

전기적 신호/광신호 변환 양방향 전송기술

Transmission of 2.5Gbps Optical Signal Converted from 155Mbps 16 Channels Electrical Signal

최춘기(C.G. Choi)
황건(G. Hwang)

실장기술팀 선임연구원
실장기술팀 책임연구원, 팀장

본 논문은 현재 교환시스템의 시스템 랙(rack)간 전송에 사용되는 전기적 신호전송 매체의 한계인 155Mbps 또는 250Mbps에서 15m의 전송거리라는 제약을 극복하고 또한 기존의 단순 동기식 전송 방식(1:1)에서 탈피하여 다중/역다중 접속방식(16:1)을 채택하여 고밀도, 저가격, 다중화/역다중화 기능을 포함하는 광송수신 모듈을 개발한 내용을 기술하고 있다. 본 기술은 155Mbps 16채널의 전기적 신호를 2.5Gbps 광신호로 변환하여 양방향으로 전송할 수 있는 Twin-ax/Optical Bus Access Module 개발에 관한 것이다.

1. 서론

인터넷, 화상회의 등 기하급수적인 멀티미디어 수요의 증가에 따라 현재 상용화가 진행되고 있는 교환기 및 대용량 통신시스템에서는 고속의 멀티미디어 서비스를 제공해야 한다. 그러나 프로세서의 처리속도가 증가함에 따라 네트워크 및 통신에서 전기접속은 병목현상을 발생시키고 있다. 77Mbps, 155Mbps 그리고 311Mbps 등의 비교적 낮은 대역의 전기접속이 인쇄회로기판(Printed Circuit Board)에서 구현될 것이고, 이러한 다중채널의 라인에서 병목현상이 발생하지 않도록 상호접속 모듈이 필요한 실정이다[1-3]. 따라서 상호접속 모듈은 다중채널을 수용할 수 있도록 고속 장거리 전송이 가능한 광접속 기술을 이용하게 될 것이다.

실제로 많은 양의 데이터를 처리하는 ATM(Asynchronous Transfer Mode) 교환기는 250Mbps 대역의 고속 차등구동신호(Differential Signal)를 사용하고 있으며, 시스템의 랙과 랙 사이, 랙 내부의 연결

은 일대일 차등신호전송이 가능하도록 Twin-ax cable을 사용하고 있다. 그러나 Twin-ax cable은 고속 특성 및 cable 손실에 의하여 250Mbps 대역에서 15m 전송이 한계이고, 향후 대용량 서비스를 제공하기 위해서는 Giga 대역의 초고속 장거리 전송이 이루어져야 한다. 추가적으로 ATM 교환기의 가입자 정합시스템과 ATM Edge 시스템 또는 B-NT(Node Terminal) 상호 연동 시에는 SDH(Synchronous Digital Hierarchy) 계열의 STM(Synchronous Transfer Mode)-1 Level 155Mbps 신호전송이 필수적이며, 계속적인 시스템의 용량 증가로 STM-4 Level 622Mbps, STM-16 Level 2.5Gbps 수준의 시스템 연동 요구가 급등적으로 증가하고 있는 추세에 있다[4].

본 연구에서는 현재 시스템 랙간 전송에 사용되는 전기적 신호전송 매체의 한계인 155Mbps 또는 250Mbps에서 15m의 전송거리를 극복하여 전기적 신호 155Mbps 16채널을 2.5Gbps 광전송신호로 변환하여 장거리 전송이 가능하도록 하기 위한 Twin-

ax/Optical Bus Access Module을 개발하고자 하며, 또한 수 km까지 전송이 가능한 표준 실장시스템에 적합한 플러그인 형태의 모듈을 개발하기 위한 시스템 랙간 전송거리의 기술적 제약을 극복할 수 있는 기초기술을 확보하고자 한다. Twin-ax/Optical Bus Access Module은 다음과 같은 방법으로 구현하였다.

- 시스템에서의 광전송은 시스템 설계에 큰 어려움이 있고 비효율적이므로 모듈 형태로 구현한다.
- 현재 사용하고 있는 Twin-ax cable과의 호환성이 있어야 한다.
- 다중 채널을 수용하기 위해서 일대일 상호접속은 비효율적이므로 다채널의 전기적 신호를 다중화/역다중화하는 기술을 수용한다.
- 다중화/역다중화 기능과 광전송 기술을 통합하기 위한 인터페이스 회로 설계가 필요하다.

