

4광파 혼합 현상을 이용한 스펙트럼 저미어진 광섬유 증폭 광원의 SNR 개선 방법*

한 정 희

한국전자통신연구원 광통신연구실

고준원 · 이재승

광운대학교 전자공학과

신 상 영

한국과학기술원 전기및전자공학과

(1997년 10월 16일 받음)

본 논문에서는 고속 장거리 광전송시스템에서 스펙트럼 저미어진 광섬유 증폭 광원의 분산 패널티를 줄일 수 있는 전 광학적 방법을 새로이 제안하였다. 즉, 수신된 신호의 광 선폭을 확장하므로 잡음광의 2.5 Gb/s 전송에 필요한 송신 채널의 선폭을 0.1 nm 까지 줄였다. 선폭 확장은 분산천이 광섬유에서 intra-channel 4광파 혼합현상을 이용하였으며, 그 결과 송신 채널의 신호대 잡음비를 개선할 수 있었다. 이 방법을 이용하여 0.1 nm 채널 선폭을 갖는 2.5 Gb/s NRZ 변조된 광신호의 분산천이 광섬유 300 km 전송을 성공적으로 수행하였다. 선폭 확대 전에는 비트 에러율이 1×10^{-5} 이었으나, 선폭 확대 후 비트 에러율이 1×10^{-10} 이하로 개선되었으며, 측정된 전송 패널티는 0.5 dB 이하 였다. 이 결과는 지금까지 보고된 가간섭성이 없는 잡음 광원을 사용한 2.5 Gb/s 전송 실험 중에서 최소의 선폭과 최고의 전송거리 값을 갖는 결과이다.

I. 서 론

에르븀이 첨가된 광섬유를 이득 매질로 하는 광섬유증폭기(Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA)가 상용화 되면서 광 주파수분할 다중화(WDM: Wavelength Division Multiplexing) 방식에 기초한 광통신 시스템이 최근 활발히 연구 개발되고 있다.^[1,2] WDM 방식은 여러 가지 광파장을 사용하여 전송하게 되므로 각 채널들의 주파수를 안정하게 배열하여 송신 광원을 구성해야 한다. 기존의 송신 광원은 반도체 레이저의 출력 파장을 측정하여 필요한 파장의 광원을 선택하는 방식을 채택하고 있다. 반도체 레이저는 발진 파장을 정확하게 제어하기 곤란한 단점이 있으며, 발진 파장이 경년효과(aging)에 의해 불규칙적으로 변동하는 문제점을 안고 있다. 따라서 안정하고 경제적으로 송신 광원을 구성할 수 있는 대안을 모색하고 있다.

최근에 EDFA에서 발생된 증폭된 자연방출광(ASE: Amplified Spontaneous Emission)의 넓은 광 스펙트럼을 광학 필터를 사용하여 좁게 저미어서(Spectrum-Slicing) WDM 전송 시스템용 광원으로 사용하는 방안이 제안되었다.^[3,4] 이러한 광원의 장점으로는 광섬유증폭기 하나만으로도 여러개의 WDM 용 광원인 반도체 레이저를 대체할 수 있어 경제적이고, 또한 각 채널의 중심주파수도 광학 필터를 사용하여 규격

에 맞게 쉽게 설정할 수 있다는 점 등이다. 그러나 스펙트럼 저미어진 잡음 광원(SSIL: Spectrum-Sliced Incoherent Light)은 기존의 반도체 레이저와 달리 광수신 회로에서 신호를 검출할 때 광출력에 비례하여 과잉강도잡음(Excess Intensity Noise)이 크게 나타난다. 최근에 외부 변조 방식의 송신기에 초고주파 회로를 부가하여 SSIL 신호의 과잉강도잡음을 감소시키는 방법을 제안하였으며, 이 방법으로 0.23 nm의 좁은 채널 선폭으로 2.5 Gb/s 광전송 시험을 수행한 보고가 있었다.^[5] 그러나 이 방법은 광/전 변환의 복잡한 신호 처리 과정과 정확한 타이밍 제어가 요구되고 있다.

