WDM 전송을 위한 광 변조 방식

이성렬

목포해양대학교 해양전자통신공학부

목 차

Ⅰ. 서 론
Ⅱ. NRZ 및 RZ 방식
Ⅲ. 복이진 방식
Ⅳ. DPSK 방식
Ⅴ. 결 론

Ⅰ. 서 론

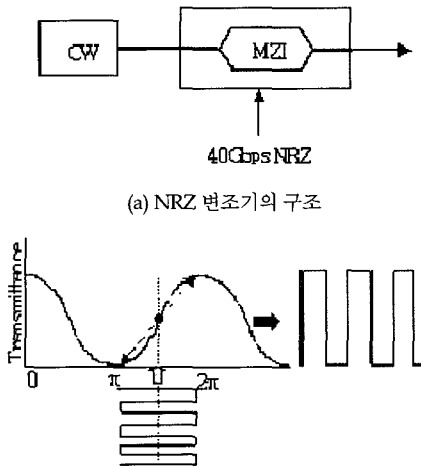
WDM(Wavelength Division Multiplexing) 광 전송망에서 전송 용량을 증가시키기 위해서는 채널의 수를 늘리거나 채널 당 전송률을 높여야 한다. 채널의 수를 늘리기 위해서는 광 증폭기의 수용 대역폭이 더 넓어지거나 채널간 간격이 좁아져야 한다. 보다 좁은 채널 간격을 얻기 위해 기존의 NRZ(Non Return -to-Zero) 이외에 복이진(Duo-binary) 및 VSB (Vestigial Side Band) 등 여러 변조 방식들이 제안되었다[1,2]. 또한 채널 당 전송률이 40Gbps 수준으로 초고속화 됨에 따라 요구되는 OSNR이 증가되었고 이로 인해 광 섬유의 비선형 현상의 영향이 커지게 되었다. 따라서 비선형 현상으로 인한 신호 왜곡을 줄이기 위해 여러 변조 방식들이 연구되고 있다[3,4].

본 연구에서는 이러한 변조 방식들의 특성 분석 및 장단점 비교를 통해 기술 동향을 파악하고 정리하였다.

Ⅱ. NRZ 및 RZ 방식

2.1 NRZ

NRZ 변조 방식은 0, 1 데이터를 보낼 때 신호의 있고 없음을 구분하여 전송하는 방식이다. 디지털 통신에서 흔히 On-Off keying(OOK) 방식이라고 불린다. NRZ는 구조가 간단하여 지금도 가장 널리 쓰이고 있으며 IM-DD(Intensity Modulation-Direct Detection) 전송의 대표적인 변조 방식이다.



(a) NRZ 변조기의 구조

(b) NRZ 발생 원리

그림 1. NRZ 변조기 구조 및 NRZ 발생 원리

그림 1(a)는 single arm 광 변조기를 사용할 때에 NRZ 신호를 만드는 구조를 보여주고 있으며, 그림 1(b)는 인가되는 전기 신호와 광 변조기의 전달특성에 대한 관계를 설명하고 있다. 그림 1(b)에서 광 변조기의 바이어스는 전달 특성 그래프의 증가하는 경사면 중간을 중심으로 전기적으로 변조된다. 위상이 π 지점일 때는 space('0') 신호가 되고 위상이 2π 지점일

때는 mark('1') 신호가 된다.

NRZ의 장점은 구조가 간단하다는 것과 저속에서 고속에 이르기까지 거의 모든 광 전송 시스템에 도입, 검증된 변조 방식이라는 것이다. 스펙트럼은 그림 2와 같이 2×bit-rate의 대역폭을 가지고 있으며 반송파(carrier)가 스펙트럼의 중간에 나타난다. B bps를 보내는데 2B Hz의 대역폭이 필요하여 스펙트럼 효율은 0.5 bps/Hz이다.

