초고속, 장거리 고밀도 WDM 전송을 위한 광변조 방식 기술 동향

김광준 / ETRI WDM 기술팀 팀장

I. 서 론

기존의 10Gbps 이하급 전송에는 NRZ(NonReturn-to-zero) 변조 방식이 주로 사용되었으며 이 방식은 주파수 효율이 매우 우수하고 전자 소자에 요구되는 대역폭이 작다는 큰 장점이 있었다. 1990년대에 이르러 전송 수요가 빠르게 증가하면서 파장분할 다중방식(WDM: Wavelength Division Multiplexing) 전송 기술이 상용화 되었다. WDM 방식의 전송 용량 확장을 위해서는 채널의 수를 늘리고 채널당 속도를 높여야 한다.

보다 좁은 채널 간격을 얻기 위해 기존의 비제로 복귀 변조 방식 보다 더 좁은 대역폭을 갖는 Duo-binary 및 VSB(Vestigial Side Band) 등 여러 변조 방식들이 제안되었다. 또한, 채널 당 전송률이 40Gbps 이상으로 초고속화 됨에 따라 요구되는 신호대잡음비(OSNR)가 증가되었고 이로 인해 광섬유의 비선형 현상의 영향이 커지게 되었다. 따라서 비선형 현상에 취약한 비제로 복귀 변조 방식 대신 RZ(Return-to-zero) 변조 방식 그리고 DPSK(Differential Phase Shift Key) 변조 방식에 기반을 둔 비선형 현상에 둔감한 여러 변조 방식들이 연구되고 있다.

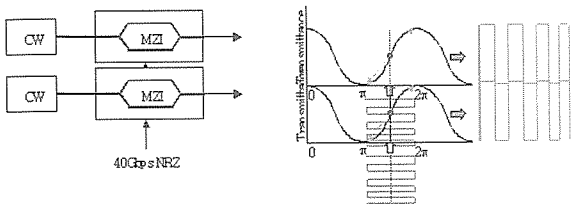
본 고에서는 최근 몇 년의 논문 자료를 바탕으로 제안된 여러 변조 방식들의 동작 원리, 특성 분석 및 장단점 비교를 통해 기술 동향을 파악하고 최근에 수행된 여러 장거리 전송 실험 결과를 정리하였다. II장에서는 여러 변조 방식들을 소개하고 장단점 특성들을 정리하였으며 III장에서는 최근에 제안된 변조 방식을 이용한 장거리 전송 실험 결과에 대해 비교하였다. 그리고 IV장에서 각 변조 방식들을 비교 정리하였다.

II. 광변조 방식 기술 동향

1. NRZ (NonReturn-to-Zero)

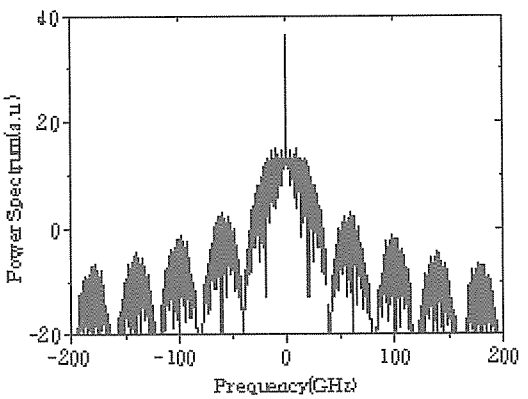
NRZ 변조 방식은 0, 1 데이터를 보낼 때 신호의 있고 없음을 구분하여 전송하는 방식이다. 디지털 통신에서 흔히 On-Off keying(OOK) 방식이라고 불린다. NRZ는 구조가 간단하여 가장 널리 쓰이며 IM-DD(intensity modulation-direct detection)전송의 대표적인 변조 방식이다.

(그림 1)의 왼쪽 그림은 single arm 광변조기를 사용할 때에NRZ 신호를 만드는 구조를 보여주고 있으며 오른쪽 그림은 인가되는 전기 신호와 광변조기의 전달특성에 대한 관계를 설명하고 있다. 오른쪽 그림에서 광변조기의 바이어스는 전달 특성 그래프의 증가하는 경사면의 중간을 중심으로 전기적으로 변조된다. 위상이 π지점일 때는 space('0') 신호가 되고 위상이 2π지점일 때는 mark('1') 신호가 된다.



