中国科学:信息科学 2020年 第50卷 第9期:1361-1376

SCIENTIA SINICA Informationis

纪念《中国科学》创刊 70 周年专刊·评述





# 光纤通信技术发展综述

余少华1,2,3\*、何炜1,2,3

1. 中国信息通信科技集团有限公司, 武汉 430074

2. 光纤通信技术和网络国家重点实验室, 武汉 430074

3. 国家信息光电子创新中心 (NOEIC), 武汉 430074

\* 通信作者. E-mail: yushaohuawri@sina.cn

收稿日期: 2020-04-17; 接受日期: 2020-06-11; 网络出版日期: 2020-09-23

**摘要** 光纤通信作为二战以来最有意义的四大发明之一,奠定了网络信息传输的基石,承载了全球 90% 以上数据流量,但预计其未来 20 年将遭遇"传输容量危机".本文围绕超高速率、超大容量、超长 距离、超宽灵活、超强智能 (ultra-high speed, ultra-large capacity, ultra-long distance, ultra-wideband flexibility, and ultra-powerful intelligence, 5U) 这 5 个光纤通信的发展维度开展研究,在回顾了其 50 多 年发展历程的基础上,对近 10 年来所取得的一系列最新进展进行了全面综述,并就未来 10 年甚至 20 年的演进趋势做出展望.

关键词 光纤通信,光传输,光网络

## 1 引言

2020 年是《中国科学》创刊 70 周年,同时也是光纤通信自 1966 年提出以来飞速发展半个多世纪的重要节点之年,有必要回顾过往光纤通信技术发展的一些重要节点,深入分析国内外技术动态及现状,并展望光纤通信未来 10 年甚至 20 年的技术需求和发展趋势.

在过去的 30 年, 无线频谱中传送的信息量每两年半翻一番, 互联网上每秒比特的传送量每 16 个 月翻一番, 骨干网光纤的传输带宽每 9 到 12 个月翻一番, 连接带宽呈现出 Gbps→Tbps→Pbps→Ebps →Zbps 指数型增长趋势. 作为网络信息传输基石的光纤通信网络, 承载了全球 90% 以上数据传输. 其 传输容量从 8 Mb/s 到 96×100 Gb/s, 提升 120 万倍; 传输距离从 10 公里到 3000 公里, 扩展 300 倍; 电 交叉容量从 64 M-bit 到 64 T-bit, 提高 100 万倍; 器件成本 1550 nm 光模块从 2 万元到 100 元, 降低 200 倍<sup>[1]</sup>..... 难怪 *Scientific American* 杂志曾评价: "光纤通信是二战以来最有意义的四大发明之一, 如果没有光纤通信, 就不会有今天的互联网和通信网络."

当今世界正处于"网络信息世界与自然世界和人类社会"深度融合的数字化、网络化、智能化进程中,百年一遇.未来20年,网络通信技术的发展方向是人 – 网 – 物三元万物互联及其与各行业各区

ⓒ 2020《中国科学》杂志社

**引用格式:** 余少华,何炜. 光纤通信技术发展综述. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 1361–1376, doi: 10.1360/SSI-2020-0093 Yu S H, He W. Latest survey on optical fiber communication (in Chinese). Sci Sin Inform, 2020, 50: 1361–1376, doi: 10.1360/SSI-2020-0093

域的系统性融合, 网络连接数量从几十亿到百亿级, 再发展到千亿级与万亿级, 从人 – 网二元互联发展到人 – 网 – 物三元和多元互联, 从地面的平面互联发展到空间三维互联及外太空和星际互联, 网络数据总量将从 TB 和 PB 级快速向 EB, ZB, YB 乃至 BB 级递增<sup>[1]</sup>, 视频、游戏和多媒体将占据全部 流量的 85% 以上. 面对网络流量的激增, 近 10 年来光纤通信的容量年增速已经从 20 世纪的 78% 降 至现在的 20%, 远落后于全球网络流量 45% 左右的年增速需求, 且其传输容量的进一步提升遭遇香农 (Shannon) 极限、光纤非线性、光纤可用带宽资源、光电器件指标等限制, 预计未来 20 年前后将出现 网络信息传输 "容量危机", 光纤通信急需突破性的理论和颠覆性的技术<sup>[2]</sup>.

光纤通信涵盖非常广阔的研究领域,光纤光缆、光电器件和光网络系统 3 个层面相辅相成,合力推动光纤通信不断向超高速率、超大容量、超长距离、超宽灵活、超强智能 (ultra-high speed, ultra-large capacity, ultra-long distance, ultra-wideband flexibility, and ultra-powerful intelligence, 5U) 5 个维度升级演进<sup>[3]</sup>.本文首先简要回顾了光纤通信的 4 个主要发展时期,然后在详细介绍了当前热点技术及研究进展的基础上,最终推断预测光纤通信未来的技术走向和研究难题.

#### 2 演进历程

从 1960 年, 美国科学家希奥多·哈罗德·梅曼 (Theodore Harold Maiman) 发明第 1 个红宝石激 光器解决了光源问题开始, 人类逐步揭开了光纤通信的神秘面纱; 到 1966 年, 华裔科学家高锟提出光 导纤维作为信息传输介质的可行性; 再到 1970 年, 美国康宁公司 (Corning Incorporated) 拉出了第 1 根衰减为 20 dB/km 的低损耗石英光纤; 与此同时, 美国贝尔实验室 (Alcatel-Lucent Bell Labs) 成功 研制了室温下连续工作的双异质结半导体激光器. 光纤和激光器的结合促使光纤通信技术从实验室研 究步入到实用化工程应用, 标志着人类通信史开启新篇章. 此后 50 年中, 新技术的不断引入推动着光 纤通信传输速率、容量、距离的持续提升, 传输容量呈现每 10 年 1000 倍的爆炸式增长, 发展速度前 所未有, 其历程可大致分为 4 个主要时代.

第1个是逐段光电再生系统 (1977~1995): 早期跨段式光电再生传输系统的容量取决于收发器的接口速率,无论是在商用系统还是实验研究中,接口速率的增长都非常缓慢. 图1<sup>[4]</sup>显示了商用系统中的接口速率大约每年提升20%,而实验研究中的接口速率增长更慢,每年约为14%. 其间主要采用时分复用 TDM 技术推动传输容量的提升,从多模光纤到单模光纤,再到同步数字体系 SDH,系统容量约以每年0.5 dB 的速率增长.

