

640 Gbps WDM 시스템의 유효 전송 거리 개선

중신회원 임 황 빈*

Increasing of Effective Transmission Distance of 640 Gbps WDM System

Hwang-Bin Yim* *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서 Inline 분산 제어 (DM; dispersion management)와 전체 전송로 중간에 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 갖는 광전송 링크의 적용을 통해 640 Gbps WDM 시스템의 유효 전송 거리를 신장시킬 수 있는 것을 살펴보았다. 640 Gbps WDM 시스템에 고려하는 광전송 링크를 적용하는데 있어 전체 잉여 분산량 (NRD; net residual dispersion)을 전송 거리에 관계하여 최적으로 결정하면 유효 전송 거리가 $NRD = 0$ ps/nm인 시스템보다 채널 입사 전력에 관계하여 400 혹은 600 km 정도 신장되는 것을 알 수 있었다.

Key Words : 분산 제어 (DM; dispersion management), 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator), 유효 전송 거리, 전체 잉여 분산량 (NRD; net residual dispersion)

ABSTRACT

In this paper, the increasement of effective transmission length of 640 Gbps WDM systems through the applying optical link configuration with inline dispersion management (DM) and mid-span optical phase conjugator (OPC) is investigated. When the considered optical link configuration is applied into 640 Gbps WDM system and the optimal net residual dispersions (NRDs) depending on transmission length are decided, the effective transmission length is increased by 400 or 600 km depending on channel launch power than in same system with fixed 0 ps/nm of NRD in all transmission length.

I. 서 론

최근의 통신 용량 수요의 급증에 따라 통신에서의 기존 패러다임이 변화하고 있고, 향후 통신의 개인화, 멀티미디어화가 더욱 더 진행되면 필요한 시스템 전송 용량은 비약적으로 계속 증가하여 테라비트를 넘는 통신 시스템이 불가피하게 될 것이다. 이러한 요구를 만족시키기 위해 파장 분할 다중 시스템(WDM: Wave-length Division Multiplexing)이 급속하게 개발되어 실용화되고 있다. 각종 시스템과의 연동을 가능하게 하는 광통신 부품들, 에르븀 첨가 광섬유 증폭기(EDFA: Erbium-Doped Fiber Amp-

lifier) 등의 광 증폭기^[1], 정밀한 파장 제어와 가변이 가능한 반도체 레이저^[2], 광섬유의 고기능화 등이 WDM 시스템의 발전을 가능하게 했다.

10 Gbps 이상의 고속 광전송 시스템이 현장에 적용되면서 광 펄스가 붕괴되는 현상인 색 분산(chromatic dispersion)을 줄이기 위한 효과적인 기술로 분산 제어(DM; dispersion management)가 있다. 이 기술은 주 전송로로 쓰이는 단일 모드 광섬유(SMF; single mode fiber)나 비 영 분산 천이 광섬유(NZ-DSF; non zero-dispersion shifted fiber)와 반대 특성을 갖는 분산 보상 광섬유(DCF; dispersion compensating fiber)나 분산 보상 모듈(DCM; dispersion compensating module)

* 강원도립대학 정보통신과(hbinyim7@hanmail.net),
논문번호 : 09001-0115, 접수일자 : 2009년1월15일

을 주 전송로에 부가적으로 삽입 또는 추가하여 분산량을 조절한다³⁾.

전송 거리를 늘려주기 위하여 기존의 광 신호를 재생 증폭하는 증계기 대신에 EDFA를 광전송 링크에 직접 적용하게 되면 광 신호의 강도가 증가하게 되고, 결국 Kerr 효과에 의한 비선형 현상이 더욱 증가하게 되어 전송 거리가 늘어날수록 신호 왜곡이 심해지게 되는 문제를 가지고 있다.

