

차세대 광통신 기술의 개발 동향

李在升, 朴熙甲, 沈昌燮
韓國電子通信研究所

I. 서 론

지난 20여년 간에 걸친 광섬유와 반도체 기술의 눈부신 성장은 종전의 전기적인 통신형태와는 정보 전송 능력에서 비교가 되지 않는, 빛을 매체로 한 광통신 방식을 가능케 하였다. 우리나라를 포함하여 통신기술의 선진국에서는 국간 중계의 경우 이미 대부분 광통신 통신기술로 대체되었으며, 최근에는 한 걸음 더 나아가 일반 가입자에 이르기까지 광섬유를 통하여 서비스를 하고자 하는 광가입자 망의 개념까지 등장하게 되었다.

그러나 기존의 광통신 기술은 광원(반도체 레이저)을 입력신호에 따라 단순히 점멸(on-off) 시킴으로써 광강도를 변조하여 송신하고 수신단의 광검출기에서 광강도를 직접 검출하는 강도변조/직접검파(IM/DD: intensity modulation/direct detection) 방식에 불과하다. 즉 기존의 라디오 송수신 기술의 측면에서 견주어 보면 이러한 방식은 반송파(carrier)로 사용되는 광파의 종류가 오직 하나여서 주파수분할다중화(광 FDM 혹은 고밀도 WDM)가 불가능하며 또한 그 캐리어의 위상에는 정보를 실지 못하고 있다. 게다가 수신단측에 국부발진기가 없으므로 수신감도가 낮고 따라서 광섬유의 손실을 보상해 주기 위한 중계기 사이의 거리가 짧게 제한을 받는다. 빛의 높은 주파수(광장 $1.5\mu\text{m}$ 대역에서 약 2×10^5 GHz)를 감안할 때 이는 큰 낭비이며 통신량의 폭발적 증가 추세에 따라 이러한 비효율성을 극복하기 위해 차세대 통신 방식으로서 수신부에 국부발진기를 사용하는 코히런트 방식^[1]이 한창 연구 개발되고 있다. 이러한 코히런트 방식은 현재 미국과 영국은 지상에서 일본에서는 해저케이블에서 현장시험까지 성공한 단계이

며 빛의 잠재적인 정보전송 능력을 극대화 할 수 있다는 장점이 있으나 기술적인 측면과 비용적인 측면에서 보면 가까운 장래의 전면적인 실용화는 아직 미지수이며 코히런트 방식과 IM/DD 방식을 접목한 광 FDM 형태도 많이 연구되고 있다.

또 한가지의 주목할 만한 방식으로 솔리톤 전송기술^[2]이 있다. 이는 광섬유의 영분산(zero dispersion) 이상의 장파장 대역에서 강도가 높은 초단 펄스가 광섬유를 전파할 때 광섬유의 분산효과가 비선형 효과에 의해 상쇄됨을 이용한 것으로 광섬유의 손실을 이상적으로 보상할 수만 있다면 초단펄스를 그 모양을 안정하게 유지한 채 고속으로 수천 Km 이상 장거리 전송할 수 있는 방법이다.

광섬유의 손실을 보상하는 방법으로 최근 Er 광섬유 증폭기^[3]가 개발되어 각광을 받고 있다. 이는 희토류 원소인 erbium이 도핑된 광섬유를 펌핑광으로 여기시키면 광섬유의 최저 손실 대역에 해당하는 1540nm 부근의 광신호를 유도적으로 증폭하는 특성을 갖는 것을 이용한 소자로서, 현재 쓰이는 복잡한 중계기를 아주 간단하고도 신뢰도가 높은 광 중계기로 대체할 수 있으며, 또한 앞으로의 광 LAN, 광대역망 등 고도화된 광통신망에서 선로의 많은 분기(branch)로 인해 발생하는 광손실을 보상해 줄 수 있다. 광섬유 증폭방식은 그 이전에 제안된 반도체 레이저 증폭기에 비해 전송용 광섬유와의 결합손실이 작고, 이득이 편광에 무관하며, 채널간에 누화가 적은 장점을 갖는다. 이러한 광증폭기술은 지난 3여년간 급진적으로 발전하여 왔으며, 현재 연구중인 여러가지 통신 방식 모두에게 광섬유 손실문제의 극복이라는 중요한 돌파구를 제공하고 있는데, 특히 직

접 검파 방식의 낮은 수신감도 문제를 해결할 수 있어서 기존방식을 대체할 차세대 통신방식의 실현 시기에 매우 민감하게 작용할 것이다.

이러한 차세대 광통신기술은 광섬유의 손실이 극소화되는 1.55 μm 대역에서 중점적으로 연구되고 있다. 상용되는 광섬유의 분산이 최소로 되는 지점이 1.3 μm 근방이므로 1.55 μm 대역에서 분산효과를 최소화 하기 위해서는 dispersion-shifted fiber를 사용하거나 선폭이 좁은 광원을 사용하면 된다. 이 영역은 기존의 1.3 μm 대역에서 개발된 InGaAs 및 Ge등을 이용한 소자기술이 거의 그대로 쓰이며, 특히 Er 광섬유 증폭기가 이득을 갖는 영역이므로 장래의 광통신 대역으로서 매우 유망하다.

반도체 레이저 및 송수신단 광집적회로의 개발 진척에 따라 광통신 기술의 향배가 결정될 것이며 실제로 널리 쓰이기에는 현재 문제점이 존재함도 사실이다. 이 글에서는 최근 활발히 연구되고 있는 이러한 차세대 광통신기술의 개발현황을 특히 코히런트 방식과 Er 광섬유 증폭기에 비중을 두어 알아보고 앞으로의 전망을 예측해 보고자 한다.

II. 코히런트 광통신

1. 기본원리

코히런트 광통신 방식의 기본원리는 그림1과 같다. 송신부에서는 매우 좁은 주파수 선폭을 갖는 LD (laser diode)로부터의 빛, 즉 반송파를 입력신호에 따라 진폭변조(ASK; amplitude shift keying), 주파수 변조(FSK; frequency shift keying), 또는 위상변조(PSK; phase shift keying)하여 송신한다. 광섬유를 따라 전달된 변조된 광신호는 수신부에서 반송파와 근접한 발광 주파수를 갖는 별도의 국부발진기(local oscillator)로 부터의 빛과 헤테로다인(heterodyne) 합성되어 광검출기에 의해 전기적 신호로 바뀌어 진다. 따라서 광검출기로 부터의 전기적 출력은 반송파와

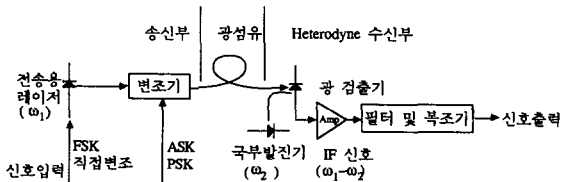


그림 1. 코히런트 광통신 시스템

국부 광파와의 차주파수 성분인 IF(intermediate frequency)대역의 신호로서 나타나게 된다. 한편 국부발진기로 반송파와 같은 주파수의 광원을 사용할 수도 있는데 이는 호모다인(homodyne)으로서 헤테로다인에 비해 몇가지 중요한 장점이 있으나 기술적으로 복잡해지는 문제점이 있다.

코히런트 광통신 방식은 이와 같이 국부발진기와 진보된 변복조 방식을 도입함으로써 재래의 IM/DD 방식에 비해 통상 10dB 정도 수신감도가 향상되며 그만큼 중계간격을 늘릴 수 있다. 또한 1~5GHz 대역으로 IF 신호를 조정하면 기존의 잘 정립된 마이크로파 기술을 활용할 수 있어서 매우 세밀한 주파수 간격으로 주파수 대역을 분할하여 다중화 전송하는 광 FDM이 가능하게 되며, IM/DD 방식에 비하여 최소한 10⁴정도 더 큰 주파수 대역 활용도를 가질 수 있다. 그림 2에 성상결합기(star coupler)를 이용한 코히런트 FDM 통신망의 개략도를 보였다.

