

전파 매개변수 매핑을 통한 광 증폭 전송시스템의 시뮬레이션

정희원 김 용 범*, 이 용 원*, 이 명 문*, 유 진 태*, 박 진 우*

Simulation of Optical Amplified Transmission System Using Propagation Parameter Mapping

Yongbum Kim*, Yongwon Lee*, Myungmoon Lee*, Jintae Yu*, Jinwoo Park* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 장거리 광 전송로에 대한 시뮬레이션을 효과적으로 빨리 할 수 있는 전파 매개변수 매핑 방법을 제안한다. 이 방법은 많은 광섬유 섹션들과 증폭기들로 구성된 긴 전송로를, 매핑된 전파 매개변수를 갖는 단 하나의 광섬유 섹션의 전송로로 모델링 하는 것이다. 그리고, 본래의 전송로 대신 모델링된 전송로를 사용하여 시뮬레이션을 하고 성능을 분석한다. 그것의 성능을 eye diagram, 정상 시뮬레이션과 제안된 매핑 방법에 의한 eye-opening들의 차이, 시뮬레이션 시간의 감소 정도를 통해 확인한다. 시뮬레이션 결과에서 이 방법은 정상 시뮬레이션과 비교할 때 3% 이내의 eye-opening 차이를 가질 만큼 광 신호의 전파특성을 정확하게 서술하고 시뮬레이션 시간은 광섬유 섹션의 수가 20일 때 정상 시뮬레이션의 34.72%로 감소시켜 주는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a propagation parameter mapping method which helps to evaluate the performance of in-line optical amplified transmission line efficiently. This method gives the transmission line model with mapped parameters for simplified simulation. It has been shown in the results that the proposed mapping method can describe the propagation behavior of optical pulses with only less than 3% difference in eye-opening ratio but with calculation time reduction to 34.72% of the normal method.

I. 서 론

EDFA (erbium-doped fiber amplifier)의 출현으로 1.55 μm 파장에서의 광섬유 손실 문제가 극복되어, 장거리 광통신 시스템의 손실은 증폭기들을 주기적으로 이용하여 보상할 수 있게 되었다. 최근 in-line 광 증폭 전송시스템의 성능을 분석하는 연구가 많이 진행되어 왔다. 이를 위해서는 광섬유 내에서 광 펄스의 전파를 서술하는 비선형 Schrödinger 방정식을 푸는 것이 필요한데, 그 방법으로는 수치 해석적 방법^[1-4]과, 분석적 방법^[5-7]이 있다.

비선형 Schrödinger 방정식은 광섬유 내에서 광

펄스의 전파를 서술하는 비선형 편미분 방정식으로, 일반적으로 특별한 경우를 제외하고는 분석적 해를 얻을 수 없다. 분석적 방법은 많은 시간을 들이지 않고도 비교적 정확하게 전송 특성의 변화를 예측하기 쉽다는 장점이 있다. 그러나, 그 결과들은 대개 제한적인 조건하에 있는 것들이다; 예를 들면, 정해진 입력 파형의 경우, 특정 광섬유의 경우, 그리고 특정 형태의 결과들(RMS 펄스 폭, 피크 파워의 변화, 펄스 확산 요소) 등이다. 그것은 다양한 전송 환경 하에서 발생하는 신호의 왜곡에 대해 모든 정보를 제공하지 않는다.

그러므로, 광섬유 내에서 이루어지는 광 펄스의

* 고려대학교 전자공학과 광통신망연구실 (kimyb@korea.ac.kr)
논문번호 : 010031-0308, 접수일자 : 2001년 3월 8일

전파에 대해 정확히 이해하기 위해서는 많은 경우에 수치해석적 접근이 필요하다. 수치해석적 분석은 다양한 매개변수들의 변화에 따른 광 전송특성에 대한 상세 정보를 정확하게 줄 수 있다. 반면에, in-line 광 증폭기들이 들어있는 장거리 전송선로를 시뮬레이션 하는 것은, 광 증폭기와 광섬유의 섹션이 많을수록 전송로 구성과 분석에 많은 시간이 걸리기 때문에 지루한 작업을 요구한다.

