

Self-Phase Modulation 현상과 Chirping이 10 Gbps 전송 특성에 미치는 영향

정회원 정 지 채*, 김 성 기*

10 Gbps Transmission Performance for Self-Phase Modulation and Chirping

Jichai Jeong*, Sung Kee Kim* *Regular Members*

요 약

Self-phase modulation (SPM)에 의해 발생한 chirp에 의해 향상된 전송 특성을 고려하여 송신단에서의 α 계수를 재정의 하였다. α 계수는 stimulated Brillouin scattering(SBS)을 무시할 수 있는 12.5dBm의 광입력으로 인한 SPM 현상이 존재하는 경우 송신기 자체의 α 계수에 비해 약 1 정도 줄어들었다. 이와 같이 α 계수의 감소는 송신기에서 α 계수가 positive던지 negative던지 간에 전송 특성을 향상시킬 수 있다. SPM에 의한 유효 α 계수는 10 Gbps급 초고속 전송 시스템 설계에 중요한 계수가 될 수 있다.

ABSTRACT

We have redefined the α -parameter of the extended transmitters in the presence of self-phase modulation (SPM) induced chirp. The α -parameter is effectively lowered to about 1, when the SPM effect with the launching power of 12.5dBm (maximum launching power to avoid stimulated Brillouin scattering(SBS)) is included, compared to the α -parameter of the transmitter alone. The lowered α -parameter has improved the transmission performance significantly regardless the transmitter is operated with positive or negative chirp. The SPM-induced effective α -parameter can be used as a design parameter for the high speed (10 Gbps) transmission systems.

I. 서 론

어븀 첨가된 광섬유 증폭기 (EDFA)의 도움으로 1.5 μm 파장에서 광섬유 손실을 극복하게 되었다⁽¹⁾. 따라

서, 1.3 μm 파장에서 분산이 0이 되는 표준 단일 모드 광섬유를 사용하여 1.5 μm 파장의 신호를 전송하는 경우 group-velocity dispersion (GVD)가 장거리 전송에 주요 제한 요소가 되었다. 1.5 μm 파장 대역에서는 송신기의 chirp이 전송 특성을 크게 변화시키므로, 전송 특성을 향상시키기 위한 방법으로 low chirp이나 negative chirp을 위해 변조기를 사용한 송신기가 개

* 고려대학교 전파공학과
論文番號 : 98129-0319
接受日字 : 1998年 3月 19日

발되고 있다^(2,3,4). 특히, 표준 단일 모드 광섬유를 통해 초고속 광전송 시스템에서 negative chirp은 전송 특성을 향상시키는데 도움을 준다. Negative chirp을 사용할 경우 펄스의 leading-edge에서는 파장이 길어지고(red-shift), falling-edge에서는 파장이 짧아진다(blue-shift). 1.55 μm 파장대역을 사용하는 경우 단파장(short wavelength)의 성분이 장파장(long wavelength)의 성분보다 전송 속도가 빠르므로, negative chirp은 광 펄스가 전송 될 때 펄스를 압축시키게 된다. 적절하게 negative chirp을 조정해 주게 되면, 색 분산(chromatic dispersion)에 의한 펄스의 퍼짐 현상을 제거하여 원래의 신호 파형을 그대로 복원할 수 있다. 그러므로, 분산에 의해 제한된 전송 거리는 negative chirp을 사용함으로써 연장할 수 있다. 전송 거리를 연장하는 방법으로 self-phase modulation(SPM)과 같은 광섬유의 비선형 현상을 이용할 수 있다⁽⁵⁾.