II. 모듈의 개발 규격 및 구성

1. 모듈의 개발 규격

<표 1>~<표 4>는 2.5Gbps Twin-ax/Optical Bus Access Module의 광특성(optical specifications), 전기적 특성(electrical specifications), 인터페이스 특성(interface specifications) 및 일반적인 성능(general performance) 등의 개발 규격을 나타내고 있다.

<표 1> 광특성

Parameter		Min	Max	Unit
Transmitter	Data Rate	-	2.5	Gbps
	Wavelength	1,265	1,360	nm
	Spectral Width	-	4	nm
	Launch Power	-10	-3	dBm
Receiver	Extinction Ratio	8.2	-	dB
	Sensitivity	-	-18	dBm
	Overload	0	-	dBm

<표 2> 전기적 특성

Parameter		Min (ppm)	Max (ppm)	Unit
Transmitter	CLK_IN	155.52-20	155.52+ 20	Mbps
	CLK_IN duty cycle	40	60	%
	Tr(10-90%)	0	1.5	ns
	Tf(10-90%)	0	1.5	ns
Receiver	CLK_OUT	155.52-20	155.52+ 20	Mbps
	CLK_OUT duty cycle	45	55	%
	Tr(10-90%)	0.5	1.5	ns
	Tf(10-90%)	0.5	1.5	ns

<표 3> 인터페이스 특성

Parameter	Specifications	Reference
Optical	SC/PC or LC/PC type connector	connector type
Electrical	Differential 9 wafer HS Link	for RX & TX
	Hard Metric, D-sub connector	connector type

<표 4> 일반적인 성능

Parameter	Specifications	Reference
BER	$\leq 2 \times 10^{-10}$	for 2.5GHz, 1m
Life Time	≥ 30 years	-
Environmental Condition	0 ~ + 85°C	-
Impedance condition	50ohm	-
Included components	CDR, Laser Driver, MUX, DEMUX	within Module

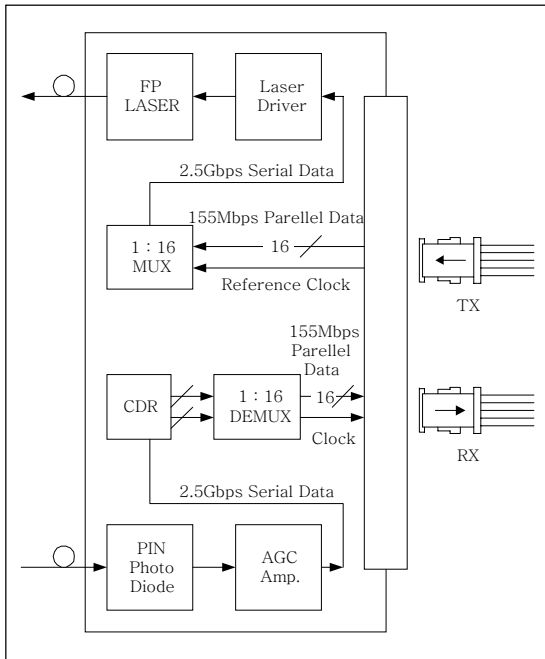
2. 모듈의 구성

2.5Gbps Twin-ax/Optical Bus Access Module은 (그림 1)에서 보듯이 Twin-ax cable 인터페이스 블록, 16:1 MUX/1:16 DEMUX 블록, 블록간 인터페이스, 2.5Gbps 광송수신 블록으로 구성되어 있다.

