

SMF 길이가 랜덤하게 분포하는 분산 제어 광전송 링크

Dispersion-managed Optical Transmission Links with the Random Distributed SMF Lengths

이 영 교

부천대학교 정보통신과

Young-Kyo Lee

Department of Info. & Telecomm., Bucheon University, Gyeonggi-do 14632, Korea

[요 약]

광 위상 공액과 분산 제어 (DM; dispersion management)를 결합한 기술은 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)의 색 분산과 비선형 Kerr 효과에 의한 광 신호 왜곡을 보상하는 대표적인 기술이다. 하지만 일반적으로 사용되는 고정된 각 중계 구간 SMF 길이는 광전송 링크의 유연한 구성을 방해한다. 본 연구의 목적은 DM 광전송 링크를 구성하는 모든 중계 구간의 SMF 길이의 랜덤 분포를 통한 초고속 장거리 광전송 시스템의 유연한 구성 가능성을 살펴보는 것이다. 랜덤 분포에 의해 평균적으로 갖게 되는 SMF 길이가 짧을수록 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 신호 왜곡 보상에 효과적인 것을 확인하였다. 또한 각 중계 구간의 SMF 길이를 랜덤하게 분포시키는 DM 링크에서 우수한 보상을 위한 전체 잉여 분산의 조절은 postcompensation이 적합하고, 그 전체 잉여 분산(NRD; net residual dispersion) 크기는 -10 ps/nm인 것을 확인하였다.

[Abstract]

Optical phase conjugation combining with dispersion management (DM) is promising technique to compensate for signal distortion due to chromatic dispersion and nonlinear Kerr effects of single mode fiber (SMF) in optical communication systems. However the fixed SMF length in every fiber spans usually used in the optical links with optical phase conjugator(OPC) and DM restricts the flexible link configuration. The goal of this paper is to investigate the possibility of the flexible configurations of the ultra-high and long-haul optical transmission systems by using the random distribution of SMF length of each fiber spans consisted of the optical link. It is confirmed that the excellent compensation for the distorted wavelength division multiplexing signals in the optical links with the randomly distribution is obtained in case of the shorter averaged SMF length over all fiber spans. It is also confirmed that the control method of net residual dispersion suitable to good compensation is postcompensation and the extent of net residual dispersion(NRD) is -10 ps/nm in DM optical link consisted of fiber spans with the randomly distributed SMF lengths.

Key word : Dispersion management, Optical phase conjugation, Single mode fiber, Random distribution, Net residual dispersion.

<https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.5.462>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 5 October 2018; Revised 1 October 2018

Accepted (Publication) 22 October 2018 (30 October 2018)

*Corresponding Author; Young-Kyo Lee

Tel: +82-32-610-3365

E-mail: yklee@bc.ac.kr

I. 서론

현재 광범위하게 포설되어 있는 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)를 통한 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing)과 같은 대용량 광전송에 있어 SMF가 갖는 색 분산 (chromatic dispersion)은 많은 한계를 제공한다 [1]. 또한 SMF들의 손실을 보상하여 전송 거리를 늘리기 위해 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA; erbium-doped fiber amplifier) 등의 증폭기를 광 증계기로 사용하게 되면 광 신호의 전력이 증가하여 Kerr 효과에 의한 비선형 현상, 특히 자기 위상 변조 (SPM; self phase modulation) 현상에 의한 신호 왜곡이 부가적으로 생겨 광 신호의 품질을 더욱 저하시킨다[2]. 분산 천이 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 SMF에 삽입하는 분산 제어 (DM; dispersion management)는 SMF의 색 분산에 의한 왜곡을 극복하는 방법 중 하나로 널리 알려져 있다[3],[4].

또한 전체 전송로의 중간에 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 두어 송신단부터 OPC까지 전송되면서 왜곡된 신호의 스펙트럼을 OPC에서 반전시켜 나머지 구간 (OPC부터 수신단까지)을 전송시켜 보상을 하는 광 위상 공액은 색 분산뿐만 아니라 비선형 효과에 의한 왜곡 보상에 우수한 기술로 알려져 있다 [5],[6].