(그림 1) NRZ 변조 방식 구성 및 광변조기 특성 그래프에서의 생성 원리

NRZ의 장점은 구조가 간단하다는 것과 저속에서 10Gb/s급 고속에 이르기까지 거의 모든 광전송 시스템에 도입된 검증된 변조방식이라는 것이다. 광스펙트럼은 (그림 2)와 같이 2B(bit rate)의 대역폭을 가지고 있으며 반송파(carrier)가 스펙트럼의 중간에 나타난다. B b/s를 보내는데 2B Hz의 대역폭이 필요하여 스펙트럼 효율은 0.5bps/Hz이다.

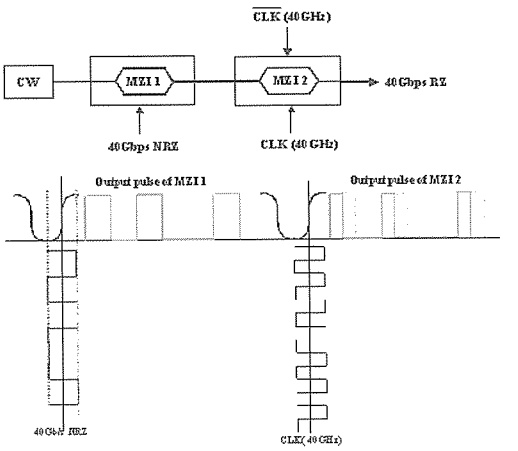


(그림 2) NRZ 방식으로 변조된 신호의 파워 스펙트럼

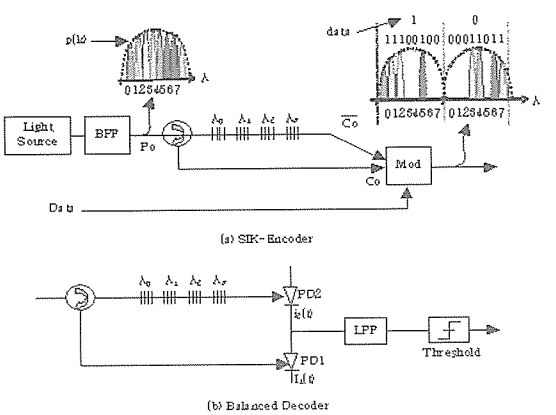
2. RZ (Return-to-Zero)

RZ 변조 방식은 '1'의 신호를 전송하는 신호 펄스가 비트 주기의 일부분에만 존재한다는 점이 NRZ변조 방식과 다르다. 예로, 역율(duty-cycle)이 50 %인 경우는 비트 주기의 1/2 동안만 신호 펄스가 존재하고 1/2동안은 신호 펄스가 꺼져있게 된다.

RZ 신호 변조를 위해서는 모드락킹 레이저와 같이 펄스를 발생시키는 레이저를 사용한 후 세기 변조를 수행하는 방법과 (그림 3)과 같이 일반 DFB레이저와 2개의 MZI(Mach-Zehnder Interferometer) 광변조기를 사용하는 방법이 있다. (그림 3)에서 첫번째 MZI는 CW신호를 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 40GHz의 주파수로 변조하여 비트 주기내에 펄스신호를 발생시켜 RZ신호를 생성한다. 40Gbps RZ 변조의 파워 스펙트럼 특성은 (그림 4)와 같다. 반송파를 중심으로 40GHz씩 떨어진 양쪽편에 부반송파가 생긴다.



(그림 3) 40Gbps RZ 신호 변조기 구성 및 신호 생성 원리

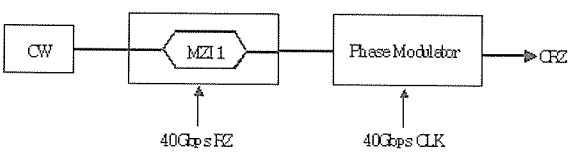


(그림 4) RZ방식으로 변조된 신호의 파워스펙트럼

역율(duty rate)이 50 %인 경우 NRZ의 대역폭보다 2배의 넓은 대역폭을 가지며 RZ 방식으로 변조된 신호의 대역폭은 역율에 반비례하여 넓어지게 된다. 같은 전송 거리에서 RZ 전송에서는 광섬유에 인가될 수 있는 평균 입력 파워가 기존 NRZ전송과 비교하여 50% 역율에서는 약 3dB, 25% 역율에서는 약 6dB 증가된다. RZ 신호의 대역폭이 NRZ에 비해 넓으므로 분산으로 인해 펄스가 빨리 퍼지게 된다. 짧은 펄스 신호일수록 분산으로 펄스가 빨리 퍼지게 되어 자기 위상변조(SPM)감소의 효과가 나타난다. 따라서, RZ는 고속 전송에서 NRZ보다 우수한 전송 결과를 보여준다.

