

비영 분산 천이 광섬유를 갖는 WDM 시스템에서 광 위상 공액기의 최적 파라미터를 이용한 비트 에러율 개선

김은미* · 이성렬*

*목포해양대학교

Improvement of Bit Error Rate using the Optimal Parameters of Optical Phase Conjugator in WDM System with Non Zero - Dispersion Shifted Fiber

Eun-Mi kim* · Seong-Real Lee**

*Mokpo National Maritime University

E-mail : reallee@mmu.ac.kr

요 약

광 전송로로 비영 분산천이 광섬유 (NZ-DSF ; Non Zero - Dispersion Shifted Fiber)를 이용한 8×40 Gbps WDM 시스템에서 모든 채널을 효과적으로 보상할 수 있는 광 위상 공액기 (OPC ; Optical Phase Conjugator)의 최적 위치와 광섬유의 최적 분산 계수 값을 도출하는 수치적 방법을 제안하였다. 이 방법의 유용성을 확인하기 위하여 도출된 두 최적 파라미터를 갖는 시스템에서의 비트 에러율 (BER ; Bit Error Rate) 특성을 현재 일반화된 MSSI (Mid-Span Spectral Inversion)에서의 BER 특성과 비교하였다. 최적 파라미터들을 갖는 OPC를 WDM 시스템에 적용하게 되면 채널 간 파워 페널티를 4배 이상으로 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

The numerical methods of finding the optimal position of optical phase conjugator (OPC) and the optimal fiber dispersions are proposed, which are able to effectively compensate overall channels in 8×40 Gbps WDM system with non zero - dispersion shifted fiber (NZ-DSF) as an optical fiber. And BER characteristics in the system with two induced optimal parameters are compared with those in the system with the currently used mid-span spectral inversion (MSSI) in order to confirm the availability of the proposed methods. It is confirmed that the applying two induced optimal parameters into WDM system contribute to reduce power penalty to 4 times than that of WDM system with the conventional MSSI.

키워드

WDM 전송 시스템, Optical Phase Conjugator, Optimal parameters, BER 특성

1. 서 론

다채널 WDM 전송 시스템에서는 DSF의 비선형 특성, 특히 4-광파 혼합 현상 (FWM ; Four Wave Mixing)에 의한 심각한 누화(Crosstalk)가 발생되고, 이의 증가는 채널 당 광의 세기를 제한하고, 따라서 전송 거리를 제한하게 되므로 WDM 전송 시스템으로 확장할 때 문제를 야기할 우려가 있다. FWM 현상은 색 분산이 클수록 효율이 작아지게 되므로 ITU-T에서는 영 분산 대역을 1,550nm 대역의 전후로 이동시킨 새로운 광섬유인 비영 분산 천이 광섬유 (NZ-DSF ; Non

Zero DSF)의 규격화를 진행하고 있다[1].

그러나 장거리 전송을 위해 FWM 현상이 감소되더라도 NZ-DSF에 EDFA 등의 광섬유 증폭기가 결합되면 광 신호의 고전력화에 기인하여 비선형 효과 중 자기 위상 변조 (SPM ; Self Phase Modulation), 상호 위상 변조 (XPM ; Cross Phase Modulation) 등에 의해 시스템의 비트율-전송 거리 곱 (bit rate-distance product)에서 한계를 나타낼 수 밖에 없다 [2]. 이러한 한계를 극복하기 위해 광 위상 공액기 (OPC ; Optical Phase Conjugator)를 전체 전송 거리의 중간에 위치시켜 광 신호의 왜곡을 보상하는 MSSI

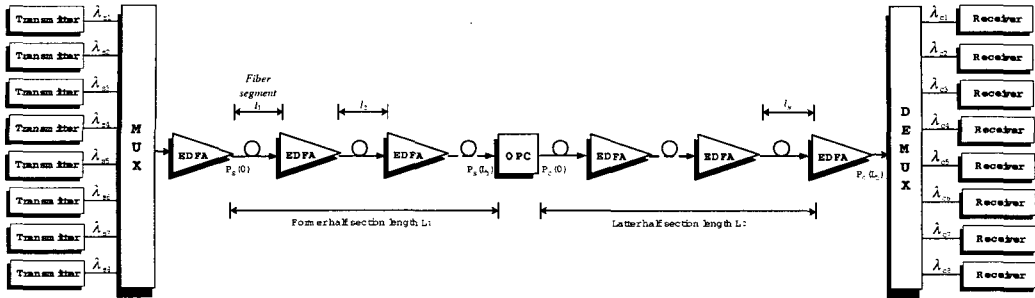


그림 1. 8-채널 WDM 시스템
Fig. 1. 8-channels WDM system.