본 논문에서는 전 광학적으로 SSIL 신호의 신호대잡음비(SNR: Signal-to Noise Ratio)를 개선하는 새로운 방법을 제안하였으며, 전송 실험으로 이를 확인하였다. 2장에서는 SSIL 신호의 SNR 개선 방법에 관해서 기술하였고, 3장에서는 이 방법을 적용하여 0.1 nm의 좁은 광선폭을 갖는 SSIL 신호를 2.5 Gb/s로 변조하여 분산천이 광섬유(DSF: Dispersion-Shifted Fiber) 300 km를 통하여 전송한 내용을 기술하고자 한다.

II. SSIL 신호의 SNR 개선

EDFA에서 발생하는 ASE 스펙트럼을 광학 필터로 저미어서 WDM 시스템의 광원으로 사용할 때, 광수신기에서 이 신호의 SNR은 다음과 같이 정의할 수 있다.^[3]

$$SNR = I_{ASE}^2 \sigma_d^2 \approx \frac{m B_o}{2 B_e} \quad (1)$$

*본 연구는 정보통신부에서 시행한 HAN/B-ISDN 사업 및 광운대학교 교내연구비의 일부 지원을 받아 수행하였습니다. 연구 수행에 도움을 주신 ETRI 박창수 박사님과 주무정 박사님께 감사드립니다.

여기서 SSIL 신호 광원과 광수신기 입력단 사이에 편광기를 사용하지 않으면 $m=2$ 이고, 사용한 경우에는 $m=1$ 의 값을 갖는다. 위 식에서 알 수 있듯이 광수신기에서 SSIL 신호의 SNR은 신호광의 세기에 무관하며 스펙트럼 저미어진 광신호의 대역폭(B_0)에 비례하고, 수신기 선형 채널의 전기적 신호 대역폭(B_e)에 반비례 한다. 주어진 전송속도에서 SNR을 개선하기 위해서는 광신호의 대역폭을 증가시켜야 하나, 이는 한정된 EDFA의 대역폭에서 사용 가능한 WDM 전송 채널의 수를 감소시키며, 광섬유의 색분산에 의한 전송 패널티를 증가시키게 되므로 장거리 전송 수행에 장애 요인이 되고 있다.^[4] 따라서, 송신단에서는 좁은 스펙트럼 폭으로 전송하면서 광섬유 증폭 광원의 SNR을 개선하는 방법이 필요하다.

식 (1)에 나타낸 바와 같이 SNR을 개선하는 방법은 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 기존의 LiNbO₃ 외부변조기를 입력 신호의 편광 상태에 무관하게 변조할 수 있는 전계흡수형 외부변조기로 대체하면 SNR을 2배 개선할 수 있다.^[6] 둘째, 광수신기의 등가 대역폭(B_e)을 줄이는 방법이 있으나, 이것은 변조 신호의 속도에 의해 최소 대역폭이 거의 고정되므로 줄이는데 한계가 있다. 셋째, SSIL 신호 채널 내부에 존재하는 spontaneous-spontaneous beat 잡음을 feed-forward 방식으로 제거한 후 전송하는 방법이 있다.^[5] 마지막으로, 본 논문에서 제안하는 송신단에서는 채널 선폭(B_c)을 좁게 유지하여 광선로 상에서 분산의 영향을 최소로 하여 전송 패널티를 줄이고 수신단에서 SSIL 신호의 선폭을 확장하여 SNR을 개선할 수 있다.

어느 일정 세기 이상의 강한 빛이 광섬유를 진행하면 매질 내에는 3차 비선형 편극(third-order nonlinear polarization)이 유도되며, 새로운 주파수 성분을 갖는 빛이 발생한다.^[7,8] 이들 중에서 대표적인 것으로 인접한 전송 채널 간의 4 광파 혼합(FWM: Four-Wave Mixing) 현상을 들 수 있다. 일반적으로 WDM 광전송 시스템에서 FWM 현상은 채널간의 누화(crosstalk)를 발생시켜 통신 장애를 일으키므로 이를 제거하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이와 달리 유한한 채널 선폭을 갖는 단일 채널의 강한 빛이 광섬유를 진행하면 채널 내에 연속적인 주파수 성분들 간의 FWM 현상에 의해 선폭이 확대되는 intra-channel FWM 현상이 나타난다.^[9] FWM은 광섬유로 입사되는 광신호의 세기가 클수록, 신호 광원의 중심파장이 광섬유의 영분산 파장에 가까울수록 더욱 강하게 나타난다.^[10]