표준 광섬유에서 SPM에 의한 파장은 펄스의 leading-edge에서 길어지는 방향으로, falling-edge에서는 짧아지는 방향으로 변하게 된다. SPM에 의한 파장의 변화는 negative chirp에 의한 파장 변화와 동일한 방향이므로, SPM은 분산에 의해 제한된 전송 거리를 늘릴 수 있으며, 10 Gbps 전송 시스템에 대한 분산을 보상하기 위한 방법으로 사용될 수 있다. SPM 뿐만 아니라 chirping도 초고속 광전송 시스템을 설계하는데 고려될 수 있다. 본 논문에서는 SBS의 현상을 무시할 수 있는 최대의 12.5dBm의 광출력을 이용하여 최대의 SPM 현상이 존재할 때, 송신기의 유효 α 계수의 효과에 대해 고찰하였다. 여기서 유효 α 계수는 SPM에 의해 발생된 chirp 계수와 송신기 자체의 chirp 계수의 합성으로 정의하였다.

II. 실험과 시뮬레이션 결과

이번 실험에 사용된 전송 시스템에서 BER 특성을 측정하기 위한 구성도는 그림 1에 나타내었다. 10 Gbps Ti:LiNbO₃ 변조기는 2²³-1 길이의 전기적인 PRBS NRZ 데이터를 가지고 구동하였다. 송신기의 chirp은 변조기의 두 전극에 가해진 전압을 조정해줌으로써 변화시켰고, 송신기로부터 나오는 출력 파형의 소광비(extinction ratio)는 측정하는 동안 12 dB 이상을 유지하였다. SPM 현상과 chirping의 효과를 보기 위해서 송신기의 출력은 EDFA를 사용하여 증폭시켜 주었으며,

가변 광 감쇠기(variable optical attenuator)를 사용하여 12.5 dBm의 전력을 가지도록 조정하였다(만약 chirping의 효과를 관찰하려면 0 dBm의 전력으로 유지). SPM 효과를 최대한으로 보기 위해서 SBS에 의해서 전송 특성이 영향을 받지 않는 최대의 광 출력인 12.5 dBm을 사용하였다. 광 출력이 작은 곳에서도 SPM이 발생하지만 최대의 SPM 효과를 보기 위해서 광 출력을 최대로 고정하여 실험하였다. 재생기(regenerator)에 도달한 신호로부터 평균 수신 전력과 전송 거리를 변화시켜가면서 BER을 측정하였다. 재생기에서 decision 회로의 문턱 전압(threshold voltage)은 각 전송거리마다 10⁻⁹ BER에서 최대의 수신 감도를 가지도록 조정해 주었다. BER 측정 후에 각 전송거리마다 광 모노크로메타(optical monochromator)와 디지털 스크프를 사용해서 time resolved chirp을 측정하였다⁽⁷⁾. Chirp을 측정하기 위해서 송신기는 2⁷-1 길이의 PRBS NRZ 데이터를 사용하여 변조하였으며, α 계수는 $\alpha = -(4\pi c \delta \lambda / \lambda^2) \int (1/S)(dS/dt)$ 를 이용하여 계산하였다. 여기서 λ 는 파장이고 c는 빛의 속도, 그리고 S는 순간 광 전력(instantaneous optical power)을 의미한다.

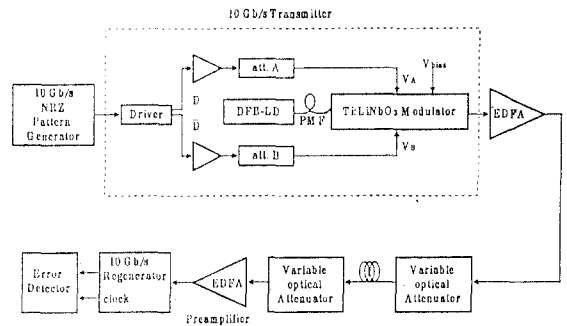


그림 1. BER 특성을 측정하기 위한 구성도. Chirp의 값은 송신기의 두 전극에 걸어주는 전압을 조정해 줌으로써 변화시켜 줄 수 있다. (att.= electrical attenuator, PMF= polarization maintaining fiber, DFB-LD= packaged DFB laser with built-in isolator, EDFA= Er-doped fiber amplifier.)