본 논문에서는, 장거리 광 전송로에 대한 시뮬레이션을 단순하게 하고 빨리 할 수 있는 전파 매개변수 매핑 방법을 제안한다. 이 방법은 많은 광섬유 섹션들과 증폭기들로 구성된 긴 전송로를, 매핑된 전파 매개변수를 갖는 단 하나의 광섬유 섹션을 갖는 전송로로 모델링 하는 것이다. 그리고, 본래의 전송로 대신 모델링된 전송로를 사용하여 시뮬레이션을 하고 성능을 분석한다. 그것의 성능을 eye diagram, 정상 시뮬레이션과 제안된 매핑 방법의 eye-opening들의 차이, 시뮬레이션 시간의 감소 정도를 통해 확인한다.

II. 전파 매개변수 매핑

세기 변조(intensity modulation)된 신호가 광섬유를 통과할 때, 비선형적인 위상의 변화를 겪게 되는데 이를 자기위상변조(Self-Phase Modulation : SPM)라고 하며, 그 위상의 변화량은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\phi_{NL}(z, T) = \gamma |A(z, T)|^2 \quad (1)$$

여기서 z 는 거리이고, T 는 군속도로 펄스와 함께 움직이는 좌표계(frame of reference)로 측정된 시간, γ 는 광섬유의 비선형 계수로서 $2\pi n_2/(\lambda_0 A_{eff})$ 로 주어지고 이 때 n_2 는 광섬유의 비선형 굴절률 계수, λ_0 는 신호의 파장이고 A_{eff} 는 광섬유 코어의 유효면적이며, A 는 신호의 진폭이다.

위상변화량 $\Delta\phi_{NL}$ 이 시간의 함수이므로, SPM은 주파수 칩(chirp)이라 불리는 주파수 천이 $\delta\omega$ 를 발생시킨다.

$$\delta\omega = -\frac{\partial\Delta\phi_{NL}}{\partial T} \quad (2)$$

입의의 거리 z 에서의 칩두 파워 $P(z)$ 와 $z=0$ 에서의 정규화된 진폭 $U(0, T)$ 를 이용하여 주파수 천이를 표현하면 다음과 같이 된다^[8].

$$\delta\omega(z, T) = -\gamma P(z) \frac{\partial |U(0, T)|^2}{\partial T} \quad (3)$$

이와 같이 SPM에 의해 발생된 새로운 주파수 성분과 군속도 분산(GVD: group velocity dispersion)의 상호작용으로 광 신호에 비선형 왜곡이 발생하게 된다.

그림 1은 in-line 광 증폭 전송시스템의 구조를 나타내는데, 여기서 $P_n(n=1, 2, \dots, N)$ 은 광 증폭기의 출력 칩두 파워이고, l_n 은 $z=0$ 에서부터의 거리이다. 신호의 파워는 광섬유 내에서 전송 되어감에 따라 지수 함수적인 감소를 겪게 되고 SPM에 의한 주파수 chirp의 크기는 $P(z)$ 에 비례하므로, SPM에 의해 발생된 주파수들은 거리 z 에 따른 분포를 갖고 광섬유 내를 진행하면서 서로 다른 분산을 겪게 된다. 따라서 입력 광신호가 광섬유로 전파되면서 겪게 되는 SPM에 의한 전체 비선형 왜곡(σ_{dist})은 SPM에 의해 발생된 주파수 성분들이 광섬유를 통해 GVD와 상호 작용하여 생기는 왜곡들의 합으로 볼 수 있으며, 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{dist}(T) = \int_0^L \delta\omega(z, T) W(z) dz \quad (4)$$

$$W(z) = \frac{\int_z^L D(r) dr}{\int_0^L D(r) dr} \quad (5)$$

여기서 L 은 전송거리이고 D 는 광섬유의 분산파라미터이며, $W(z)$ 는 임의의 지점 z 에서 발생된 주파수 성분들이 남은 거리를 진행하면서 겪게 되는 GVD와의 상호작용에 대한 가중치를 전체거리에 대한 값으로 정규화한 함수이다.

