
NRZ 방식을 이용한 40Gbps WDM 시스템의 최적화

이종형* · 한대현* · 이용재* · 최병윤**

Numerical Optimization of NRZ 40Gbps WDM systems

Jonghyung Lee* · Daehyun Han* · Yongjae Lee* · Byeongyoon Choi**

이 논문은 2006년도 동의대학교 학술연구비(2006AA148)를 지원받았음

요 약

40Gbps로 동작하는 WDM시스템의 성능 최적화를 위해 그 특성을 numerical simulation 을 통해 알아 보았다. 이때 광섬유는 가장 널리 사용되고 있는 표준 단일 모드로 가정하였으며, 변조 방식 역시 가장 간단하면서 널리 사용되고 있는 NRZ 방식을 사용하였다. 이는 40Gbps 의 새로운 시스템을 설치하는 경우보다 기존의 시스템에서 각 채널의 전송율을 40Gbps로 증가시킴으로써 최종 전송용량을 향상시킬 경우를 고려하였기 때문이다. 수신단의 필터(optical 및 electrical) 특성을 최적화하고 색분산 보상 및 입력신호 크기의 최적화를 통해 기존에 매설된 단일 모드 광섬유로 약 480km (BER < 10⁻¹⁵) 까지 전송할 수 있음을 알았다. 또한 시스템의 성능이 EDFA의 ASE 노이즈 특성에 의해 크게 제한 될 때, 수신단의 광 필터는 삽입 손실이 5dB 이상 크지 않다면, Gaussian 모양 보다는 Flattop 모양의 광 필터가 성능 개선에 더 유리함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

40Gbps WDM Systems have been studied by numerical simulation to optimize their performance. Standard single mode fiber is assumed, and the most popular modulation format, NRZ, is used for the study. These assumptions are valid when existing WDM systems are required to upgrade their performance to 40Gbps. It is shown that the standard single mode fiber can transmit optical signals over 480km (BER < 10⁻¹⁵) by optimizing optical and electrical filter characteristics at the receiver and by compensation of dispersion. In addition, when the system performance is mainly limited by ASE noise of EDFAs, it is found that flattop-shaped optical filter at the receiver gives a better result than Gaussian-shaped filter unless the insertion loss of the optical filter is larger than 5dB.

키워드

NRZ 방식, WDM, 40Gbps, Standard Single Mode Fiber

I. 서 론

광통신 시스템의 전송용량을 증가시키기 위해서는

기본적으로 세가지 방법이 있는데[1-3], 그 첫번째 방법은 다양한 변조방식 등을 통해 신호의 스펙트럼 효율을 높임으로써 좀 더 많은 채널의 광신호를 주어진 대역폭

* 동의대학교 전자공학과
** 동의대학교 컴퓨터공학과

내에서 전송 시키는 것이고, 두번째 방법은 광증폭기의 대역폭을 넓힘으로써 역시 좀 더 많은 채널의 광신호를 전송시키는 방법이다. 마지막으로는 각 채널의 전송율을 증가시킴으로써 전체의 전송용량을 증가 시키는 방법이 있다. 현재 이들 각각 방법에 대한 상용화 노력이 지속적으로 이루어지고 있으며 아직은 어떤 방법이 가장 우수한지에 대한 결론은 내려져 있지 않은 상태이다. 이는 대부분의 이들 방법이 새로운 네트워크에 적용되어지는 것을 목표로 하기보다 기존 네트워크의 성능향상에 목표를 둔 경우가 대부분이며, 이때는 정보의 트래픽 패턴과 광섬유를 포함한 기준에 설치된 장비의 특성을 고려하여야 하기 때문이다.

본 논문에서는 표준단일모드 (standard single mode fiber)를 이용한 파장분할 다중화(wavelength division multiplexing: WDM) 전송방식에서 각 채널 전송율을 40Gbps로 증가시켰을 때, 최적 동작 조건을 수학적 모델링을 통한 모의 전산실험으로 찾아내고자 한다. 광신호의 변조 방식은 기준에 가장 널리 사용되고 있는 NRZ 방식을 가정하였다.