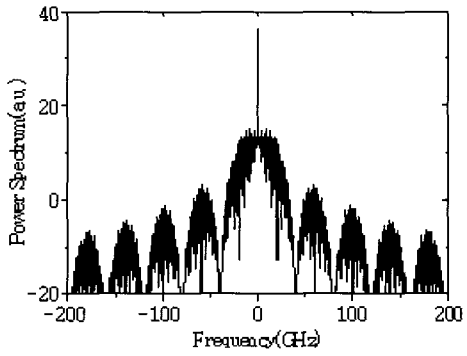


그림 2. NRZ 방식으로 변조된 신호의 전력 스펙트럼

2.2 RZ

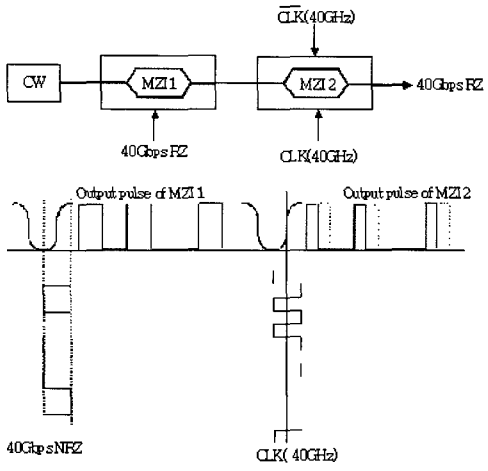


그림 3. 40 Gbps RZ 신호 변조기 구성 및 신호 생성 원리

RZ 변조 방식은 '1' 의 신호를 전송하는 신호 펄스가 비트 주기의 일부분에만 존재한다는 것이 NRZ 변조 방식과 다르다. 즉 duty-cycle이 50 %인 경우는 비트 주기의 1/2 동안만 신호 펄스가 존재하고 1/2동안은 신호 펄스가 꺼져 있게 된다.

RZ 신호 변조를 위해서는 mode-locking 레이저와 같이 펄스를 발생시키는 레이저를 사용한 후 세기 변조를 수행하는 방법과 그림 3과 같이 일반 DFB 레이저와 2개의 MZI(Mach-Zehnder Interferometer) 광 변조기를 사용하는 방법이 있다.

그림 3에서 첫번째 MZI는 CW 신호를 단순히 NRZ 형태의 신호로 바꾸는 기능을 수행하며, 두 번째 MZI 변조기는 바이어스 전압을 변조기의 전달 특성 곡선의 중간 지점(Quadrature point)에 두고 데이터 전송률과 같은 40 GHz의 주파수로 변조하여 비트 주기 내에 펄스 신호를 발생시켜 RZ 신호를 생성한다.

40 Gbps RZ 변조의 파워 스펙트럼 특성은 그림 4와 같이 반송파를 중심으로 40 GHz씩 떨어진 양쪽에 부반송파가 생긴다. duty-cycle이 50 %인 경우 NRZ의 대역폭보다 2배의 넓은 대역폭을 가지며, RZ 방식으로 변조된 신호의 대역폭은 duty-cycle에 반비례하여 넓어지게 된다.

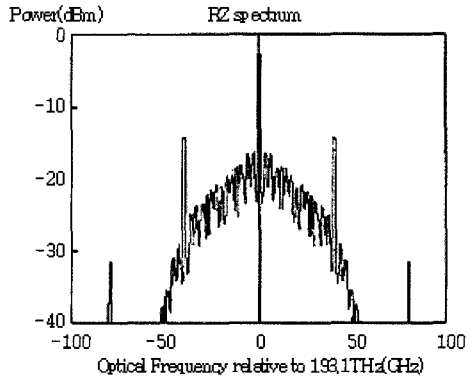


그림 4. RZ 방식으로 변조된 신호의 파워 스펙트럼

같은 전송 거리를 보장하기 위해서는 RZ 전송에서는 광섬유에 인가되는 평균 입력 전력이 기존 NRZ 전송과 비교하여 50% duty-cycle에서는 약 3dB, 25% duty-cycle에서는 약 6dB 증가되어야 한다[5]. 입력 전력은 증가하지만 신호의 대역폭이 NRZ에 비해 넓으

므로 분산으로 인해 펄스가 빨리 퍼지게 된다. 짧은 펄스 신호일수록 분산으로 펄스가 빨리 퍼지게 되어 자기 위상 변조 (SPM ; Self-Phase Modulation) 감소의 효과가 나타난다[6]. 따라서 RZ는 고속 전송에서 NRZ보다 우수한 전송 결과를 보여준다.

