

Fiber-optic Communications - Historical Perspectives and Future Directions

Yun Chur Chung[†]

School of Electrical Engineering, KAIST, 291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea

(Received August 30, 2018; Revised September 6, 2018; Accepted September 6, 2018)

This paper reviews the progress achieved in the field of fiber-optic communications during the last 40 years, and discusses its future directions. In particular, the highlights and milestones in the development of the high-capacity fiber-optic transmission system are presented in historical perspective.

Keywords: Fiber-optic communications, Historical review

OCIS codes: (060.2330) Fiber optics communications, (060.2310) Fiber optics

광통신의 발전 과정 및 향후 전망

정윤철[†]

한국과학기술원 전기 및 전자공학부
Ⓣ 34141 대전광역시 유성구 대학로 291

(2018년 8월 30일 받음, 2018년 9월 6일 수정본 받음, 2018년 9월 6일 게재 확정)

본 논문에서는 지난 40여 년간 이룩된 광통신 기술의 눈부신 발전 과정을 되돌아보고 예상되는 향후 발전 방향에 대하여 기술하였다. 특히, 초고속 대용량 광전송 시스템의 발전 과정에서 핵심적인 역할을 수행한 기술들을 역사적 관점에서 정리하였다. 본 논문은 광통신 분야에 새로이 입문하는 젊은 공학도들을 위하여 작성된 것이다.

Keywords: 광통신, 광전송시스템

OCIS codes: (060.2330) Fiber optics communications, (060.2310) Fiber optics

I. 서 론

‘정보화시대’라고 지칭되는 현대사회에서는 경제/사회/문화의 발전뿐 아니라 개개인의 일상생활을 위해서도 신속한 정보의 교환이 무엇보다 중요하게 되었다. 광통신은 이러한 정보화시대의 근간이 되는 기술이다. 광통신망은 이제 육상에서뿐 아니라 바다 밑까지 광섬유를 이용하여 전 세계를 거미줄처럼 연결하고 있으며, 우리가 지구상 어디에 있건 상관 없이 언제든 서로 자유롭게 소통하고 정보를 교환할 수 있도록 해준다. 이러한 이유로 인하여 광통신은 20세기에 이룩된 가장 중요한 발명 중 하나로 손꼽히고 있다^[1-5].

광통신 시스템은 1977년 4월 22일 미국 California의 Long Beach와 Artesia 사이에 세계에서 처음으로 포설되었다^[6]. 당시 6.3 Mbps에 불과했던 상용 광통신 시스템의 광섬유당 전송용량은 지난 40년간 300만 배 이상 증가하여 현재 20 Tbps에 달하고 있다^[7]. 이와 같이 급속한 특정 과학기술의 발전

속도는 거의 전례를 찾아볼 수 없는 것이다. 이와 관련하여 Scientific American은 광통신의 전송용량이 9개월마다 2배씩 증가하였으며, 이는 18개월마다 2배씩 증가해온 반도체의 집적용량이나 12개월마다 2배씩 증가해온 데이터 저장기술의 발전 속도와 비교하여도 매우 빠른 것으로서, 이와 같이 급속한 광통신 기술의 발전은 “빛의 승리(The triumph of the light)”라고 보도한 바 있다^[8]. 광통신 기술이 이렇게 빠른 속도로 발전할 수 있었던 가장 중요한 이유는 저손실 광섬유, 상온에서 동작하는 반도체 레이저, 에르븀 첨가 광섬유 증폭기, 파장분할다중화 기술, 첨단 변조 방식, 디지털 코히런트 수신기술 등 수많은 혁신적 요소기술들이 필요에 맞추어 끊임없이 개발되어왔기 때문이다. 그러나 광통신 시스템의 전송용량이 nonlinear Shannon limit로 인한 이론적 한계치의 3 dB 이내로 근접함에 따라 더 이상의 용량증가가 거의 불가능한 단계에 도달하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근 또 다른 혁신적 방안이라고 할 수 있는 공간분할

[†]E-mail: ychung@kaist.ac.kr, ORCID: 0000-0003-1655-9282

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

다중화 기술이 제안된 바 있으며⁹⁾, 현재 이와 관련하여 많은 연구가 활발하게 진행되고 있으나 과연 이러한 기술을 상용화할 수 있을 만큼 경제적으로 구현될 수 있는지에 대해서는 아직 회의적인 시각도 있는 것이 현실이다.

한편, 인터넷이 활성화되고 각종 멀티미디어 서비스가 개발됨에 따라 전 세계의 통신 트래픽은 지난 20여 년간 폭발적으로 증가하여왔다. 예를 들면, 전 세계 인터넷 트래픽은 1992년부터 2016년까지 24년 동안 약 2300만 배 증가하였으며, 이러한 추세는 앞으로도 계속되어 2021년에는 전 세계에서 사용하는 인터넷 트래픽이 매 초당 106 Tbps에 달할 것으로 예측되고 있다¹⁰⁾. 이와 같은 인터넷의 활성화는 위에서 기술한 바와 같이 광통신 기술의 획기적인 발전으로 인하여 가능하였다. 그러나 현재 추진되고 있는 무선통신의 5G 서비스, 4K 이상의 고화질 방송 서비스, 1 Gbps급 이상의 초고속 FTTH 서비스, 지능형 교통 시스템, 사물 인터넷 등의 각종 신규 서비스들을 수용하기 위해서는 이미 이론적 한계에 도달하고 있는 광통신의 전송용량을 앞으로도 계속 획기적으로 증가시킬 수 있어야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 또 다른 혁신적인 초고속 광전송 기술의 개발뿐 아니라 초대용량 스위칭 기술, 각종 초고속 광소자 및 전자소자, 실리콘 포토닉스 등 각종 광학적 집적회로 등의 획기적인 발전도 필요하다.

광통신은 광학, 물리학, 전자공학뿐 아니라 통신, 신호처리, 네트워크 기술 등을 포함하는 융합적 연구 분야로써 개략적으로 다음과 같은 세부 분야들이 있다.

- 유선 광통신: 광전송 시스템, 광통신 네트워크, 광 인터커넥션 등
- 무선 광통신: 심우주 광통신, 위성용 광통신, 지상용 무선 광통신 등
- 광통신용 각종 소자 및 서브시스템: 광섬유, 수동형 광소자, 능동형 광소자, 광학적 집적회로, 광통신용 전자소자, 광회선분기결합기, 광회선분배기 등

광통신 기술의 발전은 이와 같이 다양한 세부 분야의 전문가들이 적극적으로 협력함으로써 이루어져왔다. 본고에서는 이 중에서 특히 초고속/초대용량 유선 광전송 시스템을 중심으로 지난 40년간의 발전과정과 현황을 살펴보고, 이를 바탕으로 이렇게 빠르게 발전해온 광통신 기술의 향후 발전방향에 대하여 전망해 보고자 한다.

II. 광통신의 발전과정

2.1. 광통신의 여명기

1970년대 초반까지 대부분의 장거리 통신은 마이크로웨이브 전송을 통해 이루어 졌다. 이와 같이 마이크로웨이브를 이용한 통신기술의 상용 서비스는 제2차 세계대전이 끝난 1940년대 후반에 본격적으로 시작되었으며, 1960년대 초반에는 미국 전역에 걸쳐 마이크로웨이브 중계 시스템이 대규

모로 포설되었다¹¹⁾. 이는 물론 동축케이블을 사용하는 경우보다 마이크로웨이브를 사용하는 시스템이 구축비용이나 운영비용 측면에서 훨씬 유리했기 때문이었다. 이러한 이유로 인하여 미국 AT&T의 경우 1970년대에는 전화통화의 70%, 텔레비전 트래픽의 95%를 마이크로웨이브 중계 시스템을 이용하여 전달하였다¹²⁾. 이에 따라 당시 마이크로웨이브 중계 시스템의 전송용량을 증가시키려는 노력이 활발하게 진행되었으며, 1971년에는 6 GHz에서 동작하는 반송주파수에 양방향 음성신호 14,400 회선을 실어 전송할 수 있어 그 시대에서는 초대용량이라고 할 수 있었던 “TH-3 마이크로웨이브 시스템”이 개발되었다¹³⁾. 그러나 당시 마이크로웨이브 중계 시스템의 전송용량을 이보다 더 증가시키는 데에는 많은 기술적 어려움이 있었으며, 이를 극복하기 위한 가장 논리적인 방안은 더 높은 반송 주파수를 사용하는 것이라고 판단되었다. 이에 따라, AT&T의 벨 연구소에서는 40~110 GHz 대역의 밀리미터파를 활용하기 위하여 직경이 6 cm인 “WT4 금속 도파관”을 지하에 포설하는 방안을 모색하게 되었다¹⁴⁾. 이는 이러한 밀리미터파 금속 도파관을 통해 2진 위상 천이 변조(Binary Phase Shift Keying, BPSK) 신호를 전송하는 경우 16 Gbps의 전송용량을 확보할 수 있는 것을 분석되어 기존 마이크로웨이브 중계 시스템을 사용하는 경우보다 전송용량을 획기적으로 증대시킬 수 있을 것으로 기대되었기 때문이다. 그러나 이러한 밀리미터파 금속 도파관의 전송손실을 최소화하기 위해서는 매우 정밀한 설치가 요구되었던 관계로 실질적으로 포설하는 데에는 많은 기술적 어려움이 있었으며 막대한 비용이 소요되었다. 그럼에도 불구하고 AT&T는 이러한 밀리미터파 금속 도파관을 New Jersey에 14 km 정도 포설하고 1974년부터 1977년까지 field trial을 실시하였다¹⁴⁾. 그 후 이 trial은 아주 성공적이었던 것으로 발표되었으나, 기술적 어려움과 취약한 경제성으로 인하여 더 이상의 추진은 중단되었다¹⁵⁾.

이러한 시기에 광섬유를 활용하여 장거리 통신 시스템을 구축하는 획기적인 방안이 제안되었다. C. Kao는 1966년 유리에서 불순물을 충분히 제거하고, 중심 부분인 코어의 굴절률이 주변보다 약간 높도록 조절하여 유리막대 형태의 도파관을 만들면 전송손실이 1 km당 20 dB 이하인 광섬유를 만들 수 있으며, 그러면 머리카락처럼 가늘고 자유롭게 구부릴 수 있는 유연한 광섬유를 이용해서 기존의 동축 케이블이나 마이크로웨이브 시스템보다 전송용량이 훨씬 큰 통신 시스템을 저비용으로 구축하는 것이 가능할 것이라고 발표하였다¹⁶⁾. C. Kao는 이와 같이 현대 정보화시대가 가능하도록 이끈 획기적인 기술을 발명한 공로로 2009년 노벨상을 수상하였다. 사실 직경이 125 μm 에 불과한 광섬유를 당시 차세대 통신을 위하여 AT&T에서 개발을 추진했던 직경이 6 cm인 “WT4 밀리미터파 금속 도파관”과 비교해 보면 선택은 명백한 것이었다. 이에 따라 전송손실이 작은 광섬유를 실제로 개발/생산하기 위한 치열한 경쟁이 시작되었다. 이런 가운데 1970년 미국 Corning의 D. Keck, R. Mauer, P. Schulz는 전송손실이 20 dB/km 이하인 광섬유를 세계에서 처음으로 개발하는데

성공하였다^{6,17)}. 또한, 1970년에는 상온에서 동작하는 반도체 레이저가 벨 연구소에서 처음으로 개발되었으며, 이는 광통신이 실현될 수 있었던 또 다른 획기적인 기술적 진전이라고 할 수 있다¹⁸⁾. 당시 반도체 레이저가 상온에서 동작한 시간은 10분 정도에 불과하였으나, 이로부터 불과 수년만인 1970년대 중반에는 상온에서 동작하는 반도체 레이저의 수명이 100만 시간 이상으로 급속히 증가되었다¹⁹⁾. 이에 따라, 이제 전송손실이 매우 적은 광섬유와 상온에서 동작하는 신뢰성 있는 반도체 레이저를 활용하여 실용적인 광통신 시스템을 구현하는 것이 가능해 졌다. 이러한 가능성을 인식한 벨 연구소에서는 이미 1973년에 W. Muska 등이 6.3 Mbps의 속도로 동작하는 fiber-optic regenerator를 세계에서 처음으로 시연하였다. 이와 같이 광통신 기술이 성공적으로 시연되자 벨 연구소에서는 I. Jacobs와 S. Miller의 주도하에 실용성 있는 광통신 시스템을 구현하기 위한 탐사연구를 1975년에 시작하였으며, 1976년에는 광섬유 144개로 구성된 광케이블을 지하에 포설하고 광섬유당 45 Mbps급 신호를 전송하기 위한 “Atlanta Fiber System Experiment”를 진행하였다^{20,21)}. 이 실험에 성공적인 것으로 판단됨에 따라 1977년 초반에는 Chicago 시내에 24개의 멀티모드 광섬유로 구성된 광케이블 6.3 km를 포설하여 전화국 2곳과 가입자 시설 1곳을 연결하고, 그때부터 2년간 음성/영상/데이터 서비스를 제공하는 현장실험을 진행하였다²²⁾. 이 실험의 결과 유리로 만들어진 광섬유 케이블을 깨지 않고 포설할 수 있으며, 광통신 시스템의 신뢰성이 아주 우수하다는 확신을 얻게 되었다. 이에 따라 1970년대 말부터는 광통신 시스템이 전 세계에서 대규모로 포설되기 시작하여 “광통신의 시대”가 열리게 되었다.

