
장거리 해저 광통신시스템의 순방향에러정정 기술 연구

정재진* · 이영선* · 신현식*

A Study on Forward Error Correction of Long-Distance Submarine Optical Communication Systems

Jae-Jin Jung* · Young-Sun Lee* · Hyun-Sik Shin*

<요 약>

인터넷의 발달로 인해 국제간 대용량의 광신호를 장거리 전송하기 위해서는 DWDM 시스템의 성능향상이 필수적으로 요구된다. 전송 용량을 높이기 위해서는 전송 속도를 높이거나, 채널수를 늘려야 하며 이런 요구 조건을 충족시키기 위하여 라인 코딩, 변조기술, 최적화된 광섬유, 광대역 광증폭 기술, 분산보상 기술, 순방향 에러정정기술 등이 적용되고 있다. 특히, 순방향 에러정정기술은 고속 대용량 트래픽을 장거리 전송하기 위한 혁신적인 기술로 각광 받고 있다. 본 논문에서는 순방향 에러정정기술의 세대별 발전 현황과 코딩이득을 분석하여 상용 시스템에 구현하는 방법을 제시하였다.

ABSTRACT

According to the development of Internet, DWDM system needs to improve the performance for long distance transmission international optical signals. For higher the transmission capacity, we have to raise the transmission speed and increase a number of channels. To make qualifications, there are a lot of technologies such as line coding, modulation, precious fiber, broadband amplification, dispersion and forward error correction. Especially, FEC has been considered as a progressive technology for long distance transmission to carry out high speed and large capacity traffic. This paper introduced the progress of each new generation of FEC and the way to employ by current system analyzed the coding gain.

키워드

FEC, Reed-Solomon, concatenated code, BTC, LDPC

1. 서론

광통신은 회선수용용량의 측면에서 볼 때, 지난 20년 동안 엄청나게 발전하였다. 1996년에 광섬유 하나에 1 Tbps 전송이 가능하였고, 2001년에 10 Tbps 전송에 성공하였다. 이러한 기술발전은 무엇보다도 광통신기술의 발전으로 가능하였으며, 결국은 기술이 시장을 선도함

을 알 수 있다. 광통신이 다음 단계로 넘어가기 위해서는 혁신적인 기술이 필요하며 그 기술이 바로 순방향 오류정정(FEC, Forward Error Correction) 기술이다. 순수한 전기기술을 기반으로 하는 FEC는 새로운 기술은 아니지만, 광통신의 성능 향상에 혁신적인 역할을 한다.(1)

C. E. 사논이 1948년, 잡음이 누적되는 회선에서 신

* 전남대학교 전기전자컴퓨터공학부 전자통신공학전공

접수일자 : 2008. 07. 07

뢰성 있는 데이터의 한계에 관한 논문이었던 “통신의 수학적 이론(Mathematical Theory of Communications)”을 발표한 이후, FEC를 적용하는 효율적인 방법을 찾기 위해 디지털 무선 및 위성 통신시스템에서 상당한 노력을 경주해오고 있다. 하지만 광통신시스템에서 FEC는 무시되었는데, 이는 10⁻³에서 10⁻⁵ 정도의 BER을 갖는 무선 및 위성통신에 비해 광통신은 10⁻⁹에서 10⁻¹⁵범위의 BER을 가지므로 데이터의 무결성이 높기 때문이다. 그러나 통신 수요가 수백 Mbps 범위에 이르자 광통신에서도 FEC를 사용해야 한다는 필요성을 느끼기 시작하였다.

본 논문 II장에서는 DWDM 시스템의 구성요소들에 대해 알아보고 장거리 광전송시스템에서 성능을 향상시키기 위한 효과적인 기술을 소개하였다. III장에서는 FEC 기술을 세대별로 설명하고 각 세대별 기술을 비교 설명하였으며 마지막으로 결론을 맺고자 한다.

