

주기적 신호를 이용한 단일모드 광섬유의 상호 위상변조 해석

이종형*

Analysis of Cross-Phase Modulation using a periodic signal in a Single-Mode Fiber

Jong-Hyung Lee*

Department of Electronic Engineering, Dongeui University, Busan, 614-714, Korea

요 약

단일모드 광섬유를 사용한 WDM 시스템에서 CPM에 의한 성능저하를 이론적으로 분석하기 위해 펌프-프로브 구조에서 펌프신호가 주기적이라고 가정하였다. 주기적 펌프신호는 '0'과 '1'이 교대로 발생하는 경우를 모델링한 것으로 CPM에 의한 EOP를 이론적으로 예측할 수 있게 한다. 유도된 이론적 결과를 수치해석 결과와 비교하였으며, 그 결과 표준 단일모드 광섬유를 사용한 경우는 넓은 영역의 채널 간격 Δf 에 대해 유도된 이론식이 수치해석의 결과와 잘 일치하고 분산천이 광섬유를 사용한 경우는 $\Delta f > 100\text{GHz}$ 에서 일치하였다. 분산천이 광섬유를 사용하여 $\Delta f < 100\text{GHz}$ 인 경우는 CPM뿐만 아니라 FWM에 의한 성능저하가 두드러지므로 이론적 결과와 수치 해석의 결과 사이의 편차가 증가한다. 펌프-프로브 구조가 광섬유의 비선형성중 CPM의 영향을 주로 분석하기 위한 것이므로 이 결과는 예상대로이다.

ABSTRACT

The pump-probe scheme is used to analyze the cross-phase modulation penalty of a single-mode fiber in a WDM system. The pump signal is assumed to be a periodically modulated input like a raised sinusoidal. The periodic signal models an alternating bit sequence, and leads to an analytical expression of CPM penalty which is measured by EOP. The derived expression shows good agreement with numerical results in conventional single-mode fiber systems over a wide range of channel spacing, Δf . In dispersion-shifted fiber systems when $\Delta f < 100\text{GHz}$, the derived expression shows increased discrepancy with the numerical results due to the increased FWM. This is not a surprising because the pump-probe scheme is used to analyze system performance degradation due to CPM.

키워드 : 상호 위상 변조, 광섬유의 비선형성, 첫 워크-오프 근사, 펌프-프로브 해석, WDM 시스템

Key word : CPM, fiber nonlinearity, first walk-off approximation, pump-probe analysis, WDM system

Received 27 August 2015, Revised 16 September 2015, Accepted 30 September 2015

* Corresponding Author Jong-Hyung Lee(E-mail:jonghlee@deu.ac.kr, Tel:+82-51-890-1693)

Department of Electronic Engineering, Dongeui University, Busan 614-714, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.12.2963>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

다중 채널을 사용하는 WDM시스템에서 단일모드 광섬유의 비선형 특성은 채널간의 상호간섭을 일으켜 시스템의 성능을 저하시킨다. 하지만 비선형 특성은 이론적으로 해석하기 힘들어 수치해석에 의존하여 분석하는 경우가 많다. 본 논문에서는 주기적인 신호를 사용하여 비선형 특성 중의 하나인 상호위상 변조(CPM)를 분석하고자 한다.

CPM은 WDM시스템의 채널수에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다[1]. 따라서 CPM은 그림 1과 같은 2채널의 펌프-프로브(pump-probe) 구조를 사용하여 분석하는 경우가 많다[2-5]. 본 논문에서는 펌프신호가 정현파와 같은 주기적인 신호일 경우 수신된 프로브 신호의 변동을 해석적으로 구하고, 그 결과를 수치해석을 사용한 분석결과와 비교한다. 또한 주기적 신호에 의한 프로브 신호의 변동과 실제 랜덤 비트 패턴을 사용한 WDM 시스템의 눈열림 페널티를 비교하여 주기적 신호를 사용한 해석적 결과의 유용성 범위를 알아본다. 주기적 신호는 상승 정현파로 모델링할 수 있으며 정확한 파형보다는 눈 열림 페널티(EOP, eye-opening penalty)와 같은 성능평가 항목을 예측하고자 할 때 유용하게 사용할 수 있고, 단일 채널 광통신시스템의 성능분석을 위해 이용되기도 하였다[6].