2.3 CRZ (chirped-RZ)

CRZ는 RZ 방식으로 생성된 신호 펄스에 다시 일정하게 위상변조를 가하는 방법이다. 일반적으로 그림 5와 같이 MZI 변조기에 의해 RZ 변조된 신호를 위상 변조기에 인가하여 사인파로 위상 변조시켜 chirp를 발생시킨다.

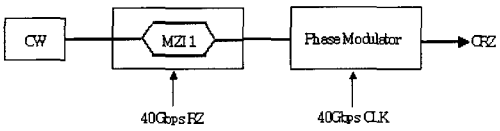


그림 5. CRZ 변조 방식 구성

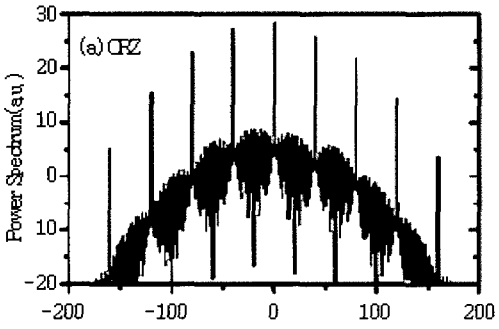


그림 6. CRZ 방식으로 변조된 신호의 파워 스펙트럼

그림 6은 구동 사인파의 크기가 Vπ와 같을 때 40 Gbps CRZ의 파워 스펙트럼이다. duty-cycle 50 %의 RZ 방식보다 스펙트럼의 대역폭이 매우 넓게 됨을 알 수 있다. 스펙트럼이 퍼지는 정도는 구동 사인파의 크기로 조절할 수 있다. 펄스에 가해주는 위상 변조는 색 분산을 상쇄하는 효과가 있다. 그리고 넓게 퍼진 대역폭 덕에 적당한 분산조건에서 광섬유의 비선형성을 극복할 수 있다. 그러나 펄스가 넓게 퍼지기 때문에 펄스 간 장애 (interpulse interference)의 영향으로 인해 mark가 연속적으로 나오는 데이터 패턴은 상대적으로 더 나쁜 신호 대 잡음비 (SNR)를 갖게 된다. CRZ의 전송 결과는 데이터 패턴 의존성이 강하다는 단점이 있다.

2.4 CSRZ (carrier-suppressed RZ)

CSRZ 변조 방식은 RZ의 파워 스펙트럼에서 정보 전송에 기여하지 않는 반송파를 제거함으로써 전송 전력 이득을 얻는 방식이다. 그림 7과 같이 두개의 MZI 변조기를 직렬로 연결하여 첫 번째 변조기는 NRZ와 같이 동작하며 신호 정보를 싣게 된다. 두 번째 변조기는 데이터 율의 절반인 주파수를 갖는 사인파를 가하여 CSRZ 펄스를 발생한다. 이때 바이어스는 MZI 전달 특성 곡선의 최저점(null point)에 둔다. 그러면 그림 7의 출력 파형과 같이 각 비트 주기마다 위상이 180° 바뀌게 된다.