특히 DM과 OPC를 결합한 기술은 전송 링크에 DM만 적용한 경우에서의 비선형 왜곡은 보상하지 못한다는 한계와 OPC가 갖는 본질적 한계인 OPC를 중심으로 한 광 전력과 국부 분산량의 비대칭 문제를 해결할 수 있다고 많은 연구를 통해 보고되었다 [7]-[10].

지금까지의 DM 링크, 또는 DM과 OPC 결합 링크 관련 논문들은 모든 증계 구간에서의 SMF 길이를 균일하게 분포시킨 링크 구조를 사용하였다. 이러한 구조는 광전송 링크 구성을 간단하게 만든다는 장점은 있지만, 광 네트워크 형태(topology)의 유연한 구성에 제약을 준다.

따라서 본 연구에서는 색 분산과 비선형 효과에 의한 왜곡 보상을 위해 각 증계 구간의 SMF 길이가 랜덤하게 분포하는 DM과 OPC 결합 링크를 통한 WDM 신호의 시스템 성능을 분석하여 광 네트워크의 유연한 구성 가능성을 알아보고자 한다. 본 연구에서 고려한 WDM 시스템의 총 전송률은 960 Gbps (= 24채널 × 40 Gbps)로 가정하였고, 각 채널의 변조 파형 형식은 영 복귀 (RZ; retune-to-zero)로 모델링하였다. 또한 광전송 링크를 구성하는 증계 구간의 수는 14개로 모델링하였다.

II. 시뮬레이션 모델링

그림 1은 본 논문에서 살펴볼 24 채널 × 40 Gbps의 WDM 전송 시스템과 이를 위한 광전송 링크의 구성도이다. OPC를 중심으로 전반 전송 구획 (former half section)과 후반 전송 구획 (latter half section)의 증계 구간 개수는 동일하게 7개로 가정하였다. OPC를 중심으로 국부 분산과 광 전력의 분포를 대칭에 가깝게 하고, 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)를 결정하는 precompensation과 postcompensation을 각각 링크의 가장 앞과 가장 끝에 있는 DCF를 통해 수행시키기 위하여 전반 전송 구획에서는 DCF 다음에 SMF가 오고, 후반 전송 구획에서는 SMF 다음에 DCF가 오도록 하였다.

각 전송 구획의 7개 증계 구간을 구성하는 SMF의 길이는 평균적으로 60 km, 80 km와 100 km의 3가지 경우 중 하나가 되도록 모델링하였다. 즉 각 반(half) 전송 구획에서의 SMF의 평균 길이가 60 km인 경우에는 7개 증계 구간 각각의 SMF 길이는 30, 40, 50, 60, 70, 80과 90 km 중에서 랜덤하게 하나가, SMF의 평균 길이가 80 km인 경우에는 7개 증계 구간 각각의 SMF 길이는 50, 60, 70, 80, 90, 100과 110 km 중에서 랜덤하게 하나가, 그리고 SMF의 평균 길이가 100 km인 경우에는 7개 증계 구간 각각의 SMF 길이는 70, 80, 90, 100, 110, 120과 130 km 중에서 랜덤하게 하나가 선택되도록 하였다.

모든 증계 구간의 SMF의 기타 파라미터들은 다음과 같이 고정된 값으로 모델링하였다; 손실 계수 $\alpha_{SMF} = 0.2$ dB/km, 분산 계수 $D_{SMF} = 17$ ps/nm/km(@1,550 nm), 비선형 계수 $\gamma_{SMF} = 1.35$ W-1km-1(@1,550 nm).

각 증계 구간마다 축적된 RDPS(residual dispersion per span)은 SMF 평균 길이와 상관없이 모두 동일하게 50 ps/nm로 가정하였다. RDPS의 결정은 DCF의 길이의 조정을 통해 이루어진다. 따라서 각 반 전송 구획의 첫 번째와 마지막 증계 구간을 제외한 6개 증계 구간에서의 DCF 길이 (l_{DCF})는 13.1 km로 고정된다. 그리고 모든 증계 구간의 DCF의 기타 파라미터들은 다음과 같이 고정된 값으로 모델링하였다; 손실 계수 $\alpha_{DCF} = 0.6$ dB/km, 분산 계수 $D_{DCF} = -100$ ps/nm/km(@1,550 nm), 비선형 계수 $\gamma_{DCF} = 5.06$ W-1km-1(@1,550 nm).