II. DWDM 시스템

DWDM 시스템은 대용량, 장거리, 고속화를 목표로 기술 개발 및 발전되고 있다. 그림 1.은 일반적인 DWDM 시스템의 기본 구성을 나타내고 있는데, 광 송수신기 (Transponder), Optical MUX/DMUX, Optical Fiber, 광 증폭기 (OA), OADM 등으로 구성된다.(2)(3)

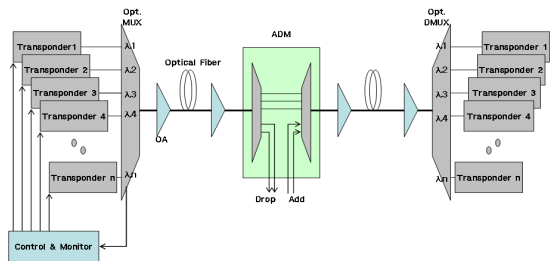


그림 1. DWDM 시스템
Fig. 1. Configuration of DWDM system

장거리 광통신 시스템의 성능을 향상시키기 위한 방법으로 그림 2.와 같이 Line coding을 NRZ에서 RZ, 증폭기의 펌핑 다이오드의 파장을 1.48um에서 0.98um, 광섬유를 SMF에서 최적화된 광섬유, 변조기술을 OOK에서 DPSK, 증폭기를 EDFA에서 Raman, 에러정정기

술을 FEC가 없는 상태에서 FEC 기술을 사용하는 방법 등 다양하지만 가장 효과적인 방법은 BTC FEC 기술을 사용함으로써 10dB정도의 이득을 얻을 수 있다.

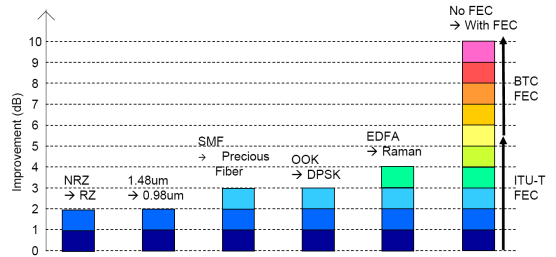


그림 2. 장거리 광통신 시스템의 성능을 향상시키기 위한 기술

Fig. 2. Technology to improve the performance for long distance optical system

III. 순방향에러정정(FEC) 코드

3.1 FEC 개요

FEC를 기반으로 하는 광전송시스템의 간략한 구조를 그림 3.에서 보여준다.

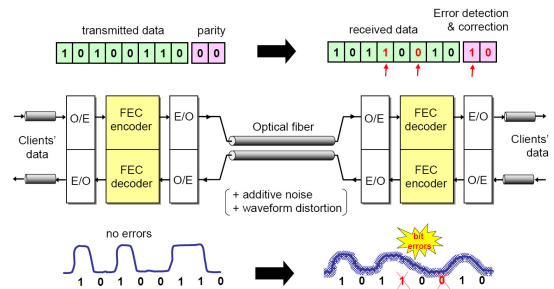


그림 3. 순방향오류정정을 사용하는 광통신시스템의 기본구조

Fig. 3. Basic configuration of optical communication system employing FEC

첫 번째로 클라이언트의 데이터는 광수신기에서 재생된 후 FEC 인코더를 통과한다. 인코더에서는 여분의 비트와 기타 오버헤드를 추가하여, 전송로 측의 광통신기에 의해 광의 형태로 변환된다. 광섬유를 통과하는 신호는 분산으로 인한 왜곡 또는 누적되는 잡음의 영향

