_0	50 ohm

수 스펙트럼을 나타낸 것이고, 그림 6(b)는 변환기에서 출력된 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다. 이로부터 변환 후의 신호가 클럭 주파수 성분을 함유하고 있음을 알 수 있다.

협대역 대역통과 필터는 유전율이 30인 Trans-Tech사의 디스크형 DR을 이용하였고, 공진기는 Rogers사의 RT/duroid 5870 10 mil 기판 위에 제작된 마이크로스트립 라인에 의해 여기되었다. 또한 정밀한 공진주파수의 조절을 위해 DR 상층부에는 금속 조절 나사가 설치되었다. 한편, DR 대역통과 필터는 특성상 인접 모드들로 인한 통과 대역들이 잔존하므로 이러한 스푸리어스 특성을 개선시킬 목적으로 보다 광대역의 대역통과 필터가 제작되었다. 제작된 대역통과 필터의 설계 사양은 위의 표 1과 같고, Rogers사의 RT/duroid 5870 10 mil 기판 위에 Coupled-microstrip-line으로 제작되었다. 그림 7(a)는 제작된 DR 대역통과 필터의 협대역 주파수 응답 특성을 나타낸 것이고, 그림 7(b)는 DR 대역통과 필터의 광대역 주파수 응답 특성을 나타낸 것이다. DR 대역통과 필터와 마이크로스트립 대역통과 필터 전체의 광대역 주파수 특성은 그림 7(c)에 나타내었다. 그림 7(b)로부터 앞서 서술한 바와 같이 인접 모드들로 인한 통과대역이 클럭 신호의 인접 주파수 대

