

초고속 광전송 기술

김 훈

National University of Singapore

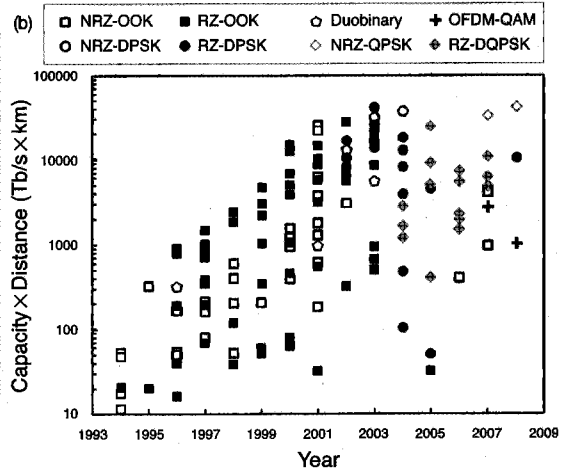
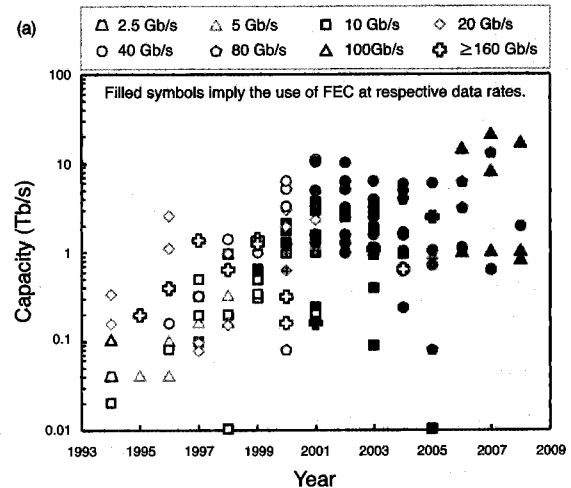
요약

본고에서 최근 초고속 광전송 시스템의 연구/개발 동향을 소개한다. 폭발적으로 증가하고 있는 통신 트래픽을 경제적으로 수용하기 위하여 초고속 광전송 시스템은 오류 정정 코드, 라만 광증폭기, 새로운 변조 방식, 전송 링크 분산 제어, 등화기, 편광 다중화 방식등의 새로운 기술들을 도입하여 용량 및 전송 거리를 증가시키고 있다.

1. 서론

이메일과 웹의 출현으로 인하여 1990년대 중반 폭발적으로 증가하였던 [1] 인터넷 트래픽은 2000년대 중반 그 증가세가 다소 감소하였으나, 여전히 매년 50~60%의 지수적인 증가세를 멈추고 있지 않다 [2]. 이와 같은 인터넷 트래픽의 증가세는 적어도 2015년까지 지속될 것으로 예측된다 [3], [4]. 광전송 시스템은 파장 분할 다중화 방식 (wavelength division multiplexing: WDM), 오류 정정 코드 (특히 Forward Error Correction: FEC), 잡음 지수가 적은 광 증폭기 등의 새로운 기술들을 채용함으로써 이러한 증가세에 발맞춰 용량을 증대시켜 왔다 [5]. 최근에는 차등 위상 변조 (differential phase shift keying: DPSK)를 위시한 새로운 변조 방식을 광전송 시스템에 도입함으로써 보다 경제적이면서 용량이 향상된 시스템이 가능해졌다 [6].

(그림 1)은 광통신 분야 최대 학회인 Optical Fiber



(그림 1) OFC 와 ECOC 학회 post deadline 세션에 발표된 논문에서 발췌한 최근 전송 실험 결과
 (a) 채널당 전송 속도 별로 전송 용량을 도시하였음.
 (b) 변조 방식에 따라 전송 용량 x 전송 거리를 도시하였음.