으로 품질의 저하를 겪게 된다. 이렇게 성능이 저하된 신호는 FEC 디코더에 의해 디코딩되는데, FEC 디코더는 발생한 오류를 오류정정능력의 범위 안에서 정정한다. 마지막으로 추출된 클라이언트의 신호는 수신측의 최종 수신기로 전달된다.해저 광통신의 순방향오류정정(FEC) 역사를 살펴보면 크게 세 가지 세대로 구분할 수 있다. 제1세대 FEC는 ITU-T G.975 규격인 RS(255, 239)가 사용되었다. DWDM 기술이 발전됨에 따라 보다 강력한 제2세대 FEC를 필요로 하게 되었으며, 이를 위해 연결코드(concatenated code)를 사용하는 RS(239, 223) + RS(255, 239)가 상용시스템에 설치되었다. 소프트디지전디코딩과 블록터보코드의 사용으로 10.1 dB의 순코딩 이득을 얻을 수 있는 제3세대 FEC로 인해 차세대 광통신시스템의 새로운 장이 열리게 되었다.(4)(5)

3.2 제1세대 FEC

광전송시스템에서 FEC의 완전한 기능은 1990년대 초에 개발된 해저케이블 시스템에서 처음으로 적용되었다. 널리 알려진 블록코드, BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem), Reed-Solomon이 해저케이블시스템에서 사용되었으며, 특히 RS(255, 239)코드가 ITU-T G.975에 권고된 바와 같이 장거리 전송시스템에서 많이 사용되게 되었다.

RS 코드는 심볼 에러 정정 코드로서 RS(n, k)로 표시하며 n은 각 부호어 심볼 합의 숫자이며 k는 정보 심볼의 숫자이다. 하나의 심볼은 8 비트로 이루어져 있다. RS코드는 부호어 내의 에러를 포함하고 있는 t개의 심볼까지 에러를 정정할 수 있다. 여기서 $t = (n - k)/2$ 이다. RS(255, 239)에서 $n=255, k=239, t=8$ 이다. 239개의 정보 심볼과 16개의 잉여 심볼로 구성되어 있으며, 코드화 되지 않은 상태에 비해 $(255-239)/239 = 6.69\%$ 의 전송 트래픽 량의 증가를 가져오지만 넓은 대역폭을 가지고 있는 광통신에서는 적은 트래픽에 불과하다.

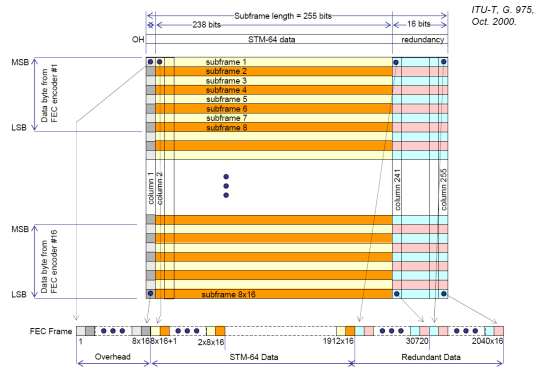


그림 4. G.975 FEC 프레임
Fig. 4. Frame format of G.975 FEC

G.975 FEC 프레임 구조를 그림 4.에서 나타내었다. 각 subframe의 오버헤드 1byte가 제일 처음에 오고 중간에 정보 데이터가 위치하고 마지막에 FEC 에러 정정 바이트가 위치한다. 오버헤드는 wavelength ID, order wire, 프레임 동기, 각 시스템 파라미터를 표시하는 ID 등으로 구성된다. RS(255, 239)는 16바이트 interleaving을 사용하여 최대 1,017 비트의 burst 에러를 정정할 수 있다.

3.3 제2세대 FEC

과장분할다중화(WDM)기술이 발전됨에 따라 강력한 FEC 코드가 필요하게 되어 연결코드를 기반으로 하는 몇 가지 형태의 FEC가 개발되었는데, 그 예로 RS(239, 223) + RS(255, 239)를 들 수 있다. 보다 향상된 오류정정능을 얻기 위해 인터리빙 및 반복복호(iterative decoding)기술이 연결과 함께 사용되었다. 2세대 FEC를 때때로 Super FEC 또는 Enhanced FEC라고 부른다.