(Mid-Span Spectral Inversion) 방식이 제안되었다 [3]. 그러나 이 기술을 실제적인 WDM 전송 시스템에 적용하려면 OPC를 중심으로 두 전송 구간에서의 광 전력 분포와 분산량이 서로 대칭을 이루어야 한다[4]. 따라서 OPC를 이용하여 모든 채널들을 양호하게 보상하기 위해서는 첫 번째 문제 해결에 필적할 만한 다른 방법을 모색해 보아야 한다.

본 논문에서는 OPC를 중심으로 광 전력 분포와 분산량을 대칭으로 만드는 방법을 대체할 수 있는 수치적 방법을 제안하고자 한다. 즉 광 전송로로 NZ-DSF를 이용한 WDM 시스템에서 모든 채널들을 효과적으로 보상할 수 있는 OPC의 최적 위치와 각 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값을 수치적으로 도출하여 이들 파라미터 값을 갖는 WDM 시스템에서의 비트 에러율 (BER ; Bit Error Rate) 특성을 OPC가 전체 전송로 중간에 위치하고 두 광섬유 구간의 분산 계수가 동일한 MSSI에서의 BER 특성과 비교해 보도록 하겠다. 본 연구에서 가정된 WDM 시스템은 채널 비트율이 40 Gbps인 8-채널 전송 시스템이고, 각 채널의 강도 변조 파형 형식은 NRZ로 모델링 하였다. 시뮬레이션은 현재 널리 사용되고 있는 단계 분할 푸리에 (SSF ; Split-Step Fourier) 방법을 이용하여 수행하였다.

II. WDM 시스템의 모델링

같은 편광을 갖고 광섬유를 동시에 전송하는 8 채널 WDM 시스템에서 $A_j(z, t)$ 를 $|A_j|^2$ 의 순시 광 전력에 의해 정규화된 천천히 변하는 j번째 복소 포락선이라 하면 $A_j(z, t)$ 는 아래의 비선형 슈뢰딩거 방정식을 만족하며 전파한다[5].

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_j}{\partial z} = & -\frac{\alpha}{2} A_j - \frac{j}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_j}{\partial T^2} \\ & + \frac{1}{6} \beta_{3j} \frac{\partial^3 A_j}{\partial T^3} \\ & + i x_{j1} |A_j|^2 A_j + 2 i x_{j2} |A_k|^2 A_j \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 α 는 광섬유의 손실 계수, λ_j 는 j번째 채널 신호 파장, β_{2j} 는 광섬유의 색 분산 파라미터, β_{3j} 는 3

차 색 분산 파라미터, x_j 는 비선형 계수, $T=t-z/v_j$ 이다. 식 (1) 우변의 마지막 두 항은 각각 SPM과 XPM을 유도한다. 여기서 마지막 항, 즉 XPM 항은 수치적 분석 과정을 간단히 하기 위하여 무시하였다.

그림 1은 OPC가 전체 전송 거리의 중간에 위치한 WDM 시스템의 전체 구성을 나타낸 것이다 (즉 MSSI). 총 전송 거리는 상대적인 길이 L_1 과 L_2 의 두 전송 구간(section)으로 나뉜다. 각 전송 구간은 50 km 간격(l)마다 10개의 EDFA로 연결된다. 본 논문에서의 시뮬레이션을 위해 가정된 광섬유 파라미터들은 표 1에 요약해 놓았다[6].