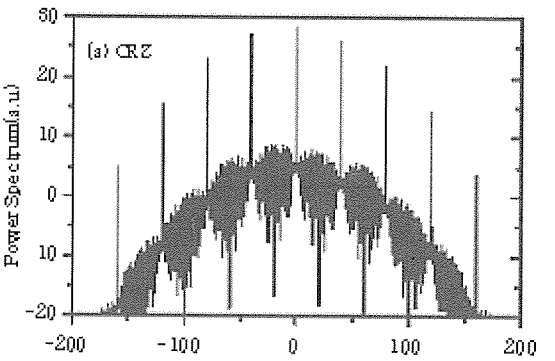
3. CRZ (Chirped Return-to-Zero)

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



(그림 5) CRZ 변조 방식 구성

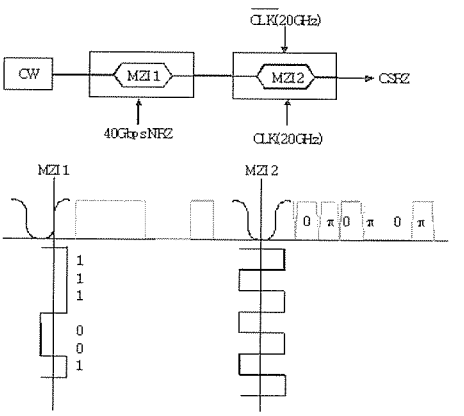
(그림 6)은 구동 사인파의 크기가 Vπ와 같을 때 40Gbps CRZ의 파워 스펙트럼이다. 역율 50 %의 RZ 방식보다 스펙트럼의 대역폭이 매우 넓게 됨을 알 수 있다. 스펙트럼이 퍼지는 정도는 구동 사인파의 크기로 조절할 수 있다. 펄스에 가해주는 위상변조는 색분산을 상쇄하는 효과가 있다. 그리고 넓게 퍼진 대역폭 덕에 적당한 분산조건에서 광섬유의 비선형성을 극복할 수 있다. 그러나, 펄스가 넓게 퍼지기 때문에 interpulse interference의 영향으로 인해 mark ('1')가 연속적으로 나오는 데이터 패턴은 상대적으로 더 나쁜 SNR(Signal-to-Noise Ratio)을 갖게 된다. CRZ의 전송 결과는 데이터 패턴 의존성이 강하다는 단점이 있다.



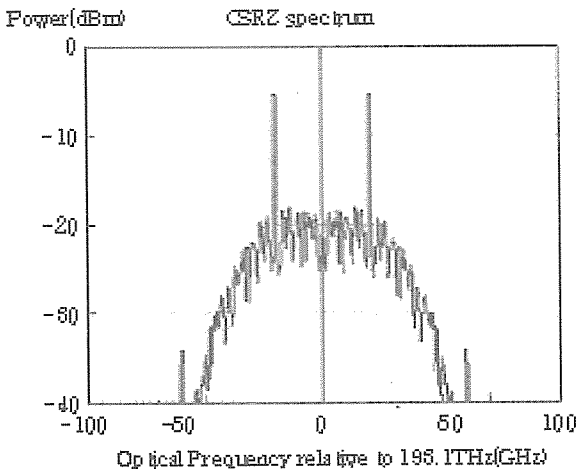
(그림 6) CRZ방식으로 변조된 신호의 파워스펙트럼

4. CSRZ (Carrier-Suppressed Return-to-Zero)

CSRZ 변조 방식은 RZ의 파워 스펙트럼에서 정보 전송에 기여하지 않는 반송파를 제거함으로써 전송 전력 이득을 얻는 방식이다. (그림 7)과 같이 두개의 MZI 변조기를 직렬로 연결하여 첫번째 변조기는 NRZ와 같이 동작하며 신호 정보를 싣게 된다. 두 번째 변조기는 데이터 율의 절반인 주파수를 갖는 사인파를 가하여 CSRZ펄스를 발생한다. 이때 바이어스는 MZI 전달 특성 곡선의 최저점(null point)에 둔다. 그러면 (그림 7)의 출력 파형과 같이 각 비트 주기마다 위상이 180° 바뀌게 된다. (그림 8)은 CSRZ 변조 방식의 파워 스펙트럼이다. RZ 변조 방식보다 대역폭이 줄어들며 반송파 성분이 억제되어 최고값이 낮아졌다.