2.2. 시분할다중방식 광통신 시스템

광통신 발전의 초기단계이었던 1970년대에는 대부분의 통신수요가 음성신호이었으며, 특히 미국의 시내 망에서는 대부분 음성신호 24개를 시분할다중화하여 1.5 Mbps의 속도로 전송할 수 있는 소위 “T1 digital carrier system”이 사용되고

있었다. 따라서 처음에는 광통신 시스템의 전송속도를 1.5 Mbps로 추진하는 방안이 적극 모색되었으나, 당시 광섬유나 레이저의 가격이 매우 비쌌던 관계로 결국 광통신의 전송속도를 음성신호 672개를 전송할 수 있는 45 Mbps급으로 결정하게 되었다²¹⁾. 그림 1(a)는 당시 사용되었던 시분할다중방식 (time-division-multiplexing, TDM) 광전송 시스템의 개략적인 구성도이다. 이러한 시스템에서는 음성신호 672개를 시분할다중화하여 45 Mbps급 전기신호를 생성하고, 이를 이용하여 레이저를 구동함으로써 광신호로 변환한 뒤 광섬유를 통해 전송하게 된다. 이와 같은 방식으로 광섬유를 통해 광신호를 장거리 전송하면 결국 광섬유의 전송손실로 인하여 광신호의 크기가 감쇠되므로 그림 1(b)에서 보여주는 것과 같은 3R (reamplification, reshaping, retiming) 방식 fiber-optic repeater를 이용하여 수십 km마다 한 번씩 광신호를 재생해 주어야 한다. 이를 위하여 시분할다중화된 광신호를 photodetector를 이용하여 수신하고 증폭한 뒤, timing recovery circuit을 이용하여 추출된 시간정보를 적용하여 decision circuit를 구동함으로써 원래의 신호를 복원하여 다시 레이저를 구동시킨다. 따라서 이러한 과정을 반복함으로써 광신호를 아주 먼 거리까지도 에러 없이 전송할 수 있다. 미국 AT&T는 이와 같은 방식으로 동작하는 45 Mbps급 “FT-3 system”을 동작파장이 825 nm인 AlGaAs 레이저와 silicon photodiode 및 50/125 μm 멀티모드 광섬유를 이용하여 구현하고, 1979년 처음으로 Connecticut주의 Trumbull에서 이를 이용한 상용 광통신 서비스를 시작하였다. 그 후 1983년 1월부터 서비스를 시작한 New York와 Washington, D.C. 사이의 1단계 “Northeast Corridor”에서는 이미 “FT-3C 시스템”이 개발되어 전송속도가 90 Mbps로 증가하였으며, 1984년에는 180 Mbps의 전송속도로 1.3-μm 대역에서 동작하는 “FT-3X 시스템,” 1985년에는 417 Mbps의 전송속도로 동작하는 “FT-series G 시스템”이 잇달아 개발되었고, 1987년에는 1.7 Gbps의 전송속도로 동작하는 “FT-series G 1.7”이 개발되어 광섬유당 전송용량이 드디어 1 Gbps를 초과하게 되었다^{23,24)}. 이는 불과 6~7년

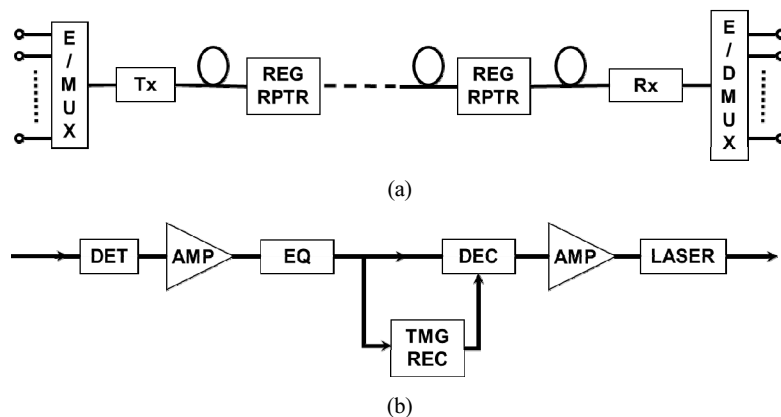


Fig. 1. (a) Configuration of fiber-optic transmission system based on time-division-multiplexing (TDM) technology, and (b) schematic diagram of fiber-optic regenerative repeater (E/MUX: electronic multiplexer, Tx: transmitter, REG RPTR: regenerative repeater, Rx: receiver, E/DMUX: electronic demultiplexer, DET: photodetector, AMP: amplifier, EQ: equalizer, TMG REC: timing recovery circuitry, DEC: decision circuitry).

만에 광통신 시스템의 광섬유당 전송용량이 약 40배 증가하였음을 의미하며, 이와 같이 급속한 광통신 기술의 발전으로 인하여 1 bit를 전송하는데 소요되는 단위거리당 비용이 같은 기간에 100배가량 감소하였다^[25]. 1980년대에는 이와 같이 시분할다중방식으로 광통신 시스템을 고속화함으로써 증가하는 통신수요를 경제적으로 수용할 수 있었다. 이는 고속으로 동작하는 광통신 시스템 한대를 사용하는 것이 저속으로 동작하는 광통신 시스템 여러 대를 사용하는 경우보다 레이저 등 가격이 비싼 광부품의 사용을 줄일 수 있어 훨씬 경제적이었기 때문이었다. 그러나 이미 1 Gbps 수준을 돌파한 광통신 시스템의 전송속도를 10 Gbps급 이상으로 증가시키는 데에는 당시 각종 전자회로의 속도가 충분히 빠르지 않았던 관계로 많은 기술적 어려움이 있었다.

2.3. 파장분할다중방식 광통신 시스템

앞서 기술한 바와 같이 광통신 시스템의 전송속도를 10 Gbps급으로 증가시키는 데에 많은 어려움을 겪고 있었던 1980년대 말에 광통신 시스템의 전송용량을 획기적으로 증가시킬 수 있는 새로운 기술들이 연속적으로 발명되었다. 예를 들면, 1987년 D. Payne은 광섬유의 전송손실이 가장 낮은 1.55- μm 대역에서 동작하는 예르븀 첨가 광섬유 증폭기(Erbium-doped fiber amplifier, EDFA)를 개발하였으며^[26], 1988년에는 E. Snitzer가 이러한 EDFA를 파장이 1.49 μm 에서 동작하는 펄프 레이저를 사용하여 구동할 수 있음을 시연함으로써 반도체 레이저를 사용하여 실용적인 EDFA를 구현할 수 있는 가능성을 제시하였고^[27], 1989년에는 M. Nakazawa가 1.48- μm 에서 동작하는 고휒력 반도체 레이저를 실제로 제작하여 EDFA를 구동하고 이러한 EDFA를 광통신 시스템의 증계기로 사용할 수 있음을 실증하였다^[28,29]. 이와 같은 EDFA는 광신호의 변조방식이나 속도에 상관없이 동작하는 관계로 기존의 3R 방식 fiber-optic repeater를 사용하는 경우와는 달리 광신호가 고속화되더라도 초고속 광/전자 부품을 사용하여 새로 제작

할 필요 없다는 장점이 있다. 이에 따라 1990년대 초반에는 기존 fiber-optic repeater 대신 EDFA를 사용하여 장거리 광전송 시스템을 구현하려는 노력이 미국과 일본에서 경쟁적으로 진행되었다^[30-33]. 특히, 기존의 3R 방식 fiber-optic repeater를 전혀 사용하지 않고 간단한 EDFA만을 사용하여 2,200 km에 달하는 전송거리를 확보할 수 있다는 보고는 당시 아주 획기적인 것이었다^[31]. 또한, 1.5- μm 대역에서 동작하는 어떤 광신호도 변조방식이나 속도에 상관없이 증폭할 수 있는 EDFA의 특성을 이용하여 파장이 서로 다른 여러 개의 광신호를 광계층에서 직접 다중화하여 장거리 전송할 수 있는 파장분할다중방식(wavelength-division-multiplexing, WDM) 광통신 시스템을 구현하기 위한 노력이 진행되었다^[32,33]. 이는 당시 기술적으로 많은 어려움을 겪고 있었던 시분할다중방식 10 Gbps급 광통신 시스템을 개발하는 대신 2.5 Gbps급 광신호 4개를 파장분할다중화하여 광섬유당 전송용량을 10 Gbps급으로 증대시키는 것이 더 현실적인 것으로 판단되었기 때문이었다. 그러나 당시 파장이 서로 다른 여러 개의 광신호를 다중화하기 위한 수단이 광커플러를 사용하는 것이었던 관계로 다중화하기 위한 광신호의 개수가 증가함에 따라 분리손실(splitting loss)이 대폭적으로 증가하는 문제점이 있어 아주 많은 수의 광신호를 다중화하는 것은 불가능하였다. 이런 즈음인 1991년 C. Dragone는 유리기판 위에 2개의 star coupler를 제작하고 이들을 일정한 간격으로 길이가 다른 여러 개의 광도파로를 이용하여 연결함으로써 파장이 서로 다른 다수의 광신호들을 분리손실 없이 다중화 또는 역다중화 할 수 있는 아주 간단한 도파로형 회절격자(arrayed waveguide grating, AWG)를 개발하였다^[34]. 이에 따라, 이제 EDFA와 AWG를 이용하여 실용적인 파장분할다중방식 광통신 시스템을 구축함으로써 광섬유당 전송용량을 대폭적으로 증대시킬 수 있게 되었다. 그림 2(a)는 파장분할다중방식 광전송 시스템의 개략적인 구성도이다. 이러한 시스템에서는 초고속으로 동작하는 다수의 전기신호를 서로 다른 파장에서 동작하는 다수

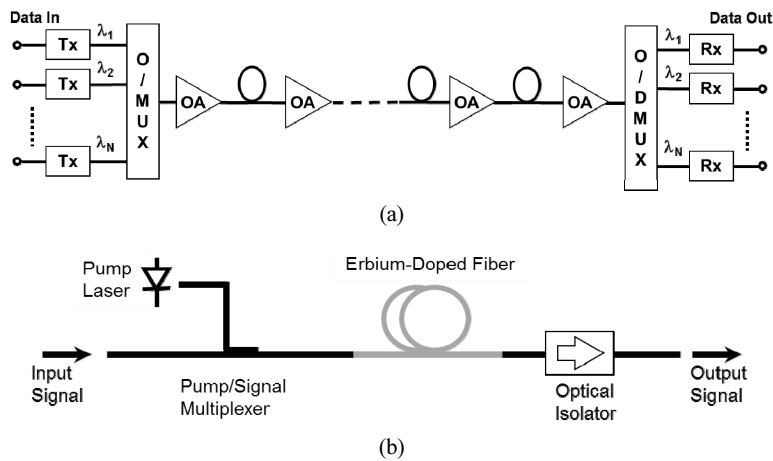


Fig. 2. (a) Configuration of fiber-optic transmission system based on wavelength-division-multiplexing (WDM) technology, and (b) schematic diagram of erbium-doped fiber amplifier (O/MUX: optical multiplexer, Tx: transmitter, OA: optical amplifier, O/DMUX: optical demultiplexer, Rx: receiver).

의 광송신기에 인가한 뒤, AWG를 이용하여 광계층에서 직접 분리손실 없이 다중화하고, 기존의 복잡한 3R 방식 재생기를 사용하는 대신 간단한 EDFA를 사용하여 장거리 전송한 후, 수신단에서 AWG를 이용하여 손실 없이 역다중화하고, 다수의 광수신기를 이용하여 역다중화된 광신호를 수신함으로써 한 가닥의 광섬유를 통해 기존 시분할다중방식으로 구현할 수 없는 대용량의 광신호를 전달할 수 있다. 그림 2(b)는 EDFA의 개략적 구성도이다. 이 그림은 EDFA가 간단히 에르븀 첨가 광섬유, 펌프 레이저, 광신호와 펌프를 결합하기 위한 광커플러 등으로 간단히 구현될 수 있음을 보여준다. EDFA를 구현하는 데에는 고속으로 동작하는 광/전자 소자가 전혀 필요하지 않다. EDFA의 간단함과 실용성은 그림 1(b)의 기존 3R 방식 fiber-optic repeater와 비교하면 아주 명백한 것이다. 이와 같이 EDFA와 AWG를 이용한 파장분할다중방식 광통신 시스템의 개발로 인한 전송용량 증대 및 경제성 제고는 그야말로 획기적인 것이었다. 그림 3은 이러한 장점을 도시하기 위한 것이다. 예를 들어 1991년 상용화되었던 2.5 Gbps급 광전송장치를 활용하여 전송용량이 40 Gbps이고 전송거리가 360 km인 광전송 시스템을 구축하는 경우를 가정해 보자. 그림 3(a)는 기존의 시분할다중방식 광통신 시스템을 활용하는 경우이다. 이를 위해서는 송수신단에 2.5 Gbps급으로 동작하는 terminal equipment를 각 16대씩 설치해야 하고, 16가닥의 광섬유 선로에 40 km 마다 3R 방식 fiber-optic repeater를 설치해야 하므로 총 128개의 fiber-optic repeater가 필요하다(실제로는 송신과 수신, working 및 protection을 모두 고려하면 이의 4배가 필요할 것이다.). 이와 비교하여 그림 3(b)는 파장분할다중방식 광통신 시스템을 사용하는 경우를 도시한 것이다. 이 경우에도 송수신단에 2.5 Gbps급으로 동작하는 terminal equipment를 각 16대씩 설치해야 하지만, 16가닥의 광섬유 대신 단지 1가닥의 광섬유만을 사용할 수 있고, EDFA를 사용하여 광신호를 충분히

증폭할 수 있어 당시 중계기 사이의 거리를 최대 120 km까지 확대할 수 있을 것으로 판단되었으므로 128개의 fiber-optic repeater 대신 단지 4개의 EDFA만을 사용하여 동일한 전송용량을 확보할 수 있었다. 이 두 그림을 비교해보면 EDFA 기반의 파장분할다중방식 광통신 시스템의 장점은 너무도 명확하다. 이에 따라 이와 같은 시스템을 개발하여 상용화하고자 하는 노력이 세계적으로 치열하게 진행되었으며, D. Huber에 의해 설립된 벤처 기업인 Ciena에서 1996년 세계 최초의 상용 파장분할다중방식 광통신 시스템인 “Multiwave 1600 Transmission System”을 출시하였다^{35,36}. 당시 이 시스템의 광섬유당 전송용량은 40 Gbps (16채널 × 2.5 Gbps)에 불과하였다. 그러나 같은 해인 1996년 연구실 수준에서는 이미 광섬유당 전송용량이 1 Tbps 이상인 파장분할다중방식 광통신 시스템이 보고되었으며³⁷⁻³⁹, 불과 5년 뒤인 2001년에는 광섬유당 전송용량이 10배 더 증가하여 10 Tbps 이상인 시스템이 시연되었다^{40,41}. 이에 따라, 상용 시스템의 광섬유당 전송용량도 급속한 속도로 증가되어 1998년에는 광섬유당 전송용량이 1 Tbps (96채널 × 10 Gbps; Ciena)에 육박하는 시스템이 개발되었으며, 그 후 1.76 Tbps (176채널 × 10 Gbps; Fujitsu), 3.2 Tbps (80채널 × 40 Gbps; Siemens) 등 Tbps급의 초대용량 상용 광통신 시스템이 연이어 개발되었다⁴².