Communication Conference (OFC) 와 European Conference on Optical Communication (ECOC)의 post-deadline 세션에 발표된 논문을 중심으로 광전송 시스템의 용량 또는 용량 \times 전송 거리를 (a) 채널당 데이터 속도와 (b) 변조 방식별로 정리한 것이다. 1990년대 부터 2000년 까지 전송 용량의 증대를 이끈 주요 기술은 파장 분할 다중화 방식과 전기 소자 및 전기/광학적 소자의 발전이다. 특히, 광원의 파장 안정화 기술 및 광학 필터링 기술이 크게 발전하여 1990년대 중반에는 100 채널 전송 실험 및 1 Tb/s 전송을 시연하는 등 WDM 기술이 성숙되었다 [7], [8]. 소자의 발전도 지속되어 1996년에 전기적 시분할 다중화 방식 (electrical time division multiplexing: ETDM)을 이용하여 40-Gb/s 급 초고속 신호의 발생 및 수신이 가능해졌으며 [9], 2005년에는 ETDM 기반 100-Gb/s 급 시스템이 처음 보고 되었다 [10]. 2000년 이후에는 라만 증폭기와 FEC 기술이 광전송 시스템에 도입되어 신호의 재생 (regeneration) 없이 보낼 수 있는 전송 거리를 크게 향상 시켰다. 이 두 기술은 전송 링크에서 발생하는 잡음을 감소 시키고, 전송 열화 요인에 의한 비트 오류율(Bit Error Ratio: BER)을 대폭 감소 시켜 경제적인 장거리 광전송 시스템의 구현을 가능케 한다. 기존의 on-off keying (OOK) 변조 방식을 탈피한 새로운 변조 방식 역시 2000년 이후 광전송 시스템의 용량 증대 및 전송 거리 증가에 큰 기여를 했다. Quadrature amplitude modulation (QAM)과 같이 주파수 효율성이 높은 변조 방식을 사용할 경우 추가적인 광증폭기 대역폭 확장 없이 광전송 시스템의 용량을 증대시킬 수 있으며, 위상 변조 방식(Phase Shift Keying: PSK)와 같이 잡음에 강인한 성질을 가진 변조 방식을 사용하여 전송 거리의 증가를 도모할 수 있다. 극히 최근에는 고속 digital-to-analog converter (DAC) 와 analog-to-digital converter (ADC)를 이용하여 off-line으로 신호를 처리하는 방법이 각광을 받게 됨에 따라 orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) 과 같이 무선 통신 시스템에 사용되는 복잡한 기술들이 광전송 시스템에도 시도되고 있다 [11].

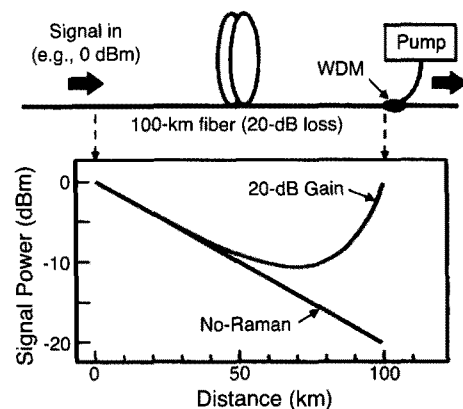
본고에서는 2000년 이후 광전송 시스템에 도입되어 용량 증대 및 전송 거리 증가를 이끈 주요한 기술들을 소개한다. 대표적인 6개의 기술로는 FEC, 라만 광증폭기, 새로운 변조 방식, 전송 링크 분산 제어 (dispersion management), 등화기 (equalizer), 그리고 편광 다중화 방식 (polarization

division multiplexing: PDM)을 꼽을 수 있다.

II. 초고속 대용량 전송 시스템을 이끈 광전송 기술

1. 오류 정정 코드 (FEC)