본 논문에서는 위의 intra-channel FWM 현상을 이용하여 SSIL 신호의 SNR을 개선하고자 한다. 즉, 송신단에서 좁은 채널 선폭을 유지한 채 색분산을 최소화시켜 전송한 후 수신단에서 광섬유의 FWM을 이용하여 전송 채널의 선폭을 확대함으로써 SNR을 개선할 수 있다. 그림 1은 DSF의 영분산 파장 부근에서 SSIL 신호의 intra-channel FWM 효율을 측정하기 위한 실험 구성도이다. EDFA1의 ASE 출력은 대역폭 0.1~0.5 nm인 광학 필터로 스펙트럼 저미어져 SSIL 신호 광원으로 사용되었다. 대역폭 0.1 nm의 광섬유 Fabry-Perot 필터는 Lorentzian lineshape을 가지며 free spectral range는 10 nm, finesse는 100 이었다. 실험에 사용된 또 하나의 대역 통과 필터는 대역폭 0.5 nm 이고, Gaussian lineshape를 갖는다. SSIL 신호는 LiNbO₃ 간접계형 외부변조기에서 NRZ 신호 형

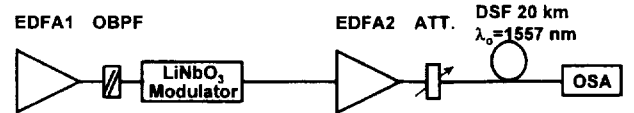


그림 1. Intra-channel FWM 효율을 측정하기 위한 실험 구성도.

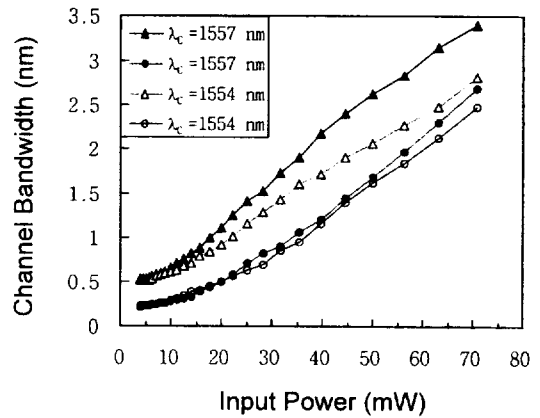


그림 2. 영분산 파장이 1557 nm인 DSF 20 km에 입력되는 광신호의 세기 및 중심 파장 변화에 따른 채널 선폭 증가.

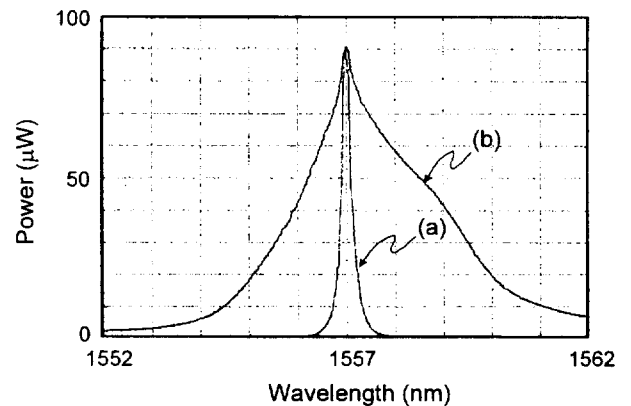


그림 3. 선폭을 확대하기 전후의 채널 스펙트럼 분포. (a) 선폭 확대 전 (광선폭: 0.1 nm), (b) 선폭 확대 후(광선폭: 2.2 nm).