그림 2에서는 α 계수가 -1.82에서 +1.26인 경우에 대해 10⁻⁹ BER에서 수신 감도를 보여준다. 다섯 개의 실선은 SPM 효과 없이 전송 거리에 따른 수신 감도의 변화를 보여 준다. 실선으로 표시된 각 라인은 위쪽에서부터 각각 +1.26, +0.24, -0.314, -0.69, 그

리고 -1.82 의 α 계수를 가진다. 이 경우 광섬유에 들어가는 광 전력은 0 dBm으로 유지해 주었다. Negative α 계수를 사용하는 경우, 전송 거리에 따라 수신 감도가 크게 감소하지 않는데, 이는 분산에 의한 펄스의 퍼짐 현상을 transient chirp이 보상에 주기 때문이다. 그림 2에서 보여주듯이, negative α 계수의 크기가 증가함에 따라 수신 감도의 향상을 볼 수 있지만, 12 dB의 소광비를 유지하기 위해서는 α 계수를 -1.82 이하로 만들 수 없었다. 기대할 수 있듯이 positive α 계수를 사용한 경우 신호를 전송함에 따라 빠르게 수신 감도가 감소함을 알 수 있는데, 이는 분산과 positive chirp 둘 다 펄스의 퍼짐을 촉진하기 때문이다. α 계수가 $+1.26$ 인 경우 40 km 전송 후 수신 감도의 감소는 3 dB였다.

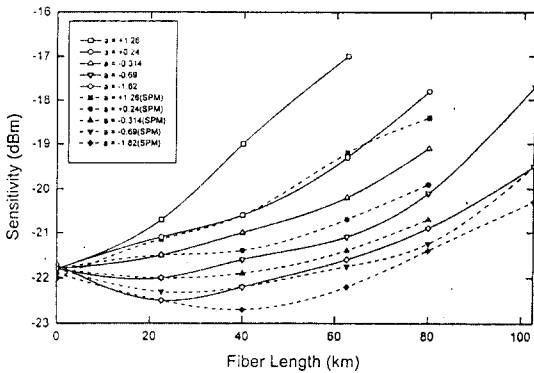


그림 2. SPM 현상이 존재하는 경우(점선)와 존재하지 않는 경우(실선), 5가지의 α 계수에 대해서 전송거리에 따라 측정된 수신 감도의 변화.

광섬유의 입력 광 전력을 $+12.5$ dBm까지 증가시킨 경우, positive α 계수를 사용하던지 negative α 계수를 사용하던지 간에 SPM 현상에 의한 수신 감도의 향상을 볼 수 있다. 이와 같이 SPM 현상이 존재하는 경우, α 계수에 의해 발생한 chirp과 SPM에 의해 발생한 chirp의 효과를 유효 α 계수로 정의함으로써 하나로 결합시킬 수 있다. 예를 들면, 송신기에서 α 계수가 $+1.26$ 인 펄스가 SPM 현상에 의해 $+0.24$ 가 된다. 이 경우 60 km 전송 후에 2.5 dB의 수신 감도의 향상을 볼 수 있다. -1.82 의 negative α 계수를 사용한 경우에도 60 km 전송 후 수신 감도가 0.5 dB 향상된다. SPM에 의해 송신기에서의 α 계수가 어느 정

도 향상되는지에 대해서 표 1에 정리하였다. 표준 광섬유에서 SPM에 의해 LiNbO_3 변조기를 사용하는 송신기에서의 α 계수는 약 1 정도 감소시킬 수 있다.

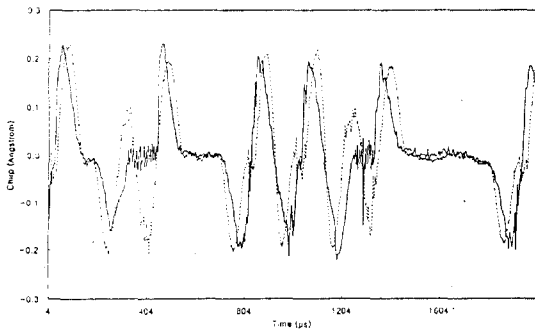
표 1. SPM에 의해 향상된 수신 감도로부터 예측한 유효 α 계수. 송신단에서 α 계수는 12.5 dBm의 출력에 의한 SPM에 의한 수신 감도의 향상으로 약 1 정도 감소된다.