III. 광통신과 정보화시대

3.1. 인터넷 확산에 대한 파장분할다중방식 광통신 기술의 역할

파장분할다중방식 광통신 시스템의 개발은 인터넷의 확산 발전을 가능하게 하여 현대 정보화시대를 이끈 대표적인 기술적 이정표가 되었던 것으로 인정받고 있다. 1990년대 초반 미국의 경우 통신 트래픽이 향후 지속적으로 증가하여 2010년에는 1990년과 비교하여 25배 이상이 될 것으로 예측되고

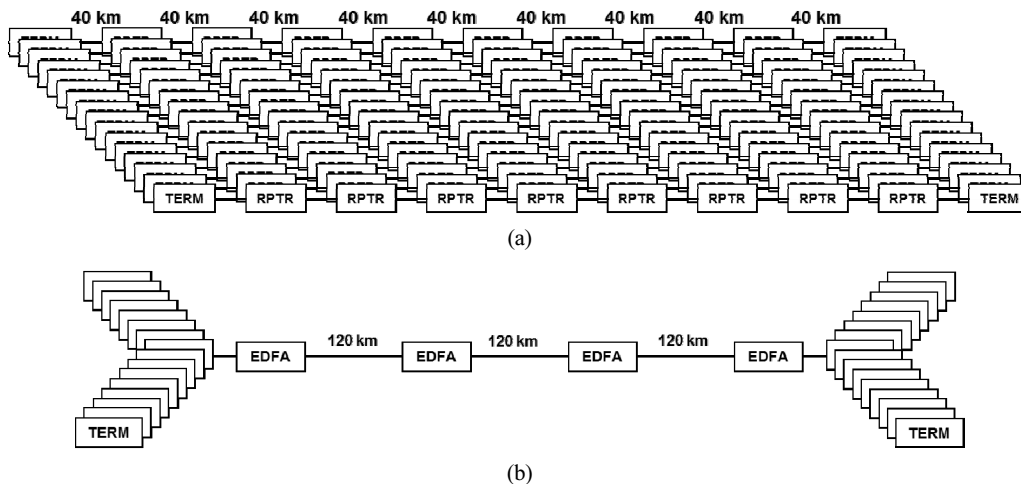


Fig. 3. Technical options for implementing a fiber-optic transmission system with 40-Gbps capacity and 360-km reach (a) by using the conventional TDM technique, and (b) by using the WDM technique based on EDFA (TERM: terminal equipment, RPTR: 3R-type fiber-optic repeater, EDFA: Erbium-doped fiber amplifier).

있었다^[43]. 이는 향후 음성신호보다 영상신호가 크게 증가할 것이라는 예상 때문이었다. 그러나 실제 통신 트래픽은 전자상거래, 온라인 게임, 인터넷 전화, 화상회의, 원격교육, 원격진료, 원격근무 등 각종 인터넷 서비스의 발전으로 인하여 이보다 훨씬 빠른 속도로 증가하여 그림 4에서 보여주는 바와 같이 1990년부터 2002년까지 12년 동안 10만 배 이상 증가하였다^[44]. 이에 따라 1990년대 말에는 이와 같이 급속한 인터넷의 발전으로 인하여 새로운 millennium에 전개될 것으로 예상되는 정보화시대에 대한 관심이 크게 고조되었다^[45]. 한편, 당시 AT&T를 비롯한 미국 통신사업자들의 광섬유 사용량은 이미 포화상태에 근접하고 있었던 관계로 아무리 빠른 속도로 신규 광케이블을 포설하더라도 이렇게 급속하게 증가하는 네트워크 트래픽을 수용하는 것은 실질적으로 불가능한 형편이었다^[46]. 당시의 이러한 분위기를 반영하는 예로써 UUNET의 M. O'Dell은 2000년 한 강연에서 당시의 인터넷 트래픽이 1993년부터 1999년까지 6년간 100만 배 증가하였으며, 향후 5년간 100~1000만 배 증가할 것을 예상되어 기간망 선로의 전송용량을 1~10 Pbps급으로 증가시킬 필요가 있으며, 이를 위해서는 늦어도 3년 이내에 이와 같은 트래픽 증가를 수용하기 위한 확장성 있는 새로운 통신장비를 대폭적으로 포설해야 한다고 역설하였다^[47]. 또한, Telecoms의 저자인 G. Gilder는 향후 25년간 통신장비의 용량을 해마다 3배씩 증가시켜야 하며, 이러한 과정을 통해 수조 달러 규모의 새로운 부가 창출될 것이라고 발표하였다^[48]. 이러한 시기에 광섬유당 전송용량을 대폭적으로 증가시키는 동시에 이에 소요되는 비용을 크게 절감할 수 있는 파장분할다중방식 광통신 기술이 개발되었다는 점은 인터넷의 확산/발전을 통한 정보화시대의 구현을 위해 매우 큰 의미가 있는 것이었다. 이로써 폭증하고 있던 인터넷 트래픽을 수용할 수 있는 현실적인 기술적 방안이 마련된 것이며, 이는 앞서 기술한 바와 같이 “빛의 승리(The triumph of the light)”라고 보도된 바 있다^[8]. 사실 광통신 기술이 이와 같이 급속한 속도로 발전하지 못했더라면 인터넷은 지금보다 훨씬 느리고 비쌌을 것이며, 현재 누구나 사용하고 있는 cloud computing이나 video streaming같은 대용량 서비스들은 상상하기조차 어려웠을 것이다.

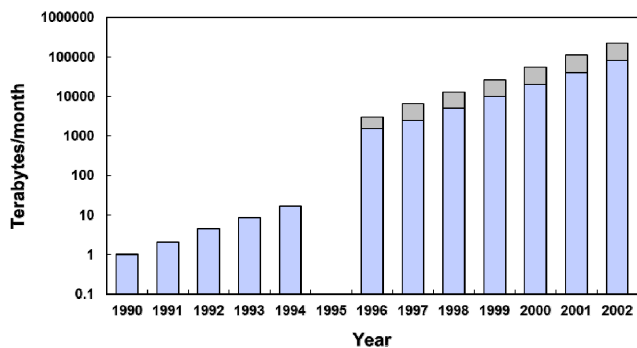


Fig. 4. Traffic on internet backbones in US during 1990~2002 (This figure is compiled using the data in [44]).

3.2. 광통신 산업의 부침 및 계속되는 광통신 용량증대의 필요성

상기와 같이 1990년대에 들어 인터넷 트래픽이 폭증함에 따라 당시 MCI Worldcom의 네트워크 담당 부사장이었던 J. Wimmer는 1999년 2월 미국 San Diego에서 개최된 OFC에서 “파장분할다중방식 광통신 기술을 연구실에서 당장 가져 나와 최대한 빠른 시일 내에 확장가능하고 신뢰성 있도록 개발하여 실제로 포설하는 것이 당면한 도전”이라고 발표하였다^[49]. 당시 Wimmer 등 통신사업자를 대표하는 인사들이 향후 5년 이내에 포설해야 한다고 주장한 기술의 수준이나 규모는 모두 상상을 초월하는 것이었다^[50]. 광통신은 이제 단순한 전송뿐 아니라 광회선 분기결합기(Optical Add/Drop Multiplexer, OADM) 및 광회선 분배장치(Optical Cross-Connect, OXC) 등을 이용하여 광계층에서 직접 광신호를 스위칭할 수 있는 전광 통신망(all-optical network)을 구축하기 위한 혁신적 방안들이 모색되었으며, 이와 관련하여 광스위치, 파장가변 레이저 등 수많은 종류의 새로운 광부품들이 필요하게 되었다. 이는 광통신과 관련된 회사들의 주식이 1999년부터 2000년까지 불과 1년 사이에 10배 이상 폭등하는 계기가 되었다. 그러나 돌이켜보면 너무 당연하게도 이러한 폭등상황이 계속 유지될 수는 없는 것이었으며, 신규 광섬유 포설에 과도한 투자가 이루어 졌다는 점, 대규모 벤처 파이낸싱으로 인해 통신장비업체들의 재정이 취약해 졌다는 점, 광부품의 판매가 감소했다는 점 등이 지적되면서 2001년에는 그 동안 폭등했던 광통신 관련 업체들의 주식이 갑자기 폭락하게 되었다^[51]. 이와 같은 과도한 투자는 아마도 1990년대 중반 web browser가 활성화됨에 따라 기존 text 중심의 인터넷 트래픽이 graphic 중심으로 변환되면서 그림 4에서 보여주는 바와 같이 1995~1996년 사이 불과 2년 만에 인터넷 트래픽이 100배가량 급속하게 증가한 점을 근거로 앞으로도 이러한 추세가 계속될 것이라고 잘못 평가한 결과였던 것이라고 짐작된다. 이에 따라 인터넷의 아버지라고 불리는 V. Cerf는 2002년 3월 미국 Anaheim에서 개최된 OFC에서 인터넷 트래픽이 매년 8배씩 증가하고 있다는 것은 잘못된 것이며, 실제로는 이보다 훨씬 적게 약 2배씩 증가하고 있다고 발표하였다^[52]. 또한, 2002년 후반에는 유럽과 북미지역에 포설된 기간망의 광섬유 중 단지 10%만이 실제로 사용되고 있는 것으로 분석되어 그간의 과도한 투자가 분명한 것으로 판명되었다^[53]. 이에 따라 불과 3년전에 5000이었던 NASDAQ 지수가 1400 이하로 폭락하였으며, 소위 “telecom winter”가 시작되어 수많은 통신 관련 업체들이 극심한 재정적 어려움을 겪고 파산하였다^[54,55]. 그러나 이러한 어려움 속에서도 인터넷 트래픽은 계속 해마다 거의 2배씩 지수적으로 성장하고 있다는 것이 여러 통신사업자, 장비업체, 정부기관 등의 발표에서 일관되게 확인되었다^[56-60]. 특히, R. Tkach는 이러한 동향에 대한 각종 자료를 종합하여 네트워크 트래픽이 연평균 “2 dB”씩 꾸준히 증가하고 있으며, 앞으로도 이러한 추세가 계속될 것이라고 전망하였다^[61]. 이러한 내용은 Business-

week에서 네트워크 트래픽이 2003~2006년 사이에 연평균 75%씩 증가하였다고 보도한 내용과도 잘 일치하는 것이다^[62]. 그림 5는 1980년 이후 네트워크 트래픽의 증가 추세와 비교하여 같은 기간 동안 시분할다중방식 및 파장분할다중방식을 이용하여 개발되었던 연구 및 상용 광통신 시스템의 광섬유당 전송용량을 도시한 것이다. 이 그림은 1990년대 초반 개발된 고밀도 파장분할다중방식 광통신 기술로 인하여 광섬유당 전송용량이 100배가량 급속하게 증가하였으나, 그 후 2000년경부터는 증가속도가 점선으로 표시된 것처럼 연평균 1 dB 정도로 현저하게 낮아졌음을 보여준다. 이와 같이 연평균 2 dB씩 증가하는 네트워크 트래픽과 비교하여 광통신 시스템의 전송용량 증가가 현저하게 낮은 현상이 계속된다면 늦어도 2018년경에는 또 다시 인터넷 트래픽을 수용하는 데에 어려움이 닥칠 것으로 전망되었다^[61]. 이에 따라 2012년 3월 Los Angeles에서 개최된 OSA Executive Forum에서는 “2019년 세상의 종말이 올 수 있다”고 선언되었으며, TIME magazine은 “다음 10년을 위한 10가지 생각(10 ideas for the next 10 years)”이라는 특집기사에서 지금과 같이 각종 인터넷 서비스를 사용하는 경우 조만간 용량부족(bandwidth shortage) 상태가 올 수 있으므로 이를 해결할 수 있는 방안이 조속히 마련되어야 한다고 보도하였다^[63]. 이에 따라 향후 네트워크 트래픽이 과연 어떤 속도로 증가할 것인지는 당시의 중요한 화두가 되었으며, 대부분 네트워크 트래픽이 향후 연평균 55~115% 성장할 것이라고 전망하였다. 이러한 증가속도는 1990년대 후반 일부에서 예측했던 것처럼 매 3개월마다 2배씩 성장하는 것은 아니더라도 실로 엄청난 것이다. 예를 들면, 향후 네트워크 트래픽이 연평균 2 dB씩 증가한다고 가정하더라도 이는 매 5년마다 10배씩 증가하여 10년 뒤에는 100배, 15년 뒤에는 1000배가 됨을 의미한다. 또, 만일 네트워크 트래픽의 증가속도가 포화되어 향후 연평균 35% 정도로 성장속도가 예상보다 현저하게 감소되는 경우를 가정하더라도 2025년이 되면 기간망에서 필요한 광섬유당 전

송용량은 약 300 Tbps에 달할 것으로 예상되었다. 그러나 광섬유의 대역폭이 무한하지 않으므로 이와 같이 막대한 전송용량을 갖는 광전송 시스템을 구현하기는 매우 어려우며, 또한 core router의 처리용량을 기존에 비해 100배 이상 증가시키는 것도 비현실적인 것으로 판단되었다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 새로운 기술적 방안들을 모색하는 것이 시급하게 되었다.

IV. 광통신 기술의 현황 및 전망

4.1. 초고속/초대용량 광전송 기술

광섬유당 전송용량이 1 Tbps 이상인 초대용량 파장분할다중방식 광통신 시스템이 이미 2000년대 초반 상용화 되었으며, 현재는 이러한 상용 시스템의 전송용량이 10 Tbps 이상으로 증가되었다. 그러나 앞서 기술한 바와 같이 매년 2 dB씩 끊임없이 증가하고 있는 네트워크 트래픽을 수용하기 위해서는 앞으로도 광섬유당 전송용량을 지속적으로 더욱 증대시킬 필요가 있다. 이를 위하여 지난 20년 동안 파장분할다중방식 광통신 시스템의 (1) 채널당 전송속도를 더욱 증가시키고, (2) 파장간의 간격을 축소하여 더 많은 채널을 수용하며, (3) 초기 광통신 시스템에서 널리 사용되어 왔던 단순한 온-오프 변조(on-off keying, OOK) 대신 직교 진폭 변조(quadrature amplitude modulation, QAM)와 같은 멀티레벨 변조 방식을 사용함으로써 스펙트럼 효율을 증대시키고, (4) 광신호 편광의 직교성을 이용하여 광섬유당 전송용량을 2배 증대시킬 수 있는 편광다중화 기술을 파장분할다중방식 광통신 시스템에 적용하는 등의 방안들이 추진되어 왔다.

