

장거리 광신호 전송에서 분산 맵 최적화와 분산 기울기 불일치의 영향

김민성*, 최보훈**

* 동명정보대학교 정보통신공학과, ** 호주 멜버른대학교 전기전자공학과

Dispersion Map Optimization and Dispersion Slope Mismatch Effect on optical long-haul transmission

Min-Sung Kim*, Bo-Hun Choi**

*Department of Information & Communications Engineering, TongMyong University of Information Technology

**Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Melbourne, Australia

요약

표준 단일모드 광섬유를 전송선으로 사용하고, Raman 증폭기 없이 EDFA 증폭기만을 사용하여, 각 채널당 10 Gb/s의 파장다중화된 40개 채널신호들을 3,000km 전송하는 경제적인 광 링크를 구성한 뒤, 이 링크의 전송 성능 최적화를 위해 분산 맵 구조의 차이에 따른 성능 차이를 분석하였다. 이 링크의 분산 맵은 전치분산보상, 구간분산보상 그리고 후치분산보상으로 나누어 지는데 이들의 다양한 조합을 통해 15가지의 다양한 분산 맵들을 구성한 뒤 각각의 경우를 분석하여 링크 성능을 크게 향상시키는 최적화된 분산 맵 구조를 구하였다. 이 최적화된 분산 조건이, 단일모드 광섬유와 분산보상 광섬유가 가지는 파장에 따른 분산 기울기의 불일치로 인해 받게 되는 영향이 조사되었고 이 영향이 링크의 성능에 미치는 효과가 무시될 수 있는 분산 기울기의 허용 가능한 불일치 범위를 구하였다.

I. 서문

광신호 장거리 전송은 초고속 전송과 대용량 전송의 두 방향축을 중심으로 급격히 발전해 왔다. 최근에 이러한 기술의 상업화 과정에서 기술적인 선진성과 함께 중요하게 요구되고 있는 것이 경제적인 효율성이다^[1]. 10 Gb/s 전송기술을 사용하는 경제적인 방법 중의 하나는, 새로운 분산보상 기능이 강화된 특수 광섬유나 Raman 증폭기 없이 기존에 포설되어 있는 표준 단일모드 광섬유(Standard Single Mode Fiber: SSMF)와 표준적인 100 km 증폭구간 거리 그리고 에르븀 첨가 광섬유 증폭기(Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA)를 사용하는 것이다. 이 방법은 새로운 기술에 기반을 둔 전송 방법에 비해 경제적인 장점을 가지는 것이 분명하지만 그 전송 성능이 상대적으로 제한적이다.

시스템 최적화, 특히 분산 맵(map) 최적화가 이 같은 SSMF 전송 링크의 전송 거리와 전송 용량 제약을 완화시킬 수 있지만^[2], 분산 맵의 변화에 따른 효과를 실험적으로 분석하는 것은 현실적인 어려움을 가지고 있다. 왜냐하면, 다양한 분산조건을 비교하게 위해 많은 다양한 길이의 분산 보상 광섬유(Dispersion Compensation Fiber: DCF)와 이에 맞게 제작된 다양한 성능의 EDFA들이 요구되기 때문이다. 그 대안으로 컴퓨터 실험을 통한 연구가 활발하게 이루어지고 있으나, 현재까지 분산 맵 최적화 문제는 충분히 분석되지 않고 있으며 더구나 파장에 따른 분산 기울기 불일치 문제는 다루어지지 않고 있다^[3-4]. 본 논문에서는 SSMF를 전송 광섬유로 하는 30 x 100 km 거리에 대해 10 Gb/s의 채널 속도를 가진 40개의 파장다중 Return-to-Zero(RZ) 채널 신호들을 전송하는 링크를 구성한 뒤, 이 링크에서 다양한 분산 보상 맵의 영향을 조사하고자 한다.

II. 본문

40 채널의 파장 다중화 전송 링크의 구성도가 Fig. 1에서 주어지는데, 30회의 증폭 구간(amplification span)을 거치며, 채널속도가 10 Gb/s 이고 RZ 전송신호를 사용하는 40개의 채널로 구성되어 있다. 각 증폭구간은 100 km SSMF와 그에 상응하는 DCF, 2개의 EDFA 증폭단 그리고 이득 평탄화 필터(Gain Flattening Filter: GFF)로 구성된다. GFF는 광신호가 광섬유를 따라 진행하면서 생기는 라만 산란(Raman scattering)에 의해, 파장에 따라 다른 이득의 차이를 보상해 주기 위해 사용되었다. 이 링크를 위한 분산 맵은 세 부분으로 나누어질 수 있는데, 각 증폭구간에서 분산보상 광섬유의 길이에 따른 구간보상, 신호 전송부에서 덧붙여지는 분산보상 광섬유의 길이에 따른 전치보상, 그리고 수신부의 직전에 덧붙여지는 분산보상 광섬유의 길이에 따른 후치보상 등으로 구성된다.

