

5.12 Tb/s(128 채널 × 43 Gb/s) WDM 신호의 전송실험

전상배 · 손의승 · 정승필 · 정윤철[†]

한국과학기술원 전자전산학과(전기전자) 광통신연구실
Ⓣ 305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1

(2004년 11월 29일 받음, 2005년 2월 4일 수정본 받음)

본 논문은 5.12-Tb/s(128 채널 × 43 Gb/s) WDM 신호의 200 km 전송실험에 관한 것이다. 본 실험에서는 Medium Dispersion Fiber를 사용하여 0.8-(bits/s)/Hz의 스펙트럼 효율을 구현하였다. 전송 후 측정된 평균 Q-factor값은 15.2 dB이었다.

주제어 : Spectral Efficiency, High capacity, Wavelength-Division-Multiplexing(WDM), Medium Dispersion Fiber(MDF).

I. 서 론

최근 인터넷을 비롯한 각종 데이터 서비스의 증가로 인하여 기간망에서 필요로 하는 대역폭이 급격히 증가하고 있다. 이러한 전송수요에 적절히 대처하기 위해서는 광섬유당 전송용량을 지금보다 더욱 증가시킬 필요가 있다. 이를 위한 가장 효과적인 방법은 여러 개의 초고속 신호를 파장분할다중화하여 전송하는 WDM 기술을 이용하는 것이다. 따라서, 지금도 세계 각국에서는 WDM 시스템의 용량을 극대화시키려는 수많은 노력이 진행되고 있다¹⁻³¹. 본 논문에서는 국내에서는 처음으로 광섬유당 전송용량이 5.12 Tb/s인 초대용량 WDM 시스템을 구현하고, MDF(Medium Dispersion Fiber)를 이용하여 200 km 전송하였다. 이를 위하여 채널당 전송속도가 43 Gb/s인 128개의 초고속 광신호가 사용되었다. 이러한 초대용량 시스템을 구현하려면 광증폭기의 한정된 대역폭을 최대한 활용할 수 있어야 한다. 따라서, 채널간격을 50 GHz로 최소화하고, 각 신호의 편광이 서로 수직이 되도록 조정함으로써 0.8(bit/s)/Hz에 달하는 스펙트럼 효율을 달성하였다.

II. 전송 실험

실험구성도는 그림 1과 같다. 본 실험에서 사용된 128개 DFB 레이저의 파장 대역은 1534.64~1559.79 nm(C-band)와 1572.24~1597.62 nm(L-band) 이었으며, 채널 간격은 50 GHz 이었다. 채널간의 누화를 최소화하기 위한 방안의 일환으로 C/L-band의 홀수채널들과 짝수채널들을 2개의 C/L-band 결합기를 이용하여 통합하였다. 결합된 신호는 서로 상보관계에 있는 43 Gb/s ETDM 신호에 의해 각각 구동되는 2개의 광변조기로 보내졌다. 각 신호의 전송속도가 40 Gb/s가 아니