3. 모듈의 설계

가. Differential Signal 16:1 MUX/1:16 DEMUX 블록 설계

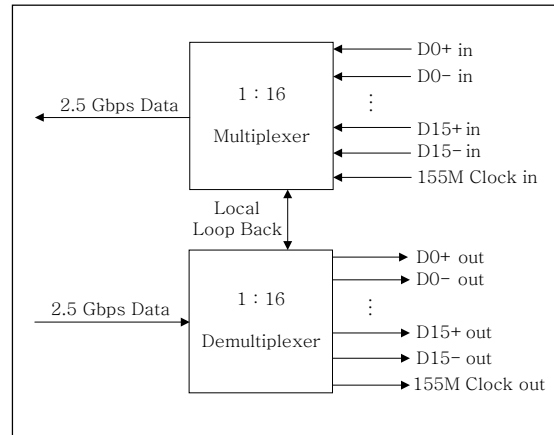
기존의 저속 통신시스템에서는 단일의 신호를 이



(그림 1) 2.5Gbps 모듈의 기능 블록 구성도

용한 전송형식을 취하였다. 그러나 시스템이 초고속화, 대용량에 따라서 시스템 설계 시 시스템과 시스템, 랙과 랙 사이의 고속 신호전송을 필수적으로 고려해야 한다. 이에 따라 단일신호를 이용한 신호의 전송보다 전송품질이 뛰어난 차등신호를 사용하는 경향이 높아지고 있다. 차등적으로 구동된 신호는 원래의 신호(single-ended)에다가 위상이 180° 반전된 신호를 함께 보내고, 이 두 개의 신호를 비교하여 신호를 재생하므로 품질을 높일 수 있다. 또한 고속 전송선로에서 가장 큰 문제가 되는 근단누화와 원단누화에 대한 면역성이 강해서 고속 신호전송에 적합하다[5]. 155Mbps의 고속 다중화/역다중화 블록을 설계함에 있어 이러한 장점을 충분히 고려하여 소자를 선정하였다.

시스템에서 시스템으로 각 채널의 신호를 1:1로 전송하는 것은 모듈의 수가 그만큼 되어야 하기 때문에 밀도도 높아지지만 경제적으로도 비효율적이다. 그러므로 송신단에서는 parallel한 16개의 채널을 1개의 라인으로 serial하게 처리할 수 있고, 수신단에서는 이와는 반대로 serial한 1개의 라인을 원



(그림 2) 16:1 MUX/1:16 DEMUX 송수신단 블록도

래의 parallel한 16개의 신호로 복원하는 블록을 구현하였다.

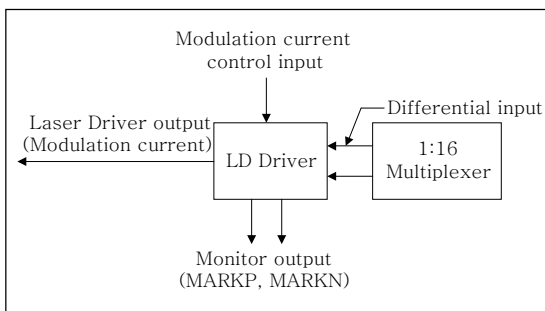
(그림 2)에서 보듯이 송신단에서는 155Mbps 16개의 Differential data와 1개의 Differential clock이 입력되어 2.5Gbps 1 라인으로 출력되고, 수신단에서는 2.5Gbps 1 라인이 입력되어 155Mbps 16개의 Differential data와 1개의 Differential clock이 출력된다. 입출력 Data Level은 ECL(Emitter Coupled Logic)이며 전원은 5.0V, -5.2V를 사용한다. 수신단에서 2.5Gbps의 광신호가 16개의 155Mbps의 전기적 신호로 역다중화되기 위해서는 먼저 클록과 데이터가 복원되어야 하는데 이를 수행하는 CDR(Clock Recovery Module) 회로는 DEMUX 내부에 내장하여 모듈을 최적화하였다[6].

나. 광전송 블록과 다중화/역다중화 블록의 인터페이스 회로 설계

광전송 기능을 갖는 블록과 Differential electrical signal의 다중화/역다중화 기능 블록의 인터페이스는 초고속(2.5Gbps) 신호처리를 하는 부분이므로 정확한 Impedance control과 적절한 output current를 고려하여 설계하였다[7]. Electrical/Optical signal 상호 변환 시 신호왜곡을 최소화하였고, Noise의 영향을 최소화하기 위해 Tx와 Rx 부분을 완전히 구분하여 설계되었다(전원과 Ground 포함)[8].

다. 광송신부 설계

MUX에서 2.5Gbps로 출력된 데이터는 다시 광신호로 변환되어 모듈의 외부로 광섬유를 타고 전송된다. 이때 MUX에서 출력된 신호가 바로 광신호로 변환되어지기 위한 모듈레이션 신호이다. 이 신호가 광소자를 구동하기 위해서는 (그림 3)과 같이 구성되어진다.



(그림 3) 광송신부 블록도

광송신기는 2.5Gbps용 DFB(Distributed Feed-Back) 레이저를 사용하였으며, 주요 기능부분은 반도체 레이저 고속변조를 위한 레이저 구동회로, 레이저 칩의 온도를 일정하게 유지시켜 주는 온도제어부, 광출력의 세기를 모니터하여 출력광의 세기를 일정하게 하는 자동 광출력 조정부(Automatic Power Control) 등으로 구성되어졌다[9].