II. 본론

2-1. 수신단 필터의 최적화

최근 40Gbps 시스템의 특성에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 수신단의 필터 특성에 따른 성능 분석은 거의 보고가 이루어 지지 않고 있다. 그러나 장거리 광통신에서는 광증폭기(EDFA)의 노이즈에 의해 시스템 성능이 크게 제한 받으므로 수신단의 역 다중화기(DeMux)를 이루고 있는 광필터와 광 검출후의 전기적 필터의 특성에 따라 그 성능이 크게 영향받을 수 있다. 본고에서는 역 다중화기의 광필터 특성이 Gaussian 과 Flattop 모양의 두 가지 경우를 고려하였으며, 광 검출기후의 전기적 필터는 5차 베셀 필터로 가정하였다. 본 연구에서 사용된 그 외 중요 시뮬레이션 변수들을 표 1에 정리하였다.

그림 1은 WDM 광통신 시스템의 개략도와 40 채널의 입력 스펙트럼 및 back-to-back 으로 연결 하였을 때의 193.42THz 채널 눈패턴(Eye pattern)을 함께 나타낸 것이

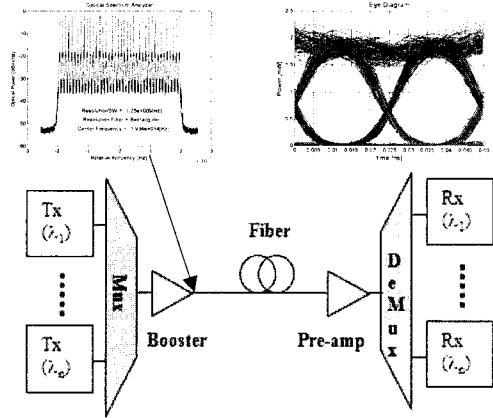


그림 1. WDM 광통신 시스템의 개략도
Fig. 1 WDM Optical Fiber Communication System

표 1. 중요 시뮬레이션 변수 값
Table 1. Simulation Parameters and their values

Transmitter	Parameters
Bit rate	NRZ 40Gbps
Channel spacing	100GHz
External modulation	Extinction ratio > 20dB Chirpless
Span	Parameters
Standard single mode fiber	Attenuation: 0.23 dB/km Chromatic Dispersion: 16 ps/nm/km Slope of dispersion: 0.08 ps/nm ² /km Effective core area: 80μm ² Nonlinear refractive index: 2.6.10 ⁻²⁰ m ² /W
Dispersion compensation fiber	Attenuation: 0.5 dB/km Chromatic Dispersion: -90 ps/nm/km Slope of dispersion: -0.0890/16 ps/nm ² /km Effective core area: 50μm ² Nonlinear refractive index: 2.6.10 ⁻²⁰ m ² /W
Receiver	Parameters
Optical receiver filter	Gaussian or Flattop shape (삽입 손실=0) $T(f) = \exp\left(-\ln\sqrt{2}\left(\frac{f-f_c}{\Delta f_{3dB}/2}\right)^{2n}\right)$ n=1 for Gaussian n=1.36 for Flattop
Q-estimation	Gaussian approximation including ISI effect
Photodiode	PIN
Electrical Filter	5 th order Bessel LPF

그림2는 광 필터와 전기적 필터의 3dB 대역폭이 30GHz 에서90GHz, 20GHz 에서 60GHz로 각각 변화 할 때의 Q-factor를 그린 것이다. (비트오율은 $BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)$ 의 관계식에서 얻을 수 있다[4].) 이때 채널은 $f=193.41\text{THz}$ 를 중심으로 3 채널을 가정하였으며, 송신기와 수신기 사이의 광섬유는 없다고 가정하였다. 부스터 증폭기(booster amp) 후의 OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio)은 100GHz 의 rectangular resolution 필터에 의해 20dB로 측정되게 설정하여 장거리 통신에서 일어날 수 있는 EDFA의 축적된 노이즈를 모델링하였다. Q-value는 통계적 오차를 줄이기 위해 각 채널당 210 비트에 의한 10번의 시뮬레이션 결과를 평균한 것이다[5].