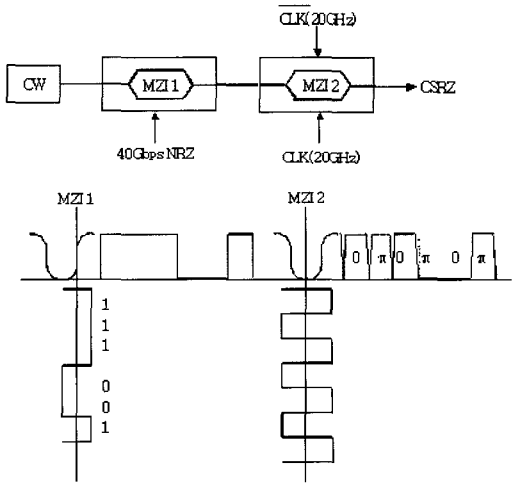


그림 7. 40 CSRZ 신호 변조기 구성 및 신호 생성 원리

그림 8은 CSRZ 변조 방식의 전력 스펙트럼이다. RZ 변조 방식보다 대역폭이 줄어들며 반송파 성분이 억제되어 최고 값이 낮아졌다. CSRZ는 RZ와 비교하여 SPM과 그룹 속도 분산 (GVD : Group-Velocity Dispersion)로 인한 신호 왜곡에 내성이 강하므로 더 큰 입력 전력을 인가할 수 있다. 또한 분산에 대해서도 내성이 강하다. WDM채널에서도 채널 간격에 따

른 상호 위상 변조 (XPM : Cross-Phase Modulation), 4-광파 혼합 (FWM : Four-Wave Mixing)으로 인한 페널티의 영향이 없다[4].

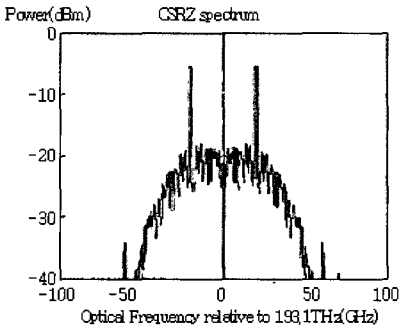


그림 8. CSRZ 방식으로 변조된 신호의 파워 스펙트럼

Ck는 k번째 부반송파에 위치한 파일럿 부반송파이고 $W[k]$는 스크램블링 수열의 k번째 비트이다. 여기서, 파일럿은 $20\log(4/3)=2.5$[dB] 이며, Preamble $20\log(2\times2^{0.5}) = 9.0309$[dB]로 부스팅 된다. 이 중 Preamble carrier는 전체 carrier 중1/3 이므로 9.0309-4.7712 = 4.2497dB 부스팅 된다.

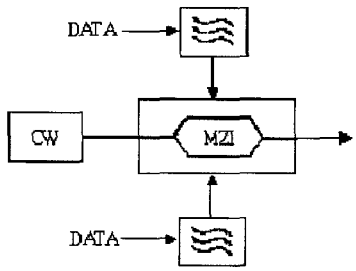
Ⅲ. 복이진 방식

3.1 복이진 (duo-binary)

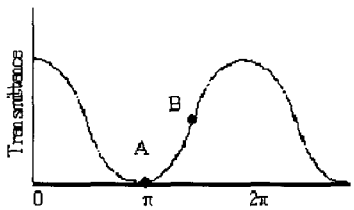
복이진 변조 방식 신호는 광 전송에서 분산에 강한 방식으로 알려져 있으며, 분산 보상 없이 장거리 전송을 하기 위한 목적으로 많이 연구되고 있다. 복이진 변조 방식은 기존의 디지털 통신에서 사용되어 왔던 방식으로 절반의 대역폭으로 데이터를 전송하기 위하여 고안되었다. 송신측에서 ISI(Inter-Symbol Interference)를 제거하기보다 오히려 제어된 ISI를 첨가하여 보내고 수신단에서 특별한 수신 방법을 통하여 그 제어된 ISI를 제거하는 방법이다[7].

복이진 신호는 디지털 통신에서 사용되어 온 복이진 신호를 그대로 광통신 영역에서 사용한다. 위와 같이 생성된 전기 신호를 MZI 광 변조기에 인가함으로써 광 복이진 신호를 만드는 것이다. 그림 9는 복이진 신호를 만드는 구조를 나타내고 있으며, 그림 9(a)는 광 변조기의 전달 특성에서 사용될 수 있는 바이어스 위치를 나타내고 있다. 데이터 패턴이 Bessel 필터를 거치고 증폭된 뒤 광 변조기의 양 쪽에 인가된다. 광 변조기의 바이어스가 B 지점에 위치하면 전기적 3-level이 광 3-level로 그대로 변화되어 3-level 광신호가 전송되고[8], A 지점에 위치하면 2-level 광신호가 되는데 전기적 3-level 신호 중 -1, 1 은 같은 광세기를 가지지만 위상이 180도 차이가 난다[9-11].