태로 진폭 변조되어 수신단으로 보내진다. EDFA2는 고출력 광섬유증폭기로 -14.5 dBm의 입력 신호광을 +18 dBm으로 증폭하였다. 수신단에 사용된 20 km의 DSF는 intra-channel FWM을 일으키기 위한 비선형 매질로 사용되었으며, 평균 손실 0.25 dB/km, 영 분산 파장은 1557 nm, 그리고 분산계수 기울기는 0.067 ps/nm²-km 였다. 광섬유를 통과한 신호는 광 스펙트럼 분석기(OSA: Optical Spectrum Analyzer)를 이용하여 선폭 확대 정도를 측정하였다.

광감쇠기를 사용하여 DSF 20 km에 입력되는 SSIL 신호의 크기를 변화 시키면서 측정한 채널 선폭 확대 특성을 그림 2에 나타내었다. Intra-channel FWM이 일어나는 임계 광세기는 약 15 mW 정도이며, 선폭 확대 정도는 입력 광세기에 선형적으로 비례하는 특성을 나타내었다. 그리고 SSIL 신호광의 중심 파장이 DSF 20 km의 영분산 파장($\lambda_c=1557$ nm)에서 약 3 nm

정도 벗어난 1554 nm 에서도 60 mW 이상의 광입력에서 선폭이 약 2 nm 정도로 충분히 확대됨을 볼 수 있다. 그림 3은 선폭을 확대하기 전후의 채널 스펙트럼을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 채널 중심 파장이 DSF 20 km의 영분산 파장인 1557 nm와 일치하더라도 입력 광세기가 +6 dBm인 경우 채널 선폭은 0.1 nm로 측정되었다. 그러나 입력 광세기를 임계 광세기 이상으로 인가하면 선폭은 선형적으로 증가하며, +18 dBm을 인가하면 그림 3(b)와 같이 선폭이 약 2.2 nm로 확대 되었다.

III. 전송 실험

송신단에서는 SSIL 신호의 채널 선폭을 좁게 유지하여 광선로 상의 분산 효과를 최소로 하여 전송한 후, 수신단에서 선폭을 확대하는 방법으로 SNR 특성을 개선하는 실험 구성도를 그림 4에 나타내었다. EDFA1에서 발생된 ASE 광은 1557.4 nm의 중심파장에서 0.1 nm의 광선폭을 갖는 OBPF1 (optical bandpass filter)를 이용하여 스펙트럼이 저미어졌다. OBPF1의 출력은 2^{23} -1 PRBS(pseudo-random bit sequence)로 2.5 Gb/s 변조된 후 광전력증폭기(EDFA2)로 증폭하여 전송하였다. 전송 선로로 사용된 DSF는 평균 손실 0.25 dB/km, 평균 영분산파장 1,559 nm, 그리고 분산계수 기울기가 0.067 ps/nm² · km인 DSF 300 km를 사용하였다. DSF 100 km 마다 광선로증폭기(EDFA3, 4)를 사용하여 중계 전송 하였다. 이 때 광선로증폭기의 출력 광세기는 선로상에서 발생하는 비선형 현상을 방지하기 위하여 +7 dBm으로 하였으며, 입력 광세기는 -18 dBm 이었다. 전송되어온 신호는 고이득 고풍출력 증폭기(EDFA5)에서 +18 dBm으로 증폭한 후 DSF 20 km에 입사시켰다. SSIL 신호는 영분산 파장이 1,557 nm 인 DSF 20 km에서 intra-channel FWM 현상을 일으켜 선폭이 0.1 nm에서 1.64 nm로 확대되었으며, 잔류 ASE 잡음성분을 제거하기 위하여 대역폭 2.7 nm인 OBPF2를 통하여 광수신기로 입력된다. 광수신기는 -3 dB 대역폭 약 1.7 GHz의 APD, 전치증폭기, 주증폭기, 그리고 리타이밍 회로로 구성되었다.