$\alpha = \frac{2 \frac{d\phi}{dt}}{\frac{1 ds}{s dt}}$	$\alpha_{\text{effective with SPM}}$	$\Delta\alpha$ due to SPM
1.26	0.24	-1.02
0.24	-0.5	-0.74
-0.314	-1.24	-0.9
-0.69	-1.82	-1.1
-1.82	< -1.82	-

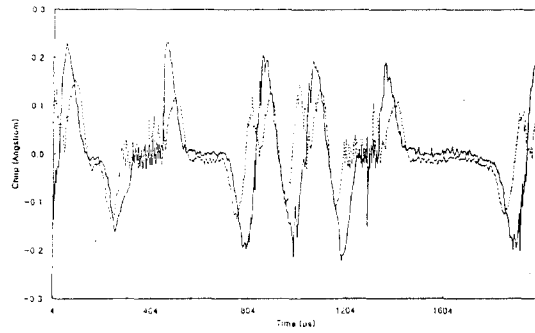
α 계수가 작은 값을 가지거나 negative 값을 가지는 경우, 수신 감도의 향상을 이해하기 위해서 '011001110101001111'의 패턴을 가지는 펄스를 표준 광섬유를 통해 전송한 후 chirping을 측정하였다. 그림 3에서는 α 계수가 -1.82 인 경우 0 km와 22 km 전송 후 SPM 현상이 있는 경우와 없는 경우에 대해 측정된 transient chirping을 보여주고 있다. 여기서 광섬유의 길이를 22 km로 선택한 이유는 전송 거리에 크게 의존하는 SPM 현상은 짧은 전송 거리에서 크게 일어나기 때문이다. 그림 3(a)에서 실선과 점선은 각각 SPM 현상이 존재하는 경우 0 km와 22 km 전송 후에 측정된 transient chirping이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, SPM 현상이 존재하는 경우 22 km 전송 후에도 0 km에서 측정된 negative transient chirping이 그대로 유지되고 있다. 표준 단일 모드 광섬유를 통해 광 신호를 전송 할 때 transient chirping이 positive 값을 가지던지 negative 값을 가지던지 간에 분산에 의해 발생한 스펙트럼 퍼짐(spectral broadening) 현상은 전송 후의 출력 신호의 chirping을 positive chirping의 방향으로 변화시키게 된다⁽⁸⁾. SPM 현상이 없는 경우, 송신단에서의 negative transient chirping은 22 km 전송 후 그 크기가 감소되었음을 그림 3(b)에서 보여준다. 이와 같이 전송 거리가 증가함에 따라 negative chirp의 크기가 줄어들어 펄스 압축(compression)을 작게 만드는 경우, SPM 현상이 존재해서 색분산

현상을 제거해 줄 경우에 비해 수신 감도가 크게 향상되지는 않았다. GVD에 의한 영향과 SPM에 의한 영향이 어느 정도의 거리까지 영향을 미치는지 알아보기 위해 T_0/β_2 로 정의된 분산 거리와 $1/\gamma P_0$ 로 정의된 비선형 거리를 계산해 보았다. 여기서 T_0 는 펄스폭이며, β_2 는 1차 GVD이다. γ 는 비선형 계수이고, P_0 는 펄스의 최대 전력을 의미한다. 이 경우 분산 거리는 622 km인데 반해 비선형 거리는 28 km로 상당히 짧음을 알 수 있다. 따라서, 12.5 dBm의 출력을 사용하면 SPM 현상이 30km 정도까지 GVD 현상에 비해 크게 일어남을 알 수 있다.