4.1.1. 광통신 시스템의 고속화

특히, 이와 같은 기술적 발전에 의한 광통신 시스템의 고속화 과정은 실로 눈부신 것이었다. 예를 들면, 1973년 6.3 Mbps의 속도로 동작하는 광증폭기가 처음으로 시연되었으나 2011년에는 단지 한 개의 레이저를 사용하여 26 Tbps의 전송속도를 구현할 수 있음도 시연되었다^[64]. 이는, 아직은 비록 실용성이 낮은 연구실 수준의 결과라는 점을 인정하더라도, 광통신의 전송속도가 40년도 되지 않는 기간 동안 400만 배 이상 증가하였음을 의미한다. 또한, 1975년 불과 45 Mbps에 불과했던 상용 광통신 시스템의 채널당 전송속도는 현재 100 Gbps급을 넘어 400 Gbps급으로 증가하기 시작한 단계이며, 향후 수년 내에 채널당 1 Tbps급으로 동작하는 초고속 시스템이 상용화될 것으로 예상되고 있다^[65-68]. 이에 따라 ITU (International Telecommunication Union), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), OIF (Optical Internetworking Forum) 등에서 400 Gbps급 동작을 위한 표준이 이미 완성되었거나 조만간 완성될 예정이며, 1 Tbps급 동작을 위한 표준화 작업도 2020년대 중반에는 완료될 예정이다^[69-71]. 그러나 향후 수년 이내에 채널당 전송속도가 1 Tbps급 이상인 초고속 광통신 시스템을 상용화하기 위해서는 (1) 효율적이며 대역폭이 넓고 선형성이 우수한 초고속

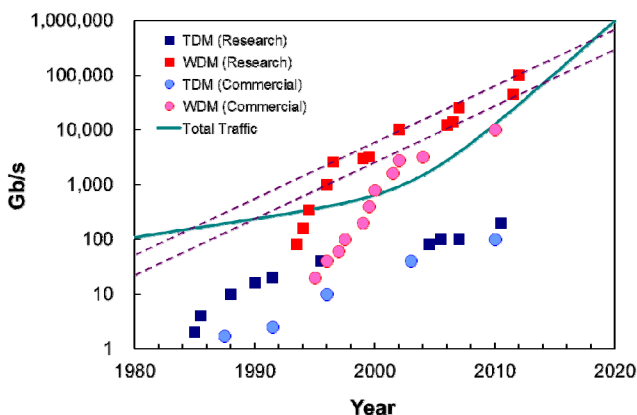


Fig. 5. Network traffic growth trend in comparison with the achieved capacities of the fiber-optic transmission system in research laboratories and commercial products (This figure was compiled by adding several new data to the information in [61]).

광변조기, 광수신기, 광증폭기 등의 각종 광부품, (2) 초고속 A/D 및 D/A converter, 대용량 DSP (digital signal processor), 광대역 저잡음 증폭기 등의 각종 전자부품, (3) silicon 및 InP 기반의 각종 광학적 집적회로, (4) 첨단 코딩 기술, 오류 정정부호 기술을 포함한 각종 신호처리 기술 등이 신속하게 개발되어야 할 것으로 판단된다.

4.1.2. 파장분할다중방식 광통신 시스템의 채널간격 및 스펙트럼 효율

1990년대 중반 현대식 고밀도 파장분할다중방식 광통신 시스템이 처음 상용화되었을 때에는 채널간격이 200 GHz (1.6 nm)인 2.5 Gbps급 광신호 16개를 다중화하여 전송함으로써 광섬유당 전송용량 40 Gbps를 달성하였다. 따라서 당시 스펙트럼 효율은 0.0125 bit/sec/Hz에 불과하였다. 그러나 광섬유당 전송용량을 더욱 증대시키기 위해서는 채널간격을 축소하여 스펙트럼 효율을 증대시켜야 한다. 이에 따라 상용 파장분할다중방식 광통신 시스템의 채널간격은 100 GHz, 50 GHz, 37.5 GHz로 점차 축소된 반면 각 채널의 전송속도는 10 Gbps, 40 Gbps, 100 Gbps, 200 Gbps로 증가하고 있는 추세이다. 이러한 결과로 최근에는 스펙트럼 효율이 5 bit/sec/Hz 이상인 상용 시스템이 개발되었다. 이와 같이 스펙트럼 효율이 1 bit/sec/Hz 이상이 되는 “super Nyquist” 시스템은 2000년대 중반부터 보고되기 시작하였으며^[72,73], 그 후 광통신 시스템의 스펙트럼 효율에 대한 기록은 급속히 증가하여 최근에는(한 가닥의 광섬유 내에 여러 개의 코어 또는 모드를 활용하는 공간분할다중방식 전송기술을 사용하지 않은 경우에도) 8.3 bit/sec/Hz의 높은 스펙트럼 효율을 확보할 수 있음이 보고되었다^[74]. 이에 따라 유한한 광섬유의 대역폭 내에 보다 많은 채널을 수용함으로써 광섬유당 전송용량을 더욱 증가시킬 수 있게 되었으며, 이미 포설되어 있는 광섬유 한 가닥을 통해 6.25 GHz 간격으로 배치된 1000개 이상의 파장분할다중화된 채널을 전송한 결과도 보고된 바 있다^[75]. 이와 같은 채널간격 변화에 부응하여 ITU에서는 기존에 50 GHz 또는 100 GHz의 배수로 정해져 있던 파장분할다중방식 광통신 시스템의 채널간격에 대한 표준을 12.5 GHz부터 100 GHz 이상의 다양한 채널간격을 사용할 수 있도록 변경하였다^[76,77].

4.1.3. 광통신 시스템을 위한 첨단 변조 기술

상기와 같이 광통신 시스템의 스펙트럼 효율을 급속도로 증가시킬 수 있었던 주요 기술적 배경으로는 (1) 편광다중화 기술과 (2) 멀티레벨 변조방식 및 오류정정부호(forward-error correction, FEC) 기술의 사용을 들 수 있다. 광신호 편광의 직교성을 이용하여 스펙트럼 효율을 2배로 증가시킬 수 있는 편광다중화 기술은 1990년대 중반부터 파장분할다중방식 광통신 시스템의 광섬유당 전송용량을 2배 증가시키는 데에 사용되어 왔으며^[78], 이제는 대부분의 상용 대용량 광통신 시스템에서도 사용되고 있는 일반적인 기술이 되었다. 또한, 초기 광통신 시스템에서는 NRZ (non-return-to-zero) 방식의 on-off 변조가 일반적으로 사용되어왔으나, 1990년대 중반부터

duobinary, DQPSK (differential quadrature phase-shift keying) 와 같은 멀티레벨 변조방식을 사용하는 방안에 대한 연구가 시작되었으며^[79-81], 최근에는 2048-QAM과 같이 극단적으로 multiplicity가 높은 변조방식을 사용함으로써 15.3 bits/sec/Hz의 아주 높은 스펙트럼 효율을 달성할 수 있는 가능성도 시연되었다^[82]. 그러나 이와 같이 변조방식의 multiplicity를 증가시키는 경우 baud rate가 낮아져서 초고속 광/전자 소자의 사용에 대한 부담을 크게 줄일 수 있다는 장점이 있으나, 이를 위해서는 수신된 광신호의 신호대 잡음비가 높아야 할 뿐 아니라 분해능이 아주 우수한 초고속 A/D 및 D/A converter가 개발되어야 한다는 문제점들이 있다. 현재 변조방식의 multiplicity가 증가함에 따라 더 높은 신호대 잡음비가 필요하여 발생하는 문제의 해결을 위하여 주로 FEC 기술이 사용되고 있다. 그러나 이와 같이 최근 편광다중기술과 멀티레벨 변조방식을 자유롭게 사용하여 광통신 시스템의 스펙트럼 효율을 대폭적으로 증가시킬 수 있었던 가장 중요한 이유는 디지털 코히런트 수신기술이 개발되었기 때문이라고 사료된다.

4.1.4. 디지털 코히런트 수신기술

코히런트 수신기술은 광통신의 역사만큼이나 오래된 것이 다^[83]. 코히런트 수신기는 기존의 직접 검출 수신기(direct-detection receiver)와는 달리 열잡음이 아니라 산탄잡음에 의해 수신감도가 결정되는 관계로 수신감도가 매우 우수하고, 주파수 영역에서 아주 조밀하게 다중화되어 있는 광신호도 국부 발진기로 사용되는 레이저를 이용하여 전기적 영역에서 쉽게 분리해낼 수 있다는 장점이 있어 1990년대 중반까지 이에 대한 많은 연구가 진행되었다. 특히, 코히런트 수신기를 사용하는 경우 우수한 수신감도 특성으로 인하여 광중계기 없이도 장거리 전송이 가능하다는 장점을 활용하기 위한 연구가 많이 수행되었으며, 이와 관련하여 1990년에는 포설되어 있는 해저 케이블을 이용한 현장실험이 진행되기도 하였다^[84]. 그러나 1990년대 중반 광증폭기의 사용이 확산됨에 따라 코히런트 수신기의 우수한 수신감도 특성은 간단한 광증폭기를 이용하여 대체할 수 있는 것으로 판단되었으며, 이에 따라 관련 연구도 그 후 거의 20년간 중단되었다. 이러한 가운데 광증폭기를 이용한 파장분할다중방식 광통신 시스템의 광섬유당 전송용량이 계속 증가되어왔으나, 2000년대에 들어서면서 발전 속도가 현저하게 저하되자 기존의 OOK 대신 멀티레벨 변조방식을 사용하는 방안이 제안되었다. 사실 코히런트 수신기술은 광신호의 위상정보를 활용할 수 있어 이와 같은 멀티레벨 신호를 처리하는 데에 매우 유리하였으나, 구현이 복잡하여 비실용적인 것으로 판단되어 오랫동안 활용되지 못하고 있었다. 그러나 네트워크 트래픽이 끊임 없이 증가함에 따라 멀티레벨 변조방식 사용의 필요성이 크게 부각되었으며, multiplicity가 높은 멀티레벨 신호를 사용하기 위해서는 코히런트 수신기술의 사용이 불가피하다는 점이 인식되면서 이에 대한 관심도 다시 증가하였다. 특히, 2005년에는 코히런트 수신기를 이용하여 광신호를 수신하는 경우 초고속 광통신 시스템의 성능을 제한하는 가장 중요한

요소 중 하나인 광섬유의 색분산으로 인한 영향을 광신호의 수신 후 전기적 영역에서 디지털 신호처리기술을 활용하여 보상할 수 있다는 점과⁸⁵⁾, 코히런트 수신기를 이용하여 편광 다중화된 멀티레벨 신호를 수신한 실험결과가 보고되면서 많은 관심의 대상이 되었다⁸⁶⁾. 그러나 당시에는 아직 이와 같은 코히런트 방식 광통신 시스템에 활용할 수 있을 만큼 충분히 빠른 디지털 신호처리용 집적회로가 개발되어있지 않았던 관계로 과연 이러한 시스템을 실용적으로 개발할 수 있는지에 대해서는 많은 논란이 있었다. 이러한 가운데 2006년 K. Kikuchi는 코히런트 수신기술을 이용하여 수신된 멀티레벨 신호의 캐리어 위상을 디지털 신호처리 방식으로 복구할 수 있는 방안을 보고하였고^{87,88)}, 2007년 K. Roberts는 90-nm CMOS 기술을 이용하여 12 mm × 16 mm 크기에 2000만개의 gate를 집적하여 실제로 구현한 코히런트 수신기용 ASIC(application specific integrated circuit)을 보고함에 따라⁸⁹⁾ 코히런트 수신기술에 대한 관심이 크게 증가하였다. 이와 같이 디지털 신호처리 기술을 사용하는 코히런트 수신기술을 1990년대까지 연구되어 왔던 기존의 코히런트 수신기술과 구별하여 흔히 “디지털 코히런트 수신기술”이라고 지칭한다. K. Kikuchi와 K. Roberts의 발표 이후 편광다중화 기술이 적용된 초고속 멀티레벨 광신호를 수신할 수 있는 현대식 디지털 코히런트 수신기술이 급속히 발전하였으며, 그 결과 현재 사용되고 있는 대용량 파장분할다중방식 광통신 시스템에는 이러한 디지털 코히런트 수신기가 널리 활용되고 있다. 이러한 디지털 코히런트 방식 광통신 시스템의 송/수신기에는 D/A 및 A/D converter와 DSP가 사용된다. 따라서 디지털 코히런트 수신기술의 발전을 위해서는 이러한 소자들의 고속화 및 분해능 개선이 필수적으로 요구된다. 이에 따라, 이미 28-nm CMOS 기술을 이용하여 이러한 기능이 포함된 ASIC이 개발되었다⁹⁰⁾. 또한, 광통신 시스템에서 사용되는 A/D converter의 샘플 속도는 2006년에는 22 GS/sec이었으나, 2013년에는 70 GS/sec로 빠르게 증가하였으며, 최근에는 샘플 속도가 90 GS/sec이며 분해능이 8-bit인 A/D converter가 보고된 바 있다⁹¹⁾. DSP의 경우 광통신 시스템의 전송속도가 계속 증가하고 있고, soft-decision FEC 기능, 각종 선형/비선형 왜곡을 보상하는 기능 등 다양한 역할을 수행하게 됨에 따라 이를 처리하기 위한 소비전력의 증가 등으로 인해 조만간 한계에 도달할 것으로 예상되며, 이를 해결할 수 있는 방안의 조속한 개발이 필요한 것으로 판단된다^{66,92)}. 광통신 시스템은 우리 주변에서 실제로 널리 사용되고 있는 분야 중 가장 빠른 속도로 동작하는 응용분야로서 발전초기부터 이와 같이 각종 초고속 광소자 및 전자소자들의 발전을 유도하는 역할을 수행하여 왔으며, 광통신의 이러한 역할은 앞으로도 계속될 것으로 판단된다.