식 (3)의 $P(z)$ 를 그림 1의 구조에 대하여 구해보면 다음과 같다.

$$P(z) = \sum_{n=1}^N P_n \exp[-\alpha(z - l_{n-1})] [u(z - l_{n-1}) - u(z - l_n)] \quad (6)$$

여기서 α 는 광섬유의 손실 계수이고, $u(z)$ 는 단

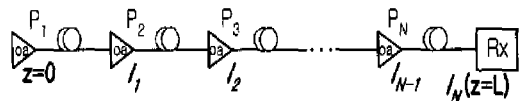


그림 1. In-Line 광 증폭 전송시스템의 구조

위계단함수이다.

광섬유 내의 분산값이 일정하다고 가정하면, 전송로에서 발생하는 전체 비선형 왜곡은 식 (3)~(6)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{dist}(T) = -\frac{\gamma}{L} \frac{\partial |U(0, T)|^2}{\partial T} \sum_{n=1}^N P_n \left[-\frac{L}{\alpha} \cdot [\exp[-\alpha(l_n - l_{n-1})] - 1] + \frac{1}{\alpha} [l_n \exp[-\alpha(l_n - l_{n-1})] - l_{n-1}] + \frac{1}{\alpha^2} [\exp[-\alpha(l_n - l_{n-1})] - 1] \right] \quad (7)$$

각 광 증폭기의 출력이 P_0 , 증폭기간 거리가 l 인 경우에 전체 비선형 왜곡(σ_{dist})은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_{dist}(T) = -\frac{\gamma P_0}{L} \frac{\partial |U(0, T)|^2}{\partial T} \times \left[-\frac{NL}{\alpha} (e^{-\alpha l} - 1) + \frac{l}{\alpha} \left\{ \frac{N(N+1)}{2} e^{-\alpha l} - \frac{N(N-1)}{2} \right\} + \frac{N}{\alpha^2} (e^{-\alpha l} - 1) \right] \quad (8)$$

그림 2는 제안된 전파 매개변수 매핑 방법에 의해 주어진 매개변수를 갖는 단순화된 전송시스템 구조를 나타낸다. 그림 1의 전송시스템에 적용된 것과 동일한 절차를 따르면 그림 2의 전송로에서 발생하는 전체 비선형 왜곡($\sigma_{dist, m}$)은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{dist, m}(T) = -\frac{\gamma_m P_m}{L_m} \frac{\partial |U(0, T)|^2}{\partial T} \left[\frac{1}{\alpha_m} (\exp(-\alpha_m L_m) - 1 + L_m \alpha_m) \right] \quad (9)$$

여기서 γ_m , P_m , L_m , α_m 등은 각각 매핑된 구조에서 광섬유의 비선형 계수, 광 증폭기 출력 침투 파워, 전송거리, 손실 계수를 나타낸다. $\sigma_{dist, m}$ 과 σ_{dist} 을 같도록 놓음으로써 그림 1과 그림 2 구조의 전파 매개변수간의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_m = P_0, \quad (10)$$



그림 2. 매핑된 전송시스템 모델

$$\gamma_m = \gamma, \quad (11)$$

$$L_m = L, \quad (12)$$

$$\left[K(e^{-\alpha l} - 1) - \frac{L}{\alpha} \right] \alpha_m^2 + L \alpha_m + \exp(-\alpha_m L) - 1 = 0 \quad (13)$$

여기서 $K = \frac{NL}{\alpha} - \frac{L(N+1)}{2\alpha} - \frac{N}{\alpha^2}$ 이다. 성능분석을 할 때 그림 1과 그림 2의 전송로 모두에 동일한 입력 신호가 사용되므로 식 (10)이 얻어진다. 동일 레벨의 파워에서 SPM에 의한 주파수 chirp의 양이 본래의 전송로와 매핑된 전송로에서 같도록 하기 위하여 식 (3)을 이용하면 식 (11)이 주어진다. 식 (12)는 같은 위치에서 같은 양의 주파수 chirp이 전체 비선형 왜곡에 기여하는 정도를 같게 해준다. 또한 식 (13)을 만족하는 α_m 을 구할 수 있다. 이상에서 얻은 전파 매개변수를 이용하면 그림 2의 전송로에 대한 성능분석을 할 수 있고, 그것은 사실상 그림 1의 전송로에 대한 분석결과를 제공해 준다.