고속 다중화부에서 제공되는 2.5Gbps NRZ(Non Return to Zero) 데이터 신호를 원활하게 접속하기 위하여 레이저 구동회로의 고속 데이터신호가 AC 결합 후에 레이저 드라이버의 입력단과 임피던스 매칭이 되도록 50ohm 마이크로스트립라인을 사용하였으며, 구동회로 출력단과 레이저의 임피던스 정합을 위하여 특성임피던스 25ohm인 마이크로스트립라인을 연결하였다.

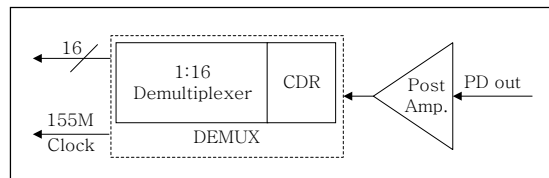
FP(Fabry-Perot) 또는 DFB LD(Laser Diode)는 동적단일모드 동작의 좁은 허용 온도범위를 일정한 온도로 유지시켜 주어야 하는데 이를 위하여 온도제어 방식은 푸시풀(push-pull) 증폭기의 단점을 보완한 광출력/전류(P-I) 제어방식을 사용하였다.

고속 변조된 레이저는 여러 가지 열화요인으로

인하여 발진임계전류가 상승하고 양자 효율이 저하되어 광출력이 점진적으로 감소하게 되므로 광출력을 일정하게 유지하도록 바이어스 전류를 조절해야 한다. 이를 위하여 서로 독립적인 두 개의 바이어스 회로를 구성하였다. 즉, 논리적으로 “0”을 나타내는 prebias 회로와 논리적으로 “1”을 나타내는 변조전류를 조절하는 회로이다. Prebias 전류는 레이저의 처핑, turn-on 지터, 소광비 등을 고려하여 인가하였으며, 변조전류는 prebias 위에서 약 30mA를 레이저 구동회로에서 인가하였다. 또한 MARKP, MARKN은 Laser Driver로 입력되는 MUX의 output level과 같은 볼티지를 갖으며 외부단자와 연결되어 있어 모니터링을 할 수 있다.

라. 광수신부 설계

LD의 광신호는 긴 광섬유를 통과하면 미약하고 왜곡되는데 이러한 광신호를 전기신호로 바꾸고 증폭, 정형, 역다중화부에서 신호처리할 수 있도록 큰 신호와 클록을 생성하는 기능을 광수신기라 한다. 광수신기의 구성은 광신호를 전기신호로 변환하는 광검출기, 미약한 전기신호를 저잡음 광대역 증폭기로 증폭한 뒤 주증폭기에서 증폭하는 전치 및 주증폭기, 그리고 왜곡된 신호를 다시 깨끗한 신호로 정형화하고 클록을 추출하는 추출 및 정형부로 되어 있다. 또 광송신기 출력과 광섬유의 특성으로 광수신기가 받는 신호는 광학적 특성이 다를 수 있으므로 이를 고려하여 설계하였다.



(그림 4) 광수신부 블록도

(그림 4)에서 보듯이 광으로 입력된 신호는 다시 전기적 신호로 변경되어 클록과 데이터를 복원한 후 DEMUX로 입력되어 16개의 채널로 역다중화된다. 이 과정에서 수신된 신호의 레벨은 송신할 때의 레

벨보다 감소하게 되는데 이를 보상하는 회로와 함께 설계되었다. DEMUX에서 출력되는 데이터는 원래의 MUX로 입력된 데이터와 같은 신호이며 약간의 위상차이만 있다.

전치증폭기는 수신감도와 dynamic range를 결정하는 중요한 증폭기인데 본 개발에서는 전치증폭기가 hybrid된 수신기 모듈을 사용하였다. 주증폭기는 전치증폭기에서 일차 증폭된 신호를 정형부에서 필요한 정도로 증폭하는 역할을 하고 주로 이득, 주파수 응답, 입력력 정합, dynamic range 확보 등을 고려하여 설계하며, NF(Noise Figure)는 대략 10dB 이하를 만족하도록 설계하였다.