SPM 현상과 chirping이 존재하는 경우 표준 단일 모드 광섬유를 통해 광 펄스의 전송은 split-step Fourier



(a)



(b)

그림 3. SPM 현상이 존재하는 경우(a)와 존재하지 않는 경우(b), 0 km (실선)과 22 km(점선)을 전송하였을 때 측정된 transient chirping. Negative chirp을 사용한 경우 SPM은 전송 초기의 chirp을 어느 정도 유지시켜주므로 전송 특성을 향상시킬 수 있다.

방법으로 계산 할 수 있다⁽⁸⁾. 이 시뮬레이션에 사용된 계수는 다음과 같다. 2^7-1 개의 비트 패턴, 12 dB의 소광비, -1.82 부터 $+1.26$ 까지의 α 계수, 0.266 dB/km의 광섬유 손실, 17 ps/nm/km의 분산, $90 \mu\text{m}^2$ 의 effective core area, $2.36 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ 의 비선형 계수를 사용하였다. 전송 후의 광 신호는 amplified spontaneous emission (ASE) noise를 줄이기 위해서 micron optic사의 광 필터(사용 파장: 1.55 μm , 대역폭: 42 GHz, finesse: 100~200)를 통과한 후 PIN 광 다이오드로 수신하였다. 수신한 신호는 측정된 전기적인 필터(electrical filter; 10.34 GHz 대역폭, 10 GHz까지 20° 위상 변화)를 통과한 후, Nuyts 등이 제안한 잡음 모델⁽⁹⁾을 사용하여 BER 특성을 계산하였다. 그림 4에서는 α 계수가 -1.82 인 경우 SPM 현상이 있는 경우(점선)와 없는 경우(실선)에 대해서 10 Gbps로 전송 할 경우 계산한 BER 특성을 보여주고 있다. 이 그림으로부터 SPM 현상은 분산에 의한 power penalty를 약 0.2에서 0.6 dB정도 향상 시켜준다. 그림 5에서는 SPM 현상이 있는 경우와 없는 경우에 대해서 여러 가지 α 계수를 사용하여 전송 거리에 따라 10^9 BER에서 수신 감도의 변화를 계산한 결과를 보여 준다. 그림 5에서 계산한 결과는 0 km에서의 수신 감도의 값을 제외하고는 측정된 결과(그림 2)와 비슷함을 알 수 있다. 또한 실험 결과에서 보여준 것처럼 시뮬레이션에서도 SPM에 의해 똑같은 α 계수의 향상을 보여 주었다.

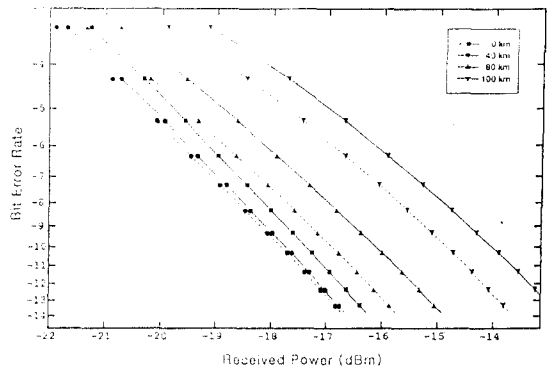


그림 4. SPM 현상이 존재하는 경우(점선)와 존재하지 않는 경우(실선), α 계수가 -1.82 인 경우 0 km, 40 km, 80 km, 100 km 전송 후 계산한 BER 특성

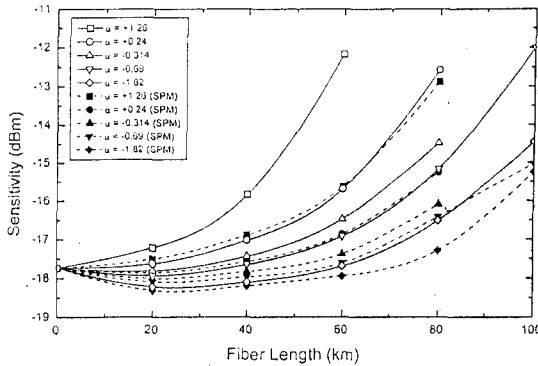


그림 5. SPM 현상이 존재하는 경우(점선)와 존재하지 않는 경우(실선)에 대해, 5 가지 α 계수를 사용하여 전송 거리에 따라 10^{-9} BER에서 수신 감도의 변화를 계산한 결과