4.1.5. 디지털 코히런트 수신기술 발전에 따른 광통신 시스템의 전송용량 증대 현황

직접 검출 수신기를 활용한 파장분할다중방식 광통신 시스템의 광섬유당 전송용량은 이에 대한 연구가 시작된 1990년

대 초반 이래 급속하게 증가하여 왔으며, 1996년에는 전송용량이 1 Tbps에 달하는 시스템이 보고되었으며³⁷⁻³⁹⁾, 2001년에는 10 Tbps급 시스템^{40,41)}, 2006년에는 14 Tbps급 시스템⁹³⁾, 2007년에는 25.6 Tbps급 시스템이 시연되었다⁹⁴⁾. 이러한 초대용량 광통신 시스템의 기술적 내용을 살펴보면, 특히 광섬유당 전송용량이 가장 큰 25.6 Tbps급 시스템의 경우 채널당 160 Gbps의 속도로 동작하는 160개의 채널을 50 GHz 간격으로 다중화하여 전송한 것으로서, 채널당 160 Gbps의 전송속도를 확보하기 위하여 편광다중기술과 DQPSK 변조방식을 사용하였으므로 각 채널의 변조 속도는 40 Gbaud이다. 또한, 이 시스템에서는 4-레벨로 위상변조된 DQPSK 신호를 수신하기 위하여 외부환경에 민감한 delayed interferometer로 구성된 직접 검출 수신기를 사용하였다. 그러나 이러한 수신기를 이용하여 multiplicity가 아주 높은 방식으로 변조된 광신호를 수신하는 것은 매우 어렵다⁹⁵⁾. 이에 따라 디지털 코히런트 수신기를 이용하여 multiplicity가 높은 멀티레벨 신호를 수신함으로써 스펙트럼 효율을 더욱 증가시키려는 노력이 진행되어 왔다. 예를 들면, 디지털 코히런트 수신기술을 이용하는 현대식 파장분할다중방식 광통신 시스템의 스펙트럼 효율은 2005년 QPSK 변조방식을 사용하여 2.5 bit/sec/Hz가 달성되었으며⁸⁶⁾, 2009년에는 16QAM 변조방식을 사용하여 6.2 bit/sec/Hz로 개선되었고⁹⁶⁾, 2010년에는 64QAM 방식을 사용하여 스펙트럼 효율이 8 bit/sec/Hz로 더욱 증가되었다⁹⁷⁾. 또한, 2015년에는 2048QAM과 같이 multiplicity가 극단적으로 높은 변조방식을 사용하여 전송함으로써 스펙트럼 효율을 15.3 bit/sec/Hz까지도 증가시킬 수 있는 가능성이 확인되었다⁸²⁾. 이에 따라 디지털 코히런트 수신기술을 이용하여 시연된 파장분할다중방식 광통신 시스템의 광섬유당 전송용량도 계속 증가하고 있다. 예를 들면, 2008년에는 164개의 100 Gbps급 QPSK 신호를 2550 km 전송함으로써 광섬유당 전송용량이 16.4 Tbps인 시스템이 시연되었고⁹⁸⁾, 2013년에는 250개의 100 Gbps급 16QAM 신호를 5530 km 전송함으로써 광섬유당 전송용량이 25 Tbps인 시스템이 시연되었으며⁹⁹⁾, 2016년에는 32QAM 또는 64APSK 방식으로 변조된 168개의 24.8 Gbaud급 광신호를 사용함으로써 광섬유당 전송용량 34.9 Tbps를 달성하고 이러한 초대용량 신호를 6000 km 이상 전송할 수 있음이 시연되었다⁷⁴⁾. 또한, 디지털 코히런트 수신기를 활용하여 OFDM(orthogonal-frequency-division-multiplexing)과 같은 다중 캐리어 변조방식 광신호를 수신함으로써 스펙트럼 효율을 증가시키고자 하는 노력도 현재 활발하게 진행되고 있으며, 이미 이러한 방식을 이용하여 13.5 Tbps의 광섬유당 전송용량을 달성하고 6000 km 이상 전송한 결과가 보고되었다¹⁰⁰⁾. 이에 따라 상용 파장분할다중방식 광통신 시스템도 2000년대 후반부터 디지털 코히런트 수신기술을 활용하기 시작하였으며, 이러한 상용 시스템의 광섬유당 전송용량은 현재 20 Tbps 이상으로 증가하였다^{7,101)}.

4.1.6. 광통신 시스템 전송용량의 한계

상기와 같은 디지털 코히런트 수신기술의 급속한 발전에도 불구하고 최근 광통신 시스템의 스펙트럼 효율이나 광섬유당 전송용량의 발전 속도가 현저하게 저하되었다. 예를 들면 1990년대에는 광통신 시스템의 전송용량이 매년 2배씩 증가하였으나, 최근에는 그 증가속도가 20% 정도로 둔화되었다. 한편, 앞서 기술한 바와 같이 네트워크 트래픽이 매년 2 dB씩 증가한다면, 또는 향후 이러한 증가속도가 어느 정도 둔화되는 경우를 가정하더라도, 2020년대 중반에는 광섬유당 전송용량이 1 Pbps급인 광통신 시스템을 포설할 필요가 있을 것으로 예상되고 있어 앞으로 광통신 시스템의 전송용량을 지속적으로 증가시켜야 할 필요가 있다. 그러나 광통신 시스템의 전송용량은 무한한 것이 아니며, 달성 가능한 스펙트럼 효율과 사용 가능한 광섬유의 대역폭의 곱에 의해 결정된다. 이 중 스펙트럼 효율은 궁극적으로 광섬유의 비선형성에 의해 제한된다. 광섬유는 기본적으로 선형성이 아주 우수하지만 입력되는 광신호의 출력이 매우 큰 경우 약간의 비선형성이 발생하여 광신호의 출력을 특정 세기 이상으로 증가시키는 경우 신호대 잡음비가 더 이상 개선되지 않는 문제가 있어 달성 가능한 스펙트럼 효율이 제한된다. 이러한 “nonlinear Shannon limit”으로 인하여 기존 단일모드 광섬유를 사용하여 광신호를 500 km 이상 전송해야 하는 경우 이론적으로 달성 가능한 최대 스펙트럼 효율은 편광다중화 기술을 적용하더라도 18 bits/sec/Hz로 제한된다^[102]. 한편, 사용 가능한 광섬유의 대역폭은 현재 광링크에서 널리 사용되고 있는 EDFA의 이득 대역폭에 의해 결정된다 할 수 있다. 따라서 현재 일반적으로 사용되고 있는 EDFA가 1530~1565 nm 대역의 소위 “C-band”에서 동작한다는 점을 고려하면 이미 실험적으로 구현된 약 35 Tbps의 광섬유당 전송용량은 nonlinear Shannon limit의 3 dB 이내로 근접한 것이며, ~20 Tbps에 달하는 상용 시스템의 전송용량도 이론적 한계의 6 dB 이내로 근접된 것임을 알 수 있다. 이에 따라 광증폭기의 대역폭을 더욱 증가시키기 위한 여러 가지 방안들이 연구되어 왔다. 예를 들면, 에르븀 첨가 광섬유의 길이를 증가시키고 이에 대한 펄핑 조건 등을 변경하여 1570~1610 nm 파장대역의 “L-band”에서 동작하는 L-band용 EDFA가 개발되었고^[103], 1490~1530 nm 파장대역의 “S-band”에서 동작하는 틀륨 첨가 광섬유 증폭기(thulium-doped fiber amplifier, TDFA)^[104], 1290~1340 nm 파장대역의 “O-band”에서 동작하는 프라세오디뮴 첨가 광섬유 증폭기(praseodymium-doped fiber amplifier, PDFA)^[105] 등도 구현되었다. 또한, 약 100 nm의 넓은 이득 대역폭을 갖도록 구현할 수 있는 반도체형 광증폭기^[106], 광섬유에서 발생하는 유도 Raman 산란 효과를 이용하여 아주 넓은 이득 대역폭을 확보할 수 있는 Raman 증폭기^[107] 등도 개발되었다. 그러나 이러한 광증폭기들은 대부분 기존 C-band용 EDFA와 비교하여 성능이 열등하다는 문제가 있다. 또한, 이와 같이 넓은 대역폭에서 동작하는 새로운 광증폭기를 사용할 수 있다고 가정하더라도 코어 직경이 8 μm에 불과한 기존 단일모드 광섬유에 1.4 W 이상의 높은

광출력을 인가하는 경우 광섬유가 녹아버리는 fiber fuse 현상이 발생할 수 있어^[108] 한 가닥의 광섬유를 통해 200채널 이상의 파장분할다중화된 광신호를 전송하는 것은 실질적으로 불가능할 것으로 판단된다. 이는 향후 광증폭기의 이득 대역폭이 대폭 증가하더라도 광통신 시스템의 광섬유당 전송용량을 현재보다 현저하게 증가시키는 것은 불가능함을 의미한다.

4.1.7. 광섬유의 전송용량 한계를 극복하기 위한 공간분할 다중방식 광통신 시스템

이와 같이 광통신 시스템의 광섬유당 전송용량이 이론적 한계치에 접근함에 따라 끊임없이 증가하고 있는 네트워크 트래픽을 수용하기 위한 추가적인 방안은 광섬유를 추가적으로 포설하는 것뿐인 것으로 인식되었다. 그러나 앞서 기술한 바와 같이 네트워크 트래픽이 매년 2 dB씩 증가한다면 이는 매 10년마다 광섬유를 100배씩 추가적으로 포설해야 함을 의미하여 실질적으로 실현이 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 새로운 혁신적 방안으로 2009년 공간분할 다중방식(space-division-multiplexing, SDM) 광통신 시스템이 제안되었다^[109]. 지금까지 장거리 대용량 광통신 시스템에서 사용되고 있는 기존의 단일모드 광섬유는 외경이 125 μm이며, 가운데에 직경이 8 μm 정도인 코어가 있다. 물론 광섬유의 색분산 효과를 회피하기 위한 분산천이광섬유(dispersion-shifted fiber, DSF), 광섬유의 비선형성으로 인한 영향을 억제하기 위한 대유효면적 광섬유(large effective area fiber, LEAF) 등 새로운 광섬유들이 이미 개발되어 사용되고 있으나 이러한 광섬유들도 모두 단일모드 광섬유의 일종이라고 할 수 있다. 공간분할다중방식 광통신 시스템은 이러한 기존의 단일모드 광섬유를 사용하는 대신 한 가닥의 광섬유 내에 한 개가 아니라 여러 개의 코어로 구성된 멀티코어 광섬유를 사용하거나 다중모드 광섬유의 각 모드에 독립적인 신호를 인가함으로써, 또는 이러한 방안들을 혼용하여 사용함으로써, 이미 한계에 근접한 광섬유당 전송용량을 대폭적으로 증가시키자는 것이다. 이때 다중모드 광섬유의 각 모드간 커플링으로 인하여 발생하는 신호의 누화는 최근 급속하게 발전되어온 DSP를 활용하여 MIMO (multiple-input multiple-output) 기술을 적용함으로써 해결이 가능할 것으로 판단되었다. 이와 같은 멀티코어/다중모드 광섬유를 사용하여 공간분할다중방식 광통신 시스템을 구현하는 경우 기존보다 광섬유당 전송용량을 100배 이상으로 증가시킬 수 있을 것으로 기대되어 지난 수년간 관련 연구가 전 세계에서 경쟁적으로 진행되었다^[110,111]. 예를 들면, 공간분할다중방식 광통신 시스템의 구현을 위하여 2011년부터 약 5년 동안 멀티코어 광섬유 내의 코어 개수가 7개에서 32개로 증가하였으며^[112], 다중모드 광섬유를 사용한 시스템에서 사용하는 모드의 개수도 2개에서 6개로 증가하였고, 이를 위한 공간분할다중화기 및 공간분할다중방식용 광증폭기 등 다양한 광부품들도 개발되었다^[113]. 또한, 공간분할다중방식 광통신 시스템의 전송용량과 관련하여 2012년에는 12개의 단일모드 코어로 구성된 멀티코어 광

섬유 한 가닥을 통해 각 코어마다 456 Gbps의 속도로 변조된 222개의 파장분할다중화된 광신호를 전송함으로써 총 91.4 b/s/Hz의 스펙트럼 효율과 1.01 Pbps의 광섬유당 전송용량이 달성되었고^[114], 2013년에는 7개의 단일모드 코어로 구성된 멀티코어 광섬유와 공간 및 파장분할다중화된 총 1402개의 광신호를 이용하여 140 Tbps의 광섬유당 전송용량을 7300 km 이상 전송함으로써 이러한 기술을 해저 케이블과 같은 초장거리 전송 시스템에도 활용할 수 있는 가능성이 확인되었으며^[115], 2014년에는 12개의 다중모드 코어로 구성된 멀티코어 다중모드 광섬유 한 가닥을 통해 12개의 코어마다 3개씩의 모드를 활용하여 720개의 공간 및 파장분할다중화된 광신호를 전송함으로써 총 247.9 bit/sec/Hz의 스펙트럼 효율과 75.6 Tbps의 광섬유당 전송용량이 달성되었고^[116], 2015년에는 22개의 단일모드 코어로 구성된 멀티코어 광섬유를 이용하여 광섬유당 전송용량이 2.15 Pbps으로 증가되었으며^[117], 2016년에는 32개의 단일모드 코어로 구성된 멀티코어 광섬유를 통해 640개의 공간 및 파장분할다중화된 광신호를 1645 km 전송함으로써 201 bit/sec/Hz의 총 스펙트럼 효율을 달성하고 이와 같이 공간 효율성이 매우 높은 멀티코어 광섬유를 활용할 수 있는 가능성을 확인하였다^[118]. 이와 같이 공간분할다중방식 기술은 지난 수년간 급속히 발전하여 실험실 수준에서는 이미 nonlinear Shannon limit에 의한 광통신 시스템의 전송용량 한계를 극복하고 광섬유당 2 Pbps 이상의 전송용량과 거의 250 bit/sec/Hz에 달하는 스펙트럼 효율을 달성하였다. 그럼에도 불구하고 공간분할다중방식 광통신 시스템은 매우 복잡하고 구현이 어려운 관계로 과연 이러한 기술을 필요한 시간 내에 실용화 할 수 있는지에 대해서는 아직 회의적인 시각도 많이 존재하고 있다. 이에 따라 일부에서는 공간분할다중 기술이 장거리 대용량 광통신 시스템에서보다는 고성능 컴퓨터를 위한 optical interconnect 등의 분야에서 먼저 사용될 것으로 전망하고 있다^[119]. 이와 같은 초대용량 공간분할다중방식 광통신 시스템을 실용화하기 위해서는 향후 (1) 공간 효율성이 우수한 공간분할다중화용 광섬유를 비롯 이에 필요한 다중화/역다중화기, 광커넥터, 광섬유 접속장치 등 각종 광학 소자, (2) 공간분할다중방식으로 인하여 사용개수가 터미널당 1000개 이상으로 크게 증가할 것이 예상되는 코히런트 방식 광송수신기들의 고밀도 집적화, (3) 멀티코어/다중모드 광섬유에 적합한 광섬유 증폭기, (4) 모드 또는 코어 간의 커플링을 해결할 수 있는 효율성이 우수하고 전력소모가 적은 MIMO 및 DSP 기술, (5) 공간분할다중방식 광통신 시스템에 적합한 광회선 분기결합기(OADM) 및 광회선 분배기(OXC) 등이 조속하게 개발되어야 할 것으로 판단된다.

