중계 구간의 SMF 길이와 RDPS의 분포가 랜덤한 분산 제어 광전송 링크에서의 WDM 신호의 보상을 위한 최적 전체 잉여 분산

이성렬*

*목포해양대학교

Optimal Net Residual Dispersion for Compensation of WDM Signals in Dispersion Managed Optical Links with Random Distribution of SMF Length and RDPS

Seong-Real Lee*

*Mokpo National Maritime University

E-mail : reallee@mmu.ac.kr

요 약

광섬유의 그룹 속도 분산 (GVD; group velocity dispersion)과 비선형 효과의 상호 작용에 의해 왜곡되는 960 Gbps 신호의 보상을 위해 분산 제어 (DM; dispersion management) 기술이 적용된 광전송 링크의 유연한 구성에 필요한 중계 구간 (fiber span)을 구성하는 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)의 길이와 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)을 랜덤하게 분포시키는 구조에서의 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)의 최적치와 유효 입사 전력 범위를 도출하였다.

ABSTRACT

Optimal net residual dispersion (NRD) and effective launching power range of optical transmission links with random distribution of single mode fiber (SMF) length and residual dispersion per span (RDPS) required to flexibly design of optical links in dispersion management (DM) technique for compensating the distorted 960 Gbps optical signals due to interaction of group velocoty dispersion (GVD) and optical nonlinear effects are induced.

키워드

Dispersion management, Net residual dispersion, Residual dispersion per span, Random distribution of SMF length and RDPS, Effective launching power

Ⅰ. 서 론

현재의 장거리 대용량 광전송 시스템은 전송 거리와 비트율이 증가할수록 심해지는 광섬유의 비선형 현상 (Kerr effect)과 그룹 속도 분산 (GVD; group velocity dispersion)에 의한 전송 성능 저하를 개선하고자 하는 노력의 결과로써 나타난 것이다. 분산 제어 (DM; dispersion management) 기술[1],[2]과 광 위상 공액 (optical phase conjugation) 기술[3],[4]은 이러한 문제들을 해결할 수 있는 대표적 기술이다.

DM은 주 전송로로 사용되는 광섬유, 예를 들어 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)나 비 영 분산 천이 광섬유 (NZ-DSF; non zero - dispersion shifted fiber)에서 축적된 총 분산량을 이들과 반대 부호의 분산 계수를 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 전체 전송 링크의 적당한 곳에 위치시켜 줄여주거나 제거하는 기술이다. 또한 광 위상 공액 기술은 시스템의 전체 전송로 중간에 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 두어 송신단부터 OPC까지 전파되면서 겪은 GVD와 비선형 현상에 의한 신호 왜곡을 OPC에서 공액 변환하여 나머지 전송 구간, 즉 OPC부터 수신단까지 전송시켜서 보상하는 방법으로 이론적으로 광 신호의 전력이 OPC를 중심으로 대칭적이어야 한다. 그

러나 광섬유에서의 손실과 EDFA에서의 증폭 때문에 실제적으로 대칭을 만들기 어렵다[3].

본 논문의 저자는 그동안의 연구를 통해 OPC가 DM 기술과 결합하면 광 전력 비대칭 문제가 완화되어 성능 개선 효과가 더욱 증대되는 것을 보였다[5],[6]. 이는 단순히 OPC와 DM을 결합하는 것이 아니라 시스템의 전송 용량 변조 파형 형식, 광섬유의 형태 등에 관계하여 precompensation, postcompensation, 중계 간격 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span), 전체 잉여 분산량 (NRD; net residual dispersion) 등을 최적화시킴으로써 가능하였다.

DM의 가장 일반적인 구조는 시스템 전체의 복잡성을 줄여주기 위해 주 전송로인 SMF의 길이와 RDPS를 일정하게 하고 전송 링크의 precompensation과 postcompensation, 그리고 중계 간격마다 일정한 RDPS를 통해 결정되는 NRD를 최적화하는 것이다. 하지만 전체적인 구조가 복잡하다고 하더라도 중계 구간의 RDPS에 변화를 주어 시스템 성능이 크게 향상된다면 대용량 정보 전송 측면에서 바람직하다고 할 수 있다. 저자가 아는 한 모든 중계 구간의 RDPS의 분포를 포함하여 SMF 길이 분포를 랜덤하게 구성한 전송 링크에 대한 연구는 아직까지 보고되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 전체 전송 링크 중간에 OPC가 적용되고, OPC를 중심으로 송신단부터 OPC까지의 전반 전송 구획 (former half section)과 OPC부터 수신단까지의 후반 전송 구획 (latter half section)에서의 모든 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포하는 전송 링크의 시스템 성능을 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 모두 균일하게 고정된 전송 링크에서의 시스템 성능과 비교하여 각 경우의 최적 NRD를 도출해 보고자 한다.