역 다중화기의 광 필터가 Gaussian shape일 때, Q 값은 광 필터의 3dB 대역폭이 56GHz, 전기적 필터의 대역폭이 34GHz일 때 최고값($Q_{\max} = 11.57$) 나타냈으며, 광 필터가 Flattop shape 일때는 광 필터의 3dB 대역폭이 50GHz, 전기적 필터의 대역폭이60GHz일 때 최고값을 ($Q_{\max} = 12$) 을 나타내었다. 그러나 Q 값은 상당히 넓은 구간 동안 필터특성에 크게 민감하지 않았다. 예로, 광 필터가 Flattop shape 일 경우 광 필터의 3dB 대역폭이 56GHz, 전기적 필터의 대역폭이 34GHz일 때도 $Q = 11.9$ 로 최고값과 큰 차이는 나타나지 않았다. 추후의 simulation 에서는 비교를 위해 Gaussian 필터를 사용하였을 경우의 최적화 대역폭 값을 Flattop 에서도 사용하였다. 그림2의 결과는 또 명확히 Flattop 모양이 역 다중화기보다 우수한 특성을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 역 다중화기는 AWG(Arrayed wavelength grating) 소자로 제작되는데 Flattop 모양인 경우 삽입손실(insertion loss)이 더욱 커진다고 알려져 있어 이를 고려하면 Flattop 필터가 항상 우수한 특성을 나타낸다고는 할 수 없다[6]. 이를 좀 더 살펴보기 위해 각각 2^{11} 비트로 변조된 5채널의 WDM 시스템에서 역시 OSNR = 20dB로 하였을 경우 Flattop 필터의 삽입손실이 어느 정도 Q 값에 영향을 미치는지를 시뮬레이션 하였다. 그림3 은 40번의 시뮬레이션 결과를 평균한 것으로 역 다중화기의 광 필터가 삽입손실이 없는 Gaussian 일때의 Q 값과 Flattop 필터의 삽입손실이 증가될 때의 Q값을 비교한 것이다. Flattop 필터의 삽입손실이 Gaussain 필터에 비해 5dB 이상 크지 않다면, Flattop 필터를 사용함으로써 Q 값

의 개선 효과를 볼 수 있음을 알 수 있다.

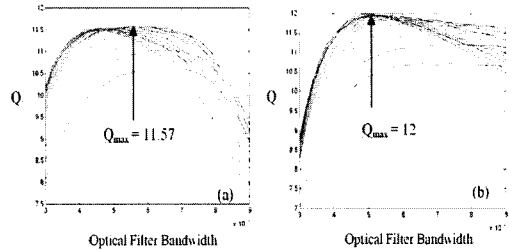


그림 2. 계산된 Q 값 (a) Gaussian 모양 필터 사용시 (b) Flattop 모양 필터 사용시
Fig 2. Simulated Q values (a) Gaussian optical filter (b) Flattop optical filter

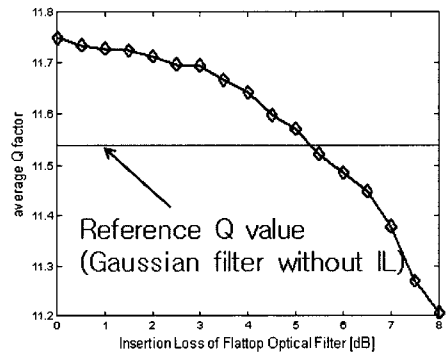


그림 3. Flattop 필터의 삽입손실에 따른 Q 값의 변화
Fig 3. Q value when the insertion loss of flattop filter increases