第 2 个是放大的色散管理系统 (1995~2008): 实用型光放大器 EDFA 的发明堪称光纤通信史上的一个里程碑, 它使得直接进行光中继的长距离高速传输成为可能, 并促成高成本效益的 WDM 系统的诞生. 20 世纪 90 年代初期, 几项与 EDFA 提供带宽中光纤非线性管理相关的核心发明, 使得商用WDM 系统容量从 20 世纪 90 年代中期到 21 世纪初以每年 100% 的速度 (3 dB/年) 显著增长, 同样, 实验研究的增长速度比商用系统慢, 为每年 78%, 如图 1 所示. WDM 结合 EDFA 技术开启了光纤通信的新纪元, 通过增加传输的信道数, 传输容量呈现爆炸性增长.

第3个是放大的数字相干系统 (2008~至今):数字相干接收技术的引入,使得基本被占满的频谱 资源得以更好的利用,系统谱效率 (spectral efficiency, SE)进一步提升,WDM 的传输容量持续突破,单信道 Tb/s 级传输系统陆续出现,WDM 传输系统容量持续增长至单纤 100 Tb/s 左右.但非线性效 应越发明显,引起系统信噪比急剧恶化,非线性香农极限限制了传输容量的进一步增长.基于众多的 研究结果,2010年 Nature 杂志发表文章指出 100 Tb/s 是商用标准单模光纤传输系统容量的一个关键台阶 <sup>[5]</sup>.目前最高水平的研究成果也验证了这点 (单模单纤的最高传输容量为 102.3 Tb/s,谱效率



图 1 (网络版彩图)单载波接口速率和 WDM 容量方面的产品及实验记录<sup>[4]</sup>

Figure 1 (Color online) Products and research records of single carrier interface rates and WDM capacities



图 2 (网络版彩图)关键技术推动传输容量与距离的持续提升

为 9.1 bit/s/Hz), 如图 2 所示.

第4个是空分复用系统 (202x~未来): 2012 年后, 单模单纤 WDM 光传输系统容量提升对于现有 技术来讲比较受限, 传统技术路径都遭遇性能瓶颈, 引入空间这一还没有被利用的维度参数被认为是 当前和今后一段时间内超大容量光传输的主要发展方向之一. 模式复用和多芯复用等空分复用技术的

Figure 2 (Color online) Key technologies promote continuous improvement of transmission capacity and distance



图 3 (网络版彩图) 光纤通信的五个维度发展方向 Figure 3 (Color online) Five development directions of optical fiber communication

相继出现,使得光纤通信系统容量达到 Pbit 量级或更高.未来,空分复用还可将系统传输容量提升多 个数量级 (也存在一些缺点,例如空分复用无法有效降低数据流量的比特成本、无法与现有技术和存 量网络后向兼容及平滑演进、缺乏技术成熟度和生产制备可靠性、标准化滞后等,也有一些专家认为 这不是光纤通信的主流方向),再次给光纤通信带来容量大幅提升的机遇.

### 3 发展现状

光纤通信的发展状况可以从 5 个维度进行解析, 如图 3 所示. 网络带宽需求的"恒不足", 使得超高速率、超大容量、超长距离传输成为光纤通信矢志不渝的追求; 多业务分组化综合承载对光网络的 光层加电层弹性灵活组网提出迫切要求, 软件定义网络及人工智能技术的引入使得构建超强智能的光 网络成为可能.

#### 3.1 超高速率超大容量超长距离传输

近 10 年来, 互联网流量增速已大大超越光传输的容量增速, 提高光纤的信道速率、系统容量和 传输距离的需求日益迫切. 早期光纤通信曾经聚焦于相干光接收, 但光源性能、光锁相环难以实现等 制约了其应用. 在 1993 年, 业界提出了基于 DSP 的相干光接收技术, 但当时的 CMOS 水平并不能 体现出相干光接收相对于直接探测的优势. 经过多年的发展, CMOS 技术水平得到了极大提高, 可以 支撑高速光纤通信的演进需求. 在 2.5 Gb/s, 10 Gb/s, 40 Gb/s 直调直检系统中, 色散等光纤信道的 损伤是演进中主要考虑的因素, 谱效率则无需关注. 但在 40 Gb/s 向 100 Gb/s 演进的过程中, 信道 损伤和谱效率都是必须考虑的重要因素. 100 Gb/s 开启了光纤通信的数字相干系统时代, 相干光接收 的 PDM-QPSK 成为其解决方案. 相干光接收不仅是实现高阶调制和偏振复用的基本要求, 而且能够 在电数字域对光纤传输中的信道损伤进行补偿. 在 100 Gb/s 向 400 Gb/s, 1 Tb/s 演进的过程中, 超 100 Gb/s 技术必然还是以相干光接收为基础, 信道损伤不再是焦点, 主要的注意力集中到如何提升系 统谱效率.



图 4 (网络版标图) 按7元纤进信苏玩谷里的 5 计初连维度 5 Figure 4 (Color online) Five physical dimensions to improve the capacity of optical fiber communication system

基于系统容量 (*C*) 取决于并行空间路径数量 (*M*)、系统带宽 (*B*) 和谱效率 (SE) 之积 (*C* = *M*×*B*× SE) 可知,在光通信带宽资源有限的情况下,实现超高速率超大容量超长距离光传输系统的实质就是不断提升空间并行度和系统谱效率,其技术路径主要聚焦于 3 种实现方式.

一是高阶调制技术,通过提升码元速率及码元调制阶数,尽可能获取单位光带宽下的信号传输速率. 然而由于核心器件如数模转换芯片 (digital-to-analog converter, DAC)、模数转换芯片 (analog-todigital converter, ADC) 的限制,码元速率提升有限,且随着调制阶数的上升,调制信号对激光器线宽 及稳定性要求增高,对接收端 ADC 的采样速率及采样精度要求增高,引入的系统非线性效应也越发 显著,对系统各种损伤也更加敏感,如何实现高谱效率和抗损伤的高阶调制是高速大容量相干光传输 的关键.