본 연구에서 WDM 채널 보상에 대한 영향을 분석하는데 이용되는 DM 파라미터는 NRD와 pre(post)compensation이다. 전송 링크의 NRD는 첫 번째 증계 구간의 DCF 길이 (그림 1의 l_{pre})의 조절로 얻어지는 precompensation, 또는 마지막 증계 구

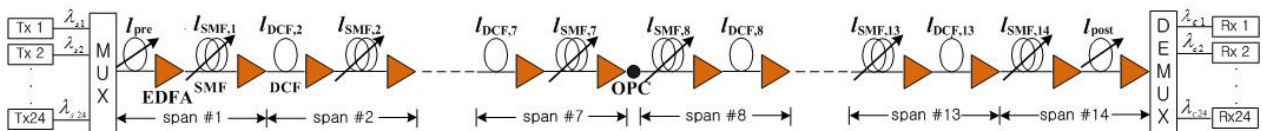


그림 1. 24×40 Gbps WDM 전송 시스템 구조
 Fig. 1 Configuration of 24×40 Gbps WDM transmission system.

간의 DCF 길이(그림 1의 l_{post})의 조절로 얻어지는 postcompensation을 통해 결정하도록 하였다.

그림 1의 24개 송신기(Tx)는 분포 케환 레이저 다이오드 (DFB-LD; distributed feedback laser diode)로 가정하였고, 채널 1과 24의 DFB-LD의 중심 파장은 각각 1,550 nm와 1,568.4 nm 로 하고 각 채널의 파장 간격은 ITU-T G.694.1의 권고에 따라 100 GHz (즉 0.8 nm)로 모델링하였다. 각 DFB-LB는 서로 독립 적인 128(=27) 의 사 랜덤 비트열 (PRBS; pseudo random bit sequence)에 의해 외부적으로 변조되는 것으로 모델링하였다. 이 때 외부 변조기로부터 발생하는 변조 파형 형식은 소광비 (ER; extinction ratio)가 10 dB인 2차 가우시안 펄스의 RZ로 모 델링하였다.

수신기는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 전치 증폭기, 1 nm 대역 폭의 광 필터, PIN 다이오드, 버터워스 형태의 펄스 정형 필터 와 판별 회로로 구성된 직접 검파 (direct detection) 방식의 수신 기로 모델링하였다. 수신 대역폭은 0.65 x 비트율로 가정하였 다.

WDM 시스템의 송신부, 수신부 및 전체 전송로 중간에 위치 한 OPC는 HNL-DSF(highly nonlinearity - dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였고, 그 세부 구 성과 파라미터 값은 S. R. Lee의 참고 문헌 [10]과 동일하게 모 델링하였다.

III. 시뮬레이션 결과 및 검토

각 중계 구간의 SMF 길이가 랜덤하게 분포하는 경우 수가 무수히 많기 때문에 모든 경우를 시뮬레이션을 통해 살펴보는 데 대단히 많은 시간이 소모된다. 따라서 본 연구에서는 분석의 정확성을 비교적 높이고 동시에 시간 소모를 줄이기 위하여 20 번의 랜덤 분포를 발생시켜 시뮬레이션을 수행하였다.