III. 성능분석

그림 2의 채널 신호속도가 10 Gbit/s이고 광 증폭기간 거리가 20 km인 in-line 광 증폭 전송로에 대하여 제안된 전파 매개변수 매핑 방법을 적용하여 시뮬레이션을 하였다. 전송로의 광섬유로는 기존에 가장 많이 포설되어 사용되고 있는 SMF (standard single mode fiber)와 최근 새로운 광섬유로 주목받고 있는 NZ-DSF (non-zero dispersion shifted fiber)를 선택하였으며, 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1과 같다. 제안된 방법을 적용한 시뮬레이션 결과와 주어진 전송거리내의 모든 광섬유 스팬과 광 증폭기에 대하여 정상적으로 시뮬레이션한 결과를 비교, 분석하였다.

제안된 매핑 방법을 사용하여 손실 계수 α_m 을 구한 예를 표 2에 나타내었다. 여기서 N은 전송로에서 광섬유 섹션의 수를 나타낸다. N=1인 경우는 광섬유 섹션의 수가 한 개인 경우를 나타내므로, N=1일 때 매핑 방법을 이용하여 구한 α_m 의 값이 사용된 광섬유의 손실 계수의 값과 같게 된다. 또한 N 값이 증가할수록 매핑된 손실 계수 α_m 의 값이 감소함을 알 수 있다.

그림 3은 정상 시뮬레이션과 제안된 매핑 방법에 의한 시뮬레이션 결과로 얻어진, 전송 후의 펄스 패

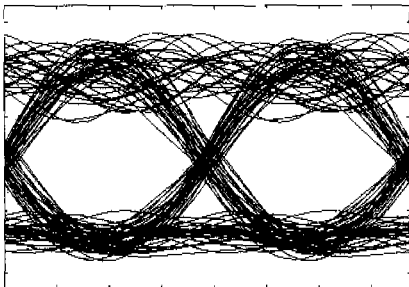
표 1. 시뮬레이션 파라미터

| Parameter | Unit | Value(SMF, NZ-DSF) |
|--------------------------------------|------------|-------------------------|
| PRBS pattern | - | 217-1 |
| Wavelength | nm | 1555 |
| Noise figure (EDFA) | dB | 4.5 |
| Dispersion(D) | ps/nm/km | (+16, +3.0) |
| Loss(α) | 1/km | (0.0510, 0.0472) |
| Nonlinearity coefficient(γ) | 1/(W · km) | (2, 2.3) |
| Input pulse form | - | RZ-Gaussian (FWHM=40ps) |

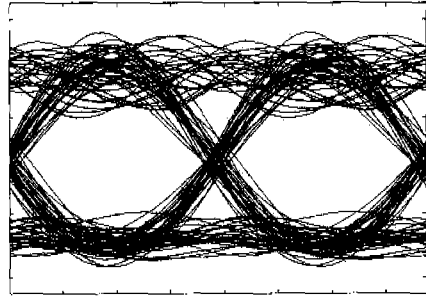
표 2. 매핑의 예 (10 Gbit/s, l=20 km)

| N | $\alpha_m(1/km)$ | SMF | NZ-DSF |
|----|------------------|--------|--------|
| 1 | | 0.0510 | 0.0472 |
| 2 | | 0.0323 | 0.0298 |
| 3 | | 0.0231 | 0.0214 |
| 4 | | 0.0180 | 0.0166 |
| 5 | | 0.0147 | 0.0136 |
| 6 | | 0.0124 | 0.0115 |
| 7 | | 0.0108 | 0.0099 |
| 8 | | 0.0095 | 0.0088 |
| 9 | | 0.0085 | 0.0078 |
| 10 | | 0.0077 | 0.0071 |