二是频谱超级信道技术,通过减小信号频带间的保护间隔获取更多的有效传输信道,主要采用超 奈奎斯特 (Nyquist) WDM 和 OFDM 两种方式. 超奈奎斯特本质上是以牺牲数字信号处理 (digital signal processing, DSP) 技术的资源运算抵抗引入的码间干扰,从而获得系统谱效率的提升,其受限于 硬件条件;而 OFDM 虽然其固有的正交性使得系统不受信道间串扰影响,然而其抵抗色散及信道估计 引入的额外开销、多载波固有的高峰均比引起的非线性效应等问题限制了系统谱效率的进一步提升.

三是空分复用技术,主要采用模式复用及多芯复用.增加新的参数维度可扩展信号的加载范围, 而新维度的引入存在模式串扰及模式色散等复杂的信道环境问题,需要大量数字信号处理运算和开销 做信道均衡,减少信道间干扰及降低系统冗余信息,这些问题的存在又制约了系统谱效率的提升.

因此,研究高速光通信系统中的先进调制技术和高阶调制格式、完善数字信号处理算法、探索新的复用维度光传输系统架构等关键技术,在有限的带宽资源下提升空间并行度和系统谱效率,对于实现超高速率超大容量超长距离光传输系统显得尤其必要.图 4<sup>[6]</sup>显示了可用于光纤通信中调制和多路 复用的 5 个物理维度.

Table 1      Test records of ultra high speed and ultra large capacity transmission system in single mode optical fiber							
Capacity (Tb/s)	Modulation format	Band	SE (bit/s/Hz)	Distance (km)	Institution	Year	
64	107G-PDM- $36$ QAM	C, L	8	320	Bell Lab	2010	
69	171.2G-PDM-16QAM	C, L+	6.4	240	NTT Lab	2010	
101.7	294G-PDM-128QAM-OFDM	C, L	11	165	NEC Lab	2011	
102.3	548G-PDM- $64$ QAM-SC-FDM	C, L+	9.1	240	NTT Lab	2012	
63	183.3-PDM-OFDM-16QAM	C, L	6.85	160	WRI	2013	
100.3	320.7G-PDM-128QAM-DFTS OFDM	C, L	10.7	80	WRI	2014	
66	Single carrier 2048QAM	C, L	15.3	150	Tohoku University	2015	
115	460G-PCS- $64$ QAM	S, C, L	9.2	100	Bell Lab	2017	
120	385G-PDM- $256$ QAM	C, L	10.99	630	Xtera Communication	s 2018	
150.3	PDM-128QAM	S, C, L	11.05	40	NTT Lab	2018	

表 1 超高速率超大容量单模光纤传输系统实验记录 [7~15]

表 2 超高速率超大容量少模光纤传输系统实验记录 [16~22]

Table 2 Test records of ultra high speed and ultra large capacity transmission system in few-mode optical fiber

Capacity (Tb/s)	Modulation format	Mode	SE (bit/s/Hz)	Distance (km)	Institution	Year
57.6	PDM-QPSK	3	12	119	TU Eindhoven	2012
24.6	PDM-16QAM	12	32	177	Bell Lab	2013
21.6	PDM-16QAM	15	43.63	22.8	Bell Lab	2015
115.2	PDM-QPSK	10	29	125	Bell Lab	2015
200	PDM-DFTS-OFDM-32QAM	3	21.375	1	WRI	2015
266.1	PDM-16QAM	6	36.7	90.4	KDDI Lab	2018
280	PDM-64QAM	3	30	93.34	NICT	2018
402.7	PDM-16QAM	10	47	48	KDDI Lab	2019

当前,光传输系统的研究正在经历一个新概念、新技术层出不穷的极度活跃的发展时期.光的幅度、时间/频率、正交相位和偏振 4 个物理维度已通过高阶调制格式、数字相干接收、偏振复用、频分复用等光传输技术被利用到接近极限,多模多芯等空间维度也被相继开发,促进了系统容量的不断提升.光纤通信向单信道速率 1 Tb/s 演进,单纤容量向 100 Tb/s 发展,已接近普通商用单模光纤传输系统的香农极限.未来,光纤通信将由 Tbit 级向 Pbit 级,甚至 Ebps, Zbps 级演进,将主要依赖于空分复用技术.各类光纤的超高速率超大容量超长距离光传输系统的业界最高水平不断被刷新,具体如表 1~5<sup>[7~43]</sup> 所示.

武汉邮电科学研究院近年来在超高速率超大容量超长距离光传输实验方面取得一系列进展<sup>[44~49]</sup>. 超高速率方面,2010年利用低密度奇偶校验编码 (low density parity check code, LDPC)和高阶调制 技术相结合的方式,在保证高谱效率的同时实现了单信道 1 Tb/s 1040 km 标准单模光纤无误码传 输.超大容量方面,相继在 2012及 2013年利用 PDM-OFDM-16QAM 调制技术分别实现了 C 波段 30.7 Tb/s 80 km 和 C+L 波段 67.44 Tb/s 160 km 标准单模光纤传输系统实验; 2014年采用离散傅里 叶 (Fourier) 变换扩展正交频分复用 (DFT-S OFDM) 128QAM 调制方式完成了 C+L 波段 100.3 Tb/s 80 km 标准单模光纤传输系统实验,并成功入选当年两院院士评选的"中国十大科技进展新闻"; 2015 年实现 3 模式 200 Tb/s 超大容量模分复用及波分复用光传输系统实验; 2016年完成 7 芯单模光纤

Table 3      Test records of ultra high speed and ultra large capacity transmission system in multi-core optical fiber						
Capacity (Tb/s)	Modulation format	Core	SE (bit/s/Hz)	Distance (km)	Institution	Year
112	PDM-QPSK	7	14	76.8	OFS Lab	2011
305	PDM-QPSK	19	30.5	10.1	NICT	2012
1010	PDM-32QAM	12	91.4	52	NTT Lab	2012
110	PDM-QPSK	7	22.4	6370	KDDI Lab	2013
2150	PDM-64QAM	22	215.6	31	NICT	2015
560	DFT-s PDM-OFDM-32QAM	7	59.95	10	WRI	2016
1060	PDM-16QAM-OFDM	19	113	1	WRI	2018
596	PDM-16/256QAM	4	42.67	54	NICT	2020