(그림 7) CSRZ 변조 방식 구성 및 동작 원리

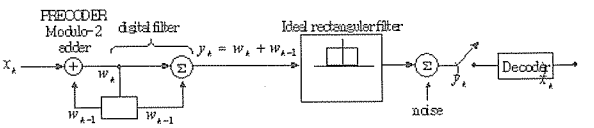


(그림 8) CSRZ방식으로 변조된 신호의 파워 스펙트럼

CSRZ는 RZ와 비교하여 SPM (Self-Phase Modulation)과 GVD (Group-Velocity Dispersion)로 인한 신호 왜곡에 내성이 강하므로 더 큰 입력 파워를 인가할 수 있다. 또한 분산에 대해서도 내성이 강하다. WDM채널에서도 채널 간격에 따른 XPM (Cross-Phase Modulation), FWM (Four-Wave Mixing)으로 인한 페널티의 영향이 없다.

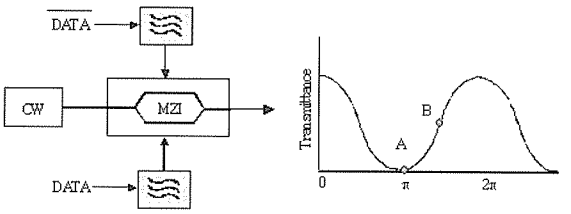
5. 복이진 (Duobinary)

복이진 변조 방식 신호는 광전송에서 분산에 강한 방식으로 알려져 있으며 분산 보상 없이 장거리 전송을 하기 위한 목적으로 많은 연구가 되고 있다. 복이진 변조방식은 기존의 디지털 통신에서 사용되어 왔던 방식으로 절반의 대역폭으로 데이터를 전송하기 위하여 고안되었다. 송신측에서 ISI(Inter Symbol Interference)를 제거하기 보다 오히려 제어된 ISI를 첨가하여 보내고 수신단에서 특별한 수신 방법을 통하여 그 제어된 ISI를 제거하는 방법이며, partial response scheme이라고도 불린다. 이러한 복이진 변조 신호를 생성하기 위해서는 (그림 9)와 같은 과정을 거친다. 먼저 precoder를 거치고 난 뒤 자기 신호와 1 bit delay된 신호가 합쳐지는 디지털 필터링 과정과 이상적인 Nyquist 필터를 거치는 과정을 통하여 생성된다. 최초의 복이진 변조는 precoder 과정이 없었지만 이 과정이 없을 경우 수신단에서 하나의 오류가 다른 비트로 전파되는 단점이 있어 precoder를 통하여 이러한 단점을 극복하였다. 이렇게 생성된 신호는 3-level 신호(-1, 0, 1)가 되고 수신 과정은 일반 NRZ 신호에 비하여 다소 복잡한 구조를 갖게 된다. 광스펙트럼의 대역폭은 NRZ 신호의 절반에 해당한다.