II. 광전송 링크와 시스템의 모델링

그림 1의 전송 링크의 전반과 후반 전송 구획의 각 7개의 중계 구간을 구성하는 모든 SMF와 DCF의 길이, 즉 $l_{SMF,n}$와 $l_{DCF,n}$는 본 연구의 목적을 위하여 일정하지 않다. 그러나 모든 중계 구간의 주 전송로인 SMF의 손실 계수 α_{SMF}는 0.2 dB/km, 비선형 계수 γ_{SMF}는 1.41 $W^{-1}km^{-1}$ (@1,550 nm), 분산 계수 D_{SMF}는 17 ps/nm/km(@1,550 nm)로 일정하게 가정하였다. 또한 각 중계 구간의 SMF에서 축적되는 분산량을 제거하거나 줄여주기 위해 추가되는 모든 DCF의 손실 계수 α_{DCF}는 0.4 dB/km, 비선형 계수 γ_{DCF}는 4.83 $W^{-1}km^{-1}$(@1,550 nm), 분산 계수 D_{DCF}는 -100 ps/nm/km로 동일하게 가정하였다.

본 논문에서 고려한 SMF 길이와 RDPS를 랜덤하게 하는 전송 링크 구조는 우선 각 전송 반 구획의 7개 각각의 SMF의 길이가 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 km 중 하나의 값으로 랜덤하게 결정(이 분포는 각 전송 반 구획의 중계 구간의 평균 SMF 길이를 80 km가 되게 한다)되도록 하고, 동시에 첫 번째와 마지막 14번째 중계 구간을 제외한 각 전송 반 구획의 6개의 각각의 RDPS은 0, 100, 200, 300, 400, 800 ps/nm 중 하나의 값으로 랜덤하게 결정(이 분포는 각 전송 반 구획에서의 평균 RDPS를 300 ps/nm가 되게 한다)되도록 하였다. 각 중계 구간의 랜덤한 RDPS 값은 해당 구간의 아래 식 (1)의 DCF 길이 조절로 가능하다.

$$l_{DCF} = \frac{(l_{SMF} \times D_{SMF}) - RDPS}{D_{DCF}} \quad (1)$$

그림 1에서 NRD는 SMF 길이와 RDPS 분포가 랜덤한 경우 14번째 중계 구간의 DCF 길이를 후반 전송 구획에서의 축적 분산량이 0 ps/nm가 되도록 31.6 km로 고정시켜 놓고 첫 번째 중계 구간의 DCF 길이 l_{pre}에 의해 결정되는 precompensation, 또는 첫 번째 중계 구간의 DCF 길이를 전반 전송 구획에서의 축적 분산량이 0 ps/nm가 되도록 31.6 km로 고정시켜 놓고 14번째 중계 구간의 DCF 길이 l_{post}에 의해 결정되는 postcompensation에 의해 결정되도록 하였다.

본 연구에서 고려한 각 전송 반 구획의7개 중계 구간의 SMF 길이의 평균은 80 km이고, precompensation과 postcompensation을 위한 중계 구간을 제외한 12개 중계 구간의 RDPS 평균은 300 ps/nm이다. 따라서 본 연구에서 살펴보는 SMF 길이와 RDPS 분포가 일정하지 않은 전송 링크에서의 시스템 성능의 비교 대상인 균일 분포 전송 링크의 14개 SMF 길이는 모두 80 km으로 동일하게 하고, 2번째부터 13번째 중계 구간의 RDPS를 300 ps/nm로 모두 균일하게 하기 위하여 이들 중계 구간의 DCF 길이를 모두 10.6 km로 동일하게 하여 얻을 수 있다.