색 분산뿐만 아니라 비선형 현상을 보상하기 위한 기술로 전체 전송로 중간에 광 위상 공액기(OPC; optical phase conjugator)를 두어 송신단부터 OPC까지 전파되면서 겪은 왜곡된 신호파를 OPC에서 공액파로 변환하여 나머지 전송 구간을 전송시켜 수신하면 왜곡을 보상할 수 있는 위상 공액(optical phase conjugation)이 있다^{4),5)}. 그러나 광 위상 공액 기술에서 비선형 효과를 보상하기 위해서는 광 신호의 전력 분포가 OPC를 중심으로 대칭이 되어야 하지만 전송 링크를 구성하는 EDFA(erbium-doped fiber amplifier)에서의 신호 증폭과 광섬유 내에서의 손실 때문에 대칭을 만들기가 매우 어렵다는 한계를 안고 있다.

그러나 OPC가 DM 기술과 결합하면 광 전력 대칭의 문제가 완화되어 성능 개선 효과가 더욱 증대될 수 있다^{6),7)}. 이는 단순히 OPC와 DM을 결합한 것을 통해서가 아니라 시스템 구조, 즉 전송 용량, 변조 파형 형식, 광섬유의 형태에 관련하여 precompensation, postcompensation 전송 링크 최종단에서 축적된 전체 분산량으로 정의되는 전체 잉여 분산량(NRD; net residual dispersion) 등을 최적화하여 가능하다.

본 논문에서는 DM과 OPC가 결합된 640 Gbps (=16×40 Gbps) WDM 시스템에서 NRD의 최적화를 통한 유효 전송 거리의 개선에 대해 살펴보도록 한다. 본 연구에서 고려하는 DM의 구조는 모든 EDFA 구획(span)에서 축적된 분산량을 구획 단위로 제어하기 위해 구획마다 DCF를 두는 inline DM이다. 또한 40 Gbps 비트율의 각 WDM 채널 신호

는 RZ 형식을 사용하였고, 각 채널의 간격은 100 GHz (0.8nm)로 가정하였다. 또한 각 전송 구획을 구성하는 광섬유는 SMF이고, 수신 신호의 성능 평가는 눈 열림 페널티(EOP; eye opening penalty)를 사용하였다.

II. WDM 전송 시스템의 구성

그림 1은 OPC가 전체 전송 거리의 중간에 위치한 WDM 전송 시스템에서 모든 전송 구획(span)마다 DCF를 두어 축적된 전체 분산량을 보상하는 inline DM이 적용된 시스템 구조를 나타낸 것이다. 그림 1의 송신부에서의 16개의 송신기는 각각 레이저 다이오드가 서로 독립적인 40 Gbps 128(=27) PRBS(pseudo random bit sequence)에 의해 강도 변조되는 것으로 가정하였다. 이 때 외부 광 변조기로부터 발생하는 출력 전계 강도는 10 dB의 소광비(extinction ratio)를 갖는 RZ 형식의 2차 가우시안 펄스로 모델링하였다. 광 변조기로부터 출력되는 각 채널의 광 펄스는 그림 1의 광 전송 링크를 통해 식 (1)의 비선형 슈뢰딩거 방정식(NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 따라 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 수신단에 도착한다⁸⁾.

$$\frac{\partial A_j}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A_j - \frac{j}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_j}{\partial T^2} + \frac{1}{6} \beta_{3j} \frac{\partial^3 A_j}{\partial T^3} + i \sum_k \gamma_{jk} A_j^2 A_k + 2i \sum_k \gamma_{kj} A_k^2 A_j \quad (1)$$

여기서 $j, k = 1, 2, \dots, 16$, A_j 는 WDM의 j -번째 채널의 포락선, α 는 광섬유의 손실 계수, β_{2j} 는 색 분산 파라미터, β_{3j} 는 3차 색 분산 파라미터, $\gamma_j (= 2\pi n_2 / A_{eff} \lambda_j)$ 는 비선형 계수, n_2 는 비선형 굴절 계수, A_{eff} 는 광섬유의 유효 코어 영역, λ_j 는 j -번째 채널의 신호 파장, $T = t - z/v_g$ 이다. 식 (1) 우변의 마지막 두 항은 각각 비선형 효과 중 자기 위상 변조(SPM; self phase modulation)와 상호 위상 변조(XPM; cross phase modulation)를 유도