(그림 9) 전기적 복이진 신호의 생성 원리

광복이진 신호는 앞에서와 같은 디지털 통신에서 사용되어 온 복이진 신호를 그대로 광통신 영역에서 사용한다. 위와 같이 생성된 전기 신호를 MZI 광변조기에 인가함으로써 광복이진 신호를 만드는 것이다. (그림 10)은 광복이진 신호를 만드는 구조를 나타내고 있으며 오른쪽 그림은 광변조기의 전달 특성에서 사용될 수 있는 바이어스 위치를 나타내고 있다. 데이터 패턴이 Bessel 필터를 거치고 증폭된 뒤 광변조기의 양 쪽에 인가된다. 광변조기의 바이어스가 B 지점에 위치하면 전기적 3-level이 광 3-level로 그대로 변화되어 3-level 광신호가 전송되고, A 지점에 위치하면 2-level 광신호가 되는데 전기적 3-level 신호 중 -1, 1 은 같은 광세기를 가지지만 위상이 180도 차이가 난다. 위와 같은 2-level 광복이진 변조신호에서는 반송파가 억제되는데, 이것은 CSRZ 신호를 생성할 때와 마찬가지 원리가 적용되어 나타나는 결과이다. 2-level 광복이진 변조 신호는 반송파가 억제됨으로써 유도 브릴루앙 산란(SBS)이 훨씬 적게 일어나고 따라서 광섬유에 인가할 수 있는 파워를 높일 수 있다. 3-level 광복이진 변조는 수신할 때에 3-level 수신기와 디코딩 과정이 필요하지만, 2-level 광복이진 변조는 precoder와 함께 사용될 때에 복잡한 수신기 구조가 필요 없이 NRZ 수



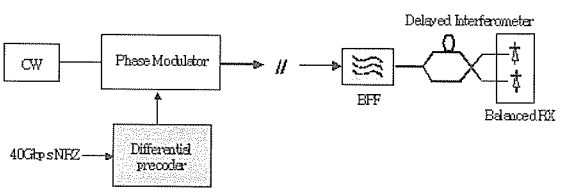
(그림 10) 복이진 변조 신호 생성 구조와 광변조기의 전달 특성 및 바이어스 위치

신기를 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다.

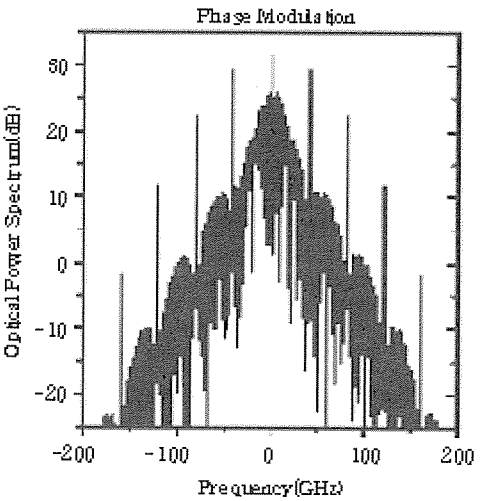
6. DPSK (Differential Phase Shift Key)

광전송에서 일반적으로 사용되는 OOK 강도변조에서 신호 세기의 변화에 따라 SPM 이나 XPM과 같은 광섬유의 비선형 현상이 야기되므로 신호의 세기를 일정하게 유지시켜서 비선형 Kerr 효과를 제거하는 위상변조 방식이 주목을 받게 되었다. 하지만 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 잡음 등으로 인해 신호 세기의 변화가 초래되어 비선형 현상에 의한 위상 잡음이 발생한다는 해결해야 할 문제점도 있다.

동작원리는 (그림 11)과 같다. 송신단에서 전기적으로 1 비트 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 수신감도를 갖는다. DPSK의 파워스펙트럼은 (그림 12)와 같다.



(그림 11) DPSK 변조 방식 구성 및 balanced 수신단 구성

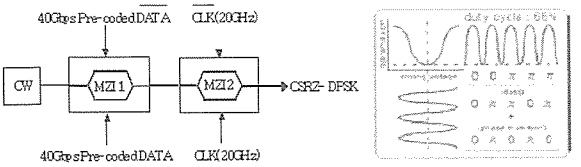


(그림 12) DPSK방식으로 변조된 신호의 파워스펙트럼

7. CSRZ-DPSK (Carrier-Suppressed Return -to-Zero-Differential Phase Shift Key)

순수한 위상 변조를 하는 DPSK에서 0과 1 비트의 transition point에서 급격한 위상 변화는 intensity ripple을 유발하게 된다. 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.

동작원리는 (그림 13)과 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 역율은 66%가 된다. 참고적으로 두 번째 변조기의 바이어스가 전달특성 곡선의 최고점에 있으면 33% 역율을 갖는 RZ-DPSK 변조가 된다.