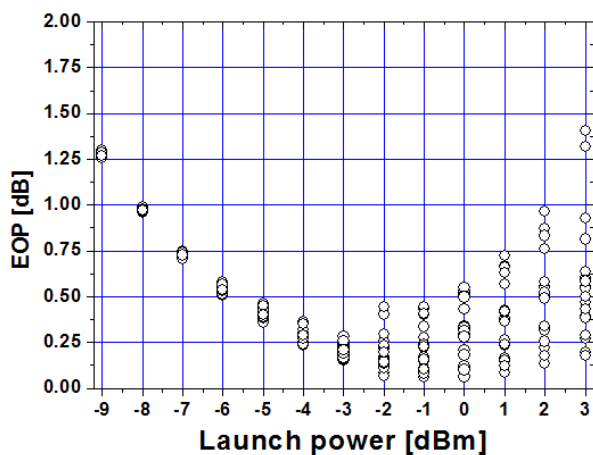


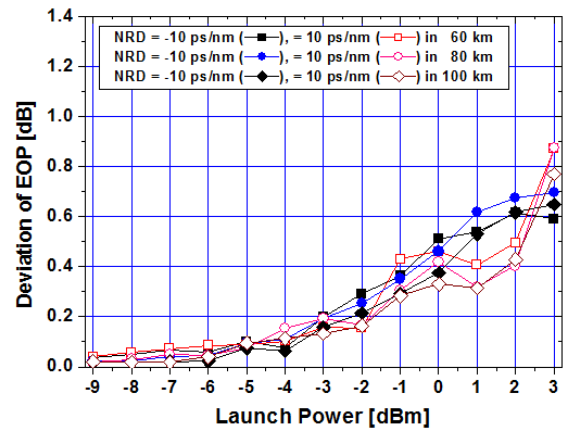
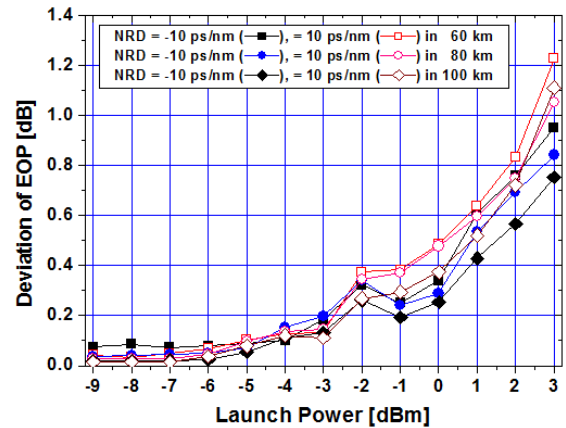
그림 2. NRD = 10 ps/nm인 광전송 링크에서 입사 전력에 따른 EOP

Fig. 2. The EOP as a function of the launch power in the

optical link with NRD = 10 ps/nm.

그림 2는 precompensation에 의해 NRD가 10 ps/nm로 설정된 링크에서 각 중계 구간의 SMF 길이가 랜덤하게 분포한 20가지 경우별 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)를 WDM 채널의 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. 쉽게 예상할 수 있듯이 WDM 채널의 입사 전력이 증가할수록 SMF 길이의 랜덤 분포에 대한 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 그림 2의 결과로부터 얻을 수 있는 중요한 사실은 비교적 큰 입사 전력에 대해서 SMF 길이의 랜덤 값에 따른 보상 정도 차이가 링크 구조, 즉 precompensation과 postcompensation에 의한 NRD 조절과 그 NRD 크기에 따라 달라지는 링크 구조에 따라 달라질 수 있고, 그렇기 때문에 전송 링크의 융통적 구현을 위해 랜덤하게 분포 하는 SMF 길이를 갖지만 그 랜덤 분포의 영향을 최소화할 수 있는 링크 구조를 찾아야 한다는 것이다.

그림 3은 NRD를 조절하는 방식과 그에 따라 NRD가 각각 -10 ps/nm와 10 ps/nm로 설정된 링크에서 SMF 길이의 20가지 랜덤 분포 중 보상 특성이 가장 최악인 랜덤 분포에서의 EOP



(a) precompensation (b) postcompensation

그림 3. 입사 전력에 따른 EOP 편차 (랜덤한 SMF 길이 분포에 따른 최악 EOP와 최상 EOP의 차이)

Fig. 3. The EOP deviations (i.e., the differences of the worst EOP and the best EOP depending on the random distribution of SMF lengths) as a function of the launch