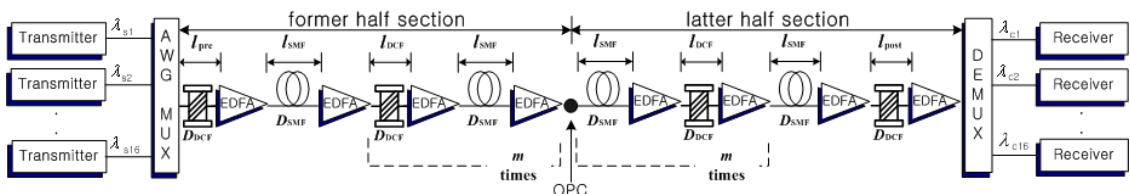


그림 1. 640 Gbps WDM 전송 시스템의 구성

한다. 본 논문에서 식 (1)의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법을 이용하여 이루어졌다⁸⁾.

그림 1에서 수신부는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 전치 증폭기, 1 nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, 버터워스 형태의 펄스 정형 필터와 판별 회로로 구성된 직접 검파 (direct detection) 방식의 수신기로 가정하였다⁹⁾. 수신 대역폭은 0.65 x 비트율로 가정하였다. 그리고 전체 전송 링크 중간에 위치한 OPC는 참고 문헌¹⁰⁾에서와 동일한 파라미터를 갖는 HNL-DSF (highly nonlinearity dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였다. 16 채널 중 첫 번째 채널의 중심 파장은 1550.0 nm로 가정하였고, 각 WDM 채널들의 중심 주파수들은 ITU-T 권고에 따라 100 GHz (즉 0.8 nm)의 동일한 간격으로 분할하여 할당하였다¹¹⁾. 따라서 26 개의 신호 파장들(1550.0~1562.0 nm)과 이들의 공액파와 파장들(1537.5~1549.5 nm)은 모두 참고 문헌 [10]에서와 동일하게 얻어지는 OPC 변환 효율의 3-dB 대역폭 안에 포함된다.

그림 1에서 OPC를 중심으로 송신단부터 OPC까지의 전송 구간을 전반 구간 (former half section), OPC부터 수신부까지의 전송 구간을 후반 구간 (latter half section)이라고 한다면, 전반 구간은 EDFA와 SMF로 구성된 각 구획에서의 분산 보상은 길이 l_{DCF} 의 DCF 링크를 SMF 링크 앞에 두고 이들을 EDFA로 연결하는 구조로 하였고, 후반 구간은 이와 반대의 구조로 구성하였다. 여기서 SMF의 각 전송 구획의 길이 l_{SMF} 는 50 km로 하였다. SMF의 손실 계수 α_{SMF} 는 0.2 dB/km, 분산 계수 D_{SMF} 는 17 ps/nm/km(@1,550 nm), 비선형 계수 γ_{SMF} 는 1.41 W⁻¹km⁻¹(@1,550 nm)로 가정하였다. 분산 제어를 위해 전반 구간과 후반 구간에서 각각 매 SMF 구획 바로 앞과 뒤에 위치한 DCF의 분산 계수는 $D_{DCF} = -85$ ps/nm/km(@ 1,550 nm)로 가정하였다. 또한 DCF의 손실 계수 α_{DCF} 는 0.4 dB/km, 비선형 계수 γ_{DCF} 는 4.83 W⁻¹km⁻¹(@1,550 nm)로 가정하였다.