그림 5.는 2세대 FEC의 encoder/decoder 구성도이다. FEC프레임으로 매핑 되어진 클라이언트 데이터는 인터리빙 후에 outer encoder로 encoding 된다. 그리고 de-interleaving 된 후 다시 inner encoder로 encoding 된다. 반대로 수신된 데이터는 inner decoder로 decoding 된 후 인터리빙 후 outer decoder로 decoding 된다. 이 decoding은 Line rate의 증가 없이 에러정정능력을 향상시키기 위해 반복적으로 실행되어진다.

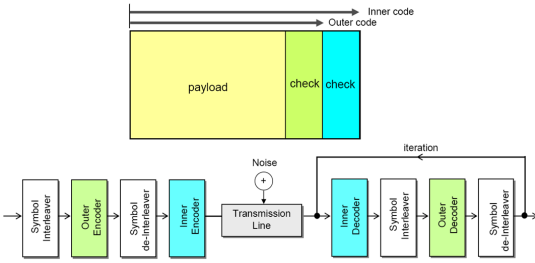


그림 5. 연결코드의 encoder/decoder 구성도
Fig. 5. Block diagram of concatenated code

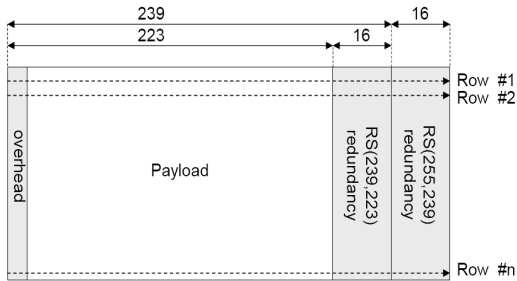


그림 6. RS(239, 223) + RS(255, 239)의 프레임 구조
Fig. 6. Frame format of RS(239, 223) + RS(255, 239)

그림 6은 RS(239, 223) + RS(255, 239)의 프레임 구조를 나타내었다. 프레임 구조는 16 RS(235, 239)코드와 16 RS(239, 223)코드로 이루어져 있으며, 239는 코드의 길이이고 223은 정보의 길이이다. 첫 번째 열은 FEC 오버헤드, 뒤따르는 222열은 정보, 다음 16열은 RS(239, 223)의 에러 정정용 잉여, 마지막 16열은 RS(255, 239)코드의 에러 정정용 잉여이다.

3.4 제3세대 FEC

2000년대 초반에 설치된 상용 광섬유의 전송용량은 마침내 Tera bit로 증가됨에 따라 2세대 FEC로는 그런 대용량을 지원하기 힘들게 되었다. 따라서 저비용 투자, 쉬운 Upgrade, 사용하고 있는 케이블과 증폭기의 활용을 목적으로 새로운 FEC 시스템이 요구되었다. 제3세대 FEC는 소프트디지전디코딩과 블록터보코드의 사용으로 10 dB 이상의 NCG (Net Coding Gain) 를 갖는 훨씬 강력한 FEC를 개발하는데 성공하였다. 여기서 NCG는 순코딩 이득이며, 총코딩 이득(dB)에서 중복된 오버헤드로 인한 비트 레이트 증가(dB)를 뺀 값이

다.(6)(7)

그림 7은 소프트디지전디코딩 방법을 보여준다. 소프트디지전디코딩은 디지전 트레슬드와 멀티 컨피던스 트레슬드를 종합적으로 프로세싱하여 디코딩을 수행하지만 하드 디지전보다 성능이 우수하다. 무선 시스템에서 소프트디지전 비트를 8개까지 사용할 수 있지만 광통신 시스템에서는 단지 3 비트를 사용하며, 10 Gbps 또는 그 이상의 속도에서 사용한다.