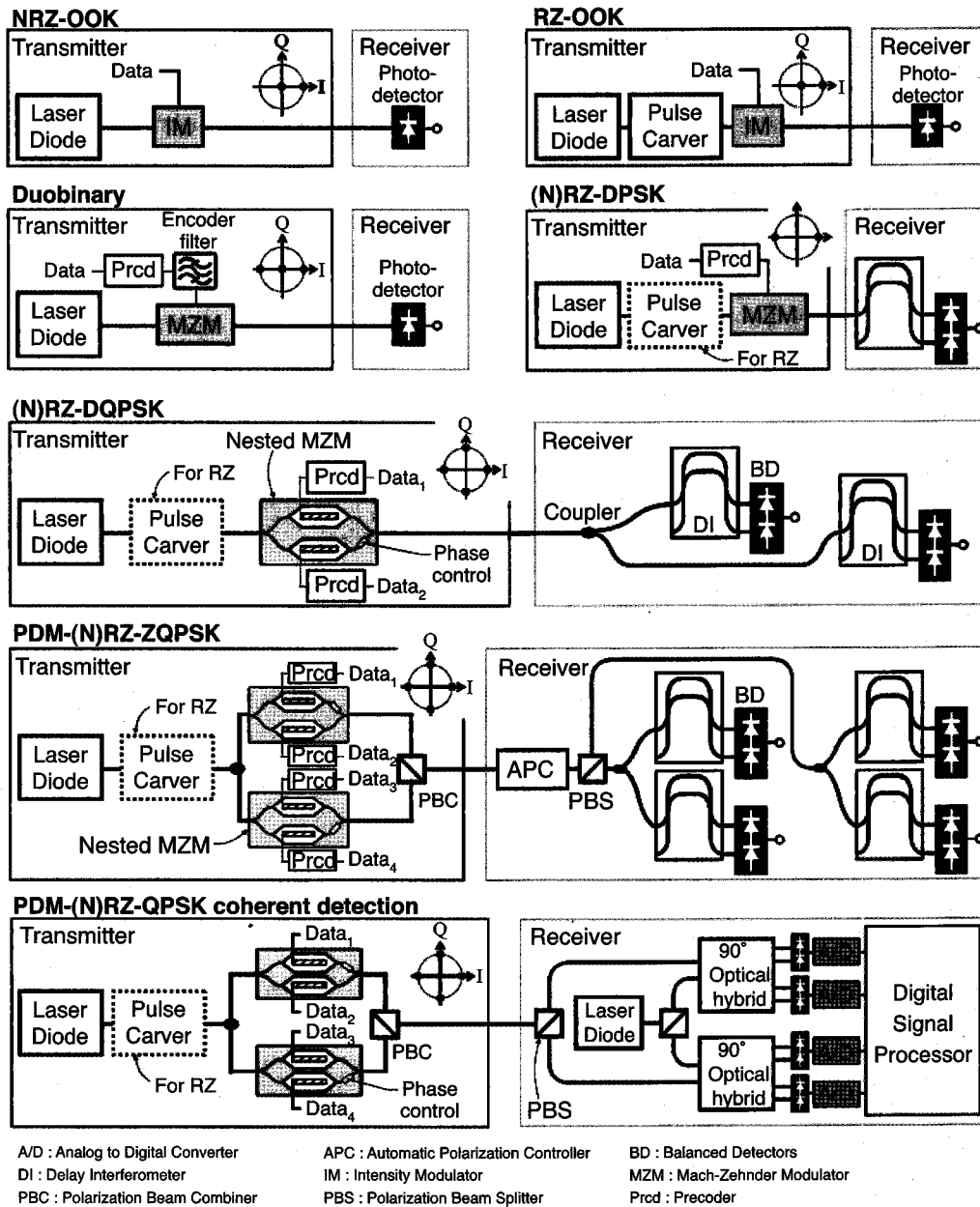
2000년 이후 많은 기술들이 복합적으로 광전송 시스템의 성능을 향상시켰지만, 그 중 가장 큰 공헌을 한 단일 기술은 FEC라 할 수 있다. FEC는 송신단에서 특정한 부가 데이터 (redundant data)를 송신할 데이터에 삽입하고, 수신단에서 이를 이용하여 전송 도중 발생하는 오류를 검출하고 정정하는 기술이다 [12]. 통상 10% 내외의 부가 데이터 삽입으로 인하여 전송 속도가 그만큼 증가하지만 FEC 사용으로 대략 시스템 마진을 8 dB 가량 증가시킬 수 있다 [5]. 이는 장거리 광전송 시스템에서 신호의 재생 없이 보낼 수 있는 최대 전송 거리를 6배 가량 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 장점으로 인하여 현재 거의 모든 상용 장거리 광전송 시스템은 [255, 239] Reed-Solomon Code와 같은 FEC 를 채용하고 있다 [1].



(그림 2) 라만 광증폭기와 100-km 광섬유 내의 광신호 전력 분포

2. 라만 증폭기

라만 증폭기 또한 시스템의 성능을 크게 개선시킨 일등 공신이다. 라만 증폭기는 높은 주파수의 펌프 광이 광섬유에 인가되면 광섬유 분자에 의하여 펌프 광이 비탄성 산란



(그림 3) 변조 방식별 송수신단 구조

(inelastic scattering) 을 일으켜 낮은 주파수의 빛으로 변환되는 라만 산란을 이용한다 [13]. 기존의 회도류 첨가 광섬유 증폭기 (예, Erbium-doped fiber amplifier: EDFA) 와 비교하여 라만 증폭기의 가장 큰 장점은 어느 파장 대역에서나 이득 (gain)을 얻을 수 있다는 점이다. 실리카 (silica) 광섬유의