2.2 입력신호 크기 및 색분산 Map의 최적화

40Gbps에서는 짧은 광신호의 펄스폭 및 넓어진 스펙트럼의 영향으로 색분산의 영향이 시스템 특성에 크게 영향을 미칠 것으로 쉽게 예상을 해 볼 수 있다. 10Gbps NRZ 시스템에서는 색분산을 약간 부족 보상(under compensation) 하는 것이 성능개선에 도움이 된다고 알려져 있다[7]. 40Gbps에서는 잔류 색분산이 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 색분산 보상비 (compensation ratio, CR)를 95%에서 105%로 변화시키면서 Q 값을 시뮬레이션 하였으며 그 결과를 그림4에 나타내었다. 이 그림으로부터 시스템 성능이 CR=100%을 중심으로 거의 대칭적으로 이루어짐을 알 수 있다. 따라서 40Gbps에서는 약간의 부족보상(under compensation) 이나 과도 보

상(over compensation) 이 성능개선에 도움을 주지 못함을 알 수 있다. 그림4(a)와 (b)의 비교에서 이 같은 특성은 전송거리가 멀어짐에 따라 더욱 두드러진다. (추후의 시뮬레이션에서는 항상 CR=100% 가정)

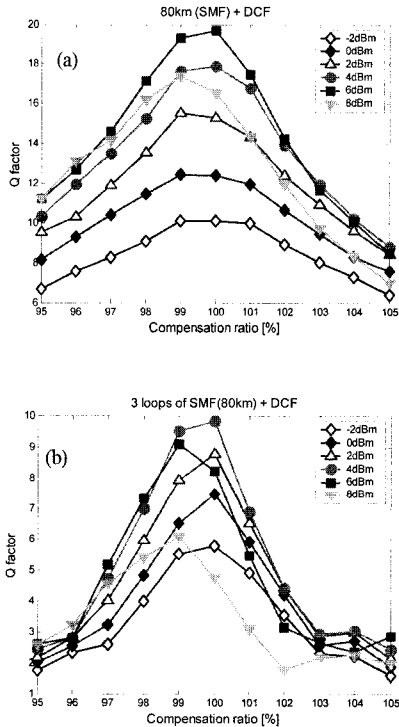


그림 4. 보상비에 따른 Q 값 (a) 전송거리 = 80km, (b) 전송거리 = 240km
Fig 4. Q values as a function of compensation ratio (a) transmission distance = 80km, (b) transmission distance = 240km

또한 광신호의 전송은 일반적으로 입력신호의 전력을 증가시키면 좀 더 먼 거리까지 전송 시킬 수 있지만, 어느 정도가 넘으면 광섬유의 비선형 특성에 의해 오히려 시스템 성능이 떨어진다고 알려져 있다[8,9]. 그림 4로부터 전송거리가 80km 일때는 입력신호의 크기가 6dBm 일때 가장 우수한 특성을 보이나, 전송거리가 240km로 증가할 때는 입력신호가 4dBm 일때 가장 우수한 특성을 나타낸다. 지금까지는 색분산을 후 보상(post compensation) 으로 이루어진다고 가정하였으며 또한 80km 의 한 span에서 하나의 광증폭기 (EDFA) 만이 사

용되었다고 가정하였다. 그러나 한 구간(span)에서 신호의 손실이 크면, 광증폭기의 이득 역시 이를 상쇄할 만큼 커야 하고 따라서 잡음특성 역시 좋지 않게 된다. 40Gbps 에서 좀 더 먼 거리를 전송할 수 있게 하기 위해 한 구간에서 두 EDFA 가 DCF의 전,후에 사용되었을 경우를 알아 보자.