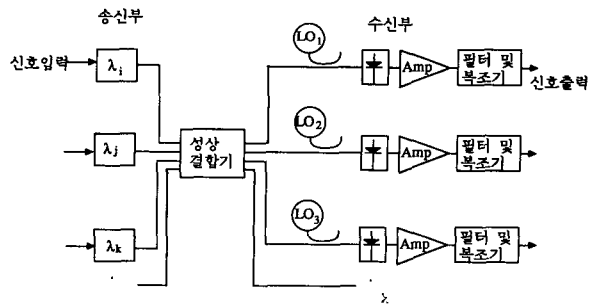


그림 2. 성상결합기를 이용한 코히런트 FDM network

코히런트 방식을 이용한 간단한 실험용 전송장치(test bed)는 이미 영국의 BT&D사에서 시판될 정도이나 코히런트방식의 장점을 극대화 하기 위해서는 몇가지의 어려운 문제점들이 남아있다. 예를들어 광섬유에 의한 편광의 천이, 광원의 위상잡음, 광원의 선폭, 동조(tuning)지연, 수신기의 turn on시 느린 cold start 반응(~9s)등이다. 많은 연구를 통하여 이러한 문제점들이 개선되고 해결방안이 제시되고 있으나 아직 만족할 단계는 아니다.

2. 광원

송신기의 광원에는 좁은 주파수 선폭 및 안정도가 고려된다. 국부 발진기는 이외에도 가입자들의 의식하여 가격이 저렴하며 가능한 한 광전력이 커야 하고 강도 잡음이 작아야 할 것이다. 가장 중요한 요구조건은 다중 채널 시스템에서 채널의 선택을 위해 상담 범위에 걸쳐 발진 주파수의 tuning이 가능하여야 한다. 예로써 채널간 간격이 10GHz이고 채널 수가 100개이면 국부발진기는 최소한 1THz의 범위 (1.5 μ m 파장대역에서 약 8nm 파장 범위)에 걸쳐 가변이 되어야 한다.

광원의 주파수 선폭 요구치는 변/복조 방식에 따라 차이가 있는데 이를 표 1에 나타내었다.^[4] 현재 시판되고 있는 DFB(distributed feedback)나 DBR(disributed Bragg reflector)구조의 LD는 주파수 선폭이 수~수십 MHz로서 ASK나 FSK 시스템에 적용이 가능하다. 그러나 PSK의 경우에는 더 좁은 선폭이 요구되므로 LEC(long external cavity) 레이저가 사용되고 있다. 현재까지 발표된 최소 선폭은 DFB가 1200 μ m 길이의 공진기에서 470KHz, DBR이 580KHz이며 LEC의 경우 외부 공진기의 길이를 늘리면 1KHz 이하까지 가능하나 부피가 커지며 안정도가 나빠진다.

기존의 IM/DD 방식에서는 광원의 on-off 변조시 주파수 chirping으로 인하여 출력 주파수의 변위가 10GHz에 이르는 까닭에 광섬유의 분산효과가 수십 Km 이상 장거리 전송의 경우 심각하다. 따라서 순수한 ASK의 경우 외부변조기를 사용한다. 외부 변조기로는 주로 LiNbO₃ 결정소자들이 사용되며 multiple quantum-well 도파로도 장차 유망할 것 같다. PSK

의 경우에도 빛의 위상을 변조하기 위해 외부 변조기를 사용한다. 그러나 외부변조기는 삽입손실과 가격상승 등의 단점이 있으므로 많은 경우 광원의 구동 진류를 직접 변조하여 출력 주파수를 변조하는 FSK 방식을 선호하는 경향이 있다. 이때 LD의 주파수 변조특성이 불균일해지는 문제를 해결하기 위해 전기적인 equalizer 회로를 사용하거나, 적절한 코딩을 통해 저주파 성분을 제거하는 방법, 수신단에서 케환회로를 사용하는 방법 등이 제시되었으나 더욱 바람직한 해결책으로는 LD의 구조를 변화시킨 split-contact DFB나 multicontact DBR 등이 있다. DFB LD의 변조속도는 1~10GHz 정도로 가장 빠르나 tuning 영역이 약 2nm 정도로서 DBR의 7nm에 비해 아직 미흡하다. 또한 DFB LD는 주파수의 안정화를 위해 60dB 정도의 높은 isolation이 필요하다. DBR 소자는 그러나 변조속도가 100MHz 근방에 불과한 문제가 남아 있다. 최근 영국의 BTRL에서 3 \times 3 \times 5cm³규격내에 선폭 50KHz인 소형 LEC 레이저를 봉입하여 DPSK 전송에 사용하였는데 연속(continuous)tuning 영역이 0.4nm로서, 장시간에 걸쳐 레이저를 안정화 하는 회로의 문제가 남아 있다.^[5] Tuning 속도와 tuning 영역의 각종 LD 구조에 대한 상황을 그림 3에 나타내었다.^[1]

3. IF 대역 복조

현재 세계적으로 실험되고 있는 실제의 coherent 광통신 시스템에서는 IF 대역 복조시에 coherent 방식이 아닌 envelope 검파 또는 differential 검파방식을 사용하는 경우가 대부분이다. 그 이유는 이러한 방식들이 coherent 복조방식에 비해서 수신감도에서

표 1. 각 변조 방식간 비교

변조방식	광변조기	광복조	IF 대역변조	상대적 수신감도	LD주파수선폭/ 전송속도	IF대역폭/ 전송속도
ASK	외부변조기	헤테로다인	envelope	0dB	$\sim 10^{-1}$	~ 2
		호모다인		3dB	$\sim 10^{-4}$	~ 1
FSK	직접변조	헤테로다인	dual-filter envelope	3dB	$\sim 10^{-1}$	4~10
			differential	$\sim 4\sim 6$ dB	$\sim 10^{-2}\sim 10^{-3}$	~ 2
PSK	외부변조기	헤테로다인	differential	9dB	$\sim 10^{-3}$	~ 2
		호모다인			$\sim 10^{-4}$	~ 1

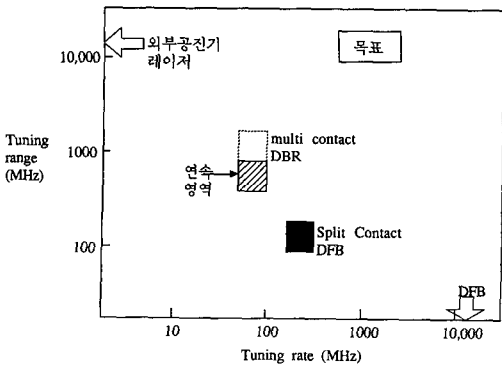


그림 3. 광통신용 LD의 tuning 영역과 주파수 변조속도

큰 차이가 없으며, 그 대신에 PLL과 같은 기준파 재생회로가 불필요하여 수신기 구성이 쉬워지는 장점이 있기 때문이다. 특히 FSK에서는 복조를 위해 IF 대역에서 주파수 필터를 통과한 후 envelope 검파하는 non-coherent 방식을 많이 사용한다. 그 이유는 광원에 요구되는 주파수 선평의 요구치에서 ASK와 같은 정도로서 충분하므로 시스템 구성이 용이하기 때문이다. FSK에서의 differential 검파방식에서는 IF 신호를 delay-line을 사용하여 지연시켜 원래의 신호와 mixing 하여 복조를 할 수 있다. 이 방식은 envelope 검파방식에 비해 광원의 주파수 선평이 더욱 좁은 것이 요구되나 수신감도와 IF 대역폭면에서 다소 유리하다. 한편 위상변조의 경우에도 기준파가 없이도 IF 대역 복조가 가능하도록 DPSK (differential PSK)를 채택하는 경우가 대부분이다. DPSK는 송신부에서 differential encoding 한 후 이를 PSK 변조하여 송신하고, 수신부의 IF단에서 입력 신호를 한 bit 지연된 신호와의 mixing에 의해 복조하는 방식이다. IF 복조시에 전 bit를 기준으로 하므로 광원의 가간섭 시간이 순수한 PSK에 비해 짧아도 복조가 가능하다. 따라서 DPSK는 PSK에 비해 수신감도가 1dB 가량 떨어지나 광원의 주파수 선평이 10배 가량 더 넓은 것이 허용되므로 실용적이다.

4. FSK와 DPSK

현재의 기술적 수준과 경제성등을 감안할 때 가장 타당한 광 변조방식은 FSK와 DPSK라 할 수 있다. 실제로 세계적으로 시도되고 있는 많은 coherent 광통신 시스템들이 거의 이 두가지 방식에 의존하고 있다. 그 장단점을 요약하면 FSK는 직접 변조로 인

한 간편성과 삽입손실, 그리고 광원의 주파수 선평 허용치에 있어서 유리하고, 주파수 특성의 불균일성과 IF 대역폭면에서 고속 전송에 불리하다. 고속전송 시에는 신호의 baseband 대역폭 자체가 커서 IF의 중심 주파수와 대역폭이 함께 커져야 하는 문제점이 있고 더욱이 FSK 변조시에는 IF 주파수와 대역폭이 다른 변조 방식에 비해 더욱 커야 한다(표1참조). 반면에 DPSK는 수신감도가 상대적으로 높고 고속 전송에 무난하다. 따라서 일반적으로 저속전송 및 가입자용 시스템에서는 FSK를, 고속전송 및 장거리 전송 시스템에서는 DPSK를 일반적으로 선호하는 경향이 있다.