그림 5는 DSF 300 km 전송 후 SSIL 신호 채널의 선폭을 확대하기 전 후에 변조된 광신호를 대역폭 1.7 GHz인 광수신기로 측정된 아이 패턴이다. 선폭 확대 전에는 spontaneous-spontaneous 비트 잡음에 의해 그림 5(a)와 같이 논리 "1"의 신호에 매우 큰 잡음이 나타난다. 그러나 DSF 20 km에서 intra-channel FWM을 이용하여 채널 선폭을 1.64 nm로 확대하면

SNR이 개선되므로 그림 5(b)와 같이 비트 잡음이 감소된 아이 패턴을 볼 수 있다.

그림 6은 비트 에러율(BER) 특성 곡선을 나타낸 것이다. 0.1 nm 선폭의 SSIL 신호는 BER 1×10^{-5} 에서 에러율이 고정되는 현상을 나타내었다. 그러나 선폭을 1.64 nm로 확대하면 DSF 300 km 통과 후에도 1×10^{-10} 이상의 BER 값을 얻을 수 있었다. 송신단에서의 SSIL 신호 채널의 선폭이 0.1 nm로 좁고, DSF 300 km의 평균 영분산 파장이 SSIL 신호의 중심 파

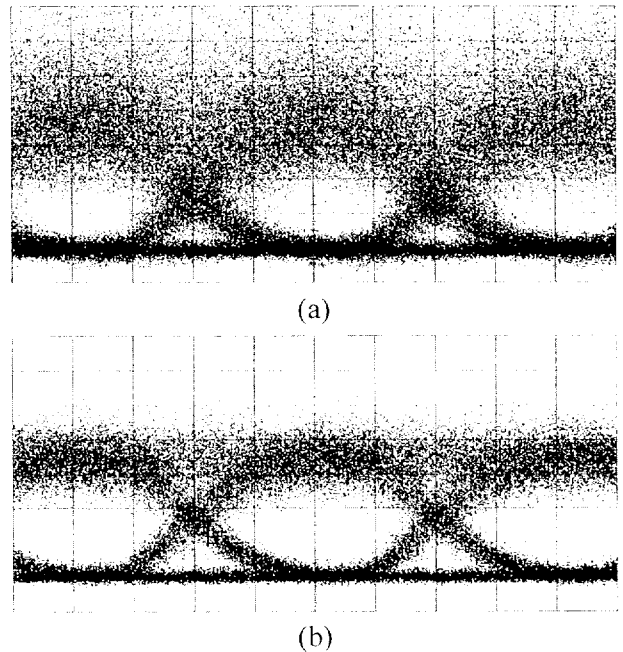


그림 5. 채널의 선폭을 확대하기 전후에 변조된 광신호의 아이 패턴. (a) 선폭 확대 전(채널 폭: 0.1 nm), (b) 선폭 확대 후(채널 폭: 1.64 nm).

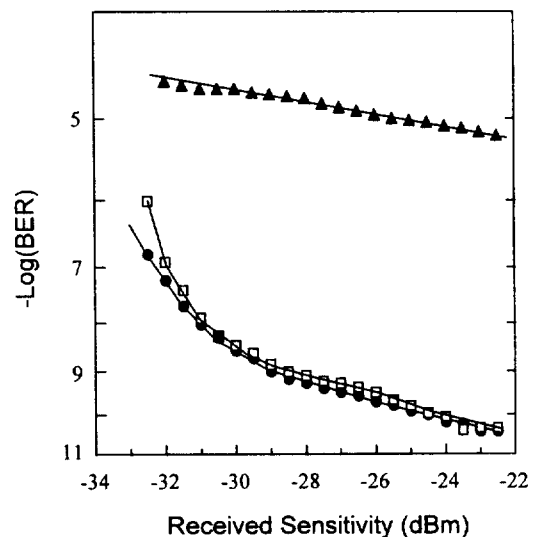


그림 6. BER 특성 곡선. ▲: 선폭 확대 전 (Back-to-Back), ● : 선폭 확대 후 (Back-to-Back), □ : 선폭 확대 후 (DSF 300 km 전송 후).