表 3 超高速率超大容量多芯光纤传输系统实验记录 [23~28]

## 表 4 超高速率超大容量多芯少模光纤传输系统实验记录 <sup>[29~33]</sup>

 ${\bf Table \ 4} \quad {\rm Test \ records \ of \ ultra \ high \ speed \ and \ ultra \ large \ capacity \ transmission \ system \ in \ multi-core \ and \ few-mode \ optical \ fiber \ }$ 

Capacity $(Tb/s)$	Modulation format	Mode/Core	SE $(bit/s/Hz)$	Distance (km)	Institution	Year
1050	PDM-32QAM-OFDM	2/12	109	3	NEC Lab	2012
2050	DP-QPSK	6/19	456	9.8	KDDI Lab	2016
1200	PDM-256QAM	3/4	130.4	3.37	NICT	2018
10160	PDM-64QAM	6/19	1099.9	11.31	KDDI Lab	2018
10660	PDM-64/256QAM	3/38	1158.7	13	NICT	2020

表 5 超长距离光纤传输系统实验记录 <sup>[34~43]</sup>

Table 5 Test records of ultra long distance optical fiber transmission system

Capacity (Tb/s)	Distance (km)	Capacity×Distance (Tb/s×km)	Fiber	Institution	Year
30	6630	198900	Single-mode	TE SubCom	2012
44.1	9100	401310	Single-mode	TE SubCom	2013
54	9150	494100	Single-mode	TE SubCom	2014
52.2	10230	534000	Single-mode	TE SubCom	2015
140.7	7326	1025000	Multi-core $(7)$	KDDI Lab	2015
65	6600	429000	Single-mode	Bell Lab	2016
70.46	7600	535496	Single-mode	TE SubCom	2017
51.5	17107	881010	Single-mode	TE SubCom	2017
25.4	10285	261239	Single-mode	Bell Lab	2018
314.5	8007	2518201.5	Multi-core $(19)$	NICT	2019
130.8	12700	1661160	Multi-core (12)	TE Subsea Communications LLC	2019
172	2040	350880	Multi-core $(3)$	NICT	2020

560 Tb/s 超大容量空分复用及波分复用光传输系统实验; 2018 年基于自主研制的具有自主知识产权的核心光电器件和单模 19 芯光纤, 实现了 1.06 Pb/s 超大容量空分复用及波分复用光传输系统实验. 超长距离方面, 2012 年分别完成了单信道 1.031 Tb/s 12160 km 和多信道 168×100 Gb/s 2240 km 标 准单模光纤传输系统实验.

#### 3.2 超宽灵活超强智能组网

光纤通信不仅在"三超"传输方面取得长足进步,而且在超宽灵活超强智能组网方面取得的技术进展也同样引人瞩目.所谓超宽灵活,即超级带宽下具有灵活的业务上下和组网能力.尽管早在2000年前后可重构网络的概念就被引入到光网络系统中,但直到2010年,随着全光交换技术的广泛商用以及相干传输系统的引入,光网络才开始采用网状组网,并具备更高维度的交换,灵活的波长上/下,以及提供远程配置、保护和恢复等功能.虽然,组网功能的扩展可能被视为与相干收发器的引入之间没有必然联系,但相干系统确实为灵活组网提供了一些关键优势,例如它消除了在分插复用节点进行色散补偿的需求,允许传输格式和速率适应于链路距离和可用信道带宽,并且通过接收器处的数字处理提供陡峭的接收滤波等.

综合承载业务的 IP 分组化趋势,推动光网络实现光层加电层的弹性灵活组网,灵活光网络技术 应运而生. 它通过硬件的灵活可编程配置,实现传送平面资源可按需软件动态调整,提升光网络整体 性能和资源利用率.灵活光网络架构及组成如图 5<sup>[50]</sup> 所示,其主要包括弹性线路侧接口和可重构光分 插复用器两大部分.其中,弹性线路侧接口支持灵活可变栅格 (flex grid)、灵活调制收发 (flex TRx) 和 灵活电层封装 (flex OTN) 3 大核心技术;可重构光分插复用器具备方向无关 (directionless)、波长无关 (colorless)、冲突无关 (contentionless) 和栅格无关 (gridless/flexible grid) 4 大关键特性.

可重构光分插复用器 (reconfigurable optical add-drop multiplexer, ROADM) 实现了光层波长级的 自动调度和恢复,将传统光链路连接成为可重构网络 (如今,已在一些大型网络中应用节点维度为 16 的 ROADM). 而随着 ROADM 节点维度的增加,波长选择开关 (wavelength selective switch, WSS) 作 为实现 ROADM 高效内部连接的关键部件,其性能的提升也面临越来越大的挑战. WSS 包括一个光开 关阵列,负责所有 DWDM 波长通道的动态路由、阻塞和衰减. 实现 WSS 光器件有多种方法,如微机 电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS)、液晶 (liquid crystal, LC) 和硅基液晶 (liquid crystal on silicon, LCoS) 等. 由于基于 LCoS 的 WSS 能够支持低驱动电压、灵活可变栅格和高端口数,在当 前 WSS 现有产品中占据有利位置. 自 2006 年面市以来,基于 LCoS 的 WSS 不断发展,端口数量也从 之前的 1×2, 1×4 发展到 1×8, 1×9,再到 1×16 和 1×20,如今商用 WSS 的较大尺寸限制在 1×32. 另 外,为了实现 "四无" ROADM 节点的冲突无关特性,未来对于 WSS 器件的端口需求将是  $M \times N$ 型. 2015 年 5 月,武汉邮电科学研究院自主研制了具备 1×9 端口切换功能的可变带宽波长选择开关样机, 其工作波长范围覆盖 C 波段,插入损耗低于 6 dB,带宽可调范围 10 GHz~5 THz,步长小于 7 GHz. 基 于该 WSS 设计,研制了具备 "四无"特性的新型 ROADM 全光交换节点样机,实现最大 8 维度,每维 度支持 80 波,支持 10 Gbps, 100 Gbps, 400 Gbps 和 1 Tbps 4 种速率灵活切换的可变带宽全光交换, 达到当时国际上使用 LCoS 器件同类产品的先进水平.