그러나 근래에 FSK에 의한 고속전송에서도 변조방식을 최적화 함으로써 얻은 좋은 결과들이 보고되고 있다. FSK 변조에서 변조된 신호의 대역폭을 최소화하기 위한 시도의 한 예로서 FSK의 일종인 MSK (minimum shift keying)를 들 수 있다. 이는 주파수 변위 (frequency deviation)가 정확히 전송속도의 절반이 되도록 하여 한 bit의 주기내에서 90°의 위상변화를 줌으로써 동기적으로 검파할 경우에 PSK와 같이 동작하도록 하는 것이다.

또한 FSK에서 광 주파수 변위를 가급적 작게하고 (광 주파수 변위 < 전송속도) 주파수 변조시에 광 위상이 불연속적으로 변화하지 않도록 함으로써 변조 신호의 대역폭을 최소로 줄이는 narrow-deviation CPFSK (continuous-phase FSK) 방식도 고속전송에 효과적인 것으로 나타나고 있다.

5. 호모다인과 헤테로다인

호모다인은 헤테로다인에 비하여 3dB 가량 높은 수신감도를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 보다 중요한 장점은 호모다인에서 IF 주파수가 영 이므로 IF단의 증폭기의 대역폭이 신호의 baseband 대역폭만으로 충분하다는 점이다. 헤테로다인의 경우 IF 증폭기의 대역폭이 신호 대역폭의 최소한 2배 이상이어야 하며, 실제로는 5배 정도, 특히 FSK의 경우에는 주파수 변조시에 많은 sideband 들이 생기므로 더욱 넓은 대역폭이 요구된다. 따라서 호모다인은 고속 전송시에 헤테로다인에 비하여 IF 대역폭에 있어서 분명한 장점을 가지고 있다. 그러나 호모다인을 위해서는 전송속도의 0.01% 정도의 매우 좁은 주파수 선평을 갖는 광원이 필요하다. 뿐만 아니라 호모다인에서의 국부 광원은 그 주파수가 수신광 캐리어 주파수와 같아야 하고 그 위상도 서로 일치해야 한

다. 이를 위해서는 광 PLL (phase-lock loop) 또는 injection locking 등 기술적으로 어려운 문제점들이 아직 완전히 해결되지 않은 채 남아 있다.

최근에는 광원의 선폭에 엄격한 제한을 두지 않더라도 호모다인을 할 수 있도록 위상 다이버시티 수신 방식이 제안되어 각광을 받고 있다. 이 방식은 수신감도가 원래의 호모다인에 비해 다소(1dB) 떨어지고 여러개의 광검출기를 사용하여 수신기가 복잡해지는 단점이 있으나, 이미 상품화된 DFB-LD를 그대로 광원으로 사용할 수 있고 고속전송시의 호모다인의 장점을 살릴 수 있으나 역시 신호처리가 복잡하다.

6. 편광문제

LD로부터 방출되는 빛은 광섬유를 지나는 동안에 편광상태가 예측할 수 없는 임의의 상태를 가지게 된다. 코히런트 광수신기에서 광결합기를 통하여 수신광과 국부광을 합성할 때에 중요한 사항은 수신광과 국부광이 서로 같은 편광상태를 가져야 mixing 이 가장 효율적으로 이루어질 수 있다는 점이다. 만일 서로 직교하는 편광상태로 두 빛이 만난다면 두 빛은 상호 간섭이 없으므로 IF 대역의 출력은 존재하지 않을 것이다. 이러한 편광의 문제점을 해결하기 위한 한 방법으로서 편광 유지 광섬유를 사용하는 방법은 이미 포설된 광섬유를 전송로로 사용하지 못하는 단점이 있을 뿐 아니라, 광섬유의 제조기술 면에서도 두 편광모드간의 누화(crosstalk)가 커서 실용화를 위한 기대치에 아직 미치지 못하고 있다. 또한 편광 유지 광섬유의 단면 구조가 비원형이므로 광섬유간의 접속시에도 편광축의 방향끼리 정확히 일치시켜야 하는 등 실제로 포설시에 불편한 점이 있어서 현재 크게 고려되지 않는다. 다른 방법은 수신부에서 광섬유 출력의 편광상태를 적절한 편광 조절기를 통하여 자동으로 국부광의 편광상태와 일치시키는 방법이다. 이 방법의 단점은 FDM의 경우 각 채널 선택시 채널 간격이 클경우 편광상태를 그때마다 조정해야 하므로 동조 지연 시간이 늘어나며, 편광의 추적/조절을 위해서 편광 감지기, 편광 변환기 및 별도의 controller/processor가 있어야 하므로 경제적으로나 기술적으로 부담스러운 측면이 있다.

보다 근원적인 해결책은 편광에 무관한 광수신기를 구성하는 것이라 할 수 있다. 이를 위해 제안된 방식이 그림 4와 같은 편광 다이버시티(polarization diversity) 수신기이다. 편광 다이버시티 수신기

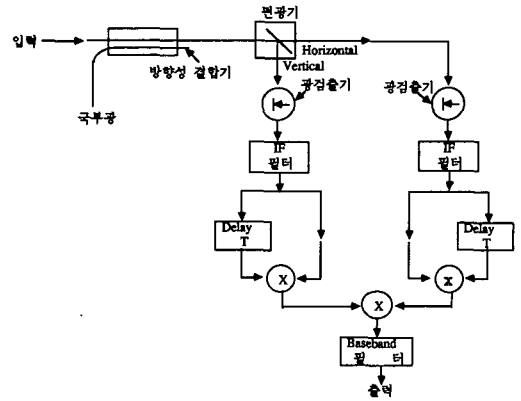


그림 4. 편광 diversity 방식의 기본 원리

의 광 입력단에서 편광기에 입사되는 국부광의 편광 상태는 두 편광축에 대하여 균일한 강도를 나타내도록 조절되어 있다. 편광기에서는 수신광과 국부광을 서로 직교하는 두 편광성분으로 분리하여 같은 편광성분끼리 헤테로다인 합성하고 두 편광성분을 각기 다른 광검출기로 검파한다. 검파한 후에 IF 신호 출력끼리 신호처리하여 합성하거나 또는 신호의 복조 후에 합성한다. 따라서 수신광의 어떠한 편광 상태에 대해서도 헤테로다인 광 수신기의 출력이 영이 되는 경우(signal fading)는 없게 된다. 신호의 복조 전에 합성하는 경우에는 두 IF 신호간에 위상 차이가 있을 수 있으므로 이를 보상해 줄 필요가 있다. 이러한 편광 다이버시티 방식은 편광 추적 방식에 비해 광손실이 그다지 크지 않고 수신기 자체에서 편광 문제를 해결할 수 있으므로 실용상 큰 장점이 있다. 다만 광검출기를 2개 사용해야 하고 2개의 IF 증폭기가 병렬로 사용되어야 하는 점에서 다소 비경제적이다.

편광에 무관한 시스템 구성방식의 다른 방법으로서 편광 스크램블링(또는 스위칭)방식이 있다. 편광 스크램블링(scrambling)방식은 적절한 편광 변환기(스위치)를 사용하여 수신광을 서로 직교하는 두 편광성분간에 매우 빠른 속도로 스위칭 시킴으로써 편광상태를 스크램블링한다. 이때 스크램블링의 속도는 빠를수록 좋으며 전송속도의 짝수배가 되어야 한다. 따라서 수신단에서 고정된 편광상태를 갖는 국부광과 헤테로다인 할 때에 IF 신호 출력은 수신광

과 국부광의 편광이 일치하는 경우에 3dB 작기는 하지만 수신광의 편광상태에 무관한 결과를 얻는다. 편광 스크램블링 방식의 특징은 수신광의 편광상태에 관계없이 항상 3dB의 고정된 손실과 함께 하나의 광검출기 및 신호처리 회로로써 편광에 무관한 수신기를 구성할 수 있다는 점이다. 그러나 고속 전송시에는 적용이 곤란한 단점이 있다. 편광 스크램블링 방식은 분배 망 전용의 시스템을 구성할 때에 그 장점이 돋보일 수 있다. 앞에서의 설명은 주로 수신기에서의 편광 스크램블링을 다루었지만 송신부에서 광섬유에 빛을 입사시키기 전에 편광 스크램블링 하더라도 같은 결과를 얻을 수 있다. 빛이 긴 길이의 광섬유를 따라 진행한 후에도 편광상태는 바뀌더라도 두 편광 성분의 직교성은 거의 유지된다. 따라서 TV와 같은 일방적인 분배망의 경우에 송신부에서 편광 스크램블링을 하여 가입자에게 분배하면 수많은 가입자는 보통의 코히런트 수신기로써 편광에 무관하게 수신할 수 있으므로 전체 시스템의 경제성면에서 단연 유리한 방식이라 할 수 있다. 또한 편광 스크램블링은 다른 편광 처리 방식과는 달리 광 주파수에 무관하므로 여러 채널을 동시에 단 하나의 스크램블러를 사용하여 처리 송신할 수 있으므로 경제적이다.