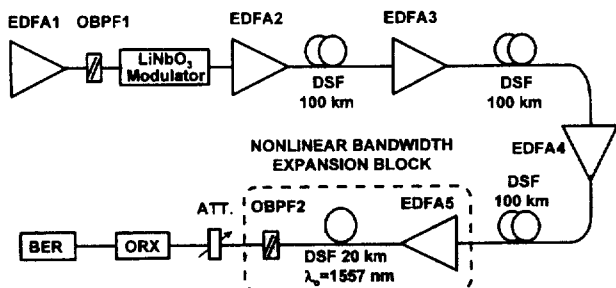


그림 4. DSF 300 km 전송 실험 구성도.

장에서 약 3 nm 정도 벗어나 있었으므로 전송 패널티는 0.5 dB 이하로 매우 적게 나타났다.

IV. 결론 및 논의

DSF에서 intra-channel FWM 현상을 이용하여 SSIL 신호 채널의 SNR을 개선하는 방법을 처음으로 제안하였으며, 2.5 Gb/s 전송 실험으로 이를 확인하였다. 0.1 nm 선폭의 SSIL 신호를 그대로 수신한 경우 비트 잡음의 증가로 BER 1×10^{-5} 에서 에러율이 고정되는 현상을 나타내었다. 그러나 선폭을 1.64 nm로 확대하여 SNR을 개선한 후 수신하면 DSF 300 km 통과 후에도 1×10^{-10} 이상의 BER을 얻을 수 있었다. 이 결과는 incoherent한 잡음 광원을 2.5 Gb/s 광전송에 적용하여 지금까지 수행한 실험 중에서 최소의 선폭과 최대의 전송 거리 값을 갖는 것이다.

본 논문에서 제안한 방법은 전광학적으로 구현 가능하므로 전송속도에 무관하게 적용할 수 있다. 또 송신단에서는 채널 선폭을 좁게 저미어서 다채널로 전송하고 각각의 수신 채널을 분리에서 SNR을 개선함으로써 좁은 채널 간격으로 다채널 할당이 가능하다. 최근 평판 광도파로 소자기술(PLC: Planar Lightwave Circuits)을 이용한 배열 도파로 회절격자(AWG: Arrayed Waveguide Grating) 필터가 상용화되고 있어 ASE 광원을 WDM 채널에 손쉽게 할당할 수 있다. 즉, AWG 라우터(route)를 이용하면 곧바로 채널의 다중/역다중이 가능하고 ITU-T에서 제안하고 있는 표준 채널의 중심 주파수도 손쉽게 맞출 수 있어[11], WDM 송신용 광원으로 SSIL 신호로 사용할 수 있을 것이다. 이 방법을 적용하여 채널 간격 1.6 nm, 3 dB 채널 선폭이 0.45 nm인 4×4 AWG 라우터를 이용하여 2.5 Gb/s $\times 4$ 채널로 DSF 240 km 전송 실험을 성공적으로 수행한 바 있으며,^[12] 분산 보상용 광섬유를 사용하여 SMF에서 색분산을 보상해주면 SMF 240 km 전송도 충분히 가능하였다.

그러나 다채널 광링크의 광원으로 SSIL 신호를 사용하는 경우 수신단에서 각각의 채널에 높은 광출력을 갖는 EDFA가 필요한 약점을 가지고 있다. 따라서 선폭 확대 효율을 높이기 위한 방안으로 유효 단면적이 적은 새로운 비선형 매질을 DSF 대신에 사용하거나, 비선형 계수가 더욱 큰 매질에 대한 연구도 계속되어야 할 것으로 생각된다.^[13] 그리고, 보다 효율적으로 SNR을 개선할 수 있는 소자가 확보된다면 Gb/s 급의 고속 WDM 지역망 등에서도 기존의 반도체 레이저 대신에 SSIL 신호를 사용할 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] K. Nosu et al., "100 channel optical FDM technology