在传统的电信核心网络领域, L3/L2 层 IP/MPLS 数据网络和 L1/L0 层 TDM/WDM 传送网络有 着不同的体系结构、交换技术、控制和管理机制. 此外, 在数据网中控制平面和转发平面是紧耦合的, 而传送网则保持数据平面和控制平面的分离. 面对如此差异, 将两个分层隔离的网络统一成"一张网" 是极具挑战性的. 所幸具有转控分离、逻辑集中控制和开放 API 3 大特性的软件定义网络 SDN 技术 的引入, 为实现"IP + 光"跨层协同融合的超强智能光网络提供了有效途径, 其演进步骤如图 6 所示. 第 1 阶段是 IP 与光层独立静态协同; 第 2 阶段通过通用多协议标签交换 (generalized multiprotocol label switching, GMPLS) 中的路径计算单元 (path computation element, PCE) 实现 IP 与光层动态协 同; 第 3 阶段提取并整合多层控制平面以满足多层多域全网集中统一管控; 第 4 阶段是 IP 与光层协



图 5 (网络版彩图) 灵活光网络架构及组成<sup>[50]</sup> Figure 5 (Color online) The architecture and composition of flexible optical network

同融合构建一张超强智能的全业务统一承载网.当前, SDN 技术正逐步引入现网商用, 光传送网络尚 处于第 3 阶段早期.

## 4 未来展望

#### 4.1 超高速率超大容量超长距离传输

可以预见,未来全球网络流量还将持续以 45% 左右的指数增长,而接口速率和光纤容量仅以每年约 20% 的速度递增,两者之间显示出日益严重的差距,"容量危机"愈演愈烈.这种增长率的差异从根



图 6 (网络版彩图) IP 与光跨层协同融合的超强智能光网络演进步骤

Figure 6 (Color online) Evolution steps of ultra-strong intelligent optical network based on IP and optical cross layer cooperation

本上源于遵循摩尔定律 (Moore's Law) 的数字集成电路技术 (推动用于生成、处理和存储信息的设备 发展) 和模拟高速光电技术 (推动用于传输信息的设备发展) 之间的固有尺度差异.

由于光的幅度、时间/频率、正交相位和偏振 4 个物理维度都已被充分利用到极致,且单纤容量正 在迅速逼近其基本的香农极限,因此根据等式 *C* = *M* × *B*× SE 可知,唯有通过进一步扩展更宽的频 带 (*B*) 和更多的空间并行度 (*M*) 才能大幅提升光纤通信的系统容量.未来,超高速率超大容量超长 距离光传输技术主要围绕这两个可伸缩性选项开展研究.

扩展频带的超宽带系统包括两个独立且同等重要的方面:跨宽带窗口的低损耗光纤,以及能够覆盖整个系统带宽无缝运行的光学子系统(如光放大器、激光器和滤波器).这两个方面对于利用已有光 纤线路(骨干和城域传输网络)和新建部署光纤线路(海底光缆和数据中心互联场景)有着不同的影 响.对于现有的绝大多数商用已部署光纤而言,将仅使用的C波段(约1530~1565 nm,即4.4 THz)扩 展到 O~L 全波段(约1260~1625 nm,即53.5 THz),理论上可获得约12倍的带宽增益,但由于水峰 等物理限制,实际仅能获得约5倍的容量系数.对于多种更宽频带、更低损耗的新型光纤,例如光子 晶体空心光纤和嵌套抗共振无节空心光纤,虽然理论上获得较为乐观的预测,但在实践中却难以实现. 并且在大多数工程领域,包括微波和光学领域,组件和子系统的复杂度随着其相对带宽的增加而提升, 每比特成本增长迅速.因此,相对于未来网络带宽成百上千倍的增长需求而言,在频率域中进行扩展 无法有效低成本地解决长期容量瓶颈问题,但仍是扩展光纤通信容量的一个选项.



图 7 (网络版标图) WDM×SDM 资源起阵以及文择 SDM 限制的观探集成汉本 <sup>4-4</sup> Figure 7 (Color online) WDM×SDM resource matrix and array integration technology supporting SDM transmission

从长远来看,空间并行性是未来显著扩展系统容量唯一切实可行的选择. 空分复用 (space division multiplexing, SDM) 使用多个并行的空间路径倍增单通道的波长容量, WDM×SDM 矩阵如图 7 左侧 所示. WDM×SDM 矩阵的每一行表示一个空间路径内的波长复用,每一列表示相同载波频率下的多 个并行空间路径,每个最小单元表示使用单个光调制器调制到单个光载波上并使用单个光接收器检测 的光信号. 一个逻辑通道可以由同一空间路径下的不同波长构成 (频谱超级信道),也可以由同一波长 跨越多条并行路径构成 (空间超级信道),更有甚者可以是两者的组合 (混合超级信道). 过去几年 SDM 的研究主要集中在多芯和少模两类新型光纤上,未来无论哪种空分复用技术或者超级信道结构被最终 应用于商业化,光学元件的规模集成都将是必不可少的,它可以有效地降低每比特的成本及能耗. 规模 集成的难点主要包括 3 个方面: 一是光电阵列集成; 二是光电混合或单片集成,即光电阵列与 CMOS ASIC 的紧密集成; 三是整体 DSP 光电集成,即对光 + 电 + DSP 三者进行协同设计,以补偿由于高 集成密度而带来的性能缺陷,具体见图 7<sup>[51]</sup> 右侧.

#### 4.2 超宽灵活超强智能组网

除了上面讨论的空分复用及光电集成技术外,频谱选择与空间超级信道的交换对于未来光网络组 网而言也有着重要影响.如何将已有的适用于 WDM 网络的 ROADM 架构扩展到 WDM×SDM 的情 况下?研究具有低阻塞率的 WDM×SDM 网络交换架构不仅意味着更大的系统容量,而且还能简化超 级信道的分配算法.未来可能的适用于 WDM×SDM 网络的空间交换节点架构如图 8<sup>[52]</sup>所示,其完全 基于光子交叉连接 (photonic cross connect, PXC) 技术.输入和输出的每个空间链路都需要经过光放 大和动态增益均衡 (dynamic gain equalizer, DGE),而中间巨大的空间交换架构采用严格的三级无阻 塞 Clos 网络,其中第1级和第3级与节点维度相关,中心级提供各维度的并行交叉连接.信号上/下 功能使用额外的空间维度,并且可以保留波长交换以提供灵活的子载波复用.