라 43 Gb/s인 이유는 OC-768 신호에 에러정정부호(FEC)를 사용하는 경우 발생하는 추가적인 대역폭 증가를 고려한 것이다. 이 신호는 4개의 10.8 Gb/s 신호(패턴길이: $2^{23}-1$)를 전기적으로 시분할 다중화하여 구현하였다. 변조된 홀수채널들과 짝수 채널들은 편광조절기와 편광결합기를 통해 편광이 서로 수직이 되도록 결합되었다. 결합된 128 채널의 신호는 채널간의 상관관계 제거와 분산보상을 위한 분산보상 광섬유(분산값: -1202 ps/nm @1550 nm)를 통과한 후 200 km의 MDF(삼성전자 UltraPass™)를 통해 전송되었다. 각 span 거리는 100 km이었으며, 이곳에서 발생하는 손실(22 dB)의 보상을 위해 C-band와 L-band를 분리한 후 C-band용 증폭기와 L-band용 증폭기를 사용하여 각각 따로 증폭하였다. 증폭된 신호의 크기는 채널당 0 dBm 이었다. 본 실험에서 사용된 MDF는 스펙트럼 효율이 높은 시스템의 경우 심각한 문제를 야기하는 각종 비선형성을 억제하는 데에 적합한 분산값을 갖고 있을 뿐 아니라³², 40 Gb/s급 초고속신호의 전송시 발생하는 채널 내 인접비트간의 비선형 현상인 IFWM (Intra-channel Four Wave Mixing), IXPM(Intra-channel Cross Phase Modulation) 등을 억제하는 데에도 기존의 단일모드 광섬유보다 우수한 것으로 알려져 있다⁴¹. 그림 2는 본 실험에서 사용된 MDF의 색분산 특성을 보여준다. MDF를 통해 전송된 신호는 편광조절기와 편광분리기를 이용하여 홀수 채널과 짝수 채널로 분리되었다. 이를 위하여, 홀수 또는 짝수 채널만이 편광분리기를 통과할 수 있도록 편광조절기를 제어하였다. 이와 같이 홀수 또는 짝수 채널에 따라 분리된 신호는 다시 C/L-band로 분리되고, 각각 C-band용 분산보상 광섬유(분산값: -564 ps/nm @1550 nm)와 L-band용 분산보상 광섬유(분산값: -684 ps/nm @1550 nm)를 통과한 후, 채널간격이 100 GHz인 AWG(Arrayed Waveguide Grating)와 파장가변 필터를 이용하여 역다중화 되었다. 40 Gb/s급 광신호의 누적분산 허용치는 약 ± 65 ps/nm이다. 따라서, 40 Gb/s급 신호를 기반으로 한 WDM 전송 시스템의 경우 각 채널을 역

[†] E-mail: ychung@ee.kaist.ac.kr

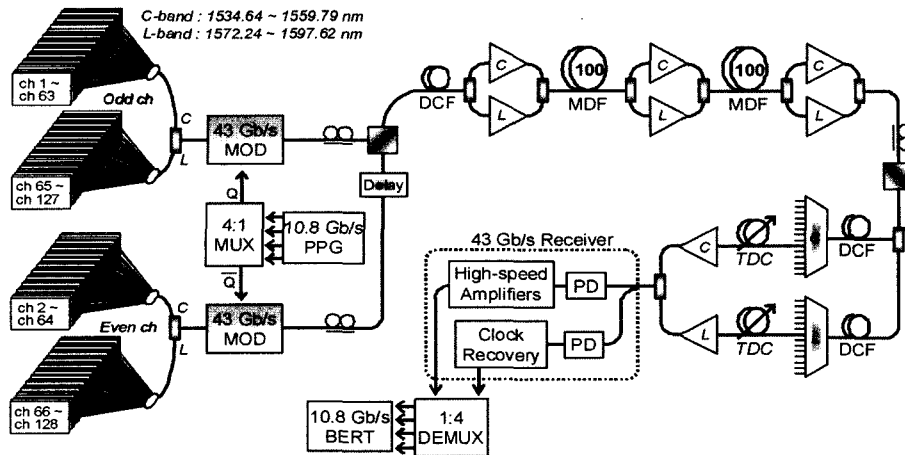


그림 1. 실험구성도.

다중화 한 뒤 채널별로 별도의 분산보상을 수행할 수 있는 가변분산보상기가 필요하다. 그러나, 상용화되어 있는 가변분산보상기는 대부분 사용 가능한 대역폭과 가변영역이 매우 좁다. 따라서, 본 실험에서는 분산값이 $2^N(N = 0\sim6)$ ps인 여러 개의 광섬유 스플을 8×8 광 스위치의 각 패스에 연결하고, 스위치 내부의 연결 상태를 컴퓨터로 제어함으로써 분산값을 조정하는 가변분산보상기를 제작하였다. 이와 같이 제작된 가변분산보상기를 사용하여 전송 후 발생한 채널별 잔여 분산값(-117 ps/nm ~ -2 ps/nm)을 보상하였다. 이러한 방식으로 분산보상된 광신호는 광전치 증폭기를 통과한 뒤 수신기에 입력되었다. 입력된 광신호는 광커플러를 사용하여 두 개의 광신호로 분리되고, 각각 광전변환된 후 43-Gb/s 데이터 신호의 복원과 클럭신호의 추출에 사용되었다. 클럭신호의 추출은 상용화되어 있는 PLL(Phase-Locked Loop)회로를 사용하였다. 복원된 43-Gb/s 데이터 신호는 다시 전기적으로 시분할 역다중화된 후, 10.8 Gb/s 신호로 변환되었다. 따라서, 변환된 10.8-Gb/s 신호의 비트오류율을 측정함으로써 구성된 시스템의 전송성능을 평가하였다.