마. Twin-ax cable과 MUX/DEMUX의 인터페이스 설계

Twin-ax cable로는 전송할 수 없는 초고속의 데이터를 장거리에 전송하기 위해 2.5Gbps 모듈이 필요한데, 시스템에서 모듈로의 input이 Twin-ax cable로 이루어지기 때문에 둘 간의 상호 인터페이스가 이루어져야 한다. Cable에서 인쇄회로기판으로의 인터페이스이므로 다음의 몇 가지 중요한 사항들을 고려해서 설계, 제작하였다.

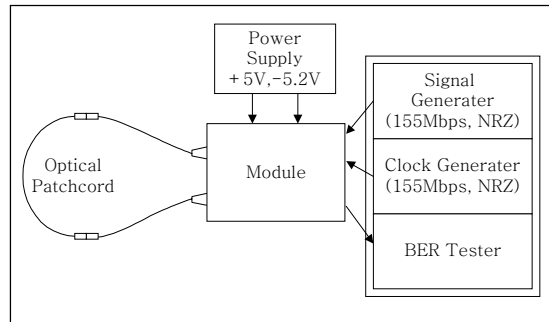
- Differential Signal line은 같은 길이를 갖는다.
- Signal line의 임피던스는 정확히 조절되어야 한다.
- Differential line 간의 cross talk를 최소화한다.

또한, Pin 간격이 2mm인 Twin-ax cable과의 연결을 위해 교환시스템의 표준 실장부품과 호환되는 2mm pitch 125pin hard metric mail right angle connector를 사용하였다.

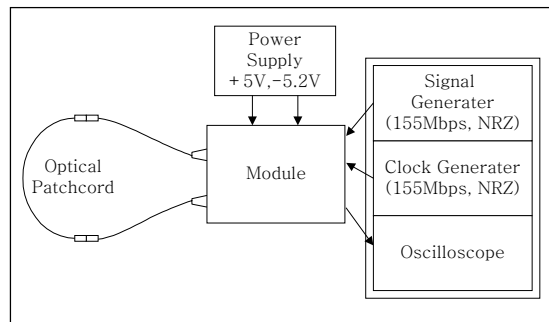
4. 성능시험

■Twin-ax/Optical Bus Access Module을 이용한 Twin-ax 성능시험

Twin-ax/Optical Bus Access Module의 시스템과 시스템간의 데이터 전송 특성을 측정하기 위하여 BER(Bit Error Rate) 및 Eye Pattern 시험을 실시하였다[10]. (그림 5)는 BER Test 모듈을 사용해서 광



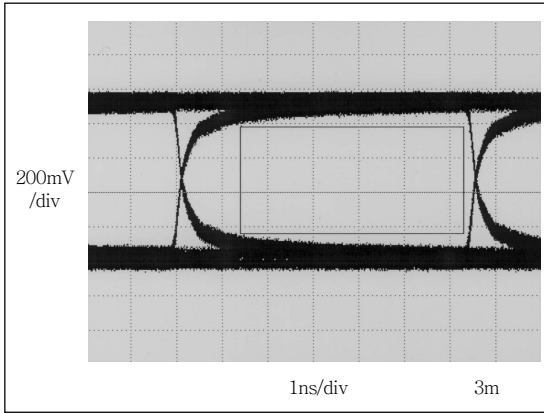
(그림 5) BER 성능시험 구성도



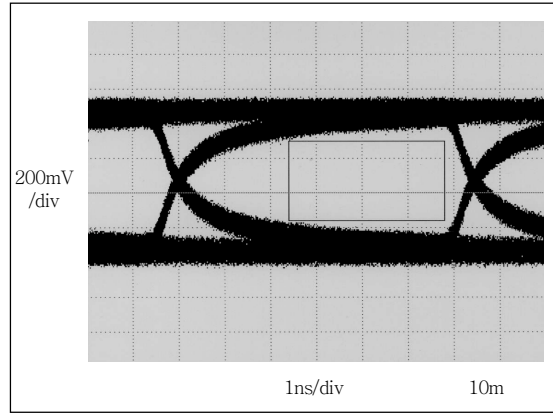
(그림 6) Eye Pattern 성능시험 구성도

데이터를 송수신하는 전송로 전체에 대한 BER을 측정하기 위한 시험장비 구성도를 나타내고 있다. 실제로 BER을 측정해 보면 개발의 목표인 2.5Gbps 속도의 10⁻¹⁰ Level에서 Error Free가 나온다. 시뮬레이션 결과도 마찬가지이다. 80km 정도까지는 Error Free를 확인할 수 있다. 그러므로 Twin-ax/Optical Bus Access Module에서는 80km 이내의 거리에서 데이터의 에러를 고려하지 않고 사용해도 무방하리라 판단된다.