7. 채널 주파수 안정화

LD의 발진 중심 주파수는 온도변화와 $1/f$ 잡음 때문에 흔들리게 된다. 이는 광 헤테로다인 후에 IF 대역에서 중심 주파수의 흔들림으로 나타나며 시스템의 BER (bit error rate) 특성이 나빠지는 원인이 된다. 송신부 LD에서의 발진 광 주파수의 미세 조절은 heat sink의 온도를 조절하거나 바이어스 전류를 조절함으로써 가능하다. 일반적으로 송신부 LD의 주파수 안정화를 위해 LD 칩의 온도를 변위 0.001~0.01도 이하의 정밀도로 일정하게 유지해 주고 광 주파수를 Fabry-Perot 간섭계를 사용하여 미리 설정된 기준 주파수에 locking 시켜서 사용한다. 송신부와는 별도로 수신부에서도 광 헤테로다인 후 IF신호의 중심 주파수를 측정하여 미리 설정된 IF필터의 중심 주파수와 일치하도록 AFC (automatic frequency control) 루프를 통하여 국부 발진기 레이저의 주파수를 조절한다. 즉 송신부의 레이저 주파수에 다소 흔들림이 있더라도 수신부에서 국부 발진 레이저가 이를 추적함으로써 두 레이저간의 주파수 차이 (IF필터 주파수에 해당) 일정하게 유지되도록 한다.

한편 다중 채널 시스템에서는 개개 송수신부의 주파수를 안정시키는 것 외에도 여러 채널의 주파수를 동시에 안정화시키며 각 채널간의 주파수 간격을 유지해야 한다. 그 뿐만아니라 FDM 방식의 다중 채널 시스템을 실제 방송망에 적용할 때에 각 채널의 주파수를 절대적인 값으로 할당해 줄 필요가 있다. 이러한 채널의 표준 주파수는 여러개의 FDM 시스템을 상호 연결하여 거대한 통신망을 구성하고자 할 때에 필요하게 될 것이다. 이때 여러 채널의 주파수를 균등한 간격으로 위치시키는 방법으로 FFP (fiber Fabry Perot)가 널리 사용되고 있으며 주파수의 절대 기준치로는 크립톤 원자등의 천이 파장을 이용하기도 한다.

8. 코히런트 FDM 시스템 구성 예

코히런트 방식이 지닌 높은 수신감도의 매력은 새로운 광섬유 증폭기의 개발로 인해 다소 퇴색한 느낌인데, 이는 기존의 전송방식으로도 쉽게 수신감도를 높일 수 있게 되었기 때문이다. 따라서 최근 많은 노력이 광가입자를 염두에 둔 FDM 다중채널 시스템에 모아지고 있는데 그 중 몇가지를 소개하기로 한다.

미국의 AT&T에서는 FDM의 송수신 시스템에 PC를 이용한 digital tuning 방식을 도입하였다.⁶⁾ 송신단에서는 단일 기관위에 제작된 6개의 multicontact DBR 레이저 각각을 50채널 중 하나의 중심주파수에 맞추어 200Mbps의 속도로 FSK 변조하고 16×16 상결합기로 6개중 출력채널을 결합하여 전송한다. 이웃한 채널간의 간격은 FFP를 이용하여 2.5GHz로 고정하였고, LD의 50가지 구동전류를 PC에 기억시키고 이 값들은 매 순간 LD의 주파수가 일정하게 유지되도록 오차 신호에 의해 변화하게 하였다. 송신부의 FFP와 약간 다른 FFP를 수신부에서 사용하여 IF 주파수를 700MHz로 모든 채널에 대해 같게 잡았으며, 국부발진기의 50가지 구동전류도 마찬가지로 PC를 이용하여 제어하였다. 이 시스템의 수신감도는 -57dBm 으로 약 10,000개의 회로에 200Mbps 신호를 PC 명령을 따라 채널을 바꿔가며 접속할 수 있다.

네델란드의 필립사에서는 두개의 multicontact DBR을 biphase 코딩으로 140Mbps FSK 변조하고, 같은 구조의 LD를 국부발진기로 사용하여 -56dBm 의 수신감도를 얻었는데, 이는 잠재적으로 수십가지의 비디오 채널을 10Km 거리의 8000 가입자에게 공급할

수 있는 수준이라고 발표하고 있다.^[7] 이때 IF 주파수는 400~2300MHz로서 고속의 HDTV 신호를 고려하였고, IF 포착(acquisition)시간은 50ms 이하이며, TV 화면을 선정하는 시간은 1초 미만이다.

일본의 NEC에서는 고속전송에 적합한 CPFSK 방식으로 4개의 DFB LD를 2.5Gbps 변조하여 (도합 10Gbps) 일반 광섬유로 150Km 전송하였다.^[8] 전송부의 LD는 두개씩 한 그룹을 이루어 전체 두 그룹을 형성하고 있는데 그룹내 LD의 주파수는 15GHz+/-70MHz 간격으로 Fabry-Perot을 이용하여 고정시키고, 그룹간의 주파수 차이는 525GHz로 sweep LD 두개와 Fabry-Perot을 이용하여 고정하였다. 이러한 방식을 확장하면 1THz 이상의 범위에 채널을 분포시킬 수 있다. Four-wave-mixing의 영향은 관측되지 않았으며 신호 앞에 채널 고유의 주파수를 실어서 0.8초 내에 채널 포착이 가능하도록 하였다. 송수신부에서의 MUX/DMUX 손실때문에 IM/DD에 비해 수신감도의 개선이 없으나 이러한 수준이면 160Gbps 이상의 전송도 가능하다고 발표되었다.

III. SCM(Sub-Carrier Multiplexing)방식

SCM 방식은 최근에 각광을 받는 다중화 광전송 방식인데 coherent 광전송 방식의 대체(alternative) 방식으로서 많은 관심을 끌고 있다. SCM 방식은 재래의 강도변조 방식과 RF대역에서의 전기적 헤테로다인을 결합한 일종의 절충방식으로서 coherent 방식에 비하여 잠재적인 용량은 훨씬 뒤지지만 기존의 전자회로를 그대로 사용하면서도 전송용량을 늘릴 수 있어서 이미 CATV등에 부분적으로 쓰이고 있다.

먼저 SCM의 원리는 그림 5에서 보는 바와 같다. 각 채널마다 입력 신호를 마이크로파 대역(수GHz)에서 동작하는 VCO(voltage-controlled oscillator)로 주파수 변조하고, 모든 VCO로부터의 전기적 출력을 합성하여 이를 다시 입력 신호로 삼아 고속 LD를 강도변조하여 광섬유를 통해 송신한다. 수신기에서는 고속 광 검출기로 광 신호를 전기적 출력으로 변환시킨 후 수신기내의 RF 국부 발진기의 신호와 mixing하여 heterodyne 검출하여 각 채널의 신호에 동조시킬 수 있다.