DM이 적용된 전송 링크에서 수신 최종단에서 측정된 총 분산량으로 정의되는 NRD는 시스템의 구조에 따라 다르지만 일반적으로 0 ps/nm가 아니다. 이는 광섬유에서 발생하는 비선형 효과와의 상호 작용에 의한 광 신호 왜곡의 보상을 위해 유효 분산이 존재해야 하기 때문이다. 더욱이 전체 전송로 중간에 OPC를 채택하고 있는 시스템에서 OPC

를 중심으로 광 전력과 국부 분산의 실제적인 비대칭성 때문에 모든 WDM 채널의 효과적 보상을 위한 NRD 값은 OPC를 채택하지 않은 시스템과 비교해 다를 수 있다. 그리고 WDM 전송 시스템의 전송 거리에 따라서도 다를 수 있다. NRD는 일반적으로 전송 링크를 구성하는 DCF의 길이로 조절할 수 있다.

본 연구에서는 최적화된 NRD를 통해 OPC가 적용된 640 Gbps WDM 전송 시스템에서 장거리 전송의 가능성과 유효 전송 거리를 확인하고자 한다. 그림 1의 시스템에서 NRD의 결정은 MUX 다음에 있는 DCF의 길이 l_{pre} ($l_{pre} \times D_{DCF}$ 를 precompensation이라고 한다)와 DEMUX 바로 전에 있는 DCF의 길이 l_{post} ($l_{post} \times D_{DCF}$ 를 postcompensation이라고 한다)에 변화를 주어 수행한다. 즉 그림 1의 시스템에서 전반 구간의 첫 번째 DCF 링크를 제외한 나머지 m개의 DCF 링크와 후반 구간의 마지막 DCF 링크를 제외한 나머지 m개의 DCF 링크는 각 구획에서의 측정 분산량을 0 ps/nm로 하기 위하여 10 km의 l_{DCF} 로 고정시켰다.

III. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 2는 전송 거리가 2,000 km인 시스템에서 precompensation을 -850 ps/nm, 즉 l_{pre} 를 10 km로 고정시키고 postcompensation에 변화를 주기 위해 l_{post} 를 변화시킨 경우 각각 3 dBm과 5 dBm의 입사 전력 (Ps)을 갖는 16개 채널들을 전송시켰을 때 NRD에 따른 최(worst) 채널의 EOP를 나타낸 것이다. 입사 전력이 3 dBm과 5 dBm인 경우 모두

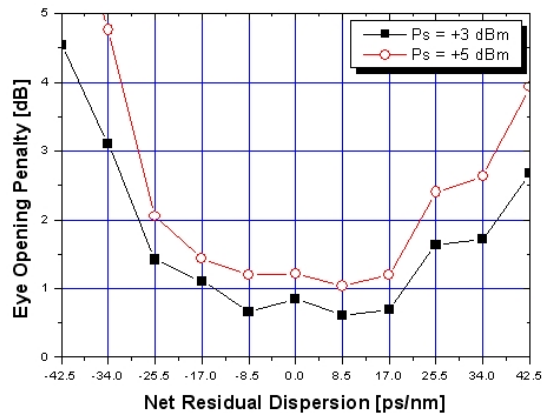


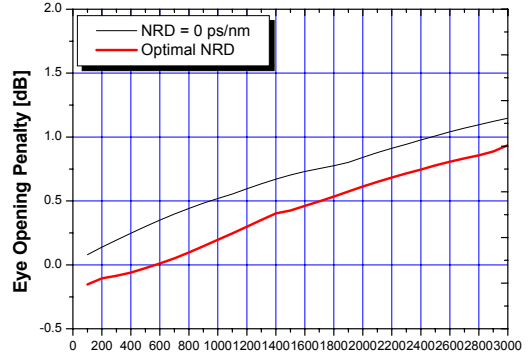
그림 2. $l_{pre} = 10$ km로 고정되고 l_{post} 만 변화를 주어 NRD를 제어하는 전송 거리가 2,000 km인 시스템에서 NRD에 따른 최악 채널의 눈 열림 페널티

EOP를 가장 양호하게 만드는 NRD는 +8,5 ps/nm 인 것을 알 수 있다. 이 NRD 값은 l_{post} 가 9.9 km 로 선택된 경우에 얻어진다.