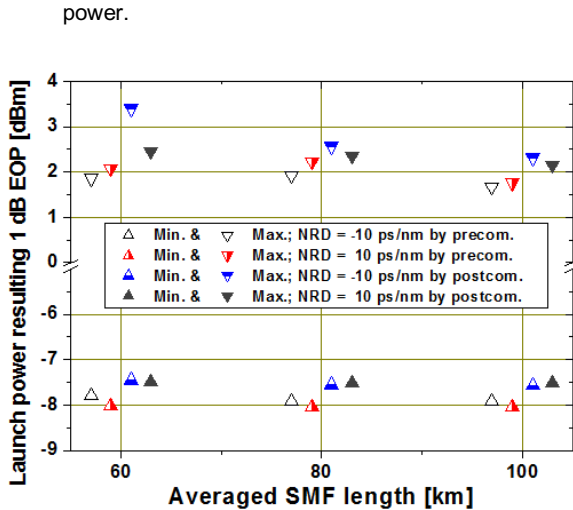


그림 4. 1 dB EOP를 결과하는 최소와 최대 입사 전력
Fig. 4. The minimum and maximum launch power resulting 1 dB EOP.

와 가장 우수한 랜덤 분포에서의 EOP 차이 (즉 최악과 최상의 보상 편차)를 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. -2 dBm 이상의 비교적 큰 입사 전력을 갖는 WDM 채널들을 전송하는 경우에 있어 NRD 크기에 상관없이 precompensation보다 postcompensation으로 NRD를 결정하는 링크 구조가 최악과 최상의 편차가 줄어드는 것, 즉 랜덤 분포의 SMF 길이에 대한 영향이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

또한 WDM 채널들의 입사 전력이 3 dBm인 경우, 즉 입사 전력이 매우 큰 경우에 있어 precompensation과 postcompensation에 관계없이 NRD를 10 ps/nm로 설정된 링크보다 -10 ps/nm로 설정된 링크를 통해 WDM 채널들을 전송하는 경우가 랜덤 분포의 SMF 길이에 대한 영향을 줄여줄 수 있는 것을 동시에 확인할 수 있다. 즉 그림 3의 결과를 통해 전송 링크의 융통적 구성을 위해 중계 구간의 SMF 길이를 랜덤하게 분포시키는 경우 precompensation보다 postcompensation을 통해 NRD를 조절하고, 그 값은 -10 ps/nm로 설정하는 것이 중계 구간의 평균 길이와 관계없이 가장 바람직하다는 것을 알 수 있다.

광통신 시스템에서 전송 품질을 EOP로 평가하는 경우 그 수신 성능 기준은 주로 1 dB EOP이다. 이는 10-12 비트 에러율 (BER ; bit error rate)에 상응하는 값이기 때문이다. 그림 4는 본 연구에서 살펴본 SMF 길이가 랜덤하게 분포하는 8가지 링크 구조 각각을 통해 WDM 채널들을 전송하는 경우 수신 채널의 EOP를 1 dB 이하로 얻을 수 있는 최소와 최대 입사 전력을 평균 중계 구간의 길이, 즉 60 km, 80 km와 100 km에 대해 나타낸 것이다.

최대 입사 전력으로 1 dB EOP 이하의 수신 성능을 얻을 수 있는 링크 구조도 앞선 그림 3의 결과와 마찬가지로 postcompensation에 의해 NRD를 -10 ps/nm로 설정하는 링크들이고, 그 중에서도 중계 구간의 평균 길이가 60 km로 짧게 하는 경우 최대 입사 전력을 약 1 dB 정도 증가시키는 것을 알 수 있

다. 중계 구간의 평균 길이가 60 km로 짧아야 하는 것은 평균 길이가 짧아짐으로써 각 중계 구간 사이의 SMF의 랜덤 길이 편차가 줄어들기 때문인 것으로 판단된다. 그림 4로부터 얻을 수 있는 또 다른 중요한 결과는 NRD를 조절하는 방법과 그로 인한 NRD 크기에 영향을 받기는 하지만 SMF 길이가 랜덤하게 분포하더라도 DM과 OPC를 이용하여 SMF의 색 분산과 비선형 효과에 의한 왜곡 보상을 우수하게 얻을 수 있는 입사 전력 마진(margin)이 약 9.5 dB (최소 -8 dBm 부근과 최대 2 dBm 부근) 이상으로 매우 크다는 것이다. 따라서 본 연구에서 제안한 링크 구조, 즉 전송 링크의 융통적 구성을 위해 중계 구간의 SMF 길이를 하나의 값으로 고정하지 않고 랜덤하게 분포시키더라도 DM과 OPC를 통해 왜곡된 WDM 채널 보상을 효과적으로 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