III. 실험결과 및 분석

그림 3은 200 km 전송 후 측정된 광스펙트럼과 광신호대 잡음비(OSNR)를 보여준다. 전송 후 측정된 각 채널의 평균 광신호대 잡음비는 24.9 dB(C-band)와 26.3 dB(L-band)였으며, 채널간의 최대 파워 차이는 4 dB 이내였다. 이러한 차이는 광섬유 증폭기에 이득 평탄화 필터를 사용하였음에도 불구하고 완벽하게 평탄화되지 않은 이득차이가 누적되어 발생한 것이다. 그림 4는 200 km 전송 후 측정된 각 채널의 Q-factor와 채널 12번, 56번, 93번의 eye diagram들을 보여주고 있다. 이 eye diagram들은 전송 후 측정된 비트오율이 최적화되도록 가변분산보상기의 분산값을 조절한 뒤 측정된 것이며, 잔여 분산값과 광변조기에서 발생한 처업이 상호작용하여 펄스가 약간 압축되었을 때 전송품질이 가장 우수하였음을 보여준다. 200 km 전송 후 측정된 평균 Q-factor 값은 15.2 dB(BER = $4.3e-9$)였으며, 가장 나쁜 성능을 보이는 18번 채널의 Q-factor 값은 14.1 dB(BER = $2e-7$)로 측정되었다. 구현된 시스템의 전송성능을 제한하는 주요 요인으로는 광신호대 잡음비의 저하뿐 아니라 인접한 채널들의 편광이 서로 완벽하게 수직이 되도록 제어하지 못함으로써 발생한 채널간의 선형간섭을 들 수 있다. 이와 같은 선형간섭에 의하여 발생하는 성능저하를 분석하기 위하여 동일한 편광상태에서 동작하고 채널간격이 100 GHz인 4개의 채널(28번, 30번, 32번, 34번)만을 전송한 뒤 Q-factor를 측정하였다. 그림 4에서 보여주는 바와 같이, 채널간격이 100 GHz인 경우(즉, 완벽하지 못한 편광제어로 인하여 발생하는 선형간섭을 무시할 수 있는 경우에는 인접한 채널들의 편광을 서로 수직이 되도록 제어하고 채널간격을 50 GHz로 축소할 경우보다 Q-factor가 약 1 dB 높게 측정되었다. 본 실험에서는 OC-768 신호에 오류정정부호를 적용한 경우를 가정하여 43 Gb/s 신호를 전송하였다. 따라서, 오류정정부호의 부호이득을 고려할 경우, 구현된 전송 시스템은 충분한 마진을 확보할 수 있을 것으로 판단된다^[3].

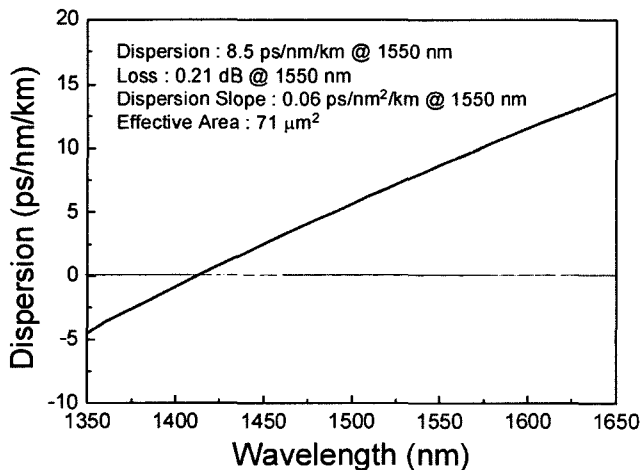


그림 2. 사용된 MDF(삼성전자 UltraPass™)의 색분산 특성.