- and its applications to optical FDM channel-based networks," *J. Lightwave Technol.*, **11**, pp.764-776 (1993).
- [2] S.Yoshida, S.Kuwano, N.Takachio, and K.Iwashita, "10 Gbit/s $\times 10$ channel WDM Transmission Experiments over 1200 km with Repeater Spacing of 100 km without Gain Equalization or Pre-emphasis," *Technical Digest on OFC'96*, TuD6 (1996).
- [3] J. S. Lee, Y. C. Chung, and D. J. DiGiovanni, "Spectrum-sliced fiber amplifier light source for multi-channel WDM applications," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **5**, pp.1458-1461 (1993).
- [4] J. H. Han, J. S. Lee, S. S. Lee, T. Y. Yun, H. K. Kim, C. H. Lee, and S. Y. Shin, "2.5 Gbit/s transmission of spectrum-sliced fiber amplifier light source channels over 200 km of dispersion-shifted fiber," *Electron. Lett.*, **31**(12), pp.989-991 (1995).
- [5] A. J. Keating, W. T. Holloway, and D. D. Sampson, "Feedforward noise reduction of incoherent light for spectrum-sliced transmission at 2.5Gb/s," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **7**, pp.1513-1515 (1995).
- [6] Lee, J. S., Chung, Y. C., Wood, T. H., Meester, J. P., Joyner, C. H., Stone, J., Presby, H. M., and DiGiovanni D. J. "Spectrum-sliced fiber amplifier light source with a polarization-insensitive electro-absorption modulator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6**, pp.1035-1038 (1994).
- [7] D. Marcuse, A. R. Chraplyvy, and R. W. Tkach, "Effect of Fiber Nonlinearity on Long-Distance Transmission," *J. Lightwave Technol.*, **9**, pp.121-128 (1991).
- [8] A. R. Chraplyvy, "Limitations on Lightwave Communications Imposed by Optical-Fiber Nonlinearities," *J. Lightwave Technol.*, **8**, pp.1548-1557 (1990).
- [9] K. O. Hill, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki, and R. I. MacDonald, "CW three-wave mixing in single-mode optical fibers," *J. Appl. Phys.*, **49**(10), pp.5098-5106 (1978).
- [10] K. Inoue, "Four-wave mixing in optical fiber in the zero dispersion wavelength region," *J. Lightwave Technol.*, **10**, pp.1553-1561 (1992).
- [11] "Optical interfaces for multi-channel systems with optical amplifiers," ITU-T draft recommendation G. mcs, SG-15.
- [12] 한정희, 김선종, 이재승, 신상영, "분산천이 광섬유 240 km를 이용한 2.5 Gb/s $\times 4$ 채널 스펙트럼 저미어진 광섬유 증폭 광원의 전송 특성," 제6회 광자기술학술회의 논문집, pp.115-116, 1997.
- [13] K. Tsujikawa, K. Nakajima, Y. Miyajima, and M. Ohasi, "Enhancement of four-wave mixing in a tapered core fiber with uniform chromatic dispersion," *OFC'97 Technical Digest Series*, **6**, paper TuN6, pp.70-71, 1997.

A novel method to improve SNR of the spectrum-sliced incoherent light source using the four-wave mixing in a dispersion-shifted fiber

Jung-Hee Han

*Optical Transmission Section, Electronics and Telecommunications Research Institute(ETRI),
Taejon, 305-600, Korea*

Joon-Won Ko and Jae-Seung Lee

Dept. of Electronic Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 139-701, Korea.

Sang-Yung Shin

*Dept. of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology(KAIST),
305-701, Korea.*

(Received : October 16, 1997)

We have present an all-optical technique to significantly reduce the dispersion penalty of a spectrum-sliced channel in high-speed and long-distance transmissions. We have reduced the necessary optical bandwidth for the 2.5 Gb/s incoherent light transmission down to 0.1 nm by expanding the optical bandwidth of a received signal. The optical bandwidth expansion was realized using the intra-channel fiber four-wave mixing at the receiver resulting in an improvement of the signal-to-noise ratio of the received light channel. We have successfully demonstrated the transmission of a 2.5 Gb/s NRZ signal with the 0.1 nm bandwidth over a 300 km dispersion-shifted fiber. An error floor occurs at 1×10^{-5} BER without the optical bandwidth expansion. With the optical bandwidth expansion, however, the error floor decreases to less than 1×10^{-10} . The transmission penalty was less than 0.5 dB at 1×10^{-10} BER. To our knowledge, the optical bandwidth of 0.1 nm used in our experiment is the narrowest optical bandwidth reported so far.