표 1. 광섬유 시뮬레이션 파라미터
Table. 1. Simulation parameters of fibers

파라미터	기호 및 파라미터 값
형태	NZ-DSF
손실 계수	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.2$ dB/km
분산 계수	$D_{1x} = 6$ ps/nm/km
비선형 굴절 계수	$n_2 = 2.5 \times 10^{-26}$ km ² /W
유효 코어 직경	$A_{eff} = 72$ μ m ²

Watanabe와 Shirasaki는 MSSI에서 완벽한 보상 조건을 아래와 같이 거리 z 의 함수로 일반화하였다[3].

$$\frac{\beta_{2j}(z_1')}{P_j(z_1') x_{j1}(z_1')} = \frac{\beta_{2j}(z_2')}{P_j(z_2') x_{j1}(z_2')} \quad (2)$$

이 관계식은 상용 위치 $-z_1'$ 과 z_2' 에서 분산과 비선형성이 동일한 비율로 형성되지만 하면 완벽한 보상이 이루어진다는 것을 의미한다. 달리 말해 이것은 완벽한 보상을 위해서는 신호 파장과 관련하여 OPC가 전체 전송 거리 중간에 반드시 위치할 필요가 없고, 각 광섬유 구간의 분산 계수들도 반드시 서로 같은 필요가 없음을 의미한다. 그러나 식 (2)는 WDM 채널들의 파장이 다양하기 때문에 모든 파장에 적용 가능한 공통의 OPC 위치와 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수 값을 찾는 것이 쉽지 않음을 의미하기도 한다. 이에 본 연구에서는 수치적 분석을 통해 모든 WDM 채널을 최선으로 보상할 수 있는 OPC의 최적 위치와 최적 광섬유 분산 계수 값을 도출해 보고자 한다. 최적 OPC 위치는 OPC를 증폭기의 한 간격 (± 25

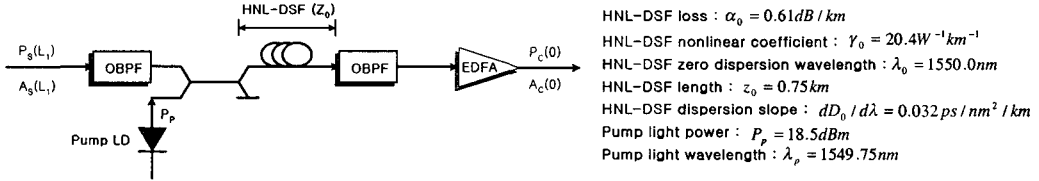


그림 2. HNL-DSF를 이용한 OPC
 Fig. 2. OPC using HNL-DSF

km) 내에서 변화시키면서 이 OPC 위치, z_{OPC} 에 대한 특정 채널들의 보상 특성을 분석해서 찾을 수 있을 것이다. 여기서 OPC 위치와 전체 전송 거리의 중간 위치, z_{mid} 의 차이를 OPC 위치 편차 Δz 라고 하자 (즉 $\Delta z = z_{OPC} - z_{mid}$). 또한 각 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값은 각 광섬유 구간의 분산 계수, $D_{1x}(x=1,2)$ 를 10% 내에서 변화시키면서 이에 대한 특정 채널들의 보상 특성을 분석해서 찾을 수 있을 것이다. 여기서 두 광섬유 구간의 분산 계수 값의 차이를 분산 계수 편차 ΔD_{1x} 로 정의한다. 즉 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수 편차는 $\Delta D_{11} = \Delta D_{11} - \Delta D_{12}$ 로, 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수 편차는 $\Delta D_{12} = \Delta D_{12} - \Delta D_{11}$ 로 정의한다.

그림 1의 송신부에 있는 각 레이저 다이오드는 40 Gbps의 128(=2⁷) 의사 랜덤 비트열 (PRBS ; pseudo random bit sequence)에 의해 외부적으로 변조되는 것으로 가정하였다. 또한 외부 변조기로부터 발생하는 출력 신호는 NRZ 형식의 2차 가우시안(Gaussian) 펄스로 가정하였다.

그림 2는 HNL-DSF (Highly-Nonlinear Dispersion Shifted Fiber)를 이용한 OPC의 구조와 파라미터 값들을 나타낸 것이다. 변환 효율 (η , conversion efficiency)은 FWM 곱(product) 전력 대 입력 신호 전력의 비로 정의된다. 그림 2에 나타난 OPC에 대한 η 의 3-dB 대역폭은 48 nm (1,526~1,574 nm)로 얻어졌다.