SCM과 coherent 방식과의 주된 차이점은 최대 수용 가능한 채널수가 무엇에 의해 제한되는 가에 있다. SCM은 많은 채널의 수용을 위해서는 LD의 변조 대역폭이 커야 하며 따라서 harmonic distortion이

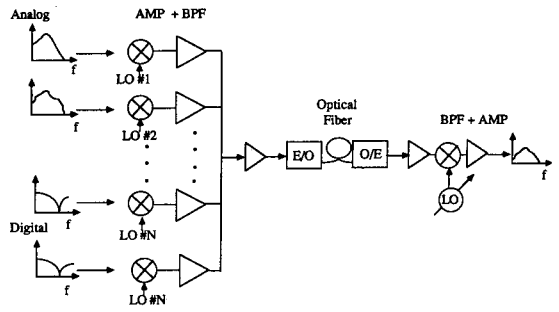


그림 5. SCM 방식의 개념도

나 intermodulation distortion을 피하기 위해 LD의 변조 특성이 sub-carrier 채널이 점하고 있는 주파수 대역 전체에 걸쳐서 균일하여야 한다. 즉 많은 채널을 다중화 전송하기 위해서는 relaxation oscillation frequency가 큰 LD를 사용하거나 외부변조기를 사용한다. 그러나 coherent 경우처럼 주파수 스펙트럼폭이 좁고 안정화되어야 할 필요는 없다. 또한 광검출기(PD)에 있어서도 coherent의 경우에 PD의 응답 대역폭이 한 채널에서 요구하는 정도의 대역폭으로서 충분하나 SCM 방식에서는 여러 채널이 다중화된 신호의 전체 대역폭을 모두 포함하여야 한다.

현재의 기술 수준에서는 SCM 방식에서 LD나 PD의 한정된 응답 대역폭 때문에 수십 채널 정도의 digital TV가 한계이다. LD의 변조 특성이나 PD의 응답 특성이 개선되는 속도가 그다지 빠르지 않기 때문에 당분간은 HDTV와 같이 빠른 전송속도를 요하는 경우에는 전체 채널수가 대폭 줄어들 수 밖에 없다. 반면에 coherent 방식에서의 전송 채널 수는 현재 수신기의 국부 발진 레이저의 주파수가 tuning 되는 범위에 의해 제한이 되고 있다. 한편 SCM은 여러 채널의 전송을 위해 단 하나의 광원을 사용하고, coherent 방식에서는 각 채널마다 별도의 광원을 사용할 수 있어서 SCM 방식의 수신감도는 코히런트 방식에 비해 매우 불리하다. 이러한 문제를 개선하기 위해 최근 코히런트 SCM 방식도 제시되고 있다. 이는 여전히 하나의 광 캐리어를 사용하되 수신감도를 높이기 위해 코히런트 변조방식을 따르며 수신부에서는 광 헤테로다인 검파를 추가한 것으로 수신감도(-25dBm)가 기존의 SCM 방식(-10dBm) 보다 높고 코히런트 FDM 방식(-50dBm)보다 낮으며 기존의 SCM 방식의 전자 장비들을 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다.^[9]

IV. FDM 직접검파 방식

기존의 광학 필터는 세밀한 간격으로 주파수 대역을 분할해야 하는 FDM에는 못미치는 성능을 가지고 있어서, 코히런트 방식으로 광 주파수를 IF 대역으로 낮추고 마이크로파용 필터를 이용하여 FDM을 구현하여 왔다. 최근 일본의 NTT에서는 SiO₂ 기판에 GeO₂를 첨가하여 만든 매우 날카로운 주파수 투과특성을 지닌 7단의 연속된 Mach Zehnder 광학 필터를 제작한 후, 국부 발진기용 광원이 필요없는(즉 직접검파 방식의) 100 채널 FDM 실험에 성공하였다.^[10] 그림 6에 실험 시스템의 개략도를 보였다. 이러한 채널수는 기록적인 것으로 100개의 DFB 광원이 60dB isolator와 함께 사용되었으며, 전체 파장의 범위는 1548에서 1556nm 사이이고, 채널간의 간격은 10GHz로 LD의 온도를 0.01도 이내로 안정하게 유지하였다. 필터의 투과 대역은 열을 가하여 변화시키며 필터의 온도도 0.01도 이내로 안정화 시켰다. 필터의 동조 속도는 20ms이며 투과 특성이 수신된 빛의 편광에 무관하도록 제작되었다. 각 채널의 변조속도는 622Mbps, FSK 변조이며, 광섬유로는 50Km의 일반 광섬유와 26Km의 dispersion-shifted 광섬유가 사용되었고, 광섬유 입력 전력은 채널당 -15dBm, 채널간 crosstalk는 -20dB 이하, 전체 crosstalk는 -13dB 이하이다. 수신감도는 -39.5dBm으로 20Km 거리의 1024 가입자에게 100 채널을 공급할 수 있다. 이러한 결과는 종래의 복잡한 코히런트 방식보다 간단한 직접검파 수신기를 가능케하며 동시에 코히런트 방식이 갖는 FDM의 장점을 살릴 수 있으므로 시사하는 바가 크다 하겠다.

V. 솔리톤 전송

일반적으로 광펄스는 광섬유를 전파하면서 분산 효과에 의해 그 폭이 넓어지고 모양도 일그러지지만, 높은 세기의 빛이 광섬유를 전파할 때 일어나는 자기위상 변조(self-phase modulation) 효과를 이용하면 분산에 의한 광펄스의 퍼짐을 막을 수 있으며, 광 손실만 없다면 펄스가 솔리톤이라 불리는 모양으로 안정하게 장거리를 전파할 수 있다. 이러한 솔리톤 펄스를 이용하여 광통신을 할 경우 펄스의 에너지가 크므로 고감도의 직접검파 방식이 가능하며, 광 손실을 주기적으로 보상해주면 매우 짧은 펄스(수 혹은 수십 ps)를 수십 Gbps의 속도로 초장거리(수천 Km) 전송할 수 있다. 이제까지의 주된 문제점은 광 손실

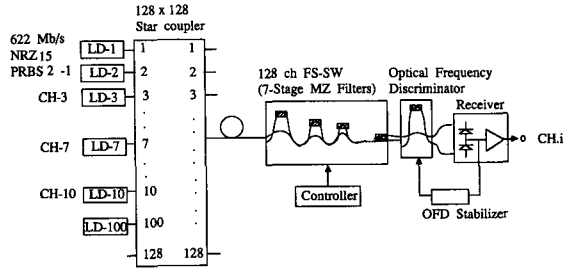


그림 6. 100 채널 광 FDM 실험

을 보상해주는 방법의 어려움이었으나 최근 Er 광섬유 증폭기의 개발로 이러한 문제점이 해결될 수 있게 되어서 최근 연구 결과가 다수 발표되고 있다. 이에 대한 자세한 이야기는 뒤의 광섬유 증폭기에 대한 설명에서 취급하겠으나, 이 방법의 근본적인 문제점은 광섬유의 비선형 현상에 의한 펄스의 상호작용 때문에 펄스와 펄스사이의 거리가 펄스폭의 10배 정도로 멀어야 하며 또한 FDM이 곤란하다는 점이다.

VI. Er 광섬유 증폭기

1. 광증폭의 장점

광섬유의 손실을 보상하는 방법으로 최근 Er 광섬유 증폭기가 개발되어 각광을 받고 있다. 그 구조를 그림 7에 도시하였는데 회도류 원소인 erbium이 도핑된 광섬유를 방향성 결합기를 통하여 결합된 펌핑 광으로 여기시키면 1540nm 부근의 광신호를 10dBm 이상 유도적으로 증폭이 가능하다.

이러한 광증폭 기술의 가장 큰 장점은 복잡한 광/전 및 전/광 변환을 거치지 않으므로 시스템을 단순화할 수 있다는 데 있다. 특히 미래의 광전송 시스템에서 전송용량의 증대를 위해 파장분할 다중화(WDM)나 광 주파수분할 다중화(광FDM) 방식의 도입이 예상되는데 광증폭 방식에서는 이러한 다중채

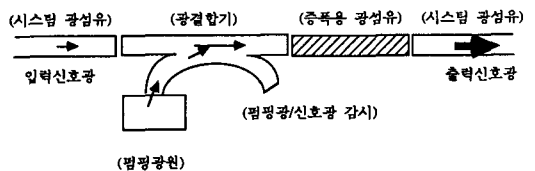


그림 7. Er 광섬유 증폭기

널을 한꺼번에 증폭해낼 수 있다. 이러한 시스템의 단순화는 궁극적으로 시스템의 신뢰도와 경제성을 높이게 된다. 또한 직접 광증폭 방식은 전송속도(bit-rate)나 광변조 방식(ASK, FSK, PSK 등)에 무관하게 광신호를 왜곡없이 증폭해내는 장점을 가진다. 특히 광섬유 증폭기는 최소한 수 Mbps 로 부터 수십 Gbps에 이르기까지 전송속도에 관계없이 균일한 증폭특성을 가진다. 이러한 특성은 시스템의 전송속도나 다중화 채널 수 등 수용 능력을 단계적으로 확장해 나가고자 할 때 절대적으로 유리하다. 기존의 중계방식을 생각해 보면 전송속도가 바뀌거나 채널을 증설하고자 할 때 중계 장치들을 완전히 대체하지 않고는 사실상 불가능하나, 광증폭 중계방식에서는 광증폭 중계기를 그대로 둔 채 단국만의 교체에 의해 시스템을 확장할 수 있다. 특히 차세대 광통신 기술로서 주목되고 있는 광 FDM과 코히런트 방식에 기존의 광/전 변환식 중계기를 사용함은 그 복잡성으로 보아 비현실적이며 광증폭 중계방식의 활용 없이는 사실상 실용화가 불가능하다.

