



综述

光通信技术研究现状及发展趋势

吕向东, 梁雪瑞, 喻千尘, 马卫东

(武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430205)

摘要: 随着人们对网络带宽需求的不断快速增长以及新的应用和网络服务的不断发展, 光网络的发展面临着传输容量、交换粒度和网络控制的巨大瓶颈。为了解决这些问题, 世界各地的研究人员提出了新的解决方案。论述了近年来光网络领域的技术创新, 重点讨论了动态可重构光网络、集成光电子学以及大容量光纤传输技术的发展, 并展望分析了光网络未来的发展趋势, 为之后相关的研究提供了参考。

关键词: 光通信网络; 可重构光分叉复用器; 相干光通信; 空分复用

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019009

Research status and development trend of optical communication technology

LV Xiangdong, LIANG Xuerui, YU Qianchen, MA Weidong

Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, China

Abstract: With the rapid growth of network bandwidth demand and the development of new applications and network services, the development of optical networks is facing a huge bottleneck of transmission capacity, switching granularity and network control. In order to solve these problems, researchers around the world have put forward new solutions. The technological innovation in optical networks in recent years was discussed, the development of dynamic reconfigurable optical network, integrated optoelectronics and optical fiber transmission technology was mainly discussed, and the future development trend of optical networks was analyzed in order to provide reference for related research.

Key words: optical communication network, ROADM, coherent optical communication, space division multiplexing

1 引言

1966年, 华裔物理学家高琨博士在《PIEE》杂志上发表了论文《Dielectric fiber surface

waveguides for optical frequencies》, 从理论上证明了光纤作为传输媒介实现长距离、大容量通信的可能性, 并论述了实现低损光纤的技术途径奠定了光纤通信的基础。此后数年中, 随着光纤损耗

收稿日期: 2018-09-14; 修回日期: 2018-12-10

基金项目: 国家重点研发项目 (No.2016YFB0402503)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2016YFB0402503)

的降低及新的激光器件和光检测器等光通信器件的不断研制成功, 光纤通信得到爆炸式的发展, 各种实用的光纤通信系统陆续出现。

半个世纪以来, 光传输技术一直在不断的发展前进之中, 光源、传输介质、传输技术、光器件等各个方面的发展进步, 促进了光网络的整体提升。通信光电子器件是光纤通信技术的基础与核心, “里程碑”式的光器件技术对光纤通信的发展应用产生深远影响和巨大变革: 20 世纪 70 年代, 室温连续运转半导体激光器和低损耗光纤的出现使光通信系统商用成为可能^[1]; 20 世纪 80 年代, DFB 激光器的出现使光纤单模传输成为可能, 光纤通信系统的传输距离和传输质量大幅