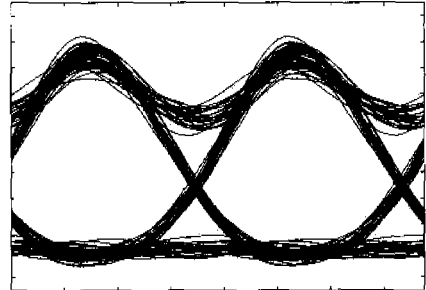
턴들 사이의 유사성을 확인시켜 준다. 그림 3 (a)와 (b)는 $P_0=0$ dBm일 때 NZ-DSF 20×20 km 전송 후의 펄스 패턴들이고, 그림 3 (c)와 (d)는 $P_0=5$ dBm일 때 NZ-DSF 7×20 km 전송 후의 결과이며, 그림 3 (e), (f) 그리고 (g), (h)는 각각 $P_0=0$ dBm, SMF 4×20 km와 $P_0=5$ dBm, SMF 5×20 km의 전송 결과를 나타낸다. 두 방법으로 얻어진 그림 3의 결과들을 볼 때 대응하는 펄스 패턴들이 거의 동일함을 확인할 수 있다.



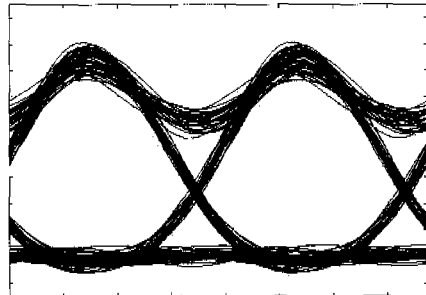
(a) 정상 방법 (NZ-DSF, N=20, $P_0=0$ dBm)



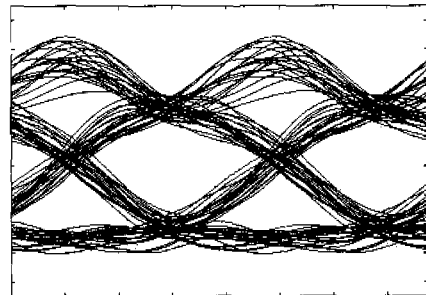
(b) 매핑 방법 (NZ-DSF, N=20, $P_0=0$ dBm)



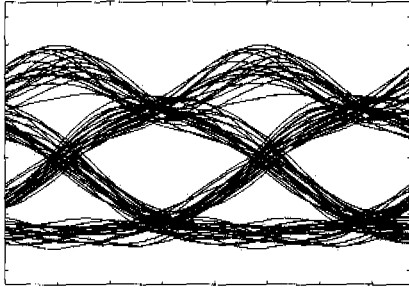
(c) 정상 방법 (NZ-DSF, N=7, $P_0=5$ dBm)



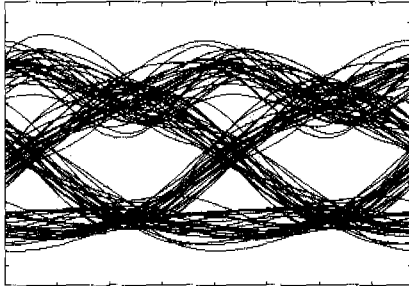
(d) 매핑 방법 (NZ-DSF, N=7, $P_0=5$ dBm)



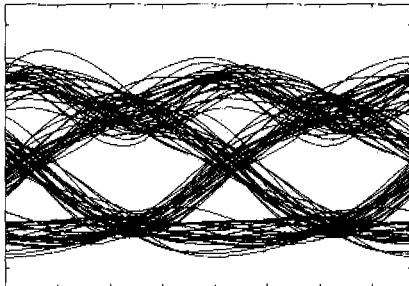
(e) 정상 방법 (SMF, N=4, $P_0=0$ dBm)



(f) 매핑 방법 (SMF, N=4, P₀=0 dBm)