위와 같은 2-level 광 복이진 변조 신호에서는 반송파가 억제되는데, 이것은 CSRZ 신호를 생성할 때와 마찬가지 원리가 적용되어 나타나는 결과이다. 2-level 광 복이진 변조 신호는 반송파가 억제됨으로써 유도 브릴루앙 산란(SBS)이 훨씬 적게 일어나고, 따라서 광섬유에 인가할 수 있는 전력을 높일 수 있다. 3-level 광복이진 변조는 수신할 때에 3-level 수신기와 디코딩 과정이 필요하지만, 2-level 광 복이진 변조는 precoder와 함께 사용될 때에 복잡한 수신기 구조가 필요 없이 NRZ 수신기를 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다.



(a) 복이진 생성 구조



(b) 광 변조기의 전달 특성 및 바이어스 위치

그림 9. 복이진 변조 신호 생성 구조와 광 변조기의 전달 특성 및 바이어스 위치

3.2 DCS-RZ (duobinary carrier-suppresed RZ)

복이진 변조 신호는 좁은 스펙트럼 특성으로 분산의 영향을 적게 받는 신호이지만 광섬유 비선형 현상들이 여전히 문제가 된다. 일반적으로 NRZ 신호에 비하여 RZ 신호가 비선형 현상에 대하여 많은 장점들을 가지고 있으나, RZ 신호는 스펙트럼이 넓어서 분산에 약한 면이 있다. 분산에 둔감하고 비선형 현상에 강한 광변조 방식으로 나타난 것이 DCS-RZ이다[12].

DCS-RZ는 그림 10에서처럼 먼저 광 변조기를 사용하여 CSRZ 펄스(신호 정보가 담겨 있지 않음)를 생성하고 또 하나의 광 변조기로 복이진 변조를 한다. CSRZ 신호를 생성할 때는 NRZ 광 변조기를 사용하였는데, DCS-RZ에서는 복이진 광 변조기를 사용한다. 이렇게 하여 최종적으로 DCS-RZ 신호가 만들어진다.

DCS-RZ 신호는 수신단에서 mode-splitting detection scheme을 사용하여 DCS-RZ에서 복이진으로 변환된 뒤에 수신된다. Mode-splitting을 통하여 수신되는 스펙트럼은 전송되는 스펙트럼에 비하여 대역폭이 좁은 특성을 가지므로 분산에 대해 좀 더 둔감한 성질을 얻을 수 있다. CSRZ 변조 형식보다 더욱 변조 대역폭이 좁아져서 NRZ 방식과 같은 변조 대역폭을 갖는다.

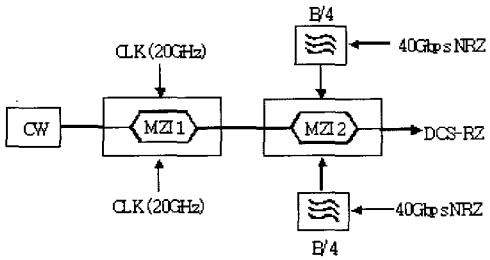


그림 10. DCS-RZ 변조 방식의 구성

Ⅳ. DPSK 방식

4.1 DPSK (differential phase shift keying)

광 전송에서 일반적으로 사용되는 OOK 강도 변조에서 신호 세기의 변화에 따라 SPM이나 XPM과 같은 광섬유의 비선형 현상이 야기되므로 신호의 세기를 일정하게 유지시켜서 비선형 Kerr 효과를 제거하는 위상 변조 방식이 주목을 받게 되었다[15]. 하지만 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 잡음 등으로 인해 신호 세기의 변화가 초래되어 비선형 현상에 의한 위상 잡음이 발생한다는 해결해야 할 문제점도 있다.