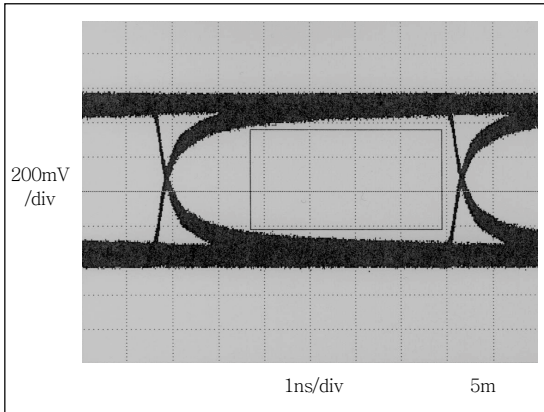
BER 외에 광전송품질을 확인할 수 있는 방법은 Eye Pattern을 분석하는 것이다. Twin-ax/Optical Bus Access Module에 대한 Eye Pattern을 분석하고 이에 따른 모듈의 성능을 확인하였다. (그림 6)은 Eye Pattern을 측정하기 위한 시험장비 구성도를 나타내고 있다. 여기에서도 80km의 단일모드 광섬유를 사용하였다. 그러나 실제로 적용되는 거리는 각기 다를 수가 있다. 부가적으로 60km와 100km에 대하여도 시뮬레이션을 통해서 Eye Pattern의



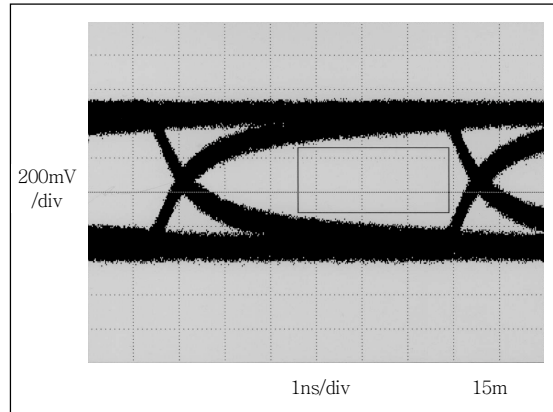
(그림 7) Eye Pattern at 3m Twin-ax



(그림 9) Eye Pattern at 10m Twin-ax



(그림 8) Eye Pattern at 5m Twin-ax



(그림 10) Eye Pattern at 15m Twin-ax

품질을 확인하였다.

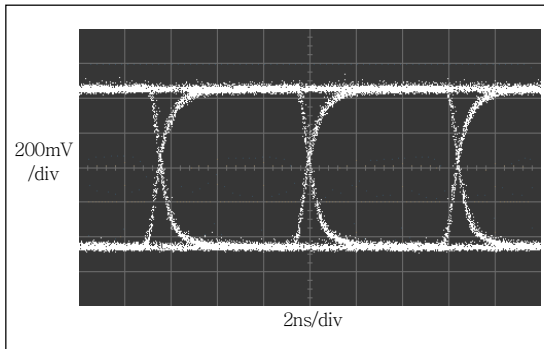
또한 전기적 접촉부분에 적용하고 있는 초고속 cable인 Twin-ax cable의 전송 특성을 Eye Pattern으로 비교하였다.

155Mbps 3m, 5m, 10m 및 15m의 네 가지 경우를 비교하였다. (그림 7)은 Twin-ax cable의 길이가 3m일 때의 Eye Pattern의 측정결과이며, 그림에서 보듯이 양호한 Opening 상태를 보여 준다. 원래의 구형파에 비해 Rising이나 Falling의 왜곡이 별로 없음을 나타내고 있다. 이 때의 BER은 10^{-10} 이하이다.