경우 라만 증폭 이득 대역이 >120 nm 에 달하며, 이득 대역의 위치도 펌프 광의 파장을 선정하여 임의대로 조정 가능하다. 라만 증폭기의 또 다른 중요한 장점은 분산 증폭 (distributed amplification) 특성이다. 수십 미터 이내에 모든 증폭이 이루어지는 회도류 첨가 광섬유 증폭기와 달리 라만

광증폭 기작 (mechanism)은 전송 광섬유의 경우 20 km 길이에 걸쳐 증폭이 일어나므로 (그림 2)에 도시한 바와 같이 광신호가 광섬유의 손실에 의하여 크게 감소하기 전에 신호를 증폭할 수 있기 때문에 증폭기의 잡음 지수를 크게 개선할 수 있다. 일반적으로 라만 광증폭기는 EDFA에 비하여 증폭기의 잡음 지수를 약 7 dB 이상 개선할 수 있다. 잡음 지수가 NF 인 광증폭기로 구성된 N 개의 구간 (span) 광전송 시스템의 신호대 잡음비 (Signal-to-Noise Ratio: SNR)는 다음과 같이 주어진다 [14].

$$SNR[dB] \oplus 58 + P_{out} - L - NF - 10 \cdot \log N \quad (1)$$

여기에서 P_{out} 은 채널당 송신기 출력 광전력이고, L 은 구간 손실이며, 모든 단위는 decibel이다. 따라서, 라만 증폭기의 사용은 광전송 시스템의 SNR을 약 7 dB 이상 개선시키며, 이는 약 5배의 전송 거리 증가를 의미한다. 이러한 장점에도 불구하고 고출력 펄스 레이저 다이오드의 높은 가격과 시스템 설치 및 유지/보수를 위한 숙련공이 요구되는 현실적 어려움으로 인하여 라만 광증폭기는 FEC만큼 상용 시스템에 널리 사용되고 있진 않다 [5].

3. 새로운 변조 방식

최근 초고속 광전송 시스템에서는 새로운 변조 방식에 대한 시도가 두드러진다. 특히 장거리 광전송 시스템에서 위상 변조 방식의 사용이 뚜렷하다. 2002년 DPSK 변조 방식을 사용하여 40 Gb/s 신호 64채널을 4000 km 전송한 결과를 필두로 [15] 매년 OFC와 ECOC에서 보고되는 최대 용량/성능의 광전송 실험은 위상 변조 방식을 사용하고 있다 (그림 1(b) 참고). 대용량 장거리 광전송 시스템의 경우 통상 시스템의 성능이 광증폭기의 잡음 및 광섬유의 비선형 효과에 의하여 제한되므로 이들에 강인한 변조 방식(예, DPSK)이 많이 선호된다. 그러나, 모든 전송 환경에 최적인 하나의 만능 변조 방식은 존재하지 않는다. 따라서, 전송 시스템의 특성에 맞는 변조 방식의 선택이 중요하다. (그림 3)은 변조 방식별 송신단의 구조를 보여준다. 그림에서 전송 방식마다 광신호의 전기장을 성상도 (constellation diagram)의 형태로 송신단 출력이 표시하였다. 광전송 시스템의 요구 조건

및 환경에 따라 차이가 있겠지만, 대체적으로 전송 거리가 짧은 가입자 망에서는 송수신단의 가격이 전체 시스템 가격에 큰 영향을 미치므로 구조가 간단한 non-return-to-zero (NRZ) OOK 변조 방식이 가장 많이 사용된다. 듀오바이너리 변조 방식은 NRZ 변조 방식에 비하여 광섬유 색분산 및 광학 필터링 (optical filtering)에 강인하므로 10-Gb/s 급 메트로 (metro) 광전송 시스템이나 50 GHz 채널 간격을 지닌 기존 10-Gb/s 망에 40-Gb/s 급 신호를 전송하는 시스템에 응용되고 있다.