另一方面,人们还希望提升光网络组网的自动化及智能化水平,最终实现网络"即插即用"功能, 而无需任何人工干预和规划,最大限度地降低网络运营成本.在物理层,这将导致人类"零接触"网络, 并通过人工智能和机器学习实现"零思考"的网络部署,即网络的各种组件将由机器人根据需要自动 添加/删除,并为任何服务自动提供所需的带宽连接及管理.为了实现完全"零接触"网络自动化,该 自治网络需要包含3个基本功能要素:传感器、执行器和控制器,三者必须共同作用,才能实现所需的



图 8 (网络版彩图) 未来可能的适用于 WDM×SDM 网络的空间交换节点架构<sup>[52]</sup> Figure 8 (Color online) Possible future spatial switching node architecture for WDM×SDM networks

网络智能. 在数字相干系统中, 传感器既可以作为相干光收发器的嵌入功能, 通过其自适应算法自动获 取网络运行的物理参数, 也可以采用独立部署的传感元件实现. 从光物理层的角度来看, 执行器是灵 活的线路卡以及动态的光交换, 动态调整链路速率和信道分配以适应不同的传输需求. 最后, 为了建 立 "网络大脑", 需要开放接口的通用抽象, 以允许 SDN 将跨网络堆栈和跨各种功能的网络元素整合 在一起<sup>[53]</sup>.

未来 20 年, 网络通信的人工智能化将集云网、感知、大数据和算法于一体<sup>[54]</sup>, 自感知、自适应、 自学习、自执行、自演进、以网络为基础的群智应用 (网络 + AI) 将成为重要趋势. 对于光网络而言, 在通往"零接触"和"零思考"网络的道路上, 以整体和跨层的思维方式解决网络灵活性和自治性方面 的问题, 将是未来的研究方向.

#### 5 结束语

在《中国科学》创刊 70 周年之际,本文回顾了光纤通信自诞生以来半个多世纪的飞速发展,并基于当下最新的研究现状推断其在未来中长期的技术演进趋势(信息光电子、网络与通信、6G 移动通信等发展趋势已在文献[55~58]中详述,本文不再赘述).光纤通信先后经历了逐段光电再生系统时代和放大色散管理系统时代,当下正处于数字相干系统时代,空分复用系统将有用场.超高速率、超大容量、超长距离传输是光纤通信永恒不变的发展主题,超宽灵活、超强智能组网是其不容忽视的演进维度.未来 10 年甚至 20 年,光纤通信无论是在光传输还是在光交换方面,利用和整合并行空间路径支撑网络大幅容量提升也是一条有效路径;而在光网络智能化方面,软件定义光网络将进一步向人工智能光网络演化.

#### 参考文献 -

- 1 Yu S H. Ten characteristics of network communication technology. People's Posts and Telecommunications News, 2018-08-16 (005) [余少华. 网络通信技术呈十大特征. 人民邮电报, 2018-08-16 (005)]
- 2 Yu S H. The seven technical walls of network communications and the primary exploration of trends. Study Opt Commun, 2018, 44: 1–7 [余少华. 网络通信七个技术墙及后续趋势初探. 光通信研究, 2018, 44: 1–7]
- 3 Yu S H, Hu X Z. Research on the Leading Edge of Ultra High Speed, Ultra Large Capacity and Ultra Long Distance Optical Fiber Transmission System. Beijing: Science Press, 2014 [余少华, 胡先志. 超高速超大容量超长距离光纤传输系统前沿研究. 北京: 科学出版社, 2014]
- 4 Winzer P J. Scaling optical fiber networks: challenges and solutions. Opt Photonics News, 2015, 26: 28–35
- 5 Luo M, Li C, Yang Q, et al. 100.3-Tb/s (375×267.27-Gb/s) C- and L-band transmission over 80-km SSMF using DFT-S OFDM 128-QAM. In: Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference, Shanghai, 2014
- 6 Winzer P J. Making spatial multiplexing a reality. Nat Photon, 2014, 8: 345-348
- 7 Zhou X, Yu J, Huang M F, et al. 64-Tb/s (640×107-Gb/s) PDM-36QAM transmission over 320 km using both pre- and post-transmission digital equalization. In: Proceedings of 2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), 2010. 1–3
- 8 Sano A, Masuda H, Kobayashi T, et al. 69.1 Tb/s (432×171 Gb/s) C- and extended L-band transmission over 240 km using PDM-16-QAM modulation and digital coherent detection. In: Proceedings of 2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), 2010. 1–3
- 9 Qian D, Huang M, Ip E, et al. 101.7-Tb/s (370×294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM transmission over 3×55-km SSMF using pilot-based phase noise mitigation. In: Proceedings of 2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), 2011. PDPB5
- 10 Sano A, Kobayashi T, Yamanaka S, et al. 102.3-Tb/s (224×548-Gb/s) C- and extended L-band all-Raman transmission over 240 km using PDM-64QAM single carrier FDM with digital pilot tone. In: Proceedings of 2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), 2012. 1–3
- 11 Li C, Luo M, Xiao X, et al. 63-Tb/s (368 × 183.3-Gb/s) C- and L-band all-Raman transmission over 160-km SSMF using PDM-OFDM-16QAM modulation. Chin Opt Lett, 2014, 12: 040601–040604
- 12 Luo M, Li C, Yang Q, et al. 100.3-Tb/s(375×267.27-Gb/s) C- and L-band Transmission over 80-km SSMF Using DFT-S OFDM 128-QAM. In: Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference, Shanghai, 2014. AF4B.1
- 13 Renaudier J, Meseguer A C, Ghazisaeidi A, et al. First 100-nm continuous-band WDM transmission system with 115 Tb/s transport over 100 km using novel ultrawideband semiconductor optical amplifiers. In: Proceedings of the 43rd Europeen Conference on Optical Communication, Gothenburg, 2017. 1–3
- 14 Ionescu M, Galdino L, Edwards A, et al. 91 nm C+L hybrid distributed Raman-Erbium-Doped fibre amplifier for high capacity subsea transmission. In: Proceedings of the 44th Europeen Conference on Optical Communication, Roma, 2018. Mo4G.2
- 15 Hamaoka F, Minoguchi K, Sasai T, et al. 150.3-Tb/s ultra-wideband (S, C, and L Bands) single-mode fibre transmission over 40-km using 519 Gb/s/A PDM-128QAM signals. In: Proceedings of the 44th Europeen Conference on Optical Communication, Roma, 2018. Mo4G.1
- 16 Sleiffer V A J M, Jung Y, Inan B, et al. Mode-division-multiplexed 3×112-Gb/s DP-QPSK transmission over 80-km few-mode fiber with inline MM-EDFA and blind DSP. In: Proceedings of the 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications, Amsterdam, 2012. 1–3
- 17 Sleiffer V A J M, Leoni P, Jung Y, et al. 20×960-Gb/s MDM-DP-32QAM transmission over 60 km FMF with inline MM-EDFA. In: Proceedings of the 39th European Conference and Exhibition on Optical Communications, 2013. 444–446
- 18 Ryf R, Randel S, Fontaine N K, et al. 32-bit/s/Hz spectral efficiency WDM transmission over 177-km few-mode fiber. In: Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013. 1–3
- 19 Ip E, Li M J, Bennett K, et al. 146λ×6×19-Gbaud wavelength- and mode-division multiplexed transmission over 10×50-km spans of few-mode fiber with a gain-equalized few-mode EDFA. In: Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013. 790–797
- 20 Luo M, Li X, Yang Q, et al. Transmission of 200 Tb/s (375×3×178.125 Gb/s) PDM-DFTS-OFDM-32QAM super