대용량 WDM 채널들을 전송하는 광 네트워크의 유연한 구성 가능성을 살펴보기 위하여 전체 전송로 중간에 OPC를 갖는 DM 링크에서 각 중계 구간의 SMF 길이를 랜덤하게 분포시킨 경우의 WDM 채널들의 성능 분석을 시뮬레이션을 통해 수행하였다.

우선 DM 링크의 유연한 구성을 위해 필요로 하는 랜덤 분포에 의해 평균적으로 갖게 되는 SMF 길이는 짧을수록 DM과 OPC에 의한 WDM 신호 왜곡 보상에 효과적인 것을 확인하였다. 또한 각 중계 구간의 SMF 길이를 랜덤하게 분포시키는 DM 링크에서 우수한 보상을 위한 NRD 조절 방식과 NRD 크기는 평균 중계 구간 길이에 상관없이 precompensation이 아닌 postcompensation에 의해 -10 ps/nm로 설정된 경우가 최적임을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 즉 결론적으로 SMF 길이를 모든 중계 구간에서 일정하게 고정한 전통적 방식에서 벗어나 랜덤하게 변화를 주더라도 왜곡된 WDM 채널들의 보상 효과가 뛰어나기 때문에 DM과 OPC가 적용된 전송 링크 구성의 융통성을 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

Acknowledgments

본 논문은 2018년도 부천대학교 교내연구비를 지원받아 수행된 연구임

References

- [1] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd ed. New York, NY: Wiley, 2002.
- [2] A. Färbert, C. Scheerer, J.-P. Elbers, C. Glingener, and G.

- Fischer, "Optimized dispersion management scheme for long-haul optical communication systems," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 21, pp. 1865-1866, Oct. 1999.
- [3] X. Xiao, S. Gao, Y. Tian, and C. Yang, "Analytical optimization of the net residual dispersion in SPM-limited dispersion-managed systems," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 2038 ~ 2044, May 2006.
- [4] M. Suzuki and N. Edagawa, "Dispersion-managed high-capacity ultra-long-haul transmission," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 916 -929. 2003.
- [5] A. Yariv, D. Fekete, and D. M. Pepper, "Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation", *Optics Letters*, Vol. 4, pp. 52-54, 1979.
- [6] A. Chowdhury and R.-J.Essiambre, "Optical phase conjugation and pseudolinear transmission", *Opt. Lett.*, Vol. 29, No. 10, pp. 1105~1107, 2004.
- [7] A. Chowdhury and R.-J.Essiambre, "Optical phase conjugation and pseudolinear transmission", *Optics Letter*, Vol. 29, No. 10, pp. 1105~1107, 2004.
- [8] P. Minzioni and A. Schiffrini, "Unifying theory of compensation techniques for intrachannel nonlinear effects," *Optical Express*, Vol. 13, No. 21, pp. 8460-8468, 2005.
- [9] J. P. Chung and S. R. Lee, "Pseudo-symmetric link configuration in dispersion-managed WDM transmission system with optical phase conjugator," *Information*, Vol. 17, No. 11B, pp. 5963 ~ 5968, Nov. 2014.
- [10] S. R. Lee, "Dispersion managed optical transmission links with an artificial distribution of the SMF length and residual dispersion per span," *Journal of Information and Communication Convergence Engineering (JICCE)*, Vol. 12, No. 2, pp. 75 ~ 82, June 2014.



이 영 교 (Young-Kyo, Lee)

1992년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학사),
2002년 2월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사),

1995년 8월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학석사)
2001년 8월 ~ 현재 : 부천대학교 정보통신과 교수

※관심분야 : WDM 전송 시스템, 사물인터넷, 트래픽 제어