2. 펌프파장

광섬유 증폭기의 펌프파장으로는 980nm와 1490nm의 두 파장대역이 유망하며 각기 장단점을 가지고 있다. 1490nm 대역은 효율이 $\sim 2\text{dB/mW}$ (1mW 펌프 광전력 증가시 2dB 이득 증가) 정도로 비교적 높고, 이미 알려진 기술로 제조된 InGaAsP/InP 계열의 LD를 사용할 수 있다는 점에서 편리하다. 또한 신호광 파장과 근접하여 신호광과 같은 기본모드로 중첩되어 함께 진행하므로 효율적인 증폭이 이루어질 수 있는 장점이 있는 반면에 펌프광과 신호광을 분리하기 어려운 단점도 있다. 펌프파장 980nm에서는 4dB/mW 이상의 높은 펌프 효율이 보고되고 있으며 최저 잡음지수(noise figure) 면에서도 3dB 정도로서 1490nm 대역의 5dB에 비하여 우수한 이상적인 펌프파장 대역이다. 그러나 아직 980nm 파장의 고풍출력 LD가 상용화되어 있지 않은데, 현재 일본 등지의 연구실에서 InGaAs/GaAs 계의 strained quantum well 구조를 이용하여 좋은 결과를 얻고 있으므로 조만간 상용이 가능할 것이다.^[11]

3. 통신 시스템 응용 방식

광섬유 증폭기를 여러가지의 형태로 사용할 수 있는데^[12] 광송신기에 바로 이어서 후치 증폭기(post amplifier)로 사용하면 광출력의 booster로 사용할 수

있다. 광송신부에서의 광출력을 광섬유 증폭기의 포화 광출력($\sim 10\text{dBm}$)에 가까운 정도까지 증폭하여 송신한다면 중계거리를 대폭 늘릴 수 있을 것이며, 가입자망이나 분배망에서 분기에 의한 광손실을 미리 보상해 줌으로써 개개 가입자 단말기에 충분한 광전력을 공급할 수 있다.

광섬유 증폭기를 중계기로서 사용하는 경우 광증폭 방식은 전송속도나 광변조 방식에 관계없이 적용 가능하므로 전송 시스템을 고급화하려면 중계기는 그대로 두고 단국장치만 교체하면 된다. 또한 광섬유 증폭기는 높은 증폭율과 매우 낮은 잡음지수 때문에 광수신부의 전치 증폭기(pre-amplifier)로도 매우 유망하다. 전치증폭기로서의 광섬유 증폭기와 PIN-PD의 조합에 의해 기존의 APD(avalanche photo-diode) 성능을 크게 능가하는 광수신기를 구성할 수 있는데, 실제로 광섬유 증폭기를 pre-amp로 사용했을 때의 수신감도가 코히런트/헤테로다인 방식으로 얻은 결과에 거의 접근하고 있다. 중계기로서나 optical pre-amp로서의 광섬유 증폭기는 전송속도가 높아질수록 그 장점이 돋보인다. 전기적 증폭시에는 전송속도가 증가하면 잡음 대역폭도 증가하여 SNR을 높이는 데 많은 노력이 필요하나 광증폭 방식에서 추가되는 잡음은 전송속도와 무관하기 때문이다.

4. 장거리 고속 전송-완전 광중계 시스템

이상적인 중계기를 3-R(reshaping, regeneration, retiming)의 기능이 모두 이루어지는 것이라 할 때 광섬유 증폭방식의 광중계기는 1-R(reshaping)만이 이루어지는 선형중계기(linear repeater)라 할 수 있다. 선형중계기에서는 광증폭에 의해 광손실은 보상되나 잡음과 지터(jitter)는 여러 증폭단을 거치면서 누적되어 시스템의 제한 요인이 된다. 1-R 방식의 선형 중계기를 무제한으로 연결할 수 없으며 적당한 간격마다 3-R 중계기에 의해 신호를 재생하고 리타이밍하여 누적된 잡음과 지터를 일소해 주어야 한다. 따라서 3-R 중계 구간의 거리가 시스템 설계시에 중요한 고려사항이 된다. 그림 8은 광섬유 증폭기를 1-R 중계기로 사용하는 경우에 3-R 중계기(기존 방식의 regenerative repeater)의 가능한 최대 간격을 이론적으로 예측한 것이다.^[13] 그림의 결과로부터, 예를 들면, 1Gbps 전송속도에 1-R 중계기(광섬유 증폭기) 간격을 50Km로 할 경우에 3-R 중계기 간격은 10,000 Km 이상이 된다. 이는 이상적인 경우를 가정한 것이기는 하지만 3-R 중계기 없이 광섬유 증폭기의 연

표 2. 광섬유 증폭 방식의 장거리 전송 시험

연구기관	KDD ^[10]	NTT ^[14]	NTT ^[15]	Bellcore ^[16]
전송속도	1.2Gb/s	5Gb/s	2.488Gb/s	11Gb/s
전송거리	904Km	201Km	2,223Km	260Km
광섬유증폭단수	12	post-amp와 pre-amp로 활용	25	2
신호광파장	1536nm	1535nm	1554nm	1536nm
펄스광파장	1.46~1.49μm	1.48μm	1.48μm	0.53μm
광학적총이득	203dB	34dB	44dB	40dB
광섬유 (전송용)	dispersion-shifted fiber	ordinary fiber	dispersion-shifted fiber	dispersion-shifted fiber
발표시기	ECOC '89	ECOC '89	OFC '90	ECOC '89
특기사항	광증폭 penalty 0.6dB	-옥의 급전 없는 무중계기 전송 -외부 변조	-코히런트 광전송 -CPFSK 변조	-Clock recovery -외부변조

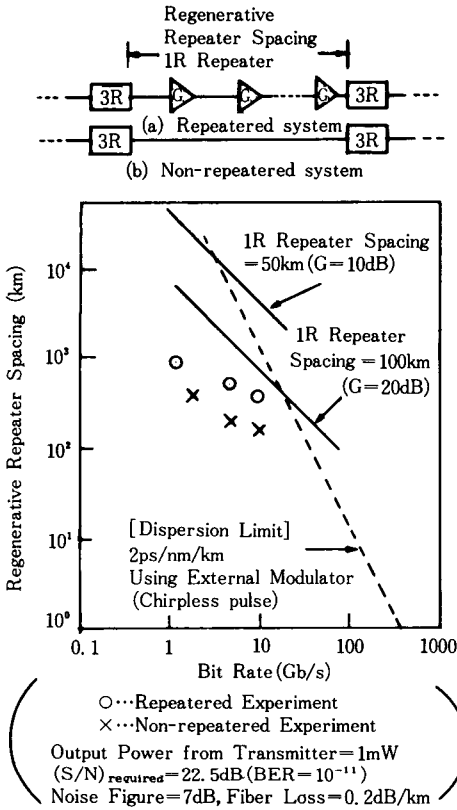
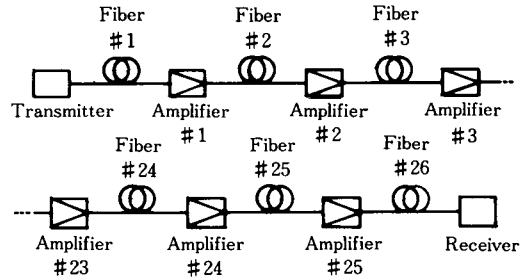


그림 8. 광섬유 증폭방식(1-R)을 사용하는 경우의 재생형(3-R) 증계기 간격

결만으로 태평양 횡단도 가능하다는 계산이다.