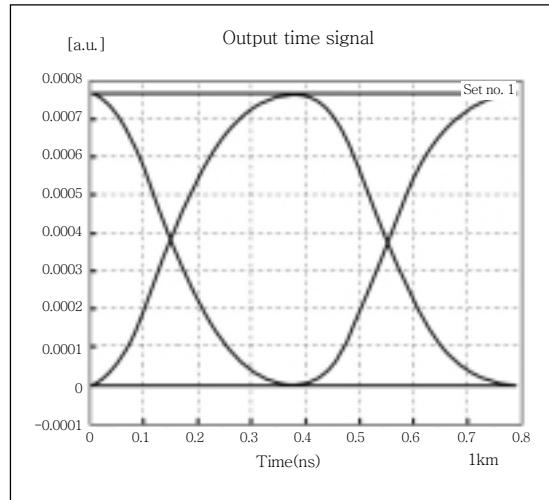
(그림 8)과 (그림 9)는 Twin-ax cable의 길이가 5m일 때와 10m일 때의 Eye Pattern이다. 길이가 늘어갈수록 Rising이나 Falling의 왜곡 현상을 볼 수 있다. 또한 파형의 진폭도 차츰 작아지는 것을 알

수 있다. 그러나 아직까지는 파형의 눈이 양호함으로 데이터를 인식하는 데는 그다지 별 문제가 없을 것이다. 이 때의 BER은 10^{-10} 이하이다.

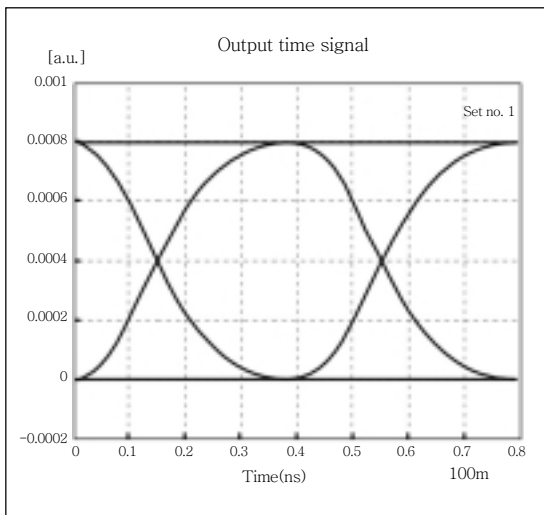
(그림 10)은 Twin-ax cable의 길이가 15m일 때의 Eye Pattern이다. Edge 속도의 열화, 즉 긴 전송선에서 고주파 성분의 신호손실에 따라 파형이 완만하게 되는 현상에 의해서 Rising이나 Falling의 왜곡이 발생하고 진폭도 많이 줄었으며, Pattern의 눈도 작아졌다. 그러나 이 때의 BER은 10^{-10} 이하이다. 실제로 Twin-ax cable의 길이가 15m까지는 사용에 별 무리가 없지만 20m, 30m가 되면 전송품질에 문제가 발생한다. 이 때의 BER은 10^{-10} 이상으로 급격히 증가하면서 시스템의 요구사항을 벗어나게 된다. 장거리 전송에서 발생하는 것과 같이 data speed가



(그림 11) Eye Pattern at Twin-ax/Optical Bus Access Module 수신부



(그림 13) Eye Pattern at 100km Fiber line



(그림 12) Eye Pattern at 60km Fiber line

올라가면서 전송품질은 급격히 떨어지게 되는데 data speed가 1Gbps일 때에는 10m 이상의 전송이 불가능한 실정이다.

마지막으로 본 과제의 최종 결과물인 Twin-ax/Optical Bus Access Module의 전송 특성을 분석하였다. (그림 11)은 앞에서 설명한 Eye Pattern 실험 조건에서는 광전송라인을 Back-to-Back 조건에서 3m Twin-ax cable로 측정하였다. 케이블에 의한 edge 속도의 열화, 즉 긴 전송선에서 고주파성분의 신호손실에 따라 파형이 완만하게 되는 현상이 없이 Eye Pattern의 상태가 양호함을 확인할 수 있다. 그리고 전송선로의 특성에 기인하는 신호 감쇠의 영향에 의한 진폭의 감소없이 송신파형을 복원하는 것

을 확인할 수 있다. 이 때의 BER은 10^{-12} 이하로 초고속 통신망에 적합한 특성을 갖게 된다.