channel over 1 km FMF. Frontiers Optoelectronics, 2015, 8: 67–78

- 21 Ryf R, Chen H, Fontaine N K, et al. 10-Mode mode-multiplexed transmission over 125-km single-span multimode fiber. In: Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC), 2015. 1–3
- 22 Soma D, Beppu S, Sumita S, et al. 402.7-Tb/s weakly-coupled 10-mode-multiplexed transmission using rate-adaptive PS PDM-16QAM WDM signals. In: Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC), 2019. W.2.A.2
- 23 Ryf R, Sierra A, Essiambre R, et al. Coherent 1200-km 6×6 MIMO mode- multiplexed transmission over 3-core microstructured fiber. In: Proceedings of the 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2011. Th.13.C.1
- 24 Ryf R, Randel S, Gnauck A H, et al. Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6 × 6 MIMO processing. J Lightwave Technol, 2012, 30: 521–531
- 25 Luo M, Qiu Y, Li X, et al. 560 Tbit/s coherent optical PDM DFT-s OFDM 32QAM signal transmission over 10 km single-mode 7 core fiber. Study Opt Commun, 2017, 2: 1-4 [罗鸣, 邱英, 李响, 等. 560 Tbit/s 相干光双偏振 DFT-s OFDM 32QAM 信号 10 km 单模 7 芯光纤传输实验. 光通信研究, 2017, 2: 1-4]
- 26 Igarashi K, Takeshima K, Tsuritani T, et al. 1109-Tbit/s SDM transmission over 6370 km using a full C-band sevencore EDFA. Opt Express, 2013, 21: 18053–18060
- 27 Puttnam B J, Luis R S, Klaus W, et al. 2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core fiber and wideband optical comb. In: Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC), 2015. 1–3
- 28 Benjamin J P, Ruben S L, Georg R, et al. 0.596 Pb/s S, C, L-band transmission in a 125μm diameter 4-core fiber using a single wideband comb source. In: Proceedings of Optical Fiber Communication Conference, San Diego, 2020. Th3H.5
- 29 Qian D Y, Ezra I, Huang M F, et al. 1.05 Pb/s transmission with 109 b/s/Hz spectral efficiency using hybrid singleand few-mode cores. In: Proceedings of Frontiers in Optics, 2012. FW6C.3
- 30 Soma D, Igarashi K, Wakayama Y, et al. 2.05 peta-bit/s super-Nyquist-WDM SDM transmission using 9.8-km 6-mode 19-core fiber in full C band. In: Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC), 2015. PDP.3.2
- 31 Luís R S, Rademacher G, Puttnam B J, et al. 1.2 Pb/s transmission over a 160 μm cladding, 4-core, 3-mode fiber, using 368 C+L band PDM-256-QAM channels. In: Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC), 2018. 1–3
- 32 Soma D, Wakayama Y, Beppu S. et al. 10.16-Peta-bit/s Dense SDM/WDM Transmission over 6-Mode 19-Core Fiber across the C+L Band. J Lightwave Technol, 2018, 36: 1362–1368
- 33 Georg R, Benjamin J P, Ruben S L, et al. 10.66 peta-bit/s transmission over a 38-core-three-mode fiber. In: Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2020. Th3H.1
- 34 Xia T J, Wellbrock G A, Huang Y K, et al. 10000-km enhanced long-haul transmission of 1.15 Tb/s superchannel using SSMF only. In: Proceedings of the 16th Opto-Electronics and Communications Conference, 2011. 758–759
- 35 Winzer P J, Essiambre R J. High-speed and high-capacity optical transmission systems. In: High Spectral Density Optical Communication Technologies. Berlin: Springer, 2010. 103–127
- 36 Chbat M W, Spalter S. From 100G to 1000G: is there a straight road ahead? In: Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC), 2010. 1–16
- 37 Salsi M, Rios-Muller R, Renaudier J, et al. 38.75 Tb/s transmission experiment over transoceanic distance.
  In: Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC), 2013. 1–3
- 38 Foursa D G, Batshon H G, Zhang H, et al. 44.1 Tb/s transmission over 9100 km using coded modulation based on 16QAM signals at 4.9 bits/s/Hz spectral efficiency. In: Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC), 2013. 1–3
- 39 Qian D, Huang M F, Zhang S, et al. 30 Tb/s C- and L-bands bidirectional transmission over 10181 km with 121 km span length. Opt Express, 2013, 21: 14244–14250
- 40 Xia T J, Wellbrock G A, Tanaka A, et al. High capacity field trials of 40.5 Tb/s for LH distance of 1822 km and 54.2 Tb/s for regional distance of 634 km. In: Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013. 1–3
- 41 Georg R, Ruben S L, Benjamin J P, et al. 172 Tb/s C+L band transmission over 2040 km strongly coupled 3-core