표 2는 일본, 미국등의 주요 연구기관에서 행한 광섬유 증폭방식의 장거리 전송 시험 내용중 몇가지를 정리한 것이다.^[13-16] 참고로 표 2에서 NTT의 2,200Km 전송실험 내용을 살펴보면 그림9와 같다. 파장 1.5542μm의 DFB-LD 광원을 2.488Gbps의 전송속도로 CPFSK 방식으로 코히런트 광변조하여 송신하였으며, 평균거리 약 80Km마다 총 2,223Km에 걸쳐 25개의 erbium 광섬유 증폭기를 사용하여 전송하였다. 그 결과로 44dB의 광학적 이득과 -42dBm의 수신감도를 얻었다. 이때 광섬유 증폭기에서는 잡음광의 역류, 증폭 및 누적을 막기 위하여 광 isolator와 광 필터가 사용되며 펄스 광원으로 1.48μm의 고출력 LD가 사용되었다.

최근 광섬유 증폭기를 이용한 코히런트 광통신의 현장시험이 최초로 NTT에 의해 성공되었다. 히로시마-마쓰야마-오오이타를 연결하는 기존의 광해저 케이블에 2채널 전송장치를 전장 약 450Km의 광케이



(광섬유 증폭단수=25, 총연장=2,223Km)

그림 9. 광섬유 증폭방식의 초장거리 고속전송 시험에 (NTT)

블에 연결하여 2.5Gbps의 초고속 광신호를 전송하는데 성공하였다. 아울러 영국의 BTRL에서도 에딘버러 (Edinburgh)와 뉴우캐슬 (Newcastle) 사이의 200Km 구간에 두개의 광섬유 증폭기를 써서, DPSK 및 FSK 방식으로 각 채널의 전송속도가 622Mbps인 2채널 전송장치의 현장시험에 성공하였다.

5. 광가입자 시스템

광섬유 증폭기기술은 가입자용 광통신 시스템에도 적용되고 있다. NTT에서 구상 중인 비디오 분배 시스템의 예를 그림10에 나타내었는데,^[17] 이 시스템에서는 성상 결합기를 통하여 여러 채널의 광신호를

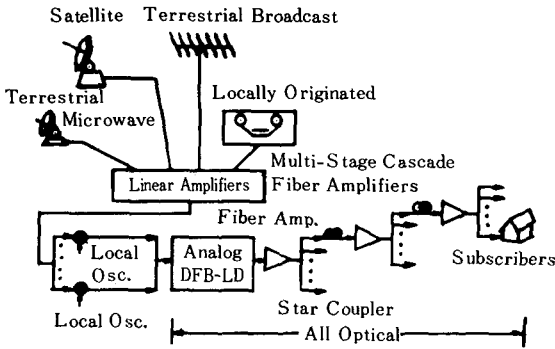


그림 10. 비디오 분배용 광가입자 시스템에서의 광섬유 증폭방식 활용 예 (NTT)

분배한 후, 약화된 광신호를 erbium 광섬유 증폭기로 광증폭하여 분배로 인한 광손실을 보상하고 다시 분배/증폭을 반복하는 방식으로 사실상 거의 무한에 가까운 수의 가입자에게 광신호를 분배 공급할 수 있다. NTT에서는 이미 6단의 광섬유 증폭기와 성상 결합기를 사용하여 에너로그 AM-및 FM-FDM 비디오 분배 시스템을 시범한 바 있다. Bellcore 에서도 최근 100 채널의 FM-TV 신호와 6채널의 622Mb/s 신호를 FDM으로 다중화하여 가입자에게 분배 전송하는 시스템 실험 결과를 보고한 바 있는데, 이 실험의 핵심 부분으로서 역시 광분해 손실 보상을 위한

광섬유 증폭기들이 사용되었다.^[16] 표 3에 최근 행하여진 광섬유 증폭기술을 이용한 광가입자 시스템 시험 예를 나타내었다.^[17-20]

6. 솔리톤 전송

솔리톤 전송에 필요한 광섬유의 비선형 효과는 광펄스의 강도가 충분히 클때 일어나는 것이므로 광섬유의 손실로 인해 광강도가 약화되면 효과를 얻을 수 없다. 따라서 전체 광섬유를 구간별로 나누어 주기적으로 손실을 보상하여 강도를 유지해 주어야 한다. 솔리톤 전송의 기본 아이디어는 과거에도 있어 왔지만 손실 보상을 해줄 수 있는 실용적인 방법이 빈곤하여 그다지 빛을 보지 못하였다. 부피가 큰 고출력 레이저를 펄핑용 광원으로 사용하는 Raman 증폭방식은 현실성이 없었던 것이다. LD로 펄핑이 가능한 간편한 광섬유 증폭기술의 발전은 이러한 문제점을 해결할 수 있어서 솔리톤 전송의 실현을 가능케하고 있다. Er 광섬유 증폭기를 이용한 솔리톤 전송 실험 몇가지를 표 4에 나타내었다.^[21-24]

최근 일본의 NTT에서는 CW 100mW의 고출력 LD를 Raman 증폭용 광원으로 사용하여 16ps 5Gbps 솔리톤 펄스를 23Km 전송한 실험 결과를 발표하고 있다.^[25] Raman 증폭방식은 대역폭이 넓고(수십 nm) 파장에 대해 균일한 증폭특성을 지니며 전송용 광섬유 자체에서 증폭이 이루어지는 장점이 있다. 또한 효율이 높아 증계기 간격을 Er 광증폭기에 비해 늘릴

표 3. 광섬유 증폭 방식을 이용한 광가입자 시스템 실험

연구기관	Bellcore ^[16]	NTT ^[17]	NTT ^[17]	GTE ^[18]	KDD ^[20]
채널 수	100 (FM-TV) 6 (622 Mbps)	19 (AM-FDM)	11 (FM-FDM)	30 (FM-SCM)	4 (WDMZ)
광섬유증폭단수	1	6 (50Km간격)	6 (80Km 간격)	1	6
신호광파장	1.527 - 1.561 μm	1.552 μm	1.552 μm	-	1.5488 - 1.5547 μm
전송 거리	9Km	254Km	480Km	-	459Km
펌프광파장	0.96 μm	1.48 μm	1.48 μm	0.528 μm	1.48 μm
펌프광원	Ti-Sapphire Laser	Laser Diode	Laser Diode	Ar Laser	Laser Diode
증계기 이득	17 - 24 dB	<11.4dB	17.2dB	20dB	26dB
최대 가능가입자수	4096	(20Km 전송시) 12,500	(20Km 전송시) 7,760,000,000	50	-
발표 시기	OFC '90	OFC '90	OFC '90	IEEE Photon Technol. Lett. '90	OFC '90
특기 사항	16개의 송신용 DFB LD 사용	97 - 217 MHz AM 신호	740 - 1130 MHz FM 신호	9dB 증가된 수신감도를 얻음	4개의 송신용 DFB LD 사용

표 4. 광섬유 증폭 방식을 이용한 솔리톤 전송 시험

연구기관 항목	NTT ⁽²¹⁾	BTRL ⁽²²⁾	AT&T ⁽²³⁾	NTT ⁽²⁴⁾
전송 속도	5 Gbps (구동전류변조)	20 Gbps (모드 록킹 펄스)	4 Gbps (모드 록킹 펄스)	20 Gbps 다단 3dB coupler 사용
전송 거리	250 Km	100 Km	106 Km	41 Km
광섬유 증폭단수	2(후치증폭) 9(중계)	1(후치증폭) 9(중계)	1(후치증폭) 9(중계)	1(중계)
중계기 간격	25 Km	50 Km	30-36 Km	27 Km
신호광파장	1.545 μm	1.561 μm	1.559 μm	1.552 μm (Color Center Laser)
중계기 이득	10 dB	9dB(후치증폭)	-	6.3dB
펌프광파장	1.48 μm	1.46 μm	1.47 μm	1.46-1.48 μm
펌프광원	Laser Diode	F-Center Laser	Laser Diode	Laser Diode
발표 시기	OFC '90	OFC '90	OFC '90	IOOC '90
특기사항	외부변조기로 펄스 스위칭, All-LD	Raman 증폭 효과도 이용됨	All-LD	

수 있으며 편광상태에 좌우되는 Raman 증폭특성의 문제점은 두개의 서로 편광축이 수직인 펌핑용 LD를 사용하여 해결할 수 있다.

Ⅶ. 요약 및 결론

빛의 높은 정보전송 능력에서 불구하고 광통신 기술은 아직까지 강도변조 직접 검파라는 극히 초보적인 수준의 기술만이 실용화 되고 있는 상태이다. 빛의 진폭 및 위상에 정보를 실어서 빛이 지닌 원래의 잠재성을 회복시켜 정보 전송 능력을 배가 시키고자 하는 것이 코히런트 광통신을 주축으로 하는 차세대 광통신 기술의 목표이다.