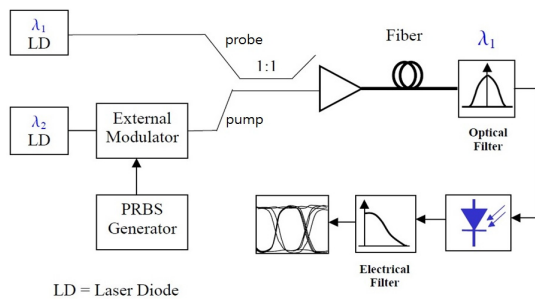


Fig. 1 pump-probe configuration

II. 주기적 신호를 사용한 펌프-프로브 구조의 이론적 해석

단일모드 광섬유로 전송되는 두 채널의 광신호는 아래와 같이 결합된 비선형 슈뢰딩거 방정식으로 표현할

수 있다[7].

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_{21}\frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2}A_1 = j\gamma_1[|A_1|^2 + 2|A_2|^2]A_1 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + d\frac{\partial A_2}{\partial t} + \frac{i}{2}\beta_{22}\frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2}A_2 = j\gamma_2[|A_2|^2 + 2|A_1|^2]A_2 \quad (1b)$$

워크 오프(walk-off) 파라미터 d 는 분산계수 D 와 다음과 같은 관계에 있다.

$$d = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D(\lambda)d\lambda \approx D|\lambda_2 - \lambda_1| = D\Delta\lambda \quad (2)$$

펌프-프로브 구조에서 λ_1 에 위치한 프로브 신호는 약한 전력(P_1)의 일정한 신호이고, 펌프 신호는 중심파장이 λ_2 이며 프로브 신호보다 훨씬 전력이 큰 변조된 신호이다.

CPM을 근사적으로 해석한 ‘첫 워크오프 근사(first walk-off approximation)’ 방법은 첫 워크오프 거리(L_w)까지는 분산의 영향을 무시할 수 있고, 이 후에는 비선형성을 무시할 수 있다는 것이다[3,4]. 이 근사방법에 의하면 프로브 신호는 L_w 전까지 CPM에 의해 다음과 같은 위상변화만 발생한다.

$$\phi_1(z, t) = \frac{2\gamma_1}{D\Delta\lambda} \int_{t-D\Delta\lambda z}^t |A_2(0, \zeta)|^2 \exp\left[-\frac{\alpha}{D\Delta\lambda}(t-\zeta)\right] d\zeta \quad (3)$$

펌프 신호를 다음과 같은 상승 정현파인 주기적 신호로 가정하자.

$$A_2(0, t) = \sqrt{P_2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T_b}t\right) \right) = \sqrt{P_2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\omega_p t) \right) \quad (4)$$

여기서 T_b 는 비트율이고 $P_2 \gg P_1$ 이다.

식(4)와 같이 주기적 신호로 표현된 펌프 신호는 ‘...010101...’과 같이 ‘0’과 ‘1’이 교대로 발생하는 경우를 모델링한다.

펌프 신호를 식(4)와 같이 주기적이라고 가정하면, 프로브 신호의 위상 변화(식(3))는 근사적으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_1(z, t) \approx \beta_w \sin(\omega_p t + \psi) + \phi_{1c} \quad (5)$$

여기서 $\beta_w = \frac{\gamma_1 P_2}{\sqrt{\alpha^2 + (D\Delta\lambda\omega_p)^2}}$, $\psi = \tan^{-1} \frac{\alpha}{D\Delta\lambda\omega_p}$ 이고 ϕ_{1c} 는 상수이다.