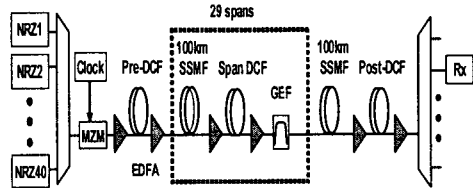


Fig. 1. 표준 단일 모드 광섬유와 EDFA 증폭기를 사용한 3000 km의 전송 링크의 구성도

전송링크를 위한 40개의 다중화 채널들의 파장은 1533.5 nm 부터 1564.7 nm 사이에 있으며 100 GHz 채널 간격을 가진다. 각 채널은 처핑없는 Mach-Zehnder 변조기를 사용하여 NRZ 신호로 만들어 진 후 RZ 포맷으로 변환하였다. 사용된 SSMF와 DCF의 주요한 상수 값들이 Table 1에 주어지는데, 이 값들은 상업적으로 실제

Table 1. 표준 단일모드 광섬유 (SSMF)와 분산 보상 광섬유 (DCF)의 상수들

Specifications	SSMF	DCF
Dispersion (ps/nm/km)	17	-90
Dispersion slope (ps/nm ² /km)	0.058	-0.32
Relative dispersion slope (nm ⁻¹)	0.0034	0.0036
Fibre loss (dB/km)	0.25	0.5
Effective area (μm ²)	80	20

이용되는 광섬유의 값들이다. EDFA의 잡음지수는 5 dB 이고 이들은 DCF의 양쪽에 위치시켰다. 이 전송 링크 실험을 위해 모델링 소프트웨어인 VPItransmissionMaker™를 사용하였다. 이 링크 시스템의 성능은 주로 채널 4 (1562.2 nm), 채널 20 (1549.3 nm), 그리고 채널 37 (1535.8 nm) 등 3개의 기준채널의 Q 값들에 의해 평가되었고 필요한 경우는 전 채널의 Q 값을 모두 계산하였다.

먼저, 입력 광 신호 세기의 적절한 선택은 전송 링크 디자인의 가장 중요한 최적화 요건중의 하나이다. 광 신호 전송선인 SSMF와 DCF로 입력되는 광 신호의 세기는 시스템 성능에 강한 영향을 미치게 된다. 본 실험에서는, 각 증폭구간에 있는 SSMF와 DCF의 앞에 위치한 EDFA의 출력 광 신호 세기를 변화시킴으로써 다양한 세기의 광 신호를 링크에 적용시킬 수 있었다. 분산 탭 비교를 위한 전 단계로, 각 증폭구간에서 완전한 분산 구간보상을 사용하고 전치보상이나 후치보상을 사용하지 않았을 때의 분산 탭 구조를 이용하였고, 이 분산 조건에서 EDFA로부터 나오는 출력 광 세기들이 링크를 위해 최적화 되었다. 시뮬레이션 결과는 SSMF에 대한 입력신호로는 18 dBm (2 dBm/채널), 그리고 y 축 DCF에 대한 입력신호로는 9 dBm (-7 dBm/채널)의 최적 조합이 주어진다. 이후 다양한 분산 탭의 차이 비교를 위해, 분산 탭의 구조가 바뀌더라도 이 광 세기들은 똑같은 값이 사용되었다.

사용된 분산 탭의 구조를 살펴보면, 전치분산보상을 위해서는 분산 값이 링크의 시작점에서 zero 인 경우 (Dispersion-Zero-At-Start: DZAS), 누적된 분산 값이 링크의 중간 점에서 zero 인 경우 (Dispersion-Zero-At-Middle: DZAM), 그리고 누적된 분산이 전송 링크의 마지막 점에서 zero 인 경우 (Dispersion-Zero-At-End: DZAE)의 세 종류의 전치보상들이 고려되었다.