이러한 시도는 현재 부품기술에 의해 제한받고 있는 상태라 할 수 있다. 그러나 초기에 시스템 구성의 큰 제한 요인이었던 광원의 선평 문제나 편광 조절문제도 소자기술의 진보와 각종 다이버시티 수신 방식의 발전으로 인하여 점차 해결되어 가고 있다. 코히런트 광통신 기술의 실용화를 위해서는 광전 집적 회로기술이 필수적인 요소라 할 수 있는데 최근 이 분야에서 많은 진전이 이루어지고 있어서 송신부에서의 주파수 선평조절 안정화, 변조 특성 개선, 그리고 수신부에서의 각종 광학적 기능과 저잡음 증폭기의 집적화를 위한 노력이 진행되고 있다.

연구의 초기 단계에는 coherent 방식이 가지는 높은 수신감도의 장점이 강조되었으나 Er 광섬유 증폭

기가 좋은 결과를 보이자 이러한 장점이 무색하게 되었고 채널 선택도에서의 이점을 살린 가입자 시스템 분야의 응용에 최근 많은 관심이 기울고 있다. 일본, 미국, 영국등 선진국에서는 이미 코히런트 광통신의 현장시험까지 실시한 단계이다. 그러나 아직도 일반 가입자에게까지 보편화 되기는 기술적 가격적 측면에서 쉽지 않은 것도 사실이며 이 분야의 연구자들조차 코히런트 방식이 그 전통적인 형태 그대로 조기에 실용화 되리라고는 믿지 않는 것 같다. 코히런트 방식은 그 연구과정에서 많은 기술적 소득을 남겨 주겠지만 기존의 기술과 혼합 타협하여 진화해가리라 예상된다. 그러므로 가까운 장래에는 코히런트 방식과 기존의 직접검파 방식이 혼합된 형태가 실용화될 가능성이 높으며 이러한 방식의 실용화는 최근에 개발된 Er 광섬유 증폭기에 의해 보다 앞당겨질 전망이다. 이러한 FDM 기술은 광전송 뿐만 아니라 주파수분할(FD) 광교환에도 직접 활용 가능하므로 통신기술 전반에 걸친 파급효과가 매우 크다 하겠다.


參 考 文 獻

- [1] R.A. Linke, "Optical heterodyne communication systems move to the field," LF World, pp. 175-183, Apr. 1990.
- [2] L.F. Mollenauer, J.P. Gordon, and M.N. Islam, "Soliton propagation in long fibers with periodically compensated loss," IEEE

- Quantum Electron.*, vol. QE-22, pp. 157-173, 1986.
- [3] S. Shimada, "Impact of erbium-doped amplifiers on optical communication system," *Optics and Photonics News*, vol. 1, pp. 6-12, 1990.
- [4] K. Nosu and K. Iwashita, "A consideration of factors affecting future coherent light-wave communication systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-6, pp. 686-694, 1988.
- [5] M.C. Brain et al., "Progress towards the field deployment of coherent optical fiber systems," *J. Lightwave Technol.* vol. LT-8, pp. 423-437, 1990.
- [6] B. Glance and O. Scaramucci, "Dense FDM coherent optical network with random access provided by digitally tuned transmitters and receivers," Proc. of OFC '90, paper TUE1, 1990.
- [7] P.W. Hooijmans et al., "Coherent n multi-channel system for TV distribution with fast and direct channel selection," Proc. of OFC '90, paper THG5, 1990.
- [8] S. Yamazaki et al., "2.5 Gb/s CPFSK coherent multichannel transmission experiment toward over 100 Gb/s communication system," Proc. of OFC '90, paper PD12, 1990.
- [9] R. Gross and R. Olshansky, "Multichannel coherent FSK experiments using subcarrier multiplexing techniques," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-8, pp. 406-415, 1990.
- [10] H. Toba et al., "A 100-channel optical FDM transmission/distribution at 622 Mb/s over 50 Km," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-8, pp. 1396-1401, 1990.
- [11] M. Shinmizu, M. Horiguchi, M. Yamada, I. Nishi, S. Vehara, J. Noda, and E. Sugita, "Compact and highly efficient optical fiber amplifier module pumped by a 0.98 μ m laser diodes," Proc. of OFC'90, paper PD-14, 1990.
- [12] P. Urquhart, "Review of rare earth doped fiber laser and amplifiers," *IEE Proc.*, vol. 135, p. 385, 1988.
- [13] N. Edagawa, Y. Yoshida, H. Taga, S. Yamamoto, K. Mochizuki, and H. Wakabayashi, "904 Km 1.2Gb/s non-regenerative optical transmission experiment using 12 Er-doped fiber amplifiers," Proc. of ECOC '89, paper PAD-8, 1989.
- [14] K. Hagimoto, Y. Miyagawa, A. Takada, K. Kawano, and Y. Tohmori, "5Gb/s 201Km non-repeated transmission using LD pumped Er-doped fiber amplifiers," Proc. of OFC '90, paper PD2, 1990.
- [15] F. Saito, T. Imai, T. Sugie, N. Ohkawa, Y. Ichihashi, and T. Ito, "An over 2,200Km coherent transmission experiment at 2.5Gb/s using erbium-doped fiber amplifiers," Proc. of OFC '90, paper PD2, 1990.
- [16] A. Righetti, F. Fontana, G. Delrosso, and G. Grasso, "An 11Gb/s, 260km transmission experiment using a directly-modulated 1536nm DFB laser with two erbiumdoped fiber amplifiers and clock recovery," Proc. of ECOC '89, paper PDA-10, 1989.
- [17] K. Kikushima, E. Yoneda and K. Aoyama, "6-stage cascaded erbium fiber amplifiers for analog AM-and FM-FDM video distribution systems," Proc. of OFC '90, paper PD22, 1990.
- [18] W.I. Way et al., "Distribution of 100 FM-TV channels and six 622Mb/s channels to 4096 terminals using high-density WDM and a broadband in-line erbium-doped fiber amplifier," Proc. of OFC '90, paper PD21, 1990.
- [19] E. Eichen, J. McCabe, W.J. Miniscalco, R. Olshansky, and T. Wei, "FM microwave multiplexed broad-band distribution systems using Er³⁺ fiber amplifiers and preamplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, pp. 220-222, 1990.
- [20] H. Tague et al., "459 km, 2.4 Gbit/s 4 wavelength multiplexing optical fiber transmission experiment using 6 Er-doped fiber amplifiers," Proc. of OFC '90, paper PD9, 1990.
- [21] M. Nakazawa, K. Suzuki, E. Yamada, and Y. Kimura, "Distortion-free single-pass soliton communication over 250 km using multiple Er³⁺ -doped optical repeaters," Proc. OFC '90, paper PD5, 1990.
- [22] I.W. Marshall, D.M. Spirit, G.N. Brown, and L.C. Blank, "20Gbit/s 100km nonlinear transmission with semiconductro source," Proc. of OFC '90, paper PD6, 1990.
- [23] N.A. Olsson et al., "4 GBit/s soliton data

transmission experiment," Proc. of OFC '90, paper PD4, 1990.

[24] M. Nakazawa, K. Suzuki, and Y. Kimura, "20 Gb/s soliton amplification and transmission with Er³⁺-doped fiber," Proc. of IOOC '89, paper 20PDA-3, 1989.

[25] K. Iwatsuki, S. Nishi, M. Saruwatari, and K. Nakagawa, "5 Gb/s optical soliton transmission experiment using Raman amplification for fiber-loss compensation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, pp. 507-509, 1990. 

筆者紹介

李 在 升 1959年 12月 5日生
 1983年 서울대학교 전자공학과 (학사)
 1985年 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (석사)
 1989年 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사)
 1989年 10月~현재 한국전자통신연구소 광전자연구실 선임연구원

沈 昌 夔 1952年 5月 6日生
 1975年 서울대학교 응용물리학과 (학사)
 1987年 한남대학교 물리학과 (석사)
 1988年~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사과정)
 1975年~1982年 국방과학연구소 선임연구원
 1983年~현재 한국전자통신연구소 광통신 연구실장

朴 熙 甲 1955年 10月 13日生
 1978年 서울대학교 자연과학대학 물리학과 (학사)
 1980年 한국과학기술원 물리학과 (석사)
 1987年 한국과학기술원 물리학과 (박사)
 1987年~1988年 미국 Stanford University Visiting Scholar
 1980年~현재 한국전자통신연구소 광전자연구실 선임연구원