4.2. 기타 광통신 기술 분야의 현황과 전망

본고에서는 제한된 지면으로 인하여 주로 장거리 광전송 시스템의 발전과정 및 현황과 전망에 대하여 기술하였다. 다음은 광통신 관련 기타 주요 분야의 동향과 전망에 대하여 간략히 기술한 것이다.

광통신 기술은 현재 대용량 전송뿐 아니라 광신호의 스위칭에도 널리 활용되고 있다. 예를 들면, 1990년대 후반 광증폭기 기반의 파장분할다중방식 광통신 시스템이 코어/메트로망에 도입되자 광계층에서 직접 광신호 단위로 스위칭하는 것이 효율적인 것으로 판단되었다. 이에 따라 광신호를 출발지로부터 목적지까지 광/전 변환 없이 순전히 광계층에서 직접 전달함으로써 속도가 느린 전자소자로 인한 성능의 제한을 회피하고, 광신호의 속도나 protocol에 상관없이 동작하는 소위 “전광 전송망(all-optical network)”을 개발하기 위한 노력이 진행되었다^[120]. 이에 따라, 광회선분기결합기(OADM) 및 광회선분배장치(OXC)와 같이 광신호를 광계층에서 직접 스위칭하기 위한 장치들이 개발되었으며, 2000년대 들어 주로 네트워크 비용과 전력사용을 절감하기 위한 목적으로 사용되기 시작하였다. 특히, 2003년경부터 도입되기 시작한 ROADM (reconfigurable optical add/drop multiplexer)은 현재 코어망 및 메트로망의 핵심 장비로 인식되고 있으며^[121], 이에 따라 관련 시장도 2020년에는 110억불 규모로 성장할 것이 예상되고 있다^[122]. 현재 ROADM은 광신호의 동작파장이나 진행방향에 무관하게 동작하도록 개발되고 있으며, 각 채널의 대역폭을 유연하게 조절할 수 있는 방안, GMPLS 등을 이용하여 ROADM 노드의 운영/관리를 자동화하는 방안 등에 관한 연구들이 활발하게 진행되고 있다.

광섬유를 각 가정까지 연결하여 FTTH (fiber-to-the-home) 방식 광가입자망을 구현하는 방안은 광통신 시스템의 개발이 시작된 1970년대 중반부터 field trial 등을 통해 구체적으로 모색되었으나^[123], 고비용으로 인해 오랜 기간 활성화되지 못하였다. 그러다 2000년대 초반 ITU 및 IEEE에서 각각 GPON 및 EPON의 표준화가 완료된 이후 급속히 발전하기 시작하였다. 이에 따라 2015년에는 전 세계 FTTH 가입자 수가 1억4400만을 돌파하였고, 2019년까지는 2억6500만으로 증가할 것이 예상되고 있으며, 이러한 결과로 2019년에는 FTTH 서비스를 통한 사업자의 매출도 1000억불을 초과할 것으로 예측되고 있다^[124]. 또한, 이와 같은 광가입자망에서 각 가입자에게 제공되는 서비스의 속도도 1980년대부터 매 10년마다 5~6배씩 지속적으로 증가하여 왔으며, 2010년경 처음으로 제공되기 시작한 1 Gbps급 FTTH 서비스는 이제 일반적인 것이 되었고, 아직 시범적이지만 2015년부터는 홍콩, 카타르, 싱가포르, 미국 등의 지역에서는 각 가입자에게 10 Gbps급 초고속 서비스를 제공하는 사업자도 등장하기 시작하였다^[125,126]. 이와 같이 빠르게 발전하고 있는 FTTH 서비스를 지원하기 위하여 2010년경에는 10G EPON 및 10G GPON이 표준화되었고, 2015년에는 40 Gbps급 용량의 NG-PON2 표준화도 완료되었다^[127]. 이에 따라, 각 가입자에게 보다 많은 용량의 FTTH 서비스를 경제적으로 제공하기 위한 다양한 새로운 방안들이 연구되고 있으며, 특히 광가입자망에 파장분할다중기술을 경제적으로 도입하기 위한 연구가 많은 관심을 받고 있다^[124].

다양한 인터넷 서비스가 활성화됨에 따라 전 세계의 데이터 센터 네트워크 트래픽은 매년 약 30%씩 증가하고 있으

며, Google 데이터 센터의 경우 2008년부터 6년 동안 트래픽이 무려 50배가량 증가하였다고 보고되었다¹²⁸⁾. 이에 따라 최근 데이터 센터 네트워크에 광통신 기술을 적극 활용함으로써 처리용량을 증대시키기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다¹²⁹⁾. 특히 이와 관련하여 현재 대두되고 있는 주요 문제로는 지속적인 트래픽 증가를 수용할 수 있는 확장성 있는 방안, 스위칭 처리용량을 증가시키기 위한 방안, 공간 및 파장분할다중기술을 적용하기 위한 실용적 방안, 설치/운영 비용 및 전력소모를 절감하기 위한 방안 등이 있으며, 이러한 문제들을 해결하기 위한 광통신 기술의 사용은 앞으로 더욱 증가할 것으로 판단된다.

광통신 기술은 해저 케이블과 같은 초장거리 전송 시스템에서도 널리 사용되고 있다. 이와 같은 광통신 기반의 해저 케이블 시스템은 1988년 AT&T가 처음으로 대서양을 가로지르는 “TAT-8”이라고 불리는 280 Mbps급 해저 광케이블 시스템을 포설한 이래 2016년까지 전 세계에 359개의 해저 케이블(계획 중 포함)이 포설되었다¹³⁰⁾. 또한, 이러한 해저 케이블 시스템의 광섬유당 전송용량은 1988년에는 불과 280 Mbps이었으나 최근 디지털 코히런트 수신기를 이용한 파장분할다중방식을 적용함으로써 18 Tbps 이상으로 증가되었다¹³¹⁾. 이와 같이 해저 케이블 시스템의 광섬유당 전송용량도 이론적 한계에 근접함에 따라 이를 극복하기 위하여 공간분할다중방식을 적용하는 방안이 연구되고 있다¹¹⁵⁾.

상기 분야 외에도 광통신 기술은 무선통신을 위한 fronthaul/backhaul 네트워크를 구축하는 데에 널리 사용되고 있으며¹³²⁾, 심우주 광통신/위성용 광통신/지상용 무선 광통신/실내 무선 광통신 등과 같은 무선 광통신 시스템도 개발되어 활용되고 있다^{133,134)}.

광통신 기술은 초기부터 각종 초고속 광/전자 부품의 발전을 유도하여 왔으며, 이러한 부품의 발전은 항상 광통신 기술이 다시 더욱 발전할 수 있는 계기가 되어 왔다. 따라서 광통신 기술의 지속적인 발전을 위해서는 새로운 첨단 광섬유를 비롯한 반도체 레이저, 광변조기, 광수신기, 광스위치 등의 각종 광 부품, 초고속 A/D 및 D/A converter, 대용량 DSP, 광대역 저잡음 증폭기 등 각종 전자부품의 발전이 매우 중요하며, 각종 디지털 신호처리 기술 및 광학적 신호처리 기술 등의 발전도 요구된다. 특히, 최근 급속하게 발전/성장하고 있는 silicon photonics 기반의 광학적 집적회로의 발전은 광통신 기술의 새로운 도약을 위해 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다¹³⁵⁾.

V. 결 어

광통신 기술은 지난 40여 년간 급속한 발전을 계속하여 왔으며, 이로 인하여 이제 우리는 언제 어디서나 서로 자유롭게 소통하고 필요한 정보에 접근할 수 있다. 광통신 기술은 또한 인터넷 사용의 대폭적 확산을 가능하도록 함으로써 현대 정보화시대의 구현에 커다란 기여를 하였다. 이러한 이유로 인하여 현재 광통신 기술은 인류의 삶에 가장 많은 영향

을 미친 기술 중 하나로 인식되고 있다.

광통신 기술의 지난 40년간 발전 속도는 과학기술의 모든 분야를 막론하고 거의 전례를 찾아볼 수 없는 것이다. 예를 들면, 광통신 시스템의 광섬유당 전송용량은 발전 초기인 1975년 45 Mbps에 불과하였으나 2015년에는 2.15 Pbps로 증가하여 지난 40년간 약 5000만 배 증가하였다. 이러한 발전 과정에서 사용된 핵심적인 기술들을 살펴보면 (1) 1980년대부터 1990년대 중반까지는 주로 더 빠른 전자소자를 사용하여 시분할다중방식 광신호의 전송속도를 높이는 전기적 방법이 사용되었고, (2) 1990년대 중반부터 2000년대 후반까지는 EDFA를 기반으로 한 파장분할다중방식 광통신 시스템을 구현하여 광학적 방법으로 광섬유당 전송용량을 대폭 증가시켰으며, (3) 2000년대 후반부터 현재까지는 디지털 코히런트 수신기술을 이용하여 광신호의 전송속도와 스펙트럼 효율을 개선하는 전기적 방법이 사용되었고, (4) 최근에는 이미 이론적 한계치에 근접한 광섬유당 전송용량을 더욱 증가시키기 위하여 멀티코어/다중모드 광섬유를 이용한 공간분할다중방식 광통신 시스템과 같은 광학적 방안이 모색되고 있다. 이러한 광통신 기술의 발전과정을 살펴보면 당시의 기술적 한계를 극복하기 위하여 전기적이 방법과 광학적 방법이 교대로 사용되어 왔음을 알 수 있다. 광통신 시스템은 우리 주변에서 실제로 널리 사용되고 있는 기술 중 가장 빠른 속도로 동작하는 분야로써, 이와 같은 발전과정을 통해 모든 과학기술분야에서 가장 원천적 문제 중 하나라고 할 수 있는 초고속 기술의 발전을 선도하여 왔으며 앞으로도 광통신 기술의 이러한 역할은 계속될 것으로 판단된다.

인터넷을 비롯한 각종 멀티미디어 서비스의 지속적인 발전 뿐 아니라 앞으로 크게 성장할 것이 예상되는 클라우드 컴퓨팅, 사물 인터넷, 지능형 교통 시스템 등을 고려하면 향후에도 네트워크 트래픽이 계속 증가할 것은 분명한 것으로 판단된다. 이에 따라 현재 기간망에서 사용되고 있는 장거리 대용량 광통신 시스템의 전송용량을 앞으로도 더욱 증가시키기 위한 다양하고 창의적인 연구가 진행되고 있다. 그러나 이미 이론적 한계치에 근접한 광섬유당 전송용량을 더욱 증가시키기 위해서는 보다 창의적이며 실용적인 새로운 방안이 개발되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 4K/8K 등의 고화질 방송 서비스가 추진됨에 따라 FTTH와 같은 광가입자망을 경제적으로 초고속화하기 위한 연구, 5G 서비스가 추진됨에 따라 발생할 것으로 예상되는 무선통신망 fronthaul 네트워크의 심각한 병목현상 해결방안, 확장 가능성 및 경제성이 우수한 데이터 센터 네트워크 구축방안 등에 관한 연구가 현재 활발하게 진행되고 있으며, 이와 관련된 각종 초고속 광소자 및 전자소자의 개발, 광학적 고밀도 집적회로의 개발, 각종 모듈의 고밀도 집적화 등도 추진되고 있다.

국내에서는 한국전기통신연구소에서 제작한 국내 최초의 광통신 시스템이 1981년 구로/안양 전화국 사이의 12 km 구간에 설치되었으며, 그 후 ETRI를 중심으로 1984년에는 45 Mbps급 시스템, 1988년에는 565 Mbps급 시스템, 1991년에는 2.5 Gbps급 시스템을 순차적으로 개발하고 국내에 대규

모로 포설하였다. 따라서 우리나라는 선진국과 비교하여 광통신 기술의 개발이 5년 정도 늦게 시작되었으나 1990년대 초반이 되면서 기술격차가 크게 줄었다고 할 수 있다. 이에 따라, 당시 우리나라는 광통신 시스템을 자급할 수 있는 세계에서 몇 안되는 국가들 중 하나가 되었으며, 이러한 성과는 국책연구개발의 대표적인 성공사례 중 하나로 인정받기도 하였다. 그러나 2000년대에 들어서면서 국내에서 개발된 초고속 대용량 광통신 시스템은 외산 장비에 밀려 거의 사라지게 되었으며, 이러한 이유로 관련분야의 연구인력이 크게 축소되어 현재는 ETRI와 일부 대학 등에서만 관련연구가 진행되고 있는 형편이다. 그러나 광통신 기술 및 이와 관련된 초고속 기술의 중요성을 고려하면 이러한 점은 매우 아쉽게 생각된다. 특히, 국내 산업의 발전단계나 경제규모를 생각하면 광통신과 같이 정보화시대의 근간이며 각종 광소자 및 전자소자의 초고속화를 유도하고 있는 핵심적인 분야를 간과할 수는 없는 것이다. 따라서 초고속 대용량 광통신과 관련된 다양한 기술분야들을 다시 육성하기 위한 종합적인 대책이 조속히 마련되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문의 축약본이 대한민국의학술원에서 2018년 1월 발간한 “학문연구의 동향과 쟁점”에 게재되었음을 밝히며 본 논문의 게재를 승인하여 주신데 대하여 감사드립니다. 본 논문의 작성은 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 2017-0-00702).