식(3)은 주기 신호이고 $z > L_w$ 에서 첫 위크오프 근사에 따라 광섬유의 비선형성을 무시하면 프로브 신호는 역시 주기신호가 된다. 따라서 프로브 신호를 푸리에 급수를 이용하여 표현하는 것이 가능하고 푸리에 계수 $C_n(z)$ 는 식(1)에서 비선형성을 무시하면 쉽게 구할 수 있다. 그 결과는 다음과 같다.

$$C_n(z) = e^{-\frac{1}{2}\alpha(z-L_w)} \exp\left(\frac{j}{2}\beta_{21}n^2\omega_p^2(z-L_w)\right) C_n(L_w), \quad z > L_w \quad (6)$$

여기서 $C_n(L_w)$ 는 $z=L_w$ 에서 푸리에 급수의 계수이다. 만약 ψ 가 π 에 비해 작다면 $C_n(L_w)$ 은 제1종 베셀함수, $J_n(\beta_w)$,로 나타낼 수 있다. 따라서 $z > L_w$ 에서 광섬유의 비선형으로 인해 프로브 신호에 일어나는 세기의 변화를 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$|A_1(z, t)|^2 \approx P_1 e^{-\alpha z} \left| \sum J_n(\beta_w) \exp\left(\frac{j}{2}\beta_{21}n^2\omega_p^2(z-L_w)\right) e^{jn\omega_p t} \right|^2 \quad (7)$$

비트율이 정해져있을 경우, 광섬유의 분산계수가 크거나 혹은 채널 간격이 넓을수록 식(7)은 더 정확한 결과를 예측할 것이다. 이는 $|D\Delta\lambda|$ 가 클수록 $\psi = \tan^{-1} \frac{\alpha}{D\Delta\lambda\omega_p}$ 의 값이 작아서 근사해석이 좀 더 정확해지기 때문이다.

III. 시뮬레이션 결과와 비교

그림 2는 식(7)의 근사적 결과를 분할구간 푸리에 방법(split-step Fourier method)을 사용하여 MATLAB으로 수치 해석한 결과와 비교한 것이다. 채널 간격(Δf)은 100GHz, 비트율은 10Gb/s, $\alpha=0.2\text{dB/km}$, $\gamma=2 \times 10^{-3} [1/(\text{km}\cdot\text{mW})]$, $P_1=0.2\text{mW}$, $P_2=20\text{mW}$ 를 가정하였으며

전송거리 $z=100\text{km}$ 이고 광섬유의 손실은 수신기의 전치증폭기에서 모두 보상된다고 가정하였다.

표준 단일모드 광섬유의 경우 분산계수의 값이 커서 ($D=+17\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$) 식(7)로 예상되는 결과가 수치해석에 의한 시뮬레이션 결과와 잘 일치한다. 반면 분산천이 광섬유($D=-2\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$)와 같이 분산계수의 절대값이 낮은 경우는 예상대로 정확도가 떨어진다. 그 이유는 $\psi \ll \pi$ 일수록 제1종 베셀함수로 근사화한 식(7)의 결과가 더 정확하기 때문이다. 표준 단일모드 광섬유의 경우 $\psi=0.101 (\ll \pi)$ 이지만, 분산천이 광섬유의 경우는 $\psi=0.548$ 이므로 시뮬레이션 결과와 오차가 커졌다.

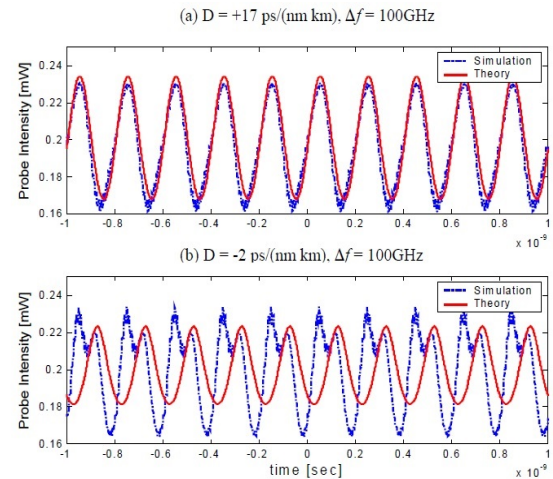


Fig. 2 Intensity fluctuations of the probe signal due to sinusoidal pump signal (a) $D=+17\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, (b) $D=-2\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$