fiber. In: Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2020. Th4C.5

- 42 Benjamin J P, Georg R, Ruben S L, et al. 8007 km C + L band transmission over MCF with 19-core cladding-pumped EDFA. In: Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC), 2019. Tu.1.A.2
- 43 Turukhin A, Paskov M, Mazurczyk M V, et al. Demonstration of potential 130.8 Tb/s capacity in power efficient SDM transmission over 12700 km using hybrid micro-assembly based amplifier platform. In: Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2019. M2I.4
- 44 Yu S H, Luo M, Li X, et al. Recent progress in an 'ultra-high speed, ultra-large capacity, ultra-long distance' optical transmission system (invited paper). Chin Opt Lett, 2016, 9: 1–4
- 45 Xue D J, Yu S H, et al. Frontier research of ultra-high-speed ultra-large-capacity and ultra-long-haul optical transmission. Frontiers Optoelectronics. 2016, 9: 123–137
- 46 Yang Q, He Z, Liu W, et al. 1-Tb/s large girth LDPC-coded coherent optical OFDM transmission over 1040-km standard single-mode fiber. In: Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2011. 1–3
- 47 He Z X, Luo M, Li C, et al. 30.7 Tbit/s Coherent Optical PDM-16QAM OFDM Signal Transmission over 80 km SSMF. Study Opt Commun, 2012, 6: 1-3 [贺志学, 罗鸣, 李超, 等. 30.7 Tbit/s 相干光 PDM 16QAM OFDM 80 km SSMF 传输. 光通信研究, 2012, 6: 1-3]
- 48 Li C, Djordjevic I, Luo M, et al. Ultra long-haul transmission of a 1-Tb/s LDPC-coded DFT-S OFDM-8PSK superchannel over 12160 km. In: Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference 2013, 2013. PDPB4
- 49 Yang Q, Xiao X, Li C, et al. 168×103 Gb/s 25-GHz-spaced C-band transmission over 2240 km SSMF with improved nonlinearity using DFT-S OFDM-8PSK modulation. In: Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference 2012, 2012. AF4B.3
- 50 Collings B. New devices enabling software-defined optical networks. IEEE Commun Mag, 2013, 51: 66–71
- 51 Winzer P J, Neilson D T. From scaling disparities to integrated parallelism: a decathlon for a decade. J Lightwave Technol, 2017, 35: 1099–1115
- 52 Fabbri S J, Sygletos S, Perentos A, et al. Experimental implementation of an all-optical interferometric drop, add, and extract multiplexer for superchannels. J Lightwave Technol, 2015, 33: 1351–1357
- 53 Kim Y-J, Simsarian J E, Choi N, et al. Cross-layer aware packet-optical link manage-ment in software-defined network operating system. In: Proceedings of Optical Fiber Communication Conference, San Diego, 2018. Th2A.31
- 54 Yu S H. A new paradigm of future network: net-AI agent and city-AI agent. Study Optical Commun, 2018, 210: 5–14 [余少华. 未来网络的一种新范式: 网络智能体和城市智能体. 光通信研究, 2018, 210: 5–14]
- 55 Yu S H, Zhang X Q. Information Optoelectronics. Beijing: Science Press, 2019 [余少华, 张新全. 信息光电子专题. 北京: 科学出版社, 2019]
- 56 Yu S H, Lu J, Chen Z N, et al. Research on the Development of Electronic Information Engineering Technology in China (2018–2019). Beijing: Science Press, 2019. 49–71, 215–253 [余少华, 陆军, 陈左宁, 等. 中国电子信息工程科 技发展研究 (综合篇 2018–2019). 北京: 科学出版社, 2019. 49–71, 215–253]
- 57 Chen L, Yu S H. Preliminary study on the trend of 6G mobile communication. Study Opt Commun, 2019, 4: 1-7 [陈 亮, 余少华. 6G 移动通信发展趋势初探. 光通信研究, 2019, 4: 1-7]
- 58 Chen L, Yu S H. Preliminary study on the key technologies of 6G mobile communication. Study Opt Commun, 2019, 5: 1-7 [陈亮, 余少华. 6G 移动通信关键技术趋势初探. 光通信研究, 2019, 5: 1-7]

## Latest survey on optical fiber communication

Shaohua $\mathrm{YU}^{1,2,3^*}$ & Wei $\mathrm{HE}^{1,2,3}$ 

- 1. China Information Communication Technologies Group Corporation, Wuhan 430074, China;
- 2. State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan 430074, China;
- 3. National Optoelectronics Innovation Center, Wuhan 430074, China
- \* Corresponding author. E-mail: yushaohuawri@sina.cn

**Abstract** As one of the four most significant inventions since World War II, optical fiber communication has provided a foundation for the development of the information society, carrying more than 90% of the global data traffic. However, it is expected that it will encounter a "capacity crisis" in the next two decades. This paper focuses on the five development dimensions of optical fiber communications: ultra-high speed, ultra-large capacity, ultra-long distance, ultra-wideband flexibility, and ultra-powerful intelligence (5U). Based on a review of its development over the past 50 years, the paper provides a comprehensive review of the latest progress achieved in the past decade and presents a bold outlook on the evolutionary trends in the next decade or even two. This review hopes to provide a reference for researchers in related fields.

Keywords optical fiber communication, optical fiber transmission, optical network



**Shaohua YU** was born in 1962. He received his Ph.D. degree in space physics and electronic information from Wuhan University, Wuhan, China, in 1992. Currently, he is a member of the Chinese Academy of Engineering (CAE), an information and communication network technology expert. His research interests include optical fiber communication and network technology. Dr. Yu is the chief engineer of the China Infor-

mation and Communication Technologies Group Co., Ltd., the director of the State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Network, the vice president of the China Institute of Communications, a member of the National 863 Program Network and Communication Subject Expert Group, a member of the Cyber Power Strategy Research Advisory Group, and a National Integrated Circuit Industry Development Advisory Committee member.