이 같은 분산 전치보상들은 Table 1의 데이터로부터

계산된, SSMF 또는 DCF의 적절한 길이에 의해 결정되었다. 구간분산보상을 위해서는 95%, 97.5% 100%, 102.5%, 그리고 105%의 다섯 종류의 서로 다른 분산 보상 조건들이 고려되었는데 이 가운데 100% 구간보상은 완전한 분산보상을 의미하며, 100% 보다 낮은 것은 부족한 보상을, 높은 것은 과도한 보상을 의미한다. 이들이 세 가지 경우의 전치보상들과 어울어져 15가지의 분산 조건 조합을 이루게 된다. 이와 같은 전치보상과 구간보상의 조합으로 결정된 구조에서, 마지막모수인 부에 덧붙여지는 DCF의 길이, 혹은 경우에따라서는 SSMF의 길이를 가변시켜 가면서 최적의 후치보상조건을 찾았다.

Fig. 2는 DZAS의 전치보상 구조와 각각의 다른 구간보상조건의 조합 하에서, 후치보상 조건을 변화시키면서 구한 채널 4, 20, 그리고 37의 Q 값들을 보여준다. 여기서, 수평축은 사용된 후치보상용 광섬유의 분산값인데 그 값이 음수인 경우는 DCF가 사용되었음을 말하며 양수 값은 DCF 대신 SSMF가 사용되었음을 의미한다.

Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이, 각각의 구간보상의 결과에서, 각 채널의 최고 Q 값을 위한 후치보상의 조건이 조금씩 차이가 있다. 따라서 분산 탭의 성능 비교를 위한 최적의 조건은, 세 채널의 최고 Q 값들 중에서 가장 낮은 값이 그 채널에서 최고가 되는 조건으로 선택하였다. 이는 링크의 성능 평가의 기준은 모든 채널 중 최저 성능을 가진 채널의 한계가 중요한 평가 기준이 되기 때문이다. 이 최고 Q 값들 중에서 가장 낮은 Q 값을 "대표 Q 값"이라고 부르며 각각의 구간보상 구조에서 대표 Q 값의 비교를 통해 다섯가지의 다른 구간보상 조건을 비교했다. Fig 2.에서 알 수 있듯이 DZAS 조건에서 최고의 성능은 102.5% 구간보상에서 이루어졌으며 이때 2 km DCF (180 ps/nm)가 후치보상으로 사용되었고, 20 x log (대표 Q 값)은 14 dB이며, 완전 구간 보상인 100% 보상 때에는 이 값이 13.5 dB였다.

DZAM과 DZAE의 전치보상의 경우에도 DZAS 경우의 Fig 2와 같이, 각각의 분산보상 조합 하에서 후치보상의 최적화 과정을 통해 대표 Q 값을 구한 뒤 그 값들이 비교하였으며, 그 결과를 Table 2에 정리하였다.

이 값들과 더불어, 각각 분산 탭에서 중심파장 채널을 기준으로, 전송거리에 따른 누적된 분산 값들을 보여주는 그림이 함께 주어졌다. 그 결과는 세 가지의 전치보상 조건 모두에서 100% 보다 높은 구간보상이 보

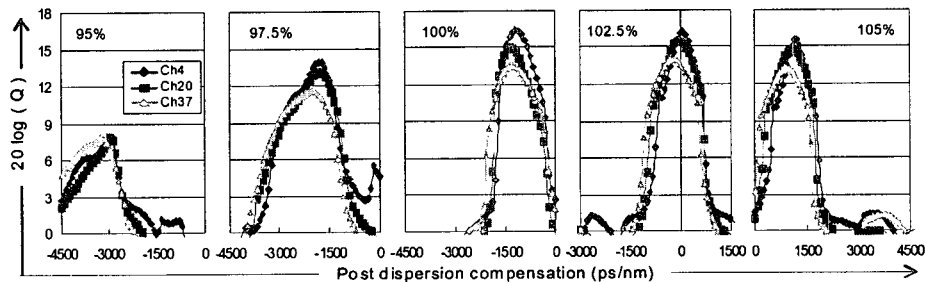
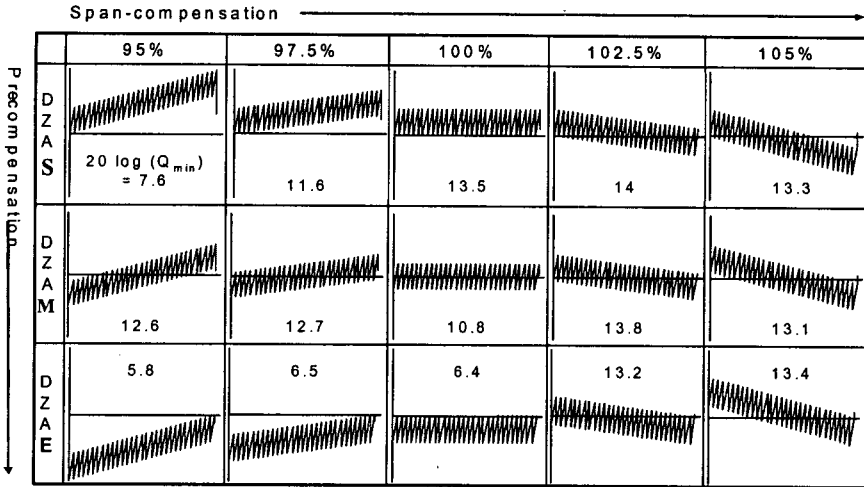