본 연구에서는 FWM 효과에 기인하는 채널 간 누화를 제거하기 위하여 WDM 채널 간 파장 간격을 모두 다르게 설정하는 F. Forghieri 등에 의해 제안된 방법[7]에 따라 8개의 채널 파장이 η 의 3-dB 대역폭에 들어가도록 각각 1550.0, 1550.7, 1551.7, 1552.5, 1553.4, 1553.9, 1550.0, 1555.6 nm로 설정하였다.

그림 1의 직접 검파 수신기는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 EDFA 전치 증폭기, 1 nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, Butterworth 필터 구조의 펄스 정형 필터, 마지막으로 판정 회로로 구성되는 것으로 가정하였다.

BER은 참고 문헌 [8]에 기초를 둔 수신 평균 전력에 대한 '1'과 '0' 각각의 평균 눈 감김 정도 (eye closure factor)를 이용하여 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$BER = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{2} \left\{ \frac{(1 - c_{ISI}^+ - \tau) I_{s,av}}{\sigma_{mark}} \right\} \right] + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{2} \left\{ \frac{(\tau - c_{ISI}^-) I_{s,av}}{\sigma_{space}} \right\} \right] \quad (3)$$

여기서 $I_{s,av}$ 는 광 신호의 시간 평균 전력의 등가 전류이고, τ 는 수신기 판별 회로에 설정된 판별 문턱치 (decision threshold level)이다. 그리고 σ_{mark} 과 σ_{space} 는 잡음 전력들과 관련된 각각 '1' 신호와 '0' 신호에 대한 잡음의 표준 편차이고, c_{ISI}^+ 과 c_{ISI}^- 는 각각 '1'과 '0'의 평균 눈 감김 정도이다.

III. 결과 및 검토

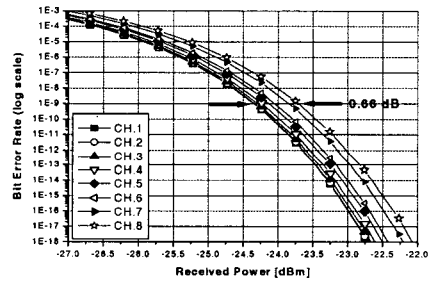


그림 3. MSSI가 채택된 시스템의 BER 특성
 Fig. 3. BER in WDM system with MSSI.

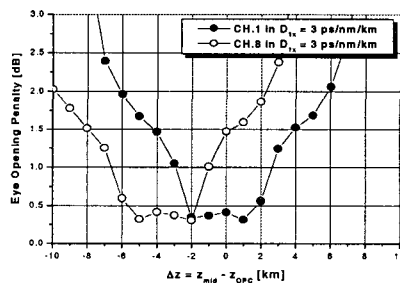


그림 4. Δz 에 따른 눈 열림 페널티
 Fig. 4. EOP as a function of Δz .

그림 4는 OPC가 전체 전송로 중간에 위치하고 두 광섬유 구간의 분산 계수 값이 모두 6 ps/nm/km로 고정된 경우 (MSSI 경우)의 8개 채널의 BER 특성을 보여주고 있다. 10⁻⁹ BER을 얻을 수 있는 수신 전력을 감도(sensitivity)로 정의하면 감도에서의 채널간 전력 페널티가 약 0.66 dB인 것을 알 수 있다.

그림 5는 모든 WDM 채널을 비슷한 품질로 보

상할 수 있는 최상의 OPC 위치를 찾기 위해 OPC 위치 편차에 따른 채널 1과 8의 눈 열림 패널티 (EOP ; Eye Opening Penalty)를 나타낸 것이다. 여기서 채널 1과 8을 선택한 이유는 둘 사이의 파장 차이가 가장 커서 전송 품질의 차이가 현격하게 나타날 것이기 때문이다. 그림 7로부터 두 채널 사이의 EOP 차이가 가장 작게 나타나는 OPC 위치는 498 km인 것을 알 수 있다.