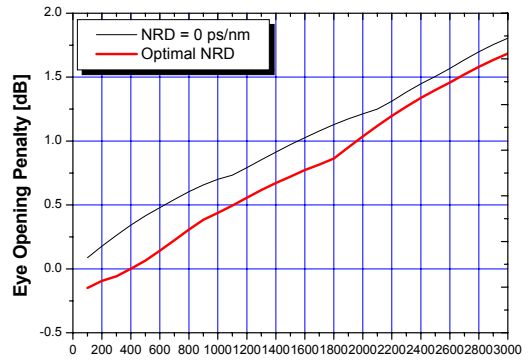
그림 2가 의미하는 것은 앞서도 언급했듯이 시스템의 구조와 파라미터 값들에 의존하여 모든 WDM 채널들을 효과적으로 보상할 수 있는 최적 NRD가 결정된다는 것이다. 따라서 m 을 증가시키면서, 즉 전송 거리를 증가시키면서 각 전송 거리의 시스템에서 l_{pre} 와 l_{post} 를 동시에 변화시킨 경우 16개 채널 중 최악의 전송 성능을 갖는 채널이 나타내는 EOP 중 최소의 EOP 값과 이 값을 만드는 l_{pre} 와 l_{post} 를, 즉 NRD를 도출해 볼 수 있다.

그림 3은 다양한 전송 거리의 640 Gbps WDM 전송 시스템에서 l_{pre} 와 l_{post} 를 동시에 변화시킨 경우 (optimal NRD) 16개 채널 중 최악의 채널이 나타내는 EOP 중 전송 거리에 따른 최소의 EOP 값을 l_{pre} 와 l_{post} 가 10 km로 고정된 경우 (NRD = 0 ps/nm)와 비교해 나타낸 것이다. 1 dB EOP를 전송 성능의 기준으로 한다면, l_{pre} 와 l_{post} 가 10 km로 고정된 경우, 즉 NRD가 0 ps/nm로 고정된 경우 입사 전력이 3 dBm인 경우와 5 dBm인 경우 각각 2,400 km와 1,500 km까지 고품질 전송이 가능한 반면 l_{pre} 와 l_{post} 를 동시에 변화시켜 시스템의 전송 거리에 따라 NRD를 최적으로 설계하면 전송 거리를 각각 3,000 km와 1,900 km까지 600 km와 400 km 신장시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다. 여기서 한 가지 눈여겨보아야 할 것은 입사 전력이 3 dBm으로 비교적 적은 전송에서 NRD를 최적화시키지 않은 경우에 대한 NRD 최적화시킨 경우의 전송 거리의 신장 정도가 고려한 모든 전송 거리 범위 내에서 약 600 km 정도로 비슷한 반면 채널의 입사 전력을 5 dBm으로 하여 2,000 km 이상 전송하게 되면 NRD를 최적화시키지 않은 경우에 대한 NRD 최적화시킨 경우의 전송 거리의 신장 정도가 100 km 정도로 줄어드는 것을 알 수 있다. 즉 NRD 최적화를 통한 WDM 시스템의 전송 거리 신장은 비교적 낮은 입사 전력과 2,000 km 이하의 시스템 전송 거리 이내에서 효과가 커짐을 알 수 있다.

그림 4는 640 Gbps WDM 전송 시스템에서 NRD를 $l_{pre} = 10$ km로 고정하고 l_{post} 에만 변화를 준 경우 1 dB EOP를 얻을 수 있는 NRD의 범위를 전송 거리와 채널의 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. 우선 NRD가 +8,5 ps/nm (즉 l_{post} 가 9.9 km)로 설정되면 3 dBm과 5 dBm의 입사 전력 모두 시스템의 유효 전송 거리를 최대화할 수 있는