Fig. 2. DZAS 전치보상 조건을 가지는 5가지의 다른 구간보상 탭들에서 후치보상 광섬유의 분산 값의 변화에 따른 Q 값

Table 2. 다양한 전치보상과 구간보상이 결합된 15가지의 분산 맵들의 누적분산 값의 그래프이며 이들이 최종적으로 후치보상 최적화를 거쳐 구해진 Q 값들



다 좋은 성능을 보여주었다.

나아가, 100% 보다 높은 구간보상 조건들에서 세 가지 전치보상조건들을 비교하면, DZAS가 제일 좋은 결과를 보였다. 최적의 결과는 DZAS 조건 하에서 102.5% 구간보상의 분산 맵 구조에서 구해졌으며, 이와 함께 나머지 다른 두 전치보상에서도 102.5% 구간보상은 유사한 좋은 결과를 가졌는데 그 이유는 이들의 보상 맵의 구조가 거의 유사하기 때문이다.

이와 같은 분산 맵의 최적 조건은 누적 분산 양의 적절한 균형에서 나왔다. 누적된 분산 양이 제로점으로부터 너무 멀어지는, 큰 분산 값이 생기는 맵 구조는 지양되어야 하지만, 누적 분산값이 전 전송거리에서 항상 제로 값 근처에 머무르는 구조 또한 성능 저하를 초래하게 된다. 이는 적은 분산 값이 두 인접한 파장 채널 사이의 위상지터 또는 cross talk 을 유발시켜서 신호 왜곡을 가져 오기 때문이다.

분산보상을 위해 고려되어야 할 중요한 변수중의 또 다른 하나는 “분산기울기” 혹은 “파장에 따른 분산의 변화”이다. 파장파장 다중화 전송에서 분산과 함께 분산기울기가 같이 보상되어야 하는데, 완전한 분산기울기 보상조건은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta_{SMF}}{D_{SMF}} = \frac{\Delta_{DCF}}{D_{DCF}}$$

여기서 D는 광섬유 분산, Δ는 분산 기울기이다. 실제로 상업적 목적으로 광섬유가 사용될 때, SSMF와 DCF 사이의 분산 기울기가 언제나 일치되도록

사용할 수 있는 것은 아니며, 앞서의 계산에서 사용한 값들도 DCF가 SSMF에 대해 4% 초과한 기울기이다.

앞서 구한 최적의 전치보상과 구간보상조건인 분산 맵 구조에, 다섯 가지의 분산 기울기 불일치 조건, 즉 10% 초과, 4% 초과, 일치, 4% 미달, 10% 미달의 경우들이 적용되었다. 이와 같은 조건에서, 후치분산 양의 변화 통해 후치 분산이 최적화된, 각각의 다른 분산 기울기 불일치 경우의 링크 성능 결과가 Fig. 3에 주어져 있다.

그림에서 알 수 있듯이, 각각의 채널에 대해, 만약 최적의 Q 값을 얻기 위해 적절하게 후치분산보상을 취해 준다면, 분산 기울기 보상의 차이가 최적의 Q 값에 미치는 영향은 크지 않다는 것을 알 수 있다. 이는 만약 후치분산보상이 각 개별 채널별로 이루어진다면 이 기울기 불일치의 효과가 최소화 될 수 있다는 것을 의미한다. 그러나, 만약 후치보상 최적화가 모든 채널에 대해 하나의 길이의 후치보상 광섬유로만 이루어진다면, 이 기울기의 차이에 의한 효과는 커지게 된다. Fig. 3에서 회색 원은 각 분산 기울기 불일치 경우에서 대표 Q 값을 표시하며 이를 통해 후치보상 조건을 알 수 있다.