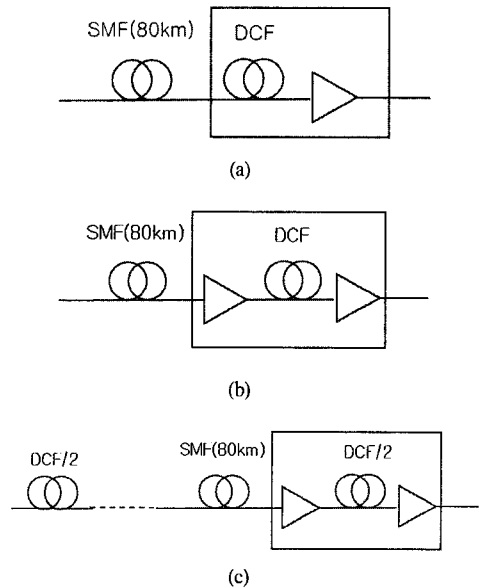


그림 5. 색분산 보상 구조 (a) 후 보상 및 1 EDFA 사용 (b) 후 보상 및 2 EDFA 사용 (c) 대칭 보상 및 2 EDFA 사용
Fig 5. Chromatic dispersion compensation (a) post compensation and 1 EDFA (b) post compensation and 2 EDFAs (c) symmetrical compensation and 2 EDFAs

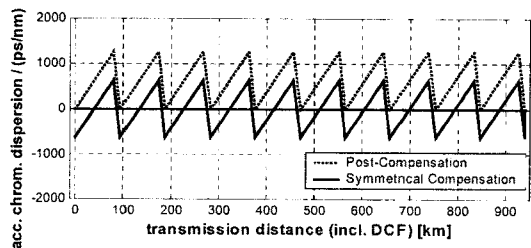


그림 6. 전송거리에 따른 누적 색분산
Fig 6. Accumulated chromatic dispersion

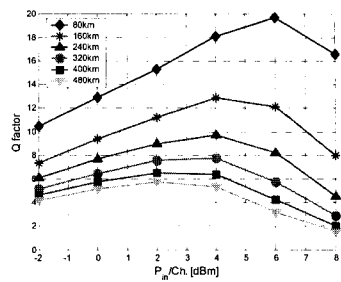
그림 5는 시뮬레이션에서 사용된 세가지 서로 다른 색보상 및 증폭기 구조를 나타낸 것이며, 그림 6은 누적 색 분산의 양을 전송 거리에 따라 나타낸 것이다. EDFA를 2개 사용 하였을 때와 색보상 맵(dispersion compensation map)을 대칭으로 하였을 경우 시스템 성능 개선 여지가 있는지를 판단하기 위하여 입력 신호의 크기 및 전송 거리에 따라 Q 값을 시뮬레이션 하였으며, 그 결과를 그림 7에 나타내었다.

그림 7의 (b)와 (c)의 비교에서 대칭 보상이 오히려 약간 성능이 더 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 NRZ 포맷을 사용하는 40Gbps 에서 대칭 분산 맵은 성능 개선에 거의 기여하지 못함을 알 수 있다. 그러나, 그림 7의 (a) 와 (b)의 비교에서 1 EDFA를 사용하였을 경우보다 2 EDFA를 사용함으로써 현저히 성능을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다. 예로 $Q > 8$ ($BER < 10^{-15}$) 값을 가지기 위해, 1 EDFA 구조로는 최대 전송거리가 약 240km이지만, 2 EDFA 구조로는 480km, 즉 전송거리를 약 2배로 증가시킬 수 있다.

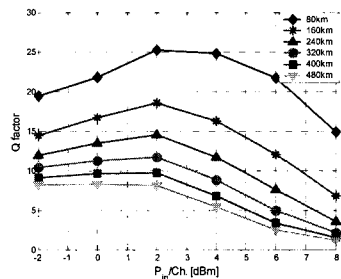
III. 결 론

본 논문에서는 파장분할 다중화 전송방식의 각 채널 전송율을 40Gbps로 증가시켰을 때, 최적 동작 매개변수(parameters) 찾기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 광섬유는 복미 및 유립을 포함한 전 세계적으로 가장 광범위하게 매설되어 있는 표준단일모드 (standard single mode fiber)라고 가정하였으며, 광신호의 변조 방식 역시 기존에 가장 널리 사용되고 있는 NRZ(Non-Return to Zero)방식으로 가정하였다.