극히 최근에는 고용량 장거리 광전송 시스템에서 quadrature phase shift keying (QPSK) 변조 방식의 사용이 눈에 띈다 (그림 1(b) 참고). QPSK 변조 방식은 이진 (binary) 변조 방식과 비교하여 심볼 속도를 비트 속도의 반으로 감소시켜 전기 소자 및 전기/광학적 소자의 대역폭 요구 조건을 크게 완화시킬 수 있을 뿐만 아니라 위상 변조 방식 계열로서 우수한 잡음 내성을 지니고 있어 장거리 전송 시스템에 매우 유리한 변조 방식이다. 또한, 변조 데이터 신호에 관계없이 일정한 세기의 광신호를 송신단에서 출력하므로 광섬유 Kerr 비선형 효과에 비교적 강하다. 그러나, DQPSK 송신단과 수신단은 그림 3에 도시한 바와 같이 하나의 nested Mach-Zehnder 변조기를 요구하며, 수신단에는 두 쌍의 delay interferometer (DI)와 balanced receiver를 요구한다. 이러한 요소들로 인하여 NRZ 송신기의 가격을 1로 보았을 때, DPSK 송신기의 가격은 1.1인 반면, DQPSK의 송신기 가격은 1.6으로 예상한다는 조사 결과가 보고된 바 있다 [16]. DQPSK 수신단의 경제성에 대해서는 아직 발표된 내용이 별로 없지만 기존의 NRZ 변조 방식에 비하여 복잡도나 가격이 크게 증가할 것은 분명하다. 이와 같이 DQPSK 변조 방식의 우수성에도 불구하고 시스템의 신뢰성과 경제성이 걸림돌이 되자, DQPSK 변조기 및 수신기 구조를 간략화하고 경제적으로 구현하고자 하는 노력도 한창이다. DQPSK 송신기로 InP 기반 소형 nested Mach-Zehnder 변조기와 레이저 광원을 집적하여 송신기의 신뢰성 및 가격 경쟁력을 제고하는 방안과 전계 흡수 변조기 (electro-absorption modulator: EAM)와 광학 커플러를 집적시켜 DQPSK 변조기를 구현하는 방안도 제안/시연되었다 [17]. 수신단에서는 하나의 DI를 사용하여 DQPSK 수신단을 구현하는 방안이 제시되었다 [18], [19]. 이 방법은 DQPSK 수신단을 복잡성을

줄이고 수신단 제작 비용을 절감하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

1980년대 수신 감도 개선을 목적으로 연구가 활발했던 코히어런트(coherent) 수신 방식이 최근 다시 각광을 받고 있다. 광증폭기가 없었던 그 당시에는 수신 감도를 개선하여 신호의 재생성이 보낼 수 있는 최대 전송 거리를 증가시키는 것이 주된 목적이었으나, 최근 코히어런트 수신 방식의 재조명은 광학 계층에서 발생하는 전송 열화 요인을 전기 계층에서 보상하고자 하는 노력에서 비롯된다. 광신호의 세기만을 수신하는 direct detection 수신기는 광신호의 위상 정보를 잃어버리기 때문에 광신호의 위상을 이용하여 구현할 수 있는 다양한 보상 회로를 무용지물로 만든다. 이에 반하여 코히어런트 수신기는 광신호의 세기 정보와 위상 정보를 고스란히 전기 신호로 변환하므로 전기 계층에서 디지털 신호 처리(Digital Signal Processing: DSP) 기법을 이용하여 신호 왜곡 보상 및 검출, 성능 감시, 그리고 파라미터(parameter) 추출 등을 가능케 한다. 또한, DSP 기술을 사용하여 광학 계층에서 구현하기 까다로운 자동 편광 제어기(automatic polarization controller)와 광학 위상 추적 회로(optical phase-locked loop)가 없는 코히어런트 수신기의 구현이 가능하다는 장점도 있다. 기존의 direct detection 방식에 비하여 수신감도를 ~2 dB 가량(예, QPSK 변조 방식) 향상시킬 수 있다는 사실도 코히어런트 수신방식을 매력적으로 보이게 하는 요소이다 [20]. 그러나, 코히어런트 수신 방식은 local oscillator 용 레이저 광원과 90° optical hybrid 소자가 요구되며, 수신후 신호 처리 기능이 DSP 회로에서 모두 이루어져야 하는 만큼 코히어런트 수신 방식의 향후 전

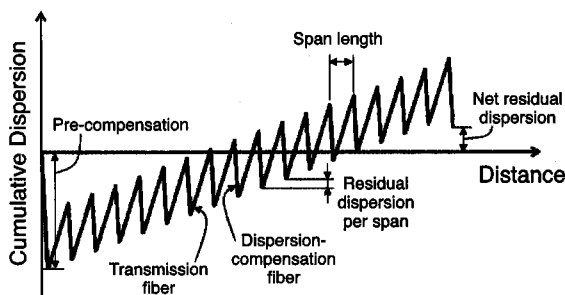
망은 디지털 전기 소자의 속도(특히 analog-to-digital converter) 및 경제성에 달렸다고 할 수 있다.