추가적으로 2.5Gbps의 속도로 광섬유 전송거리를 60km, 100km의 길이로 확장한 상태의 경우 시뮬레이션 시험을 실시하였다. (그림 12)는 60km일 때이고, (그림 13)은 100km일 때이다. Pulse의 진폭만 조금씩 작아졌을 뿐 파형에는 큰 변화가 없다. 이것은 광선로의 전송거리가 증가하였음에도 불구하고 광수신부의 데이터 복원능력이 월등함을 알 수 있다. 이 때의 BER은 10^{-12} 이하로 초고속망에서 장거리 전송라인을 광선로로 적용하여 전기적 신호화할 수 있음을 알 수 있다. 실제 전송선로의 길이와 전송 데이터의 속도의 증가가 실제 데이터 전송에 영향을 주기 때문에 늘어나는 통신 데이터의 용량을 수용하기 위해서는 필수적인 기술이다.

이상과 같은 성능시험의 결과에서 알 수 있듯이 본 연구결과는 최초 개발목표인 Twin-ax/Optical 전송을 실현하였으며, 향후 기술의 개선을 통하여 광전송 시스템에도 적용할 수 있는 transponder로의 전환도 가능한 제품개발이 가능할 것이다.

III. 결론

본 시제품은 기존의 단순 동기식 전송방식(1:1)

에서 탈피하여 다중화 접속방식(16:1)을 채택하고 있는 고밀도, 저가격, 다중화/역다중화 기능을 포함하는 광송수신 모듈이다. 광송수신 부품에다가 전기적인 다중화, 역다중화 부품을 결합한 것으로서 고밀도, 대용량의 통신시스템의 실현을 위한 동기식 전송망에 적용이 가능하며 제품응용에 따라 파장분할 방식의 고밀도, 대용량 시스템에도 적용이 가능할 것이다. 또한, Twin-ax cable의 전송거리를 30~40m로 확대하기 위하여 cable connector 내부에 등가회로를 삽입하여 주파수 변화에 따른 dispersion을 줄이는 연구도 계속적으로 진행할 예정이다.

본 시제품은 ATM 시스템 설계자들로부터 전송 기술로 인하여 대용량으로의 설계 전환에 애로가 있다는 점을 파악하여 그 해결방안을 검토하기 시작하였으며, 또한 시스템의 interconnection이 대단히 복잡하고 따라서 A/S가 쉽지 않은 점에 착안하여 연구방향을 정하였다. 따라서 시스템 설계자들이 마음 놓고 시스템의 설계를 할 수 있게 함으로써 설계의 효율성을 높이고 향후 개발될 초고속 대용량 시스템에 대한 적용기술로 활용하는 데 문제가 없을 것으로 판단된다. 시스템의 대용량화에 따르는 제약을 일부 해소시킬 수 있다는 결론을 얻음으로써 통신시스템 설계자에게 설계의 용이성, 경제성 및 사후 유지보수를 간편하게 할 수 있도록 해결책을 제시한 개발 시제품이다. 따라서 향후 국내 통신시스템에서

전기적 신호를 광신호로 변환하여 초고속 장거리 전송이 필요한 부분에 본 개발 시제품을 적극 활용할 수 있기를 기대해 본다.

참고 문헌

- [1] J.W. Goodman *et al.*, "Optical Interconnects for VLSI System," *Proc. IEEE*, Vol. 72, No. 7, 1984, pp. 850 - 866.
- [2] J.W. Goodman, "Optical Interconnections in Microelectronics," *Optical Computing '84* (SPIE Vol. 456), 1984, pp. 72 - 85.
- [3] J.A. Fried, "Optical I/O for High Speed CMOS Systems," *Opt. Eng.*, Vol. 25, No. 10, 1986, pp. 1132 - 1142.
- [4] Othmar Kyas, "ATM Network," *International Thomson Publishing*, 1995, pp. 88 - 107.
- [5] Howard W. Johnson, Martin Graham, *High-speed Digital Design*, Prentice-Hall, 1993, pp. 319 - 320.
- [6] Richard Walker, "2.488Gbit/s Silicon Bipolar Clock and Data Recovery Circuit for SONET Fiber-Optic Communication Networks," *Hewlett-Parkard Journal*, Dec. 1997, p. 111.
- [7] Howard W. Johnson, Martin Graham, *High-speed Digital Design*, Prentice-Hall, 1993, pp. 179 - 188.
- [8] Howard W. Johnson, Martin Graham, *High-speed Digital Design*, Prentice-Hall, 1993, pp. 189 - 201.
- [9] Gorrind P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems," John Wiley & Sons, 1997, pp.126 - 127.
- [10] Dennis Derickson, *Fiber Optic Test and Measurement*, Prentice Hall PTR, 1998, pp. 298 - 316.