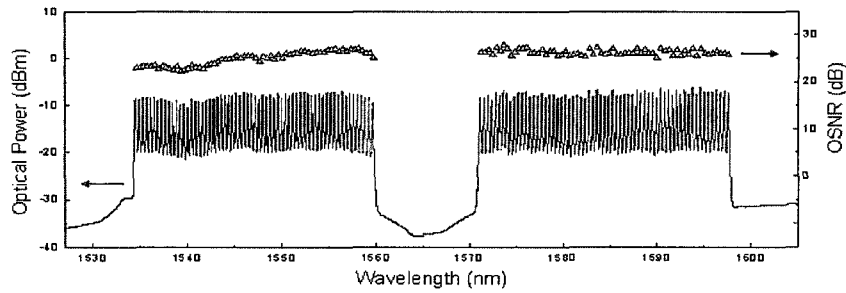


그림 3. 200 km 전송 후 측정된 광스펙트럼과 광신호대 잡음비.

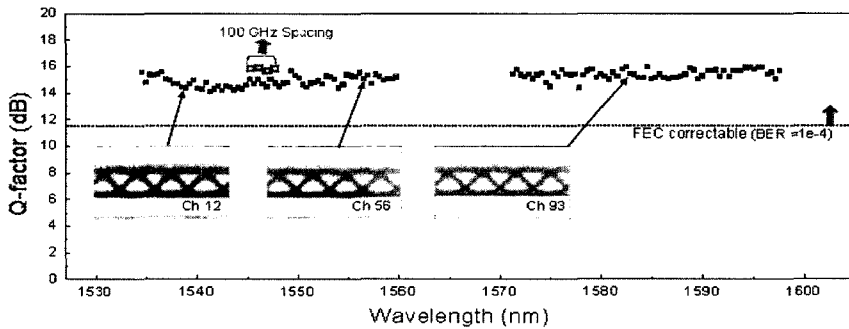


그림 4. 200 km 전송 후 측정된 Q-factor 값.

IV. 결 론

본 논문에서는 광섬유당 전송용량이 5.12 Tb/s(128 × 43 Gb/s)에 달하는 초대용량 WDM 신호를 국내에서 개발된 MDF를 이용하여 200 km 전송하였다. 전송 후 측정된 각 신호의 평균 Q-factor 값은 15.2 dB이었다.

참고문헌

[1] H. Taga, Y. Yoshida, N. Edagawa, S. Yamamoto, H. Wakabayashi, "459 km, 2.4 Gbit/s four wavelength multiplexing optical

fiber transmission experiment using six Er-doped fibre amplifiers," *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 500-501, Apr. 1990.
 [2] T. Ito, et al., "6.4 Tbit/s (160 × 40 Gbit/s) WDM transmission experiment over 0.8 bit/s/Hz spectral efficiency," in *European Conference on Optical Communication*, paper PD1.1, 2000.
 [3] S. Bigo, et al., "10.2 Tbit/s (256 × 42.7 Gbit/s PDM/WDM) transmission over 100 km TeraLight™ fiber with 1.28 bit/s/Hz spectral efficiency," in *Optical Fiber Communication conferences*, PDP 25, 2001.
 [4] B. Konrad and K. Petermann, "Optimum fiber dispersion in high-speed TDM systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, pp. 299-301, Apr. 2001.

5.12 Tb/s (128 × 43 Gb/s) WDM transmission over 200 km of medium dispersion fiber

S. B. Jun, E. S. Son, S. P. Jung, and Y. C. Chung[†]

Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, South Korea

[†]E-mail: ychung@ee.kaist.ac.kr

(Received November 29, 2004, Revised manuscript February 4, 2005)

We demonstrated 5.12-Tb/s(128 ch × 43 Gb/s) WDM transmission over 200 km of medium dispersion fiber. The spectral efficiency was 0.8-(bits/s)/Hz. After transmission, the average Q-factor was measured to be 15.2 dB.

OCIS Codes : 060.2330.