(그림 13) DPSK 변조 방식 구성 및 동작 원리

Ⅲ. 새로운 광변조 방식에 대한 WDM 전송 실험 기술 동향

다양한 전송 방식들이 제안되었고 이를 적용한 여러 WDM 전송 실험들이 수행되었다. 〈표 1〉은 ECOC2002 학회에 실린 전송 결과들을 정리한 것이다. 〈표 2〉는 OFC2003 40Gbps 장거리 전송 실험 결과들을 정리한 것이다. 대부분이 RZ 변조 방식에 기반을 둔 변형된 CS-RZ나 RZ-DPSK 등이었다. 특히, OFC2003의 post deadline paper에서는 4개중 3개의 논문이 CSRZ-DPSK를 사용한 전송이었다.

항목	Lucent	Alcatel	Lucent	PhotonEx	KDDI	Alcatel
전송용량	3.2Tb/s	6.4Tb/s	5.12Tbs/	3.2Tb/s	1.64Tb/s	0.66Tb/s
채널수	80	159	128	40	82	66
다중방식	ETDM	ETDM	ETDM	ETDM+OTDM	ETDM	
전송속도	40Gb/s	40Gb/s	40Gb/s	80Gb/s	20Gb/s	10Gb/s
변조방식	RZ-DPSK	BL-PSBT	CS-RZ	RZ	VSB-RZ	CRZ
채널간격	100GHz	50GHz	50GHz	100GHz	40GHz	62.5GHz
전송거리	5200km	2100km	1280km	785km	6260km	12220km
스팬	16x400km	7x300km	4x320km	75, 100km	28x360km	26x470km
파이버 종류	UltraWave	NZ-DSF Teralight	SSMF	NDSF	EE-PDF	SMF+RDF
파장대역	C/L	C/L	Extended L	C	C	C
증폭기	라만	EDFA +라만	라만	EDFA +라만	EDFA +라만	EDFA
Q 평균	11.5~16.8 dB	10~12.2 dB	>11.5dB	>11.5dB	9.7dB	>11.1dB
FEC	w/	w/	w/	w/	w/	w/o
PMD	w/o	w/o	w/o	w/o	w/o	w/o
비고	RCL실험	RCL실험	RCL실험	RCL실험	RCL실험	RCL실험

〈 표 1 〉 ECOC2002 초고속 WDM 전송 실험 결과

항목	KDDI		OFS	Alcatel	Fujitsu	Ciena
전송용량	2.5Tb/s	6.4Tb/s	1.6Tb/s	1.6Tb/s	1.6Tb/s	800Gb/s
채널수	63	4	40	40	40	20
다중방식	ETDM	OTDM	ETDM	ETDM	ETDM	ETDM
전송속도	40Gb/s	160Gb/s	42.7Gb/s	43Gb/s	43Gb/s	40Gb/s
변조방식	CS-RZ	CS-RZ	RZ-DPSK	NRZ	NRZ	CS-RZ
채널간격	100GHz	400GHz	100GHz	100GHz	100GHz	100GHz
전송거리	320km	225km	6000km	2540km	1600km	900km
스팬	4 x80km	3x75km	60x100km	100km	100km	10x90km
파이버 종류	NZ-DSF	NZ-DSF	Ultra-Wave	SMF	SMF	DSF
파장대역	C/L	C	L	C	C	C
증폭기	EDFA	EDFA	라만	EDFA+라만	DCFRA	EDFA+라만
Q 평균	15.4dB	15dB	13.3dB	9.2dB	11.5dB	
FEC	w/o	w/	w/o	w/o	w/o	w/
PMD	W/o	w/	w/o	w/o	w/o	
비고	현장시험		RCL 실험	RCL 실험	RCL 실험	RCL 실험

〈 표 2 〉 OFC2003 40Gb/s 장거리 실험 결과

Ⅳ. 결론

필연적으로 등장할 채널당 수십 Gb/s급 고속의 WDM 전송망에 적합한 신호 변조방식에 대해 여러 연구들이 수행되어 왔으나 아직 확실한 해답을 얻지는 못한 상태이다. 최적의 광변조 방식은 전송시스템에 사용될 광섬유의 색분산 및 비선형성, 전송 신호의 속도, 주파수 효율성의 중요도 등 여러 변수들에 따라 달라질 수 있기 때문이다. 또한 구현 방법의 경제성도 중요한 변수이다. 본 고에서는 현재까지 제안된 여러 광신호 변조 방식 기술들을 소개하고 기술 동향 및 최근 전송분야에 적용된 실험 결과들을 정리하였다.

〈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] 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.

[13] 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.