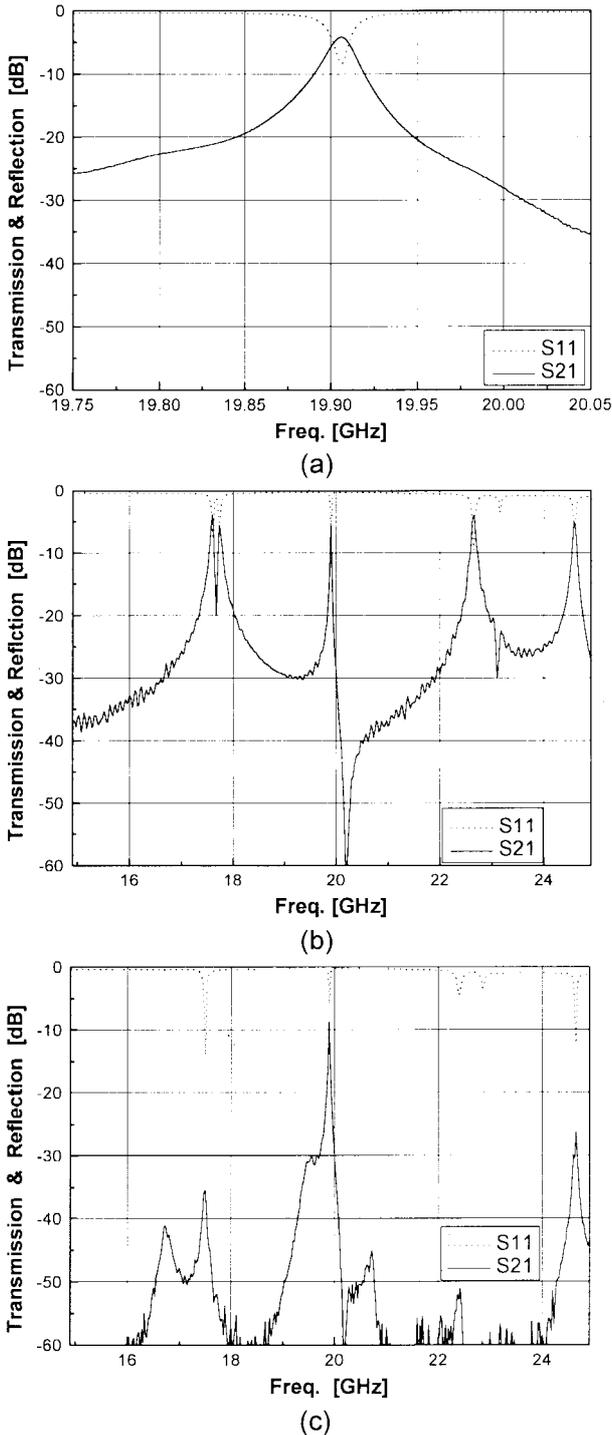


그림 7. (a) DR 대역통과 필터의 협대역 주파수 응답 특성.
 (b) DR 대역통과 필터의 광대역 주파수 응답 특성.
 (c) DR 대역통과 필터+Coupled-line 대역통과 필터의 주파수 응답 특성.

역에서 존재하고 있음을 확인할 수 있고, 추가적으로 마이크로 스트립 대역통과 필터를 통과함으로써 이러한 스퓨리어스 특성이 개선되었음을 그림 7(c)에서 확인할 수 있다.

한편, 클럭 추출 회로를 통해 추출된 클럭은 데이터 판별 및 역다중화를 위해 1:2 DEMUX에 입력되는데, 이때

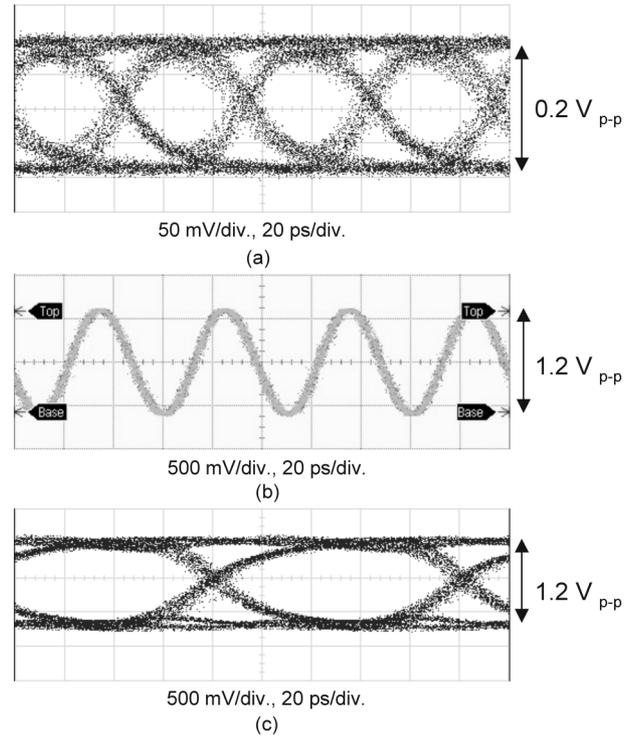


그림 8. (a) 수신부에서 광/전 변환된 신호의 아이 다이어그램.
 (b) 수신부의 클럭 추출부에서 추출된 클럭 신호.
 (c) 1:2 DEMUX에서 역다중화된 10 Gb/s 데이터의 아이 다이어그램.

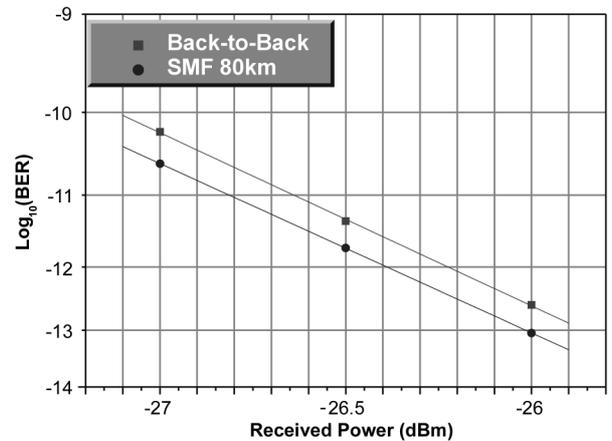


그림 9. 수신 감도 특성.

DEMUX의 입력 조건을 만족시키기 위해 중심주파수가 20 GHz인 협대역 증폭기를 사용하였다. 그림 8에 수신부에 입력되어 광/전 변환된 20 Gb/s NRZ 전기 신호(그림 8(a) 참조)와 클럭 추출부로부터 추출된 클럭 신호(그림 8(b) 참조), 그리고 최종적으로 10 Gb/s로 역다중화된 신호(그림 8(c) 참조)의 측정 결과들을 나타내었다.