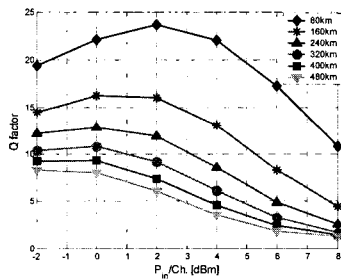
수신단의 필터(optical 및 electrical) 대역폭을 최적화하였고, 역 다중화기의 광 필터는 삽입 손실이 5dB 이상 크지 않다면, Gaussian 모양 보다는 Flattop 모양의 광 필터가 성능 개선에 더 유리함을 알 수 있었다. 이는 Flattop 필터가 채널사이의 간섭을 최소화하는데 더 뛰어나기 때문이다. 또한 색분산 보상 및 입력신호 크기의 최적화를 통해 기존의 단일 모드 광섬유로 약 480km ($BER < 10^{-15}$) 까지 전송할 수 있음을 알았다.



(a)



(b)



(c)

그림 7. 입력 신호 크기 대 Q 값 (a) 후 보상 및 1 EDFA 사용 (b) 후 보상 및 2 EDFA 사용 (c) 대칭 보상 및 2 EDFA 사용
Fig 7. Input power vs. Q values (a) 1 EDFA, post compensation, (b) 2 EDFA, post compensation, (c) 2 EDFA, symmetrical compensation

감사의 글

본 연구는 2006년도 동의대학교 학술연구비 (2006AA148) 지원의 결과로 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1] H. Taga, "Long distance transmission experiments using WDM technology", *J. of Lightwave Technology*, Vol. 14, No. 6, pp. 1287-1298, June 1996
- [2] D. Breuer, K. Obermann, K. Petermann, "comparison of $N \times 40\text{Gb/s}$ and $4N \times 10\text{Gb/s}$ WDM Transmission over standard single-mode fiber at $1.55\mu\text{m}$ " *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10, No. 12, pp.1793-1795, Dec. 1998
- [3] F. Forghieri, "Granularity in WDM Networks: The Role of Fiber Nonlinearities", *EEE Photonics Technology Letters*, Vol. 8, No. 10, pp.1400-1402, Oct. 1996
- [4] C.J. Anderson, J.A. Lyle, "Technique for evaluating system performance using Q in numerical simulations exhibiting intersymbol interference", *Electronics Letters*, Vol. 30, No. 1, pp.71-72, Jan. 1994
- [5] G. Bosco and R. Gaudino, "Towards new semi-analytical techniques for BER estimation in optical system simulation", *NFOEC 2000*, Vol.1, pp.135-145, August, 2000
- [6] C. K. Madsen and J. H. Zhao, *Optical Filter Design and Analysis*, Chap. 4, Wiley 1999
- [7] E. Iannone et.al, *Nonlinear Optical Communication Networks*, Chap. 7, Wiley 1998
- [8] M.I. Hayee, A.E. Willner, "NRZ Versus RZ in 10-40Gb/s Dispersion-Managed WDM Transmission Systems", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, No. 8, pp. 991-993, 1999
- [9] G.P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", 2nd ed., Academic Press, 1995

저자소개



이종형(JongHyung Lee)

동의대학교 전자공학과 교수

※관심분야: 광통신 및 통신 시스템 설계



한대현(DaeHyun Han)

동의대학교 전자공학과 교수

※관심분야: 초고주파 및 전자장



이용재(YongJae Lee)

동의대학교 전자공학과 교수

※관심분야: 반도체 소자, 공정



최병윤(ByeongYoon Choi)

동의대학교 컴퓨터공학과 교수

※관심분야: 정보통신용 SoC 설계