4. 전송 링크 분산 제어

선형 영역에서 동작하는 광전송 시스템의 경우 최종 잔여 분산(net residual dispersion, (그림 4) 참고)의 양이 동일하면 광전송 링크의 분산 분포에 관계없이 동일한 성능을 보인다. 그러나, 최적의 시스템 성능은 시스템이 비선형 영역에서 동작할 때 얻어진다. 식(1)에 표시된 바와 같이 높은 광전력이 SNR 측면에서 유리하지만 광섬유에 인가되는 광전력이 증가하여 어느 한계점을 초과하게 되면 광섬유 비선형 효과가 증가하여 시스템 성능이 크게 저하된다. 따라서, 광전송 시스템 성능을 극대화 하기 위해서는 광섬유의 비선형 효과를 제어하거나 등화기등을 이용하여 이를 상쇄시켜야 한다. 전송 링크 분산 제어 방법은 광섬유의 분산 분포를 조절하여 광섬유의 비선형 효과를 제어하는 방법이다. 초고속 광전송 링크의 성능을 좌우하는 주된 광섬유 비선형 효과는 광섬유의 굴절률이 광신호의 세기에 따라 증가하는 optical Kerr 효과이다. 초고속 광신호의 경우 광링크의 분산 분포에 따라 펄스 신호간의 중첩되는 모습이 바뀌므로 광전송 시스템에서 optical Kerr 효과가 시스템에 미치는 영향은 광섬유 분산 분포의 함수가 된다. 전송 링크 분산 제어는 전송 시스템 전체에 걸쳐(그림 4)와 같이 분산 분포를 설계함으로써 광섬유에 최대의 광전력을 인가하게 하는 기술이다. 분산 지도(dispersion map) 설계에 따라 다양한 형태의 분산 분포가 가능하지만 [5] 전송 링크 분산 제어 기술의 핵심은 전치 분산 보상(pre-compensation)과 구간별 잔여 분산(residual dispersion per span)에 있다 [1]. 전치 분산 보상은 송신단에서 어느 정도 광섬유 분산을 미리 보상해줌으로써 광전송 시스템 전반부에서 발생하는 광섬유 비선형 효과와 후반부에서 발생하는 효과를 상쇄시키는 역할을 한다. 또한, 구간별 잔여 분산은 매 구간에서 발생하는 광섬유 비선형 효과가 누적되는 것을 줄여준다. 현재 최첨단 상용 장거리 광전송 시스템은 대부분 이 기술을 채용하고 있다.

5. 등화기

광섬유의 비선형 효과는 등화기를 이용하여서도 상쇄가 가능하다. 통상 등화기는 광학적 등화기의 경우 전송 선로



(그림 4) 광전송 시스템에서 광섬유의 누적 분산 분포를 보여주는 분산 지도(dispersion map)의 일례

에서 증폭기가 위치한 곳에, 전기적 등화기의 경우 수신단에 위치하므로 전송 링크 분산 제어 방식과 함께 병행할 수 있다. 아직까지 많은 결과가 보고된 것은 아니지만 광학적 등화기 또는 전기적 등화기를 사용하여 광섬유 비선형 효과에 의한 시스템 열화를 완화시킨 결과가 일부 보고되었다 [21], [22]. 그러나, 등화기의 기본 개념은 선형 시스템을 가정하는 것이므로 등화기는 선형 효과에 의한 시스템 성능 열화를 상쇄하는데 보다 효과적이다 [22]. 간단한 구조의 아날로그 전기적 등화기 (예, feed-forward equalizer, decision feedback equalizer) 만으로도 광섬유 색분산에 의한 열화를 크게 감소시킬 수 있으며, maximum likelihood sequence estimation (MLSE) 과 같이 복잡한 전기적 등화기를 사용할 경우 상기 열화에 의한 전송 제한 거리를 10배 이상 향상시킬 수 있다. 또한, 편광 모드 분산에도 20~40% 성능 향상을 꾀할 수 있다 [22]. 전기적 등화기는 코히어런트 수신기의 제조명과 함께 향후 보다 널리 사용될 것으로 전망되며, DSP 기술을 활용하여 구현될 것으로 예측된다.