그림 1의 WDM 전송 시스템의 24개 송신기

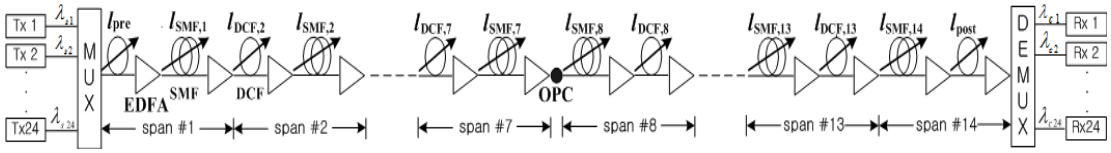


그림 1. 40 Gbps × 24 채널 WDM 전송 시스템 구조

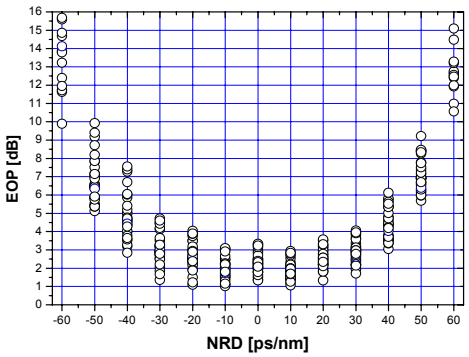
(Tx)는 분포 궤환 레이저 다이오드 (DFB-LD; distributed feedback laser diode)로 가정하였고, 채널 1과 24의 DFB-LD의 중심 파장은 각각 1,550 nm와 1,568.4 nm로 하고 각 채널의 파장 간격은 ITU-T G.694.1의 권고에 따라 100 GHz (즉 0.8 nm)로 모델링하였다. 각 DFB-LB는 서로 독립적인 128(=2^7) 의사 랜덤 비트열 (PRBS; pseudo random bit sequence)에 의해 외부적으로 변조되는 것으로 모델링하였다. 이 때 외부 변조기로부터 발생되는 변조 파형 형식은 소광비 (ER; extinction ratio)가 10 dB인 2차 가우시안 펄스의 RZ로 모델링하였다.

24개의 WDM 채널 신호들은 다중화기 (MUX; multiplexer)에서 다중화된 후 광 링크로 전송된다. 전체 광전송 링크는 MUX부터 OPC까지의 전반 전송 구획과 OPC부터 역다중화기(DEMUX)까지의 후반 전송 구획으로 나누어진다. 다중화되어 전송되는 24개 채널 신호들은 전체 전송로 중간에 위치한 OPC에서 공액 변환되어 나머지 전송 구획을 전파한 후 DEMUX에서 각 채널별로 분리된 후 수신기(Rx)로 보내진다. OPC는 참고 문헌 [8]에서와 동일한 파라미터를 갖는 HNL-DSF (highly nonlinearity–dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였다. 그리고 수신기는 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 모델링하였다. 수신 대역폭은 0.65 x 비트율로 가정하였다.

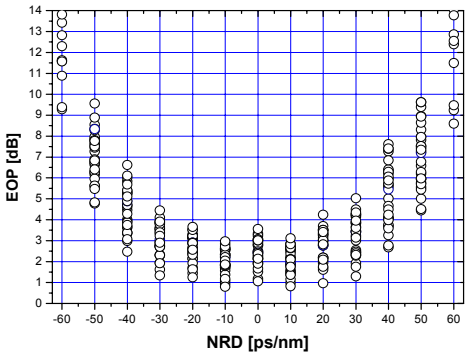
광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 쉬뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödiger equation)에 의해 표현된다[10]. NLSE를 단계 분할 퓨리에 (SSF; split-step Fourier) 기법에 따라 시뮬레이션 하였다.

III. 최적 NRD 도출과 검토

그림 2의 (a)와 (b)는 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS 분포가 랜덤한 전송 링크에서 입사 전력이 2 dBm인 24개의 WDM 채널 중 EOP 특성이 가장 나쁘게 나타나는 최악 채널의 EOP를 각각 precompensation과 postcompensation에 의해 결정되는 NRD의 변화에 따라 나타낸 것이다. 실제 랜덤한 SMF 길이와 랜덤한 RDPS에 의한 조합의 수는 무수히 많지만 본 연구에서는 랜덤 분포를 30번 발생시켜 각각에서 얻어진 결과를 나타냈다. 그림 2의 (a)와 (b)에서 확인할 수 있듯이 랜덤 분포의 SMF의 길이와 RDPS의 구체적 조합에 따라 NRD에 따른 EOP가 달라지지만, +10 ps/nm과 -10 ps/nm인 경우 EOP 편차가 비교적 적게 나타나고, 동시에 다른 NRD에 비해 EOP도 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉 SMF 길이와 RDPS 분포가 랜덤한 링크에서 최적 NRD는 +10 ps/nm 또는 -10 ps/nm라고 판단할 수 있다.