하지만 ψ 가 클 경우(즉 $|D\Delta\lambda|$ 가 작을 경우) 또 다른 비선형 현상인 FWM(four-wave mixing)이 심해져 CPM에 의한 성능저하에 못지않거나 더 심한 성능저하를 유발할 수 있다. FWM의 영향을 살피기 위해 분산천이 광섬유를 사용한 3 채널의 WDM 시스템에서 EOP (eye-opening penalty)를 채널 간격에 따라 시뮬레이션하여 단일채널의 경우와 함께 그림 3에 나타내었다. 채널간격은 중심 채널을 기준으로 양쪽 채널의 채널간격이 같은 경우와 10%씩 오프셋을 주어 채널간격이 일정하지 않은 경우를 비교하였다. 채널간격이 일정하지 않은 경우는 FWM이 억제되어 EOP는 주로 CPM에 의해 영향을 받게 된다[8,9]. 그림 3은 분산천이 광섬유를 사

용한 경우는 채널간격이 작을수록 채널간격이 일정하지 않은 경우의 EOP의 개선이 뚜렷하므로 FWM이 심하다는 것을 나타낸다. 따라서 CPM의 영향을 분석하기 위한 펌프-프로브 해석은 채널간격이 좁은 분산전이 광섬유를 사용한 경우의 성능저하를 추정하기 위해 사용하기는 힘들다는 것을 알 수 있다.

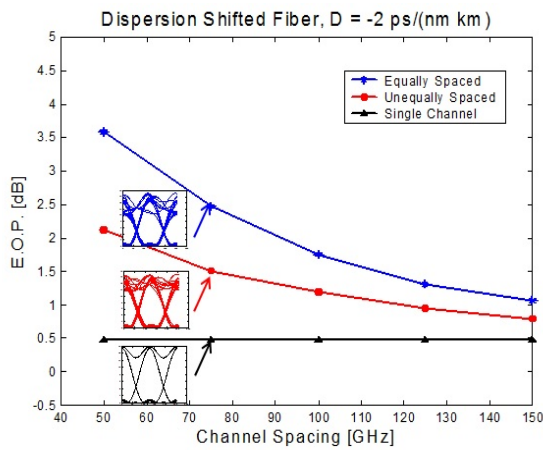


Fig. 3 EOP as a function of channel spacing after $z=100\text{km}$

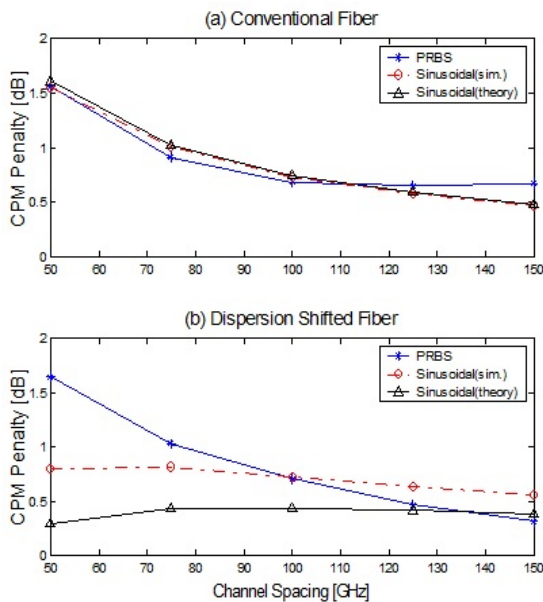


Fig. 4 CPM penalty (a) conventional single-mode fiber (b) dispersion-shifted fiber

마지막으로 그림 4는 식(7)에서 예측한 CPM에 의한 성능저하와 3 채널 WDM 시스템에서 시뮬레이션한 EOP를 비교한 것이다. 표준 단일모드 광섬유를 사용한 경우 펌프-프로브 구조에서 주기적 신호를 사용하여 근사적으로 구한 결과가 PRBS를 사용한 3 채널 WDM 시스템의 EOP와 넓은 범위에서 잘 일치하고 있다.