3.3. 단일 채널 20 Gb/s 전송 실험

제작된 광 송신기와 수신기의 성능을 시험하기 위해 간단한 광 링크를 구성하였다. 광 송신기에서 생성된 20 Gb/s NRZ

광 신호는 광 감쇠기와 광 전치 증폭기를 거친 후, 광/전 변환되고, 10 Gb/s 신호로 재생되었다. 본 실험 구성에서는 수신부를 광 전치 증폭기부터 DEMUX까지로 정의하고, 광 증폭기 앞에 위치한 광 감쇠기를 이용하여 수신 광 전력을 변화시키는 방법으로 비트 오류율(bit error rate; BER)을 측정하였다. 이 때 광/전 변환기 입력에 해당하는 광 전치 증폭기의 출력은 5 dBm으로 고정시켰다. 그림 9에 송신기와 수신기를 직접 연동하여 측정한 수신감도 특성을 나타내었고, 그 결과 BER 1×10^{-12} 에서 -26.2 dBm의 우수한 수신 감도를 얻을 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 10 Gb/s NRZ(PRBS 2⁷-1) 신호를 중속 신호로 하고, 전기적 다중/역다중 방식을 적용한 20 Gb/s 광 송신기 및 수신기를 구성하고 그 성능을 측정하였다. 특히, 고속 광 전송 시스템의 요소 기술인 클럭 추출 회로 구현을 위해 NRZ-PRZ 변환기와 협대역 DR 필터 및 광대역 대역 통과 필터를 설계하고 제작하였으며, 이를 이용하여 20 Gb/s NRZ 데이터로부터 클럭 신호를 추출하였다. 광 송신기와 수신기를 각각 하나의 보드로 구현하였고, 각 단계별 특성을 샘플링 오실로스코프를 통해 확인하였다. 광 송신기와 수신기를 직접 연결한 back-to-back 구성을 통해, 제작된 광 송·수신기의 성능을 실험적으로 조사하였으며, 그 결과 BER 1×10^{-12} 에서 -26.2 dBm의 우수한 수신 감도를 얻을 수 있었다. 더불어 본 실험을 통해 제작한 20 Gb/s ETDM 광 송·수신기의 구성 방식은 추후 40 Gb/s ETDM 시스템의 구성에도 적용이 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 실험을 위해 여러 가지 조언과 더불어 충분한 토의를 해주신 이상수 박사님, 한기호 박사님, 이원경님과 송재호님께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] B. Zhu, S. N. Knudsen, L. E. Nelson, D. W. Peckham, M. O. Pedersen, and S. Stulz, "800 Gbit/s (80×10.664 Gbit/s) WDM transmission over 5200 km of fibre employing 100 km dispersion-managed spans," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 24, pp. 1467-1469, 2001.
- [2] G. Varella, F. Pitél, and J. F. Marcérou, "3 Tbit/s (300×11.6 Gbit/s) transmission over 7380 km using C+L band with 25 GHz channel spacing and NRZ format," in *OFC Conference 2001, Postdeadline Paper PD22*, Anaheim, USA, 2001.
- [3] B. Bakhshi, M. F. Arend, M. Vaa, E. A. Golovchenko, D. Duff, H. Li, S. Jiang, W. W. Patterson, R. L. Maybach, and D. Kovsh, "1 Tbit/s (101×10 Gbit/s) transmission over transpacific distance using 28 nm C-band EDFAs," in *OFC Conference 2001, Postdeadline Paper PD21*, Anaheim, USA, 2001.
- [4] H. Suzuki, M. Fujiwara, N. Takachio, K. Iwatsuki, T. Kitoh, and T. Shibata, "12.5-GHz spaced 1.28-Tb/s (512-Channel ×2.5 Gb/s) super-dense WDM transmission over 320-km SMF using multiwavelength generation technique," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 14, no. 3, pp. 405-407, 2002.
- [5] M. Yoneyama, Y. Miyamoto, T. Otsuji, H. Toba, Y. Yamane, T. Ishibashi, and H. Miyazawa, "Fully electrical 40-Gb/s TDM system prototype based on InP HEMT digital IC technologies," *J. Lightwave Tech.*, vol. 18, no. 1, pp. 34-43, 2000.
- [6] K. Ishikawa, K. Watanabe, H. Chiba, H. Suzuki, R. Takeyari, K. Ohhata, T. Tanoue, K. Hirata, T. Masuda, R. Hayami, K. Washio, and T. Harada, "40 Gbit/s optical transmitter and receiver using InP HBT and SiGe HBT ICs," in *ECOC 2000*, Munich, Germany, vol. 1, pp. 89-90, 2000.