III. 결 론

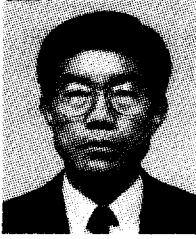
실험에 의한 BER 특성과 시뮬레이션에 의한 BER 특성을 통해 수신기에서의 수신 감도를 고려하여 SPM 현상에 의한 유효 α 계수를 얻었다. 최대의 SPM 현상이 존재할 경우 송신단에서의 α 계수는 유효 α 계수로 다시 정의할 수 있다. SPM에 기인한 유효 α 계수는 기존의 α 계수가 positive값을 가지던지 negative 값을 가지던지 간에 약 1 정도 작은 값을 가진다. 이와 같이 SPM에 의한 유효 α 계수는 초고속 전송시스템에서 전송거리를 최적화하기 위한 계수로 사용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. F. Koyama and K. Iga, "Frequency chirping in external modulators," J. of Lightwave Technol., Vol. 6, No. 1, pp. 87-92, 1988.
2. A. H. Gnauck et al., "Dispersion penalty reduction using an optical modulator with adjusting chirp," IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 3, No. 10, pp. 916-918, 1991.
3. M. Suzuki et al., "InGaAsP electroabsorption modulator for high-bit-rate EDFA system," IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 4, No., pp. 586-588, 1992.
4. A. Aoki et al., "High speed (10Gb/s) and low-

drive voltage (1V peak to peak) InGaAs/InGaAsP MQW electroabsorption-modulator integrated DFB laser with semi-insulating buried heterostructure," Electron. Lett., Vol. 28, No. 12, pp. 1157-1158, 1992.

5. M. Stern et al., "Self-phase modulation and dispersion in high data rate fiber-optic transmission systems," J. of Lightwave Technol., Vol. 8, No. 7, pp. 1009-1016, 1990.
6. N. Suzuki et al., "Simultaneous compensation of laser chirp, Kerr effect, and dispersion in 10Gb/s long-haul transmission system," J. of Lightwave Technol., Vol. 11, No. 9, pp. 1486-1494, 1993.
7. J. Jeong et al., "A new method of accurately determining transient chirp parameter of high speed digital lightwave transmitters," Electron. Lett., Vol. 33, No. 7, pp. 605-606, 1997.
8. G. P. Agrawal, Nonlinear fiber optics, 2nd edition, Academic press, 1995.
9. R. J. Nuyts et al., "Effect of transmitter speed and receiver bandwidth on the eye margin performance of a 10Gb/s optical fiber transmission system," IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 9, No. 4, pp. 532-534, 1997.



정지채(Jechai Jeong) 정회원

1980년 2월 : 고려대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1982년 2월 : 한국과학기술원 전자공학과 졸업(공학석사)

1988년 5월 : 미국 Carnegie Mellon University 전자공학과 졸업(공학박사)

1982년 3월 ~ 1985년 8월 : 한국과학기술연구소(KIST) 연구원

1988년 6월 ~ 1993년 8월 : AT&T Bell Labs. (Murray Hill) 연구원

1993년 9월 ~ 1995년 2월 : 포항공대 전자전기공학과 조교수

1995년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 전파공학과 부교수

1996년 9월 ~ 현재 : IEEE Senior member

※ 주관심분야 : 광전송, 광전 부품

e-mail : Jcj@kucn.korea.ac.kr



김성기(Sung Kee Kim) 정회원

1996년 2월 : 고려대학교 전파공학과 졸업(공학사)

1998년 2월 : 고려대학교 대학원 전파공학과 졸업(공학석사)

1998년 2월 ~ 현재 : 고려대학교 대학원 전파공학과 박사과정 재학