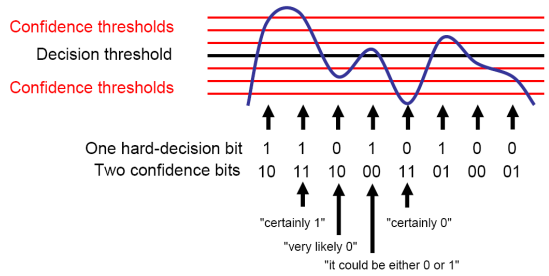


그림 7. 소프트디지전 디코딩
Fig. 7. Soft-Decision Decoding

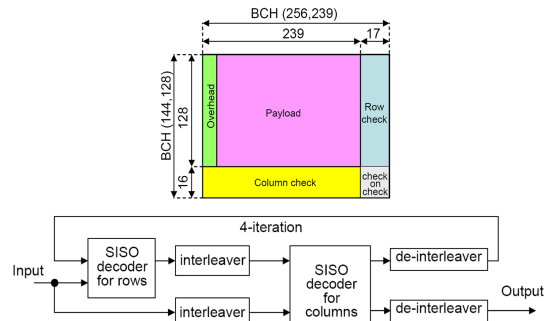


그림 8. 블록 터보 코드
Fig. 8. Block Turbo Code

그림 8은 블록터보코드의 구조를 나타내었다. 블록터보코드는 BCH(144, 128) × BCH(256, 239)로 구성되어 있으며 행과 열을 check 하는 잉여 비트가 각각 있으며 그 잉여 비트를 다시 check 하는 잉여 비트가 있다. 또한 디코더에서는 SISO (Soft Input Soft Output) 을 사용하며 네 번 반복시 3번 반복할 때보다 0.2dB의 코딩 이득을 얻을 수 있으나 5번 이상 반복은 이득에 영향을 주지 않는다. 앞으로 FEC 기술은 잉여 비트를 줄이고 회선 용량을 늘려 40 Gbps 또는 100 Gbps로 속

도를 올리는데 최선을 다해야 할 것이다. 이때의 잠재적인 대안이 LDPC (Low-Density Parity-Check codes) 이다. LDPC는 매우 드물게 패리티 체크 매트릭스에 의해 정의된 선형 코드이며 1962년에 발명되었으나 무시되었다가 1996년에 재 발견되었으며 광통신에서는 2002년에 처음으로 시도 되었다. LDPC는 소프트디시전 디코딩과 블록터보코드보다 저렴한 비용으로 좋은 코딩 이득 성능을 얻을 수 있으나 반복횟수는 더 필요하므로 많은 연구가 진행되고 있다.(8)

3.5 세대별 FEC 비교

3.5.1 BER 비교

그림 9.와 표 1.에서 상용시스템에 사용된 세대별 FEC 비교를 나타내었다.

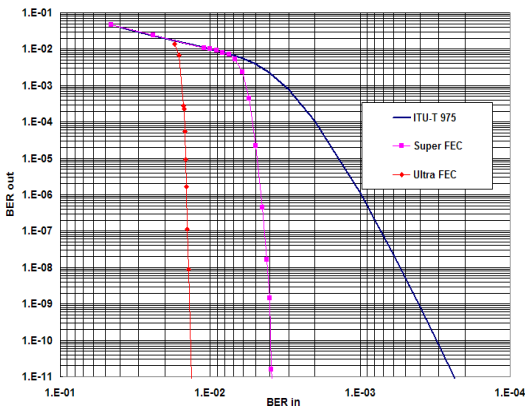


그림 9. ITU-T G.975 FEC, Super FEC and Ultra FEC의 성능 비교

Fig. 9. comparison of performance for ITU-T G.975 FEC, Super FEC and Ultra FEC

ITU-T G.975 FEC를 사용함으로써 수신 측에서 BER을 2.4×10^{-4} 에서 1.0×10^{-11} 으로 향상됨을 보여주고 있으며, Super FEC (RS(239,223) + RS(255,239))를 사용시 BER을 3.9×10^{-3} 에서 1.0×10^{-11} 으로 향상시켜 약 8.0dB의 FEC 이득을 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 또한 3세대 FEC 기술로 표현하는 Ultra FEC를 사용하면 1.4×10^{-2} 으로 수신되는 BER을 1.0×10^{-11} 으로 향상시켜 약 9.4dB의 이득을 얻을 수 있다.