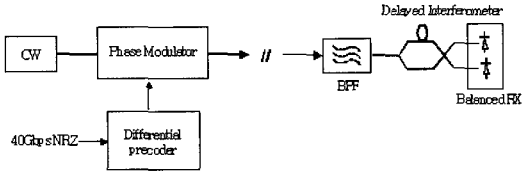


그림 11. DPSK 변조 방식 구성 및 balanced 수신단 구성

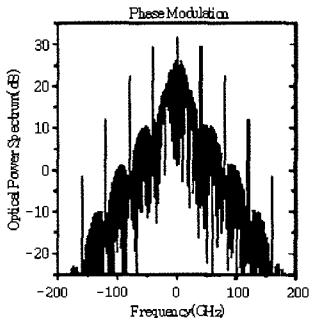


그림 12. DPSK 방식으로 변조된 신호의 전력 스펙트럼

동작 원리는 그림 11에서와 같이 송신단에서 전기적으로 1비트 지연과 XOR연산을 사용하여 precoding된 데이터를 만들어 위상변조를 한다. 수신단에서는 한쪽 경로가 1비트 지연을 갖는 지연 간섭계(Delayed Interferometer)를 사용하여 출력 신호를 얻으면 입력 데이터와 같은 값이 된다. 수신단에는 single-ended receiver 또는 balanced receiver가 사용될 수 있으며, 수신단의 필터 대역폭에 따라 다르지만 대략 balanced receiver가 2.7dB 정도 향상된 수신 감도를 갖는다[16]. DPSK의 전력 스펙트럼은 그림 12와 같다.

4.2 CSRZ-DPSK

순수한 위상 변조를 하는 DPSK에서 0과 1 비트의 transition point에서 급격한 위상 변화는 intensity

ripple을 유발하게 된다[3]. 이로 인해 전송 중에 pattern-dependent SPM-GVD 효과가 발생하여 DPSK의 장점을 흐리게 된다. 따라서 transition point 부분에 광세기를 줄여서 그 영향을 최소화 할 필요가 있게 되었다. RZ 펄스 모양의 파형에 위상변조를 가하는 Intensity-modulated DPSK가 제안되었으며, 또한 반송파를 제거하여 전력 이득도 얻을 수 있도록 CSRZ-DPSK 변조 방식도 제안되었다. CSRZ-DPSK는 다른 변조 방식에 비해 비선형 현상에 강하다는 장점이 있다.

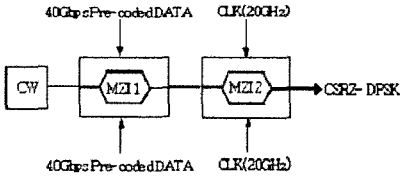


그림 13. CSRZ-DPSK 신호 변조기 구성 및 신호 동작 원리

CSRZ-DPSK의 동작원리는 그림 13과 같다. dual-port MZI 변조기에 precoding된 데이터를 인가하여 위상변조를 수행한다. 그 뒤, 두 번째 변조기를 데이터율과 같은 사인파 클럭으로 구동하여 펄스열을 발생시킨다. 이때, 바이어스가 변조기의 전달 특성 곡선의 최저점(null-point)에 있어야 한다. 이때 펄스의 duty-cycle은 66%가 된다. 두 번째 변조기의 바이어스가 전달 특성 곡선의 최고점에 있으면 33% duty-cycle을 갖는 RZ-DPSK 변조가 된다.

V. 결 론

현재까지 제안된 여러 광 신호 변조 방식 기술들을 소개하고 기술 동향을 정리하였다. 고속의 WDM 전송망에 적합한 신호 변조 방식은 광 전송 시스템에 사용될 광섬유의 색 분산 및 비선형성, 전송 신호의 속도, 주파수 효율성의 중요도 등 여러 변수들에 따라 달리되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] T. Tsuritani, A. Agata, *et al*, "Performance Comparison between DSB and VSB signals in 20Gbps-based ultra-long haul WDM systems", *Proc. OFC2001*, MM5, 2001.