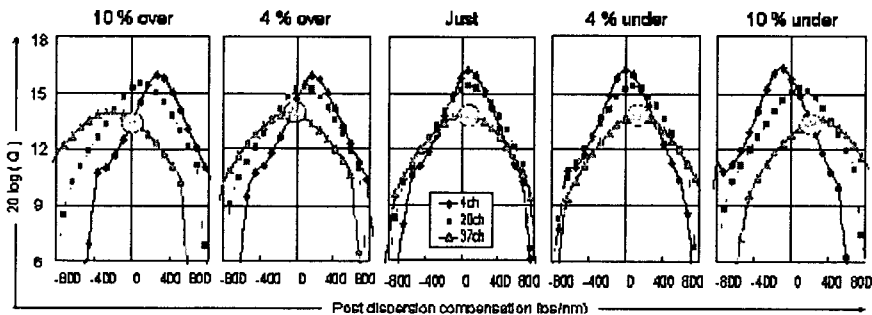


Fig3. 각각의 분산 기울기 차이가 10%미만, 4%미만, 일치, 4%초과, 그리고 10%초과인 경우, 세 대표적인 채널 4, 20, 그리고 37의 후치보상 값의 변화에 따른 Q 값

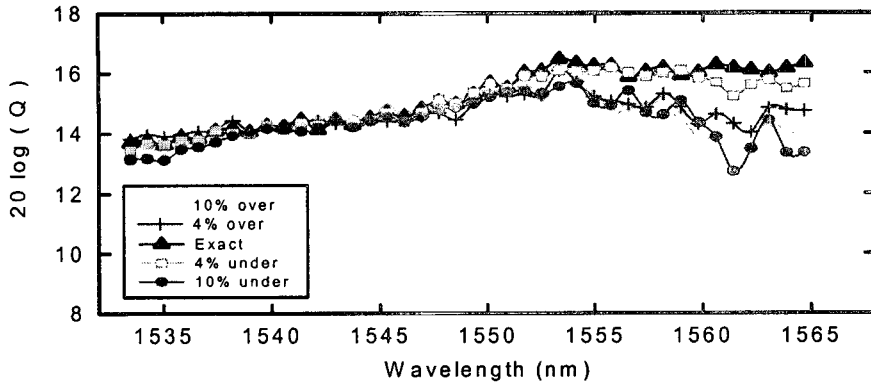


Fig. 4. 다섯 가지의 다른 분산 기울기 불일치조건에 대해, 각각 하나의 최적화된 후치분산 광섬유를 사용하여 전 40 채널에 대해 구한 Q값들.

감사의 글

본 연구는 정보통신부 2003년 기초기술연구지원 사업(과제번호 03-기초-0036)의 지원으로 수행되었으며 감사드립니다.

참고문헌

- [1] G. Charlet, S. Lanne, L. Pierre, C. Simonneau, P. Tran, H. Mardoyan, P. Brindel, M. Gorlier, J.-C. Antona, M. Molina, P. Sillard, J. Godin, W. Idler, and S. Bigo, Optical Fiber Communication Conference (2003), PD25
- [2] D. G. Foursa, C. R. Davidson, M. Nissov, M. A. Mills, L. Xu, J. X. Cai, A. N. Pilipetskii, Y. Cai, C. Breverman, R. R. Cordell, T. J. Carvelli, P. C. Corbett, H. D. Kidorf, and N. S. Bergano, Optical Fiber Communication conference (2002), FC3
- [3] B. Zhu, L. Leng, L. E. Nelson, S. Stulz, T. N. Nielsen, and D. A. Fishman, Optical Fiber Communication Conference (2001), TuN3.
- [4] Y. Frignac and S. Bigo, Optical Fiber Communication Conference (2000), TuD3.

III. 결론

RZ 전송신호의 채널속도가 10 Gb/s를 가지는 40개의 파장다중화 채널을 송신부로 사용하며, 표준 단일모드 광섬유 (SSMF)와 EDFA 증폭기 2단으로 이루어진 경제성이 있는 3000 km 전송 링크에서, 이 링크의 다양한 분산 구조에서의 전송 성능을 분석함으로써, 성능 향상을 위한 최적화 링크 분산 조건을 구하였다. 15가지의 다양한 분산 맵들의 성능 비교에서 전치분산 없이 102.5%의 구간보상조건이 가장 좋은 성능을 주었다. 모든 채널의 후치분산보상 최적화가 단지 하나의 광섬유로만 이루어지는 경우에는 분산 기울기 차이를 $\pm 4\%$ 의 이내로 제한한다면 링크의 성능 저하는 무시될 수 있다.