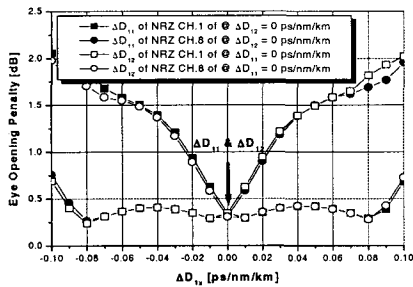


그림 5. OPC가 최적 Δz에 위치하는 경우 ΔD1x에 따른 눈 열림 패널티

Fig. 5. EOP as a function of ΔD1x when the OPC placed at the optimal.

그림 6은 그림 5의 결과로부터 얻은 최적 Δz에서의 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수편차 (ΔD1x)가 0 ps/nm/km일 때 나머지 광섬유 구간의 분산 계수 편차에 따른 채널 1과 8의 EOP를 나타낸 것이다. NZ-DSF의 모든 분산 계수 값에서 ΔD11=0 ps/nm/km일 때의 최적 ΔD12 값은 0 ps/nm/km이고, ΔD12=0 ps/nm/km일 때의 최적 ΔD11 값도 0 ps/nm/km로 얻어졌다. 즉 NRZ 전송의 경우 최적 Δz에서의 WDM 채널들의 양호한 전송을 위한 두 광섬유 구간의 분산 계수 차이는 없어야 한다.

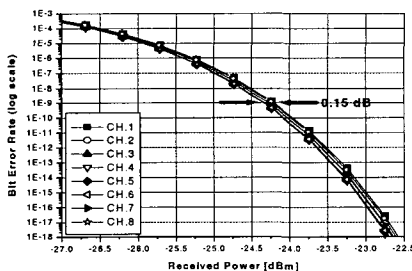


그림 6. 그림 6의 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템에서의 BER 특성

Fig. 6. BER characteristics in WDM system with the optimal parameters obtained in Fig. 5.

그림 7은 그림 6의 결과가 실제 WDM 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 6의 결과, 즉

최적 파라미터들이 적용된 WDM 시스템에서의 BER 특성을 나타낸 것이다. 최적 파라미터들이 WDM 시스템에 적용되면 MSSI(그림 4의 경우)에 비해 전력 패널티가 4배 이상 줄어드는 것을 알 수 있다.

IV. 결론

지금까지 OPC를 중심으로 광 전력 분포와 분산량을 대칭으로 만드는 방법을 대체할 수 있는 수치적 방법을 살펴보았다.

OPC를 이용한 WDM 시스템을 통해 고속 채널 모두를 양호한 품질로 장거리 전송하고자 한다면 OPC의 위치와 광섬유의 분산 계수가 최적 값으로 설정되어야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 얻어진 결과를 OPC를 이용한 WDM 전송 시스템에 적용하면 본질적으로 발생되어 보상 효과를 제한하는 광 전력 분포와 분산량의 비대칭 문제를 해소할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] ITU Recommendation "Characteristics of a non-zero dispersion shifted single-mode optical fibre cable" G.655, 2003.
- [2] A. R. Chraplyvy, "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities", J. Lightwave Technol., Vol. 8, No. 10, pp. 1548~1557, 1990
- [3] S. Watanabe and M. Shirasaki, "Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation", J. Lightwave Technol., vol. LT-14, no. 3, pp. 243~248, 1996.
- [4] C. Lorattanasane and K. Kikuchi, "Design of long-distance optical transmission systems using midway optical phase conjugation", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, no. 11, pp 1375~1377, 1995.
- [5] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, 2001.
- [6] M. Wu and W. I. way, "Fiber nonlinearity limitations in ultra-dense WDM systems", J. Lightwave Technol., Vol. 22, No. 6, pp. 1483~1498, 2004.
- [7] F. Forghieri, R. W. Tkach and A. R. Chraplyvy, "WDM systems with unequally spaced channels", J. Lightwave Technol., vol. LT-13, no. 5, pp. 889~897, 1995.
- [8] 이성렬, "Mid-Span Spectral Inversion 기법을 채택한 장거리 광 전송 시스템에서의 증폭기 간격에 따른 비트 에러율", 한국항해학회 논문지 9권 2호, pp. 109~120, 2005.