[2] H. Bissessur, G. Charlet, *et al*, "3.2Tb/s C-band Transmission over 3x100 km with 0.8bit/s/Hz Spectral Efficiency", *Proc. ECOC2001*, Postdeadline Paper 1.3, 2001.

[3] T. Hoshida, O. Vassilieva, *et al*, "Optimal 40Gbps Modulation Formats for Spectrally Efficient Long-Haul DWDM Systems", *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol.20, No.12, 2002, pp.1989-1996.

[4] A. Hod?i?, B. Konrad, *et al*, "Alternative Modulation Formats in Nx40Gbps WDM Standard Fiber RZ-Transmission Systems", *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol.20, No.4, 2002, pp.598-607.

[5] D. Breuer and K. Petermann, "Comparison of NRZ-and RZ-Modulation Format for 40-Gbps TDM Standard-Fiber Systems", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.9, No.3, 1997, pp.398-400.

[6] Sang-Gye Park, A. H. Gnauck, *et al*, "40-Gbps Transmission Over Multiple 120-km Spans of Conventional Single-Mode Fiber Using Highly Dispersed Pulses", *IEEE Photon. Technol.* Lett., Vol.12, No.8, 2000, pp.1085-1087.

[7] Lender, A., "The Duobinary Technique for High Speed Data Transmission," *IEEE Trans. Commun. Electron.*, Vol.82, May. 1963, pp.214-218.

[8] X. Gu, L.C. Blank, "10Gbps unrepeaterd three-level optical transmission over 100km of standard fibre," *Electron. Lett.*, Vol.29, Dec. 1993, pp.2209-2210.

[9] A.J. Price and N. Le Mercier, "Reduced bandwidth optical digital intensity modulation with improved chromatic dispersion tolerance," *Electron. Lett.*, Vol.31, Jan. 1995, pp.58-59.

[10] L. Pierre, et al, "243 km, 10Gbps transmission experiment through standard fibre and impact of self-phase modulation using partial response scheme, " *Electron. Lett.*, Vol.32, Mar. 1996, pp.673-674.

[11] K. Yonenaga, et al, "Optical duobinary transmission system with no receiver sensitivity degradation," *Electron. Lett.*, Vol.31, Feb. 1995, pp.302-304.

[12] A. Hirano, et al, "A Novel Mode-Splitting Detection Scheme in 43-Gbps CS- and DCS-RZ Signal Transmission," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 20, Dec. 2002, pp.2029-2034.

[13] D. Penninckx, et al, "The Phase-Shaped Binary Transmission(PSBT): A new Technique to transmit Far Beyond the Chromatic Dispersion Limit," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 9, Feb. 1997, pp.259-261.

[14] D. Penninckx, "Enhanced-phase-shaped binary transmission," *Electron. Lett.*, Vol. 36, Mar. 2000, pp.478-480.

[15] J. leibrich, C. Wree, et al, CR-RZ-DPSK for Suppression of XPM on Dispersion-Managed Long-Haul Optical WDM Transmission on Standard Single-Mode Fiber, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.14, No.2, Feb., 2002.

[16] P.J. Winzer and S. Chandrasekhar, Influence of Optical Filtering on Return-to-Zero Differential Phase Shift Keying, *In Proc. OECC2002*, 2002, p.9, 6, 7.

[17] K. Yonenaga, S. Norimatsu, Dispersion Compensation for Homodyne Detection Systems Using a 10-Gbps Optical PSK-VSB Signal, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.7, No.8, 1995, pp.929-931.

저자소개

이 성 렬

1990년 한국항공대학교 통신정보공학과 (공학사)
1992년 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학석사)
2002년 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사)
1996년 1월~2002년 5월 (주)세영통신 전파기술연구소 책임연구원
2002년 6월~2004년 2월 (주)에이티엔 기술연구소장
2004년 3월~현재 국립목포해양대학교 해양전자통신공학부 조교수
※관심분야 : WDM 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광 솔리톤 전송