(g) 정상 방법 (SMF, N=5, P₀=5 dBm)



(h) 매핑 방법 (SMF, N=5, P₀=5 dBm)

그림 3. 전송 후 펄스 패턴 비교

시뮬레이션 결과를 정량적으로 비교하기 위하여 두 시뮬레이션 결과에서 eye-opening (EO)의 비를 계산하였다. 그것은 정상 시뮬레이션 결과의 평균 EO에 대한, 제안된 매핑 방법에 의해 얻어진 펄스 패턴의 평균 EO의 비를 나타낸다. 여러 가지 조건에 대하여 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 사용된 두 종류의 광섬유를 이용한 전송결과에서 EO들의 차이가 모두 3%이내임이 확인되었다.

제안된 매핑 방법을 사용할 때 시뮬레이션 시간의 감소현상을 그림 5에서 볼 수 있다. 기대했던 것처럼 시뮬레이션 시간의 감소는 광섬유 섹션의 수

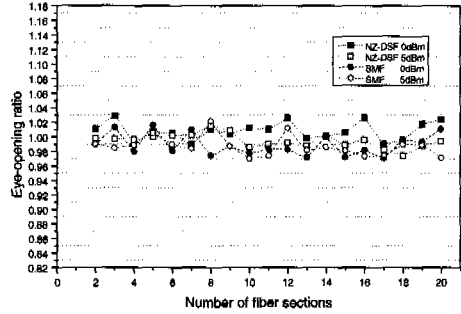


그림 4. NZ-DSF와 SMF에서의 eye-opening 비

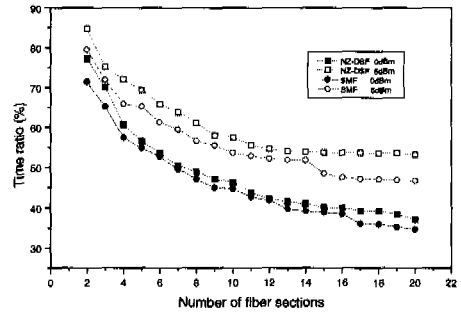


그림 5. 매핑 방법을 이용하였을 때의 시뮬레이션 시간 감소

가 증가할수록 더 명백해진다. N=20이고 P₀=0 dBm인 경우 제안된 방법을 이용할 때 시뮬레이션 시간은 NZ-DSF의 경우 정상 시뮬레이션의 37.15%, SMF의 경우 34.72%로 줄어들음을 알 수 있다. 이러한 시뮬레이션 시간의 감소는 매핑 전송로의 단순한 구조에 기인하는데, 이는 전송로에 포함된 요소가 많을수록 분석하는데 걸리는 시간은 더 늘어나기 때문이다.

IV. 결론

광 증폭기를 이용하여 전송로의 손실을 보상함으로써 장거리 전송을 실현하는 것은 이미 보편화된 기술이다. 따라서 전송로를 설계하거나 성능을 예측할 때 in-line 광 증폭기를 포함해야 함은 당연한 것이라 하겠다.

본 논문에서는 이와 같은 in-line 광 증폭기를 포함한 전송로의 성능을 시뮬레이션 할 때, 용이하면서도 짧은 시간에 결과를 낼 수 있는 방법을 제안하였다. 이는 전송로의 전파 매개변수를 매핑하는 것으로서, in-line 광 증폭시스템에서 SPM chirp과

GVD의 상호작용을 통해 발생하는 입력 신호의 비선형 왜곡과 동일한 양의 비선형 왜곡을 발생시키는, 단순한 전송로 구조를 모델링 하는 것이다. 매핑된 구조의 단순성에 비례하여 성능 평가가 용이하고 그 만큼 적은 시간을 들여 결과를 얻어낼 수 있다.