6. 편광 다중화 방식

편광 다중화 방식은 채널당 심볼 속도를 반으로 감소시켜 전기 및 광학 소자의 속도 증가없이 채널당 전송 속도를 배가시킬 수 있는 방법으로 최근 고용량 초고속 광전송 시스템 실험에서 많이 사용되는 방법이다. 광섬유의 두 직교 편광 성분에 각각 신호를 실어 심볼 속도를 절반으로 감소시켜 다중화하는 이 방법의 중요한 장점 중 하나는 타 방법들과 병행이 가능하다는 점이다. 예를 들면, 100 Gb/s 광신호를 PDM-QPSK 변조 방식을 사용하여 전송할 경우 심볼 속도는 25 GSymbol/s 가 되어 40 Gb/s 용 소자를 이용하여 충분히 구현 가능하다. 또한, 심볼 속도가 감소함에 따라 광신호의 대역폭이 반감되어 주파수 효율성이 배가되며, 광섬유 색분산 및 필터링 등에 강인해진다. 그러나, 편광 다중화 방식은 편광 모드 분산 [22] 및 상호 위상 변조(cross-phase modulation)에 취약하며 [23], [24], 송수신단의 복잡성을 2배 이상 증가시킨다는 단점이 있다. 특히, 수신단은 전송중 시변하는 편광 상태에 맞춰 신호를 역다중화하여야 하므로 편광 추적 모듈 (polarization tracking module) 등의 고가이면서 구현이 까다로운 장치를 설치하여야 한다. 다행히 코히어런트 수신 방식에서는 DSP 기술을 이용하여 입력 신호의

편광 추적이 가능하므로 그림3에 도시한 바와 같이 편광 추적 모듈 없이도 구현이 가능하다.

III. 결 론

본고에서는 2000년 이후 초고속 광전송 시스템을 이끈 주요한 기술들을 알아보았다. FEC, 라만 광증폭기, 새로운 변조 방식, 전송 링크 분산 제어, 등화기, 그리고 편광 다중화 방식등의 새로운 기술에 힘입어 초고속 광전송 시스템은 현재 10 Tb/s 이상의 초대용량 정보를 신호의 재생없이 2,000 km 이상 전송할 수 있다.

최근 초고속 광전송 시스템의 분명한 추세는 채널당 100 Gb/s 전송과 DSP 를 이용한 신호 처리 기법을 사용한 코히어런트 수신기의 사용이다. 채널당 100 Gb/s 전송은 100 G 이더넷 신호를 별도의 속도 변환 없이 전달망에서 수용하기 위한 노력의 일환이다. 전기 소자 및 전기/광학적 소자의 발전으로 가장 경제적인 광전송 시스템 구현에 필요한 채널당 전송 속도가 꾸준히 증가하고 있는 만큼 채널당 100 Gb/s 전송이 가장 효과적이며 저렴한 전송 방식이 될 날이 머지않아 도래할 것으로 예상된다. 코히어런트 수신 방식은 현재 대부분의 무선 통신 시스템이 사용하고 있는 방식으로써 광전송 시스템이 많은 부분 무선 통신 시스템이 걸어온 길을 따라가고 있다는 사실로 유추해 볼 때 언젠가는 추구할 방법이라고 여겨진다. 그러나, 코히어런트 수신기는 기존의 direct detection 수신방식과 비교하여 고가의 광소자 및 복잡한 고속 전기 소자를 요구하므로 초고속 광전송 시스템에서 코히어런트 수신기의 사용은 코히어런트 수신기의 장점이 추가적인 가격 상승분을 얼마나 상쇄할 수 있는냐에 달려 있다고 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] I. Kaminow and T. Li, *Optical Fiber Telecommunications IVB*, Academic Press, 2002.