References

1. “The top 10 inventions of the 20th century,” Act for Libraries (<http://www.actforlibraries.org/the-top-10-inventions-of-the-20th-century/>).
2. “Greatest engineering achievements of the 20th century,” National Academy of Engineering, (<http://www.greatachievements.org/>).
3. “20th Century Technology,” Time Magazine, (<http://content.time.com/time/photogallery/0,29307,2026224,00.html>).
4. “A world transformed: what are the top 30 innovations of the last 30 years?,” Knowledge@Wharton, Feb. 18, 2009 (<http://knowledge.wharton.upenn.edu>).
5. “15 influential Innovations of the Past 50 Years,” CNBC, (<https://www.cnbc.com/2011/09/19/15-Influential-Innovations-of-the-Past-50-Years.html?slide=5>).
6. J. Hecht, “City of light: the story of fiber optics,” Oxford University Press (April 2004).
7. “Alcatel-Lucent unveils single-carrier 100G/200G DWDM optical line card,” Lightwave (Sept. 24, 2014).
8. G. Stix, “The triumph of the light,” Scientific American (Jan. 2001), Vol. 284, No. 1, pp. 80-86.
9. A. R. Chraplyvy, “The coming capacity crunch,” Proc. ECOC, plenary talk (Sept. 2009).

10. Cisco, “The zettabyte era: Trends and analysis,” white paper (June 7, 2017).
11. G. Kizer, “Digital microwave communication: Engineering point-to-point microwave systems,” Wiley-IEEE Press (June 2013).
12. G. J. Mullet, “Wireless telecommunications systems and networks,” Thomson Delmar Learning (Sept. 2005).
13. R. M. Jansen and R. C. Prime, “TH-3 microwave radio system: system considerations,” Bell Syst. Tech. J. **50**, 2085-2116 (1971).
14. D. A. Alsberg, J. C. Bankert, and P. T. Hutchison, “The WT4/WT4A millimeter-wave transmission system,” Bell Syst. Tech. J. **56**, 1829-1848 (1977).
15. W. D. Warters, “Millimeter waveguide scores high in field test,” Bell Laboratories Record (Nov. 1975), pp. 401-408.
16. K. C. Kao and G. A. Hockham, “Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies,” Proc. IEE **113**, 1151-1158 (1966).
17. F. P. Kapron, D. B. Keck, and R. D. Maurer, “Radiation losses in glass waveguides,” Appl. Phys. Lett. **17**, 423-425 (1970).
18. I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy, and S. Sumski, “Junction lasers which operate continuously at room temperature,” Appl. Phys. Lett. **17**, 109-111 (1970).
19. R. W. Dixon, “Remembering the million-hour laser,” Optics & Photonics News (May 2012), pp. 44-48.
20. I. Jacobs, “Atlanta fiber system experiment: overview,” Bell Syst. Tech. J. **57**, 1717-1721 (1978).
21. I. Jacobs, “Lightwave system development: looking back and ahead,” Optic & Photonics News (Feb. 1995), pp. 19-23.
22. M. I. Schwartz, W. A. Reenstra, J. H. Mullins, and J. S. Cook, “The Chicago lightwave communications project,” Bell Syst. Tech. J. **57**, 1881-1888 (1978).
23. G. P. Agrawal, “Lightwave technology: Telecommunication systems,” Wiley-Interscience (2005).
24. “Special Edition: FT series G,” The Valley Voice, AT&T Network Systems (Feb. 1986).
25. R. J. Sanferrare, “Terrestrial lightwave systems,” AT&T Tech. J. **66**, 97-107 (1987).
26. R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, and D. N. Payne, “High-gain rare-earth-doped fiber amplifier at 1.54 μm ,” Proc. OFC/IOOC (Feb. 1987), paper W12.
27. E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, and B. C. McCollum, “Erbium fiber laser amplifier at 1.55 μm with pump at 1.49 μm and Yb sensitized Er oscillator,” Proc. OFC (Feb. 1988), paper PD2-1.
28. Y. Kimura, K. Suzuki, and M. Nakazawa, “Efficient Er^{3+} -doped optical fiber amplifier pumped by a 1.48- μm high-power laser diode,” Proc. OFC (Feb. 1989), paper TUG6.
29. M. Nakazawa, Y. Kimura, and K. Suzuki, “Soliton amplification and transmission with an Er^{3+} -doped fiber repeater pumped by InGaAsP laser diodes,” Proc. OFC (Feb. 1989), paper PD2-1.
30. N. Edagawa, Y. Yoshida, H. Taga, S. Yamamoto, K. Mochizuki, and H. Wakabayashi, “904 km, 1.2 Gbit/s non-regenerative

- optical fibre transmission experiment using 12 Er-doped fiber amplifiers,” *Electron Lett.* **26**, 66-67 (1990).
31. S. Saito, T. Imai, T. Sugie, N. Ohkawa, Y. Ichihashi, and T. Ito, “An over 2,200 km coherent transmission experiment at 2.5 Gbit/s using erbium-doped fiber amplifiers,” *Proc. OFC* (Feb. 1990), paper PD2-1.
 32. H. Taga, Y. Yoshida, N. Edagawa, S. Yamamoto, and H. Wakabayashi, “459 km, “2.4 Gbit/s four wavelength multiplexing optical fibre transmission experiment using six Er-doped fibre amplifiers,” *Electron Lett.* **26**, 500-601 (1990).
 33. D. A. Fishman, J. A. Nagel, T. W. Cline, R. E. Tench, T. C. Pleiss, T. Miller, D. G. Coult, M. A. Milbrodt, P. D. Yeates, A. Chraplyvy, R. Tkach, A. B. Picirilli, J. R. Simpson, and C. M. Miller, “A high capacity noncoherent FSK lightwave field experiment using Er³⁺-doped fiber optical amplifiers,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **2**, 662-664 (1990).
 34. C. Dragone, “An NxN optical multiplexer using a planar arrangement of two star couplers,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **3**, 812-815 (1991).
 35. T. Mack, “Communications: the next wave,” *Forbes* (Oct. 6, 1997).
 36. B. Gowan, “#Ciena25: The story behind the founding of Ciena,” *Ciena*, Sept. 14, 2017 (http://www.ciena.com/insights/articles/Ciena-20-The-Founding-of-Ciena_prx.html).
 37. H. Onaka, H. Miyata, G. Ishikawa, K. Otsuka, H. Ooi, Y. Kai, S. Kinoshita, M. Seino, H. Nishimoto, and T. Chikama, “1.1 Tb/s WDM transmission over a 150 km 1.3 μm zero-dispersion single-mode fiber,” *Proc. OFC* (Feb. 1996), paper PD19-1.
 38. A. H. Gnauck, A. R. Chraplyvy, R. W. Thach, 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,” *Proc. OFC* (Feb. 1996), paper PD20-1.
 39. T. Morioka, H. Takara, S. Kawanshi, O. Kamatani, K. Takiguchi, K. Uchiyama, M. Saruwatari, H. Takahashi, M. Yamada, T. Kanamori, and H. Ono, “100 Gbit/s × 10 channel OTDM/WDM transmission using a single supercontinuum WDM source,” *Proc. OFC* (Feb. 1996), paper PD21-1.
 40. K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasahara, and T. Ono, “10.92-Tb/s (273 × 40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment,” *Proc. OFC* (Mar. 2001), paper PD24-1.
 41. S. Bigo, Y. Frignac, G. Charlet, W. Idler, S. Borne, H. Gross, R. Dischler, W. Poehlmann, P. Tran, C. Simonneau, D. Bayart, G. Veitl, A. Jourdan, and J.-P. Hamaid, “10.2 Tbit/s (256 × 42.7 Gbit/s PDM/WDM) transmission over 100 km TeraLight™ fiber with 1.28 bit/s/Hz spectral efficiency,” *Proc. OFC* (Mar. 2001), paper PD25-1.
 42. A. A. Huurdeman, “The worldwide history of telecommunications,” *Wiley-Interscience* (2003).
 43. P. E. White, “Estimated network load,” Bellcore, private communication (Jan. 1993).
 44. A. M. Ozyilko, “Measurements and mismeasurements and the dynamics of data traffic growth,” *Computer Measurement Group’s International Conference* (Dec. 2002).
 45. M. Castells, “The information age: economy, society and culture, Vol. 1-3,” *Wiley-Blackwell* (1996-1998).
 46. C. Lu, “The race for bandwidth: understanding data transmission,” *Microsoft Press* (1998).
 47. M. D. O’Dell, “Racing with an exponential or the dangers of linear thinking in an exponential world,” *Stanford symposium, Optical Internet: The Next Generation* (May 16, 2000).
 48. G. Gilder, “Fiber keeps its promise,” *Forbes ASAP* (Apr. 7, 1997).
 49. J. Wimmer, plenary talk, *OFC/IOOC 1999* (Feb. 1999).
 50. E. Kreifeldt, “MCI WorldCom’s Wimmer lays out optical roadmap,” *Fiber Optics Online* (Apr. 4, 2000).
 51. J. Hecht, “Boom, bubble, burst: The fiber optic mania,” *Optics & Photonics News* (Oct. 2016), pp. 48-53
 52. V. Cerf, “The high capacity challenge,” plenary talk, *OFC 2002* (Mar. 2002).
 53. “Global internet geography,” *TeleGeography* (2003).
 54. “The great telecoms crash,” *Economist* (July 18, 2002).
 55. L. Endlich, “Optical illusions: Lucent and the crash of telecom,” *Simon & Schuster* (2004).
 56. M. A. Wegleitner, “Maximizing the impact of optical technology,” plenary talk, *OFC/NFOEC* (Mar. 2007).
 57. A. Viglienzoni, “Evolution of products and enabling technologies for optical networks,” *Proc. Photonics in Switching* (Aug. 2008).
 58. P. Polishuk, “Network traffic growth projection,” *Information Gatekeepers Inc.* (Dec. 19, 2006).
 59. “IX backplane maximum/minimum traffic volume,” *Japan Internet Exchange Co* (June 7, 2014).
 60. “Cisco visual networking index: Forecast and methodology, 2011-2016,” *Cisco* (May 30, 2012).
 61. R. W. Tkach, “Technologies for a renaissance in long-distance optical communications,” plenary talk, *Asia-Pacific Optical Communications (APOC) Conference* (Oct. 2008).
 62. S. E. Ante, “Telecom: Back from the dead,” *Businessweek* (June 26, 2007).
 63. T. Wu, “Bandwidth is the new black gold,” *TIME Magazine* (Mar. 11, 2010).
 64. D. Hillerkuss, R. Schmogrow, T. Schellinger, M. Jordan, M. Winter, G. Huber, T. Vallaitis, R. Bonk, P. Kleinow, F. Frey, M. Roeger, S. Koenig, A. Ludwig, A. Marculescu, J. Li, M. Hoh, M. Dreschmann, J. Meyer, S. Ben Ezra, N. Narkiss, B. Nebendahl, F. Parmigiani, P. Petropoulos, B. Resan, A. Oehler, K. Weingarten, T. Ellermeyer, J. Lutz, M. Moeller, M. Huebner, J. Becker, C. Koos, W. Freude, and J. Leuthold, “26 Tbit s⁻¹ line-rate super-channel transmission utilizing all-optical fast Fourier transform processing,” *Nat. Photon.* **5**, 364-371 (2011).
 65. “ZTE displays 400-Gbps and 1-Tbps DWDM prototype,”