표 1. 10 Gbps 시스템의 세대별 FEC 비교
Table 1. Comparison for FEC of each generation in 10 Gbps system

구 분	G.975 FEC	Super FEC	Ultra FEC
세대	1세대	2세대	3세대
주파수 (9.9532 Gbps)	10.66 Gbps	11.43 Gbps	12.47 Gbps
주요 기술	RS(255,239)	RS(239,223) + RS(255,239)	Soft-Decision Decoding, BTC
잉여 비트	7%	14%	25%
FEC 코딩이득	5.7dB@ 1.0×10^{-11}	8.0dB@ 1.0×10^{-11}	9.4dB@ 1.0×10^{-11}
오류율 향상	From 2.4×10^{-4} to 1.0×10^{-11}	From 3.9×10^{-3} to 1.0×10^{-11}	From 1.4×10^{-2} to 1.0×10^{-11}

3.5.2 Q-factor와 BER과의 관계

전송로의 측정 방법은 BER을 이용하는 방법과 Q-factor를 이용하는 방법이 있다. BER을 이용할 때는 End-to-End를 측정할 때 사용하고, 즉 고객 트래픽을 전달하는 상태가 아닌 전송로의 유지보수 또는 개통시험시 한쪽에서 Loopback을 하고 반대쪽에서는 측정기를 설치하여 측정할 때 사용하며, Q-Factor를 사용할 때는 고객 트래픽이 전달되는 상태에서 측정이 가능하며 광 시스템 전체 또는 구간별로 측정할 수 있는 장점이 있다. 따라서 Q-factor를 측정하여 BER로 변환할 수 있다.

Q-factor에서 BER로의 변환식은

$$\frac{1}{2} \times \operatorname{erfc} \left\{ 10^{\frac{Q-factor}{20}} \times \sqrt{2} \right\} \text{ 이고,}$$

BER에서 Q-factor로의 변환식은

$$BER = \frac{1}{4} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_1 - Vth}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right) + \left(\frac{Vth - \mu_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right) \right] \text{ 이다. 단,}$$

$\mu_1 = -329.536, \sigma_1 = -50.9193, \mu_0 = -951.794, \sigma_0 = -20.9145$ 이다.

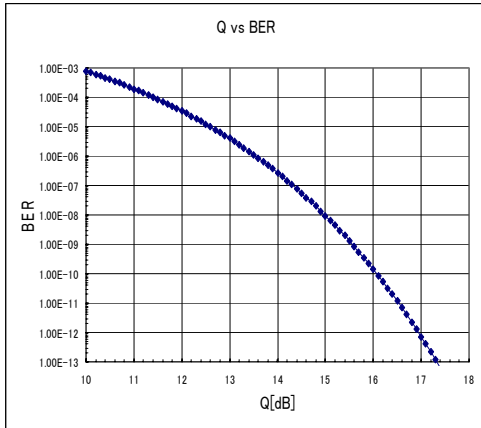


그림 10. Q-factor 와 BER 변환 그래프
Fig. 10. Graph for conversion the Q-factor and BER

그림 10은 Q-factor 와 BER 변환 그래프를 나타내었다.

3.5.3 광통신시스템에서 FEC 적용

상용 광통신시스템에서 2001년 설치시에는 1세대 FEC를 적용하였고, 2006년 증설시에는 2세대 FEC를 적용하였으며 2008년 추가 증설시에는 3세대 FEC를 적용하였다.

그림 11.과 같이 송·수신 스펙트럼을 기설 인접 CH의 OSNR이 낮은 CH에 대하여 증설 CH의 OSNR을 $3\text{dB} \pm 1\text{dB}$ 낮도록 3세대 FEC를 적용함으로써 채널에 대한 Q-factor 및 BER 값은 기존 채널에 비해 떨어지지 않음을 알 수 있다.