- [7] B. Zhu, L. Leng, L. E. Nelson, Y. Qian, L. Cowsar, S. Stulz, C. Doerr, L. Stulz, S. Chandrasekhar, S. Radic, D. Vengsarkar, Z. Chen, J. Park, K. S. Feder, H. Thiele, J. Bromage, L. Gruner-Nielsen, and S. Knudsen, "3.08 Tbit/s (77×42.7 Gbit/s) WDM transmission over 1200 km fibre with 100 km repeater spacing using dual C- and L-band hybrid Raman/erbium-doped inline amplifiers," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 13, pp. 844-845, 2001.
- [8] Y. Zhu, W. S. Lee, C. Scallion, C. Fludger, D. Watley, M. Jones, J. Homan, B. Shaw, and A. Hadjifotiou, "1.28 Tbit/s (32×40 Gbit/s) transmission over 1000 km NDSF employing distributed Raman amplification and active gain flattening," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 1, pp. 43-45, 2001.
- [9] K. Murata, T. Otsuji, T. Enoki, and Y. Umeda, "Exclusive OR/NOR IC for > 40 Gbit/s optical transmission systems," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 8, pp. 764-765, 1998.
- [10] K. Murata and T. Otsuji, "A novel clock recovery circuit for fully monolithic integration," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 12, pp. 2528-2533, 1999.
- [11] J. H. Song, T. W. Yoo, J. H. Ko, C. S. Park, and J. K. Kim, "Design and characterization of a 10 Gb/s clock and data recovery circuit implemented with phase-locked loop," *ETRI Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 1-5, 1999.
- [12] R. L. Rosenberg, C. Chamzas, and D. A. Fishman, "Timing recovery with SAW transversal filters in the regenerators of undersea long-haul fiber transmission systems," *J. Lightwave Tech.*, vol. LT-2, no. 6, pp. 917-925, 1984.
- [13] P. Monteiro, J. N. Matos, A. Gameiro, and J. R. F. da Rocha, "10 Gbit/s timing recovery circuit using dielectric resonator and active bandpass filters," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 9, pp. 819-820, 1992.
- [14] P. Monteiro, J. N. Matos, A. Gameiro, and J. R. F. da Rocha, "20 Gbit/s DR based timing recovery circuit," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 10, pp. 799-800, 1994.

Configuration of ETDM 20 Gb/s optical transmitter/receiver and their characteristics

Sang-Kyu Lim[†], Hyunwoo Cho, Gapyoul Lyu, and Jong-Hyun Lee

Optical Communications Department, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 305-350, KOREA

[†]E-mail: sklim@etri.re.kr

(Received March 14, 2002 ; revised manuscript received June 10, 2002)

We developed an optical transmitter and receiver for an electrical time division multiplexed (ETDM) 20 Gb/s optical transmission system, and experimentally investigated their characteristics. Especially, the clock extraction circuit, which is a key component in realizing broadband optical transmission receivers, was realized by using an NRZ-to-PRZ converter implemented with a half-period delay line and an EX-OR, a high-Q bandpass filter using a cylindrical dielectric resonator, and a microstrip coupled-line bandpass filter. Finally, the bit-error-rate of demultiplexed 10 Gb/s electrical signal after back-to-back transmission was measured, and a high receiver sensitivity [-26.2 dBm for NRZ (2^7-1) pseudorandom binary sequence (PRBS)] was obtained

Classification code : OC.010.