전송 매체로서 NZ-DSF($D=+3.0ps/nm/km$)와 SMF($D=16ps/nm/km$), 신호 속도는 10Gbit/s를 대상으로 시뮬레이션 하였다. 정상적인 시뮬레이션 결과와 비교할 때 eye-opening에서 3% 이내의 차이를 보였다. 또한 광섬유 섹션의 수가 20일 때 시뮬레이션 시간은 정상적인 경우의 34.72%임을 확인하였다. 제안된 매핑 방법은 전송되는 신호의 속도, 광섬유의 종류, 증폭기간 거리 및 전송거리에 관계없이 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Akira Naka and Shigeru Saito, "In-Line Amplifier Transmission Distance Determined by Self-Phase Modulation and Group-Velocity Dispersion," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 12, No. 2, pp. 280-287, 1994.

[2] Akira Naka and Shigeru Saito, "Transmission Distance of In-Line Amplifier Systems with Group-Velocity-Dispersion Compensation," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, No. 5, pp. 862-867, 1995.

[3] Dietrich Marcuse and Curtis R. Menyuk, "Simulation of Single-Channel Optical Systems at 100Gb/s," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 564-569, 1999.

[4] Yang Jing Wen and Xiang Lin Yang, "Quasi-Transform-Limited Pulse Transmission in Dispersion Managed Soliton System," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, No. 4, pp. 433-435, 1999.

[5] Dietrich Marcuse, "RMS Width of Pulses in Nonlinear Dispersive Fibers," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 17-21, 1992.

[6] Michele Midrio, "Analytical Performance Evaluation of Nonreturn-to-Zero Transmission Systems Operating in Normally Dispersive Nonlinear Fibers," *Journal of Lightwave*

Technology, Vol. 15, No. 11, pp. 2038-2050, 1997.

[7] Anders Berntson, Dan Anderson, Mietek Lisak, Manuel L. Quiroga-Teixeiro, Magnus Karlsson, "Self-phase modulation in dispersion compensated optical fibre transmission systems," *Optics Communications*, Vol. 130, pp. 153-162, 1996.

[8] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 1995.

김 용 범(Yongbum Kim)

정회원



1985년 2월 : 고려대학교
전자공학과, 학사
1987년 2월 : 서울대학교
전자공학과, 석사
1997년 3월~현재 : 고려대학교
통신시스템기술학과
박사과정

1987년 7월~현재 : 한국통신 선임연구원
<주관심 분야> 초고속 광전송시스템, 광섬유 분산 보상, 광통신망

이 용 원(Yongwon Lee)

정회원

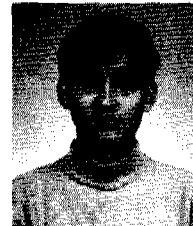


1997년 2월 : 고려대학교
전자공학과, 학사
1999년 8월 : 고려대학교
전자공학과, 석사
1999년 9월~현재 : 고려대학교
전자공학과 박사과정

<주관심 분야> 초고속 광전송에서 비선형 현상의 분석 및 보상

이 명 문(Myungmoon Lee)

정회원



1991년 2월 : 고려대학교
전자공학과, 학사
1993년 2월 : 고려대학교
전자공학과, 석사
1997년 3월~현재 : 고려대학교
전자공학과 박사과정

1993년 2월~1996년 10월 : LG전자 멀티미디어 연구소
주임연구원
<주관심 분야> 광통신망 설계, 광통신망 관리

유진태(Jintae Yu)

정회원



1996년 2월 : 고려대학교

전자공학과, 학사

1998년 2월 : 고려대학교

전자공학과, 석사

1998년 3월~현재 : 고려대학교

전자공학과 박사과정

<주관심 분야> 광전송시스템, 광/무선 통신망 설계

박진우(Jinwoo Park)

정회원

(한국통신학회 논문지 제24권 9A호 참조)

1979년 3월 : 고려대학교 전자공학과, 학사

1983년 8월 : 클렘슨대학교 전기공학과, 석사

1987년 11월 : 버지니아 주립대학교, 박사

1988년 3월~1989년 2월 : 명지대학교 전자공학과

1989년 3월~현재 : 고려대학교 전자공학과 교수

<주관심 분야> 광전송시스템, 광교환시스템, 광통신망