- [2] Cisco white paper, "Global IP traffic forecast and methodology," 2008.
- [3] B. Swanson and G. Gilder, "Estimating the Exaflood," Discovery Institute, 2008.
- [4] A. Odlyzko "Threats to the Internet: too much or too little growth?" *Internet Evolution*, 2008.
- [5] A. H. Gnauck, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, and T. Li, "High-capacity optical transmission systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 26, no. 9, pp. 1032-1045, May 2008.
- [6] P. Winzer and R. Essiambre, "Advanced optical modulation formats," *Proc. IEEE*, vol. 94, no. 5, pp. 952-985, May 2006.
- [7] Y. Yano, T. Ono, T. Ito, H. Yamazaki, M. Yamaguchi, and K. Emura, "2.6 Terabit/s WDM transmission experiment using optical duobinary," Eur. Conf. Optical Comm., Oslo, Norway, 1996, paper ThB.3.1.
- [8] A. H. Gnauck, A. R. Chraplyvy, R. W. Tkach, J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff, A. J. Lucero, Y. Sun, R. M. Jopson, F. Forghieri, R. M. Derosier, C. Wolf, and A. R. McCormick, "One terabit/s transmission experiment," Optical Fiber Conf., San Jose, CA, 1996, paper PD20.
- [9] S. Kuwano, N. Takachio, K. Iwashita, T. Otsuji, Y. Imai, T. Enoki, K. Yoshino, and K. Wakita, "160-Gbit/s (4-ch \times 40-Gbit/s electrically multiplexed data) WDM transmission over 320-km dispersion-shifted fiber," Optical Fiber Conf., 1996, San Jose, CA, paper PD25.
- [10] P. Winzer, G. Raybon, and M. Duelk, "107-Gb/s optical ETDM transmitter for 100G Ethernet transport," Eur. Conf. Optical Comm., Glasgow, Scotland, 2005, paper Th4.1.1.
- [11] S. Jansen, I. Morita, and H. Tanaka, "10 \times 121.9-Gb/s PDM-OFDM transmission with 2-b/s/Hz spectral efficiency over 1,000 km of SSMF," Optical Fiber Conf., San Diego, CA, 2008, paper PDP2.
- [12] B. Sklar, *Digital Communications*, 2nd Ed., Prentice-Hall, 2001.
- [13] J. Bromage, "Raman amplification for fiber communication systems," Optical Fiber Conf., Atlanta, GA, 2003, paper TuC1.
- [14] I. Kaminow and T. Koch, *Optical Fiber Telecommunications IIIB*, Academic Press, 1997.
- [15] A. Gnauck, G. Raybon, S. Chandrasekhar, J. Leuthold, C. Doerr, L. Stulz, A. Agarwal, S. Banerjee, D. Grosz, S. Hunsche, A. Kung, A. Marhelyuk, D. Maywar, M. Movassaghi, X. Liu, C. Xu, X. Wei, and D. Gill, "2.5 Tb/s (64 \times 42.7 Gb/s) transmission over 40 \times 100 km NZDSF using RZ-DPSK format and all-Raman-amplified spans," Optical Fiber Conf., Anaheim, CA, 2002, paper FC2.
- [16] S. Hardy, "Vendors align technologies to 40G strategies," *Lightwave Magazine*, June 2008.
- [17] M. Duelk, C. Doerr, P. J. Winzer, C. Clarke, M. Wale, and R. Griffin, "Technical and economic feasibility of DQPSK serial PMDs," IEEE MSSG Meeting, Monterey, CA, Jan. 17-19, 2007.
- [18] M. Oguma, Y. Nasu, H. Takahashi, H. Kawakami, and E. Yoshida, "Single MZI-based 1 \times 4 DQPSK demodulator," Eur. Conf. Optical Comm., Berlin, Germany, 2007, paper 10.3.3.
- [19] Y. Takushima, H. Y. Choi, and Y. C. Chung, "Plug-and-play phase monitor for DxPSK signals based on single delay interferometer using a 3 \times 3 optical coupler," Optical Fiber Conf., San Diego, CA, 2008, paper OThW4.
- [20] D.-S. Ly-Gagnon, S. Tsukamoto, K. Katoh, and K. Kikuchi, "Coherent detection of optical quadrature phase-shift keying signals with carrier phase estimation," *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 12-21, Jan. 2006.
- [21] V. Mikhailov, C. Doerr, S. Appathurai, R. Kelly and P. Bayvel, "Fiber nonlinearity and dispersion mitigation in 40-Gb/s NRZ WDM transmission using a multichannel optical equalizer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, no. 2, pp. 376-378, Jan. 2006.
- [22] H. Bulow, F. Buchali, and A. Klekamp, "Electronic

dispersion compensation," *J. Lightwave Technol.*, vol. 26, no. 1, pp. 158-167, Jan. 2008.

- [23] L. Nelson, T. N. Nielsen, and H. Kogelnik, "Observation of PMD-induced coherent crosstalk in polarization-multiplexed transmission," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 7, pp. 738-740, July 2001.
- [24] D. van den Borne, N. E. Hecker-Denschlag, G. D. Khoe, and H. de Waardt, "Cross phase modulation induced depolarization penalties in 2x10 Gbit/s polarization-multiplexed transmission," Eur. Conf. Optical Comm., Stockholm, Sweden, 2004, paper Mo4.5.5.

약 력



김 훈

1994년 한국과학기술원 학사
 1996년 한국과학기술원 석사
 2000년 한국과학기술원 박사
 2001년 ~ 2002년 Bell Labs, Lucent Technologies, 연구원
 2002년 ~ 2007년 삼성전자, 연구원
 2007년 ~ 현재 National University of Singapore, 조교수
 관심분야: 광 가입자망, 광 전송 시스템