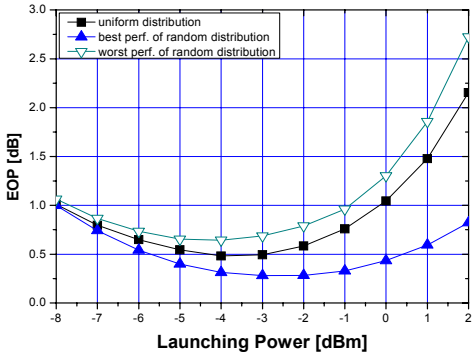
(a) precompensation



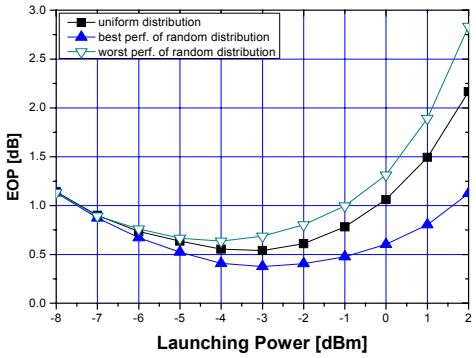
(b) postcompensation

그림 2. SMF 길이와 RDPS가 랜덤한 전송 링크에서 NRD에 따른 최악 채널의 EOP

그림 3은 SMF 길이와 RDPS 분포가 균일한 경우와 랜덤한 경우에서 WDM 채널의 입사 전력 변화에 따른 EOP를 나타낸 것으로, 30가지의 랜덤 분포의 경우에 대해서는 최악 채널의 수신 성능을 가장 우수하게 만드는 분포("best perf. of random distribution")에서의 EOP와 가장 나쁘게 만드는 분포("worst perf. of random distribution")에서의 EOP를 나누어 나타냈다. 1 dB EOP 이하의 성능으로 수신되는 입사 전력의 범위를 유효 입사 전력 범위라고 정의하면 precomensation으로 NRD를 +10 ps/nm로 설정한 전송 링크에서 SMF 길이와 RDPS를 균일하게 분포시킨 경우의 유효 입사 전력 범위가 -8~0 dBm인 반면, 이들 분포를 최상의 수신 성능이 이루어지도록 랜덤하게 한 경우 -8 dBm부터 2 dBm 이상으로 늘릴 수 있고, postcompensation으로 NRD를 -10 ps/nm로 설정한 전송 링크에서 SMF 길이와 RDPS를 균일하게 분포시킨 경우의 유효 입사 전력 범위가 -7.5~0 dBm인 반면, 최상의 수신 성능이 이루어지도록 랜덤하게 한 경우 -8 dBm부터 1.5 dBm 이상으로 늘릴 수 있는 것을 알 수 있다.



(a) NRD = +10 ps/nm determined by precompensation



(b) NRD = −10 ps/nm determined by postcompensation

그림 3. 입사 전력에 따른 최악 채널의 EOP

Ⅳ. 결 론

DM과 OPC가 적용된 광전송 링크의 유연한 구성을 위해 중계 구간을 구성하는 SMF의 길이와 RDPS를 랜덤하게 분포시키는 구조에서의 최적 NRD와 최적 NRD에서의 유효 입사 전력 범위를 도출하였다.

우선 최적 NRD는 +10 ps/nm 또는 -10 ps/nm라는 것을 알 수 있었다. 그리고 SMF 길이와 RDPS가 최상으로 랜덤하게 분포한 전송 링크가 도출된 최적의 NRD를 갖는 경우 유효 입사 전력은 SMF 길이와 RDPS가 균일한 정송 링크에 비해 1.5 dB에서 2 dB 이상으로 신장되는 것을 확인하였다.

전송 링크가 최적의 NRD로 설계되고 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS를 특정한 랜덤 패턴으로 분포시켰을 때의 수신 성능이 SMF 길이와 RDPS가 균일하게 분포된 전송 링크에서의 성능보다 개선되기는 하지만 고려한 30개 패턴 중 최상의 수신 성능을 얻게 하는 특정 랜덤 패턴을 결정하는 것이 쉽지 않고, 이 특정 패턴을 결정하는 방법을 본 연구에서 다루지 않았다.

따라서 향후 연구에서는 SMF 길이와 RDPS가 균일하게 분포한 링크에 비해 전송 성능을 향상시켜줄 수 있는 특정한 랜덤 패턴을 찾는 방법을 연구하고자 한다.

참고문헌

[1] X. Xiao, S. Gao, Y. Tian, and C. Yang, "Analy- tical optimization of the net residual dispersion in SPM-limited dispersion-managed systems," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 24, No. 5, pp. 2038～2044, May 2006.

[2] L. Grüner-Nielsen, *et al.*, "Dispersion Compensa- ting Fibers", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 23, No. 11, pp. 3566～3578, 2005.

[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. 14, No. 3, pp 243～248, 1996.

[4] H. Wei and D. V. Plant, "Simultaneous nonlinearity suppression and wide-band dispersion compensation using optical phase conjugation", *Optics Express*, Vol. 12 No. 9, pp. 1938～1958, 2004.

[5] 이성렬, "집중형 분산 제어 WDM 전송 시스템에서 Mid-span spectral inversion 기술", *한국통신학회논문지*, 제 33권 1호, pp. 7～15, 2008.

[6] 이성렬, "분산 제어가 적용된 광전송 링크에서 광 위상 공액의 비대칭성', *한국통신학회논문지*, 제 35권 8호, pp. 801～809, 2010.