분산전이 광섬유를 사용한 경우는 $\Delta f < 100\text{GHz}$ 에서는 오차가 커진다. 이는 펌프-프로브 구조가 CPM의 영향을 보기위한 고안된 구조이므로 FWM에 의한 성능저하가 심한 경우는 EOP를 식(7)을 이용하기 어렵다는 것을 말한다.

IV. 결론

WDM 시스템의 설계 단계에서 광섬유의 비선형성에 의한 성능저하를 미리 예측할 필요가 있다. 펌프-프로브 구성은 정확한 파형의 예측보다는 EOP와 같은 성능저하를 예측하기 위해 사용하므로 주기적 펌프신호에 의한 프로브 신호의 변화를 관찰하여 CPM 페널티를 간단히 예측할 수 있다. 펌프신호가 '0'과 '1'이 교대로 발생한다고 가정한다면 상승 정현파와 같은 주기적 신호로 모델링할 수 있으며, 근사적으로 프로브 신호를 변화를 이론적으로 계산할 수 있으며 따라서 CPM에 의한 페널티를 예측할 수 있다.

유도된 계산식은 수치해석 결과와 비교하였으며 표준 단일모드 광섬유의 경우는 넓은 범위의 채널 간격에서 잘 일치하였다. 하지만 분산전이 광섬유는 채널간격이 $\Delta f < 100\text{GHz}$ 일 경우는 FWM으로 인해 오차가 심해진다. 따라서 펌프-프로브 구성에서 계산된 성능예측은 CPM이 지배적일 경우는 유용하지만, FWM이 중요한 성능저하 요인인 시스템에서는 그렇지 않음을 알 수 있었다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Dong-eui University Foundation Grant 2015.

REFERENCES

[1] D. Marcuse, A. R. Chraplyvy, and R. W. Tkach, "Dependence of cross-phase modulation on channel number in fiber WDM systems," *Journal of Lightwave Technology*, vol.12, no.5, pp.885-890, May 1994.

[2] L. Rapp, "Experimental investigation of signal distortions induced by cross-phase modulation combined with dispersion," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.9, no.12, pp.1592-1594, December 1997.

[3] M. Shtaif, "Analytical description of cross-phase modulation in dispersive optical fibers," *Optics Letters*, vol.23, no.15, pp.1191-1193, August 1998.

[4] M. Shtaif and M. Eiselt, "Analysis of intensity interference caused by cross-phase modulation in dispersive optical fibers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.10, no.7, pp.979-981, July 1998.

[5] H. J. Thiele, R. I. Killely, and P. Bayvel, "Pump-probe investigation of cross-phase modulation in standard-fibre, dispersion compensated WDM recirculating loop," *Conference on Lasers and Electro-Optics*, pp.305-306, May, 1999.

[6] J. H. Lee et al, "Analysis of System Performance Degradation Using Sinusoidally Modulated Signal in Optical Fiber Communication Systems," *Journal of the Optical Society of Korea*, vol.8, no. 2, pp.59-64, June 2004.

[7] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 4th ed. Second Ed., Academic Press, San Diego, 2007.

[8] F. Forghieri, R. W. Tkach, and A. R. Chraplyvy, "WDM systems with unequally spaced channels," *Journal of Lightwave Technology*, col.13, no.5, pp.889-897, May 1995.

[9] X. Miao, "Unequally spaced channels for upgrading WDM system from 3-channel to 10-channel preserving no FWM crosstalk," *Optical Fiber Technology*, vol.2, pp.347-350, 1996.



이종형(Jong-Hyung Lee)

1987년 2월 : 연세대학교 전자공학과(공학사)
 1990년 2월 : 연세대학교 전자공학과(공학석사)
 2000년 5월 : Virginia Tech (공학박사)
 1990년 1월 ~ 1994년 6월 : (주)대우 반도체 사업본부
 2000년 5월 ~ 2001년 5월 : Principal R&D Engineer, Sprint ATL
 2001년 5월 ~ 2002년 2월 : System Engineer, Opthos
 2002년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 전자공학과
 ※관심분야 : 광통신, 통신 시스템 설계