(a) $P_s = 3$ dBm



(b) $P_s = 5$ dBm

그림 3. 전송 거리에 따른 최악 채널의 EOP

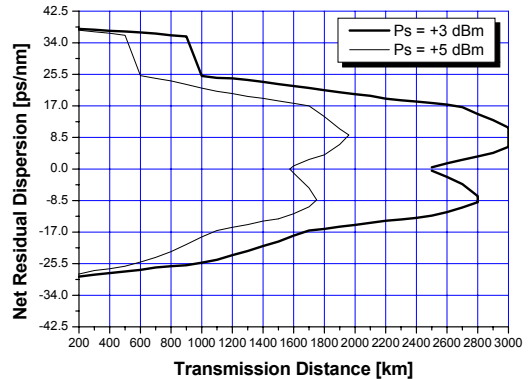


그림 4. 640 Gbps WDM 시스템에서 유효 전송 거리에 따른 NRD의 범위

것을 알 수 있다. 그리고 시스템의 유효 전송 거리를 늘릴수록 NRD의 설계 범위가 줄어들어야 하는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서 제안하는 전체 전송 거리 중간에 OPC를 두고 전송로를 구성하는 SMF 링크의 분산 보상을 위해 모든 구획마다 DCF 링크를 결합한 inline DM에서 NRD를 precompensation과 post-compensation으로 제어하는 전송 링크 구조를 640 Gbps급의 대용량 WDM 전송 시스템에 적용하면 모든 WDM 채널 신호들을 고품질로 보상하여 장거리 전송하는데 효과적이라는 것을 확인할 수 있었다.

이는 WDM 전송 시스템의 전송 거리에 따라 최적 NRD를 도출하여 시스템에 적용하는 방법으로 본 연구에서 살펴보았는데, NRD 최적화를 통한 WDM 시스템의 전송 거리 신장은 비교적 낮은 입사 전력과 2,000 km 이하의 시스템 전송 거리 내에서 효과적이라는 것을 확인할 수 있었다.

또한 본 논문에서는 640 Gbps WDM 전송에서 유효 전송 거리에 따른 NRD 설계 범위를 살펴보았다. NRD가 +8.5 ps/nm로 설계된 경우가 시스템 유효 전송 거리를 최대화시킬 수 있는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] 조호성, “반도체 광 증폭기의 기술현황”, 주간기술동향 통권 833호, 한국전자통신연구원, 1998년.
 [2] K. E. Stubkjaer et al., “Wavelength converter technology”, *IEICE Trans. Commun.*, vol. E82-B, no. 2, p. 390, 1999.
 [3] Y. Frignaca and S. Bigo, “Numerical optimization of residual dispersion in dispersion-managed systems at 40 Gb/s,” in *Proc. OFC*, Baltimore, MD, 2000, pp. 48-50.
 [4] A. Yariv, D. Fekete, and D. M. Pepper, “Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation”, *Opt. Lett.*,

vol. 4, pp 52~54, 1979.
 [5] 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.
 [6] 이성렬, 임황빈, “WDM(24x40 Gbps) 전송에서 광 위상 공액기와 분산 제어 기술을 이용한 성능 개선”, *한국통신학회논문지* 제 33권 10호, pp. 855~864, 2008.
 [7] 임황빈, “24×40Gbps WDM시스템에서 비트 에러율 개선”, *한국통신학회논문지* 제 33권 2호, pp. 14~19, 2008.
 [8] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
 [9] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
 [10] 이성렬, “WDM 채널수에 따른 최적의 OPC 위치 및 광섬유 분산 계수”, *한국항행학회논문지* 제 11권 2호, pp. 177~186, 2007.
 [11] ITU Recommendation “Spectral grids for WDM applications : DWDM frequency grid” *G.694.1*, 2006.

임 황 빈 (Hwang-Bin Yim)

종신회원



1985년 건국대학교 전자공학과 (공학석사)

2003년 순천향대학교 전기전자공학과 (공학박사)

2003년~현재 강원도립대학 정보통신과 교수

2007년~현재 강원사이버평생교

육센터(GCC)장
 <관심분야> 접근제어, 전자회로설계, 광통신 및 전파통신응용