- Lightwave (June 18, 2012).
66. Y. Ma, Q. Yang, Y. Tang, S. Chen, and W. Shieh, "1-Tb/s per channel coherent optical OFDM transmission with subwavelength bandwidth access," Proc. OFC (Mar. 2009), paper PDPC1.
 67. R. Rios-Müller, J. Renaudier, P. Brindel, H. Mardoyan, P. Jennevé, L. Schmalen, and G. Charlet, "1-Terabit/s net data-rate transceiver based on single-carrier Nyquist-shaped 124 GBaud PDM-32QAM," Proc. OFC (Mar. 2015), paper Th5B.1.
 68. D. S. Millar¹, L. Galdino, R. Maher, M. Pajovic, T. Koike-Akino, G. Saavedra, D. J. Elson, D. Lavery, K. Shi, M. S. Erkilinc, E. Sillekens, R. I. Killely, B. C. Thomsen, K. Kojima, K. Parsons, and P. Bayvel, "A simplified dual-carrier DP-64QAM 1 Tb/s transceiver," Proc. OFC (Mar. 2017), paper M3D.2.
 69. "Recommendation ITU-T G.709/Y.1331," ITU (June 22, 2016).
 70. "The 2016 Ethernet roadmap," Ethernet Alliance (Mar. 2016).
 71. S. J. Trowbridge, "Ethernet and OTN - 400G and beyond," Proc. OFC (Mar. 2015), paper Th3H.1.
 72. N. Yoshikane and I. Morita, "1.14 b/s/Hz spectrally efficient 50×85.4 -Gb/s transmission over 300 km using copolarized RZ-DQPSK signals," J. Lightw. Technol. **23**, 108-114 (2005).
 73. A. H. Gnauck, P. J. Winzer, L. L. Buhl, T. Kawanishi, T. Sakamoto, M. Izutsu, and K. Higuma, "12.3-Tb/s C-band DQPSK transmission at 3.2 b/s/Hz spectral efficiency," Proc. ECOC (Sept. 2006), paper Th4.1.2.
 74. S. Zhang, F. Yaman, Y.-K. Huang, J. D. Downie, D. Zou, W. A. Wood, A. Zakharian, R. Khrapko, S. Mishra, V. Nazarov, J. Hurley, I. B. Djordjevic, E. Mateo, Y. Inada, "Capacity-approaching transmission over 6375 km at spectral efficiency of 8.3 bit/s/Hz," Proc. OFC (Mar. 2016), paper Th5C.2.
 75. H. Takara, T. Ohara, T. Yamamoto, H. Masuda, M. Abe, H. Takahashi and T. Morioka, "Field demonstration of over 1000-channel DWDM transmission with supercontinuum multi-carrier source," Electron. Lett. **41**, 270-271 (2005).
 76. "ITU-T recommendation G.692, Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers," ITU (Oct. 1998).
 77. "ITU-T recommendation G.694.1, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid," ITU (Feb. 2012).
 78. A. R. Chraplyvy, A. H. Gnauck, R. W. Tkach, Member, 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, "1 -Tb/s Transmission Experiment," IEEE Photon. Technol. Lett. **8**, 1264-1266 (1996).
 79. G. May, A. Solheim, and J. Conradi, "Extended 10 Gb/s fiber transmission distance at 1538 nm using a duobinary receiver," IEEE Photon. Technol. Lett. **6**, 648-650 (1994).
 80. K. Yonenaga and K. Hagimoto, "10-Gbit/s \times four-channel WDM transmission experiment over 2400-km DSF using optical DPSK direct detection scheme," Proc. OFC (Feb. 1997), paper ThS2.
 81. R.A. Griffin and A.C. Carter, "Optical differential quadrature phase-shift key (oOQPSK) for high capacity optical transmission," Proc. OFC (Mar. 2002), paper WX6.
 82. S. Beppu, K. Kasai, M. Yoshida, and M. Nakazawa, "2048 QAM (66 Gbit/s) single-carrier coherent optical transmission over 150 km with a potential SE of 15.3 bit/s/Hz," Opt. Express **23**, 4960-4969 (2015).
 83. O. E. DeLange, "Wide-band optical communication systems: Part II—Frequency-division multiplexing," Proc. IEEE, **58**, 1683-1690 (1970).
 84. T. Imai, Y. Hayashi, N. Ohkawa, T. Sugie, Y. Ichihashi, and T. Ito, "Field demonstration of 2.5 Gbit/s coherent optical transmission through installed submarine fibre cables," Electron. Lett. **26**, 1407-1409 (1990).
 85. D. MacGhan, C. Laperle, A. Savchenko, C. Li, G. Mak, and M. O'Sullivan, "5120 km RZ-DPSK transmission over G652 fiber at 10 Gb/s with no optical dispersion compensation," Proc. OFC (Mar. 2005), paper PDP27.
 86. S. Tsukamoto, D.-S. Ly-Gagnon, K. Katoh, and K. Kikuchi, "Coherent demodulation of 40-Gbit/s polarization-multiplexed QPSK signals with 16-GHz spacing after 200-km transmission," Proc. OFC (Mar. 2005), paper PDP29.
 87. 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. Lightw. Technol. **24**, 12-21 (2006).
 88. K. Kikuchi, "Phase-diversity homodyne detection of multilevel optical modulation with digital carrier phase estimation," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. **12**, 563-570 (2006).
 89. K. Roberts, "Electronic dispersion compensation beyond 10 Gb/s," in Proc. 2007 Digest of the LEOS Summer Topical Meetings (Jul. 2007), pp. 9-10.
 90. C. Laperle and M. O'Sullivan, "Advances in high-speed DACs, ADCs, and DSP for optical coherent transceivers," J. Lightw. Technol. **32**, 629-643 (2014).
 91. L. Kull, D. Luu, P. A. Francese, C. Menolfi, M. Braendli, M. Kossel, T. Morf, A. Cevrero, I. Oezkaya, H. Yueksel, and T. Toifl, "CMOS ADCs towards 100 GS/s and beyond," in Proc. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS) (Oct. 2016).
 92. P. Bower and I. Dedic, "High speed converters and DSP for 100G and beyond," Opt. Fiber Technol. **17**, 464-472 (2011).
 93. A. Sano, H. Masuda, Y. Kisaka, S. Aisawa, E. Yoshida, Y. Miyamoto, M. Koga, K. Hagimoto, T. Yamada, T. Furuta, and H. Fukuyama, "14-Tb/s (140 111-Gb/s PDM/WDM) CSRZ-DQPSK transmission over 160 km using 7-THz bandwidth extended L-band EDFAs," Proc. ECOC (Sept. 2006), paper Th4.1.1.
 94. A. H. Gnauck, G. Charlet, P. Tran, P. J. Winzer, C. R. Doerr, J. C. Centanni, E. C. Burrows, T. Kawanishi, T. Sakamoto, and K. Higuma, "25.6-Tb/s C+L-band transmission of polarization-multiplexed RZ-DQPSK signals," Proc. OFC

- (Mar. 2007), paper PDP19.
95. Y. Takushima, H. Y. Choi, and Y. C. Chung, "Transmission of 108-Gb/s PDM 16ADPSK signal on 25-GHz grid using non-coherent receivers," *Opt. Express* **17**, 13458-13466 (2009).
 96. A. H. Gnauck, P. J. Winzer, C. R. Doerr, and L. L. Buhl, "10 × 112 Gb/s PDM 16-QAM transmission over 630 km of fiber with 6.2-b/s/Hz spectral efficiency," *Proc. OFC* (2009), paper PDPB8.
 97. J. Yu, X. Zhou, Y.-K. Huang, S. Gupta, M. Huang, T. Wang, and P. Magill, "112.8-Gb/s PM-RZ-64QAM optical signal generation and transmission on a 12.5GHz WDM grid," *Proc. OFC* (2010), paper OThM1.
 98. G. Charlet, J. Renaudier, H. Mardoyan, P. Tran, O. Bertran Pardo, F. Verluise, M. Achouche, A. Boutin, F. Blache, J.-Y. Dupuy, and S. Bigo, "Transmission of 16.4 Tbit/s capacity over 2550 km using PDM QPSK modulation format and coherent receiver," *Proc. OFC* (Mar. 2008), paper PDP3.
 99. J.-X. Cai, H. G. Batshon, H. Zhang, C. R. Davidson, Y. Sun, M. Mazurczyk, D. G. Foursa, O. Sinkin, A. Pilipetskii, G. Mohs, and N. S. Bergano, "25Tb/s transmission over 5,530km using 16QAM at 5.2 b/s/Hz spectral efficiency," *Opt. Express* **21**, 1555-1560 (2013).
 100. H. Masuda, E. Yamazaki, A. Sano, T. Yoshimatsu, T. Kobayashi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, S. Matsuoka, Y. Takatori, M. Mizoguchi, K. Okada, K. Hagimoto, T. Yamada, and S. Kamei, "13.5 Tb/s (135 × 111 Gb/s/ch) no-guard-interval coherent OFDM transmission over 6248 km using SNR maximized second-order DRA in the extended L-band," *Proc. OFC* (Mar. 2009), paper PDPB5.
 101. "Product brochure: 6500 packet-optical platform," Ciena (Apr. 2017).
 102. R.-J. Essiambre, G. Kramer, P. J. Winzer, G. J. Foschini, and B. Goebel, "Capacity limits of optical fiber networks," *J. Lightw. Technol.* **28**, 662-701 (2010).
 103. H. Ono, M. Yamada, and Y. Ohishi, "Gain-flattened Er³⁺-doped fiber amplifier for a WDM signal in the 1.57-1.60- μ m wavelength region," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9**, 596-598 (1997).
 104. T. Kasamatsu, Y. Yano, and H. Sekita, "1.50- μ m-band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier with 1.05- and 1.56- μ m dual-wavelength pumping," *Opt. Lett.* **24**, 1684-1686 (1999).
 105. T. J. Whitley, "A review of recent system demonstrations incorporating 1.3- μ m praseodymium-doped fluoride fiber amplifiers," *J. Lightw. Technol.* **13**, 744-760 (1995).
 106. T. Akiyama, M. Ekawa, M. Sugawara, K. Kawaguchi, H. Sudo, A. Kuramata, H. Ebe, and Y. Arakawa, "An ultrawide-band semiconductor optical amplifier having an extremely high penalty-free output power of 23 dBm achieved with quantum dots," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 1614-1616 (2005).
 107. J. Bromage, "Raman amplification for fiber communications systems," *J. Lightw. Technol.* **22**, 79-93 (2004).
 108. R. Kashyap and K. J. Blow, "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibers," *Electron. Lett.* **24**, 47-48 (1988).
 109. A. R. Chraplyvy, "The coming capacity crunch," *Proc. ECOC*, plenary talk (Sept. 2009).
 110. M. Nakazawa, "Extremely advanced transmission with 3M technologies (multi-level modulation, multi-core & multi-mode)," *Proc. OFC* (Mar. 2012), paper OTu1D.1.
 111. D. J. Richardson, J. M. Fini and L. E. Nelson, "Space-division multiplexing in optical fibres," *Nat. Photon.* **7**, 354-362 (2013).
 112. Y. Sasaki, R. Fukumoto, K. Takenaga, K. Aikawa, K. Saitoh, T. Morioka, and Y. Miyamoto, "Crosstalk-Managed Heterogeneous Single-Mode 32-Core Fibre," *Proc. ECOC* (Sept. 2016), paper W.2.B.2.
 113. G. Li, N. Bai, N. Zhao, and C. Xia, "Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication," *Adv. Opt. Photon.* **6**, 413-487 (2014).
 114. H. Takara, A. Sano, T. Kobayashi, H. Kubota, H. Kawakami, A. Matsuura, Y. Miyamoto, Y. Abe, H. Ono, K. Shikama, Y. Goto, K. Tsujikawa, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Koshiba, and T. Morioka, "1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency," *Proc. ECOC* (Sept. 2012), paper Th.3.C.1.
 115. K. Igarashi, T. Tsuritani, I. Morita, Y. Tsuchida, K. Maeda, M. Tadakuma, T. Saito, K. Watanabe, K. Imamura, R. Sugizaki, and M. Suzuki, "1.03-Exabit/s-km super-Nyquist-WDM transmission over 7,326-km seven-core fiber," *Proc. ECOC* (Sept. 2013), paper PD3.E.3.
 116. T. Mizuno, T. Kobayashi, H. Takara, A. Sano, H. Kawakami, T. Nakagawa, Y. Miyamoto, Y. Abe, T. Goh, M. Oguma, T. Sakamoto, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, and T. Morioka, "12-core × 3-mode dense space division multiplexed transmission over 40 km employing multi-carrier signals with parallel MIMO equalization," *Proc. OFC* (Mar. 2014), paper Th5B.2.
 117. B. J. Puttnam, R. S. Luís, W. Klaus, J. Sakaguchi, J.-M. Delgado Mendinueta, Y. Awaji, N. Wada, Y. Tamura, T. Hayashi, M. Hirano and J. Marciante, "2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core fiber and wideband optical comb," *Proc. ECOC* (Sept. 2015), paper PDP.3.1.
 118. T. Mizuno, K. Shibahara, H. Ono, Y. Abe, Y. Miyamoto, F. Ye, T. Morioka, Y. Sasaki, Y. Amma, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Aikawa, K. Saitoh, Y. Jung, D. J. Richardson, K. Pulverer, M. Bohn, and M. Yamada, "32-core dense SDM unidirectional transmission of PDM-16QAM signals over 1600 km using crosstalk-managed single-mode heterogeneous multicore transmission line," *Proc. OFC* (Mar. 2016), paper Th5C.3.
 119. M. A. Taubenblatt, "Optical interconnects for high-performance computing," *J. Lightw. Technol.* **30**, 448-458 (2012).
 120. A. A. M. Saleh and J. M. Simmons, "All-optical networking - evolution, benefits, challenges, and future vision," *Proc.*

- IEEE **100**, 1105-1117 (2012).
121. T. A. Strasser and J. Taylor, "ROADMS unlock the edge of the network," IEEE Commun. Mag. **46**, 146-149 (2008).
 122. "MCP-9328: Reconfigurable optical add-drop multiplexer (ROADM) - A global strategic business report, Global Industry Analysts, Inc. (May 7, 2015).
 123. M. Kawahata, "Development of optical visual information system," in *Proc. European Electro-Optics Conferences*, SPIE (Oct. 1976), Vol. 99, pp. 47-55.
 124. Y. C. Chung, "FTTH - past, present, and future," Proc. CLEO-PR, plenary talk (Aug, 2015).
 125. "HKT offers 10-Gbps broadband FTTH in Hong Kong," Lightwave Magazine (Feb. 16, 2015).
 126. M. Zager, "10 Gigabits: The next frontier," Broadband Communities (Nov./Dec. 2015), pp. 86-89.
 127. D. Nasset, "PON roadmap," J. Opt. Commun. Netw. **9**, A71-A76 (2017).
 128. U. Hölzle, "A ubiquitous cloud requires a transparent network," Proc. OFC, plenary talk (Mar. 2017).
 129. A. Vahdat, H. Liu, X. Zhao, and C. Johnson, "The Emerging Optical Data Center," Proc. OFC (Mar. 2011), paper OTuH2.
 130. M. Burgess "Google's next submarine cable will connect Singapore to Australia," Wired (Apr. 6, 2017).
 131. "Infinera and Seaborn Set Subsea Industry Benchmark for Capacity-Reach with XTS-3300 on Seabras-1," Submarine Cable Networks (Oct. 1, 2017).
 132. P. Chanclou, A. Pizzinati, F. L. Clech, T.-L. Reedeker, Y. Lagadec, F. Saliou, B. L. Guyader, L. Guillo, Q. Deniel, S. Gosselini, S. D. LE, T. Diallo, R. Brenot, F. Lelarge, L. Marazzi, P. Parolari, M. Martinelli, S. O'Dull, S. A. Gebrewold, D. Hillerkuss, J. Leuthold, G. Gavioli, and P. Galli, "Optical fiber solution for mobile fronthaul to achieve cloud radio access network," Proc. Future Network & Mobile Summit (July 2013), pp. 1-11.
 133. V. W. S. Chan, Free-space optical communications J. Lightw. Technol. **24**, 4750-4762 (2006).
 134. X. Zhu and J. M. Kahn, "Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels," IEEE Trans. Commun. **50**, 1293-1300 (2002).
 135. D. Thomson, A. Zilkie, J. E Bowers, T. Komljenovic, G. T. Reed, L. Vivien, D. Marris-Morini, E. Cassan, L. Viro, J.-M. Fédéli, J.-M. Hartmann, J. H. Schmid, D.-X. Xu, F. Boeuf, P. O'Brien, G. Z Mashanovich, and M. Nedeljkovic, "Roadmap on silicon photonics," J. Opt. **18**, 073003, 1-20 (2016).