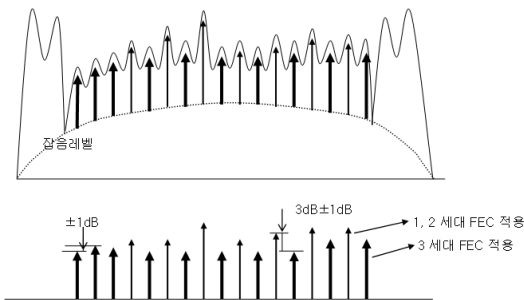


그림 11. 송·수신 스펙트럼의 조정
Fig. 11. adjustment of spectrum for Tx/Rx

IV. 결론

차세대 광통신시스템의 성능향상을 위한 가장 혁신적인 기술은 FEC가 되리라 믿는다. 본고에서 장거리 해저광통신시스템에서 적용되는 FEC 기술을 3세대로 구분하였다. RS(255, 239)는 제1세대를 대표하며, 연결 코드는 제2세대이며, 터보코드 또는 LDPC와 같은 소프트디지전디코딩을 기반으로 하는 보다 강력한 FEC를 제3세대(Ultra FEC)로 명명하였다. Ultra FEC를 사용시 현재 사용하고 있는 채널의 OSNR 보다 약 3dB정도 낮게 송·수신할 수 있으며, 보다 향상된 BER 값을 얻을 수 있었다.

가장 성능이 우수한 제3세대 FEC도 샤논의 한계로부터는 1.5dB의 격차가 있으므로 샤논의 한계에 근접하려는 노력은 계속되어야 한다.

참고 문헌

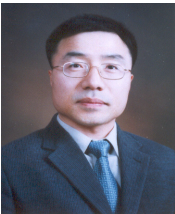
- [1] C.E. Shannon, "A mathematical theory of communication," Bell syst. Tech. J., vol.27, pp.379-423, pp.623-656, July, Oct. 1948
- [2] G.D. Forney, Concatenated Codes, The MIT Press, Cambridge, MA, 1966
- [3] ITU-T G.975, Forward error correction for submarine systems, Oct. 2000
- [4] ITU-T G.975.1, Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems, Feb. 2004
- [5] T. Mizuochi, K. Kubo, M. Akita, M. Imai, S. Kurahashi, N. Takemura, A. Hamaoka, Y. Osaki, K. Ahimokasa, K. Kuno, H. Yoshida and T.Kitayama, "Transparent multiplexer featuring super FEC for optical transport networking," Proc. SubOptic2001, paper P4.2.3, Kyoto, Japan, May 2001.
- [6] T. Mizuochi, "Recent Progress in Forward Error Correction for Optical Communication Systems," IEICE Trans Commun.2005; E88-B: 1934-1946
- [7] T. Mizuochi, "Next Generation FEC for Optical Communication," OFC/NFOEC2008, Tutorial San Diego, CA, Feb. 25th, 2008
- [8] 이영선, 유재덕, 정재진, 박홍태, 김건우, "해저 광통신 시스템," Infinity books, Apr. 2008

저자 소개



정재진(Jae-Jin Jung)

2002년 공학사
2008년 전남대학교 전자통신공학과 석사과정 중
* 주관심분야 : 해저광통신 시스템, WDM 시스템, 위성통신



이영선(Young-Sun Lee)

1987년 숭실대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
2008년 전남대학교 전자통신공학과 석사과정 중
* 주관심분야 : 해저광통신 시스템, WDM시스템



신현식(Hyun-Sik Shin)

1969년 광운대학교 무선통신공학과 졸업 (공학사)
1980년 건국대학교 행정대학원 졸업 (행정학석사)
1995년 경남대학교 대학원 졸업 (행정학박사)
현재 전남대학교 전자통신공학과 교수
(사)한국해양정보통신학회, 명예 회장
전남대학교 산학협력대학원장
(사)한국전자통신학회 회장
* 주관심분야 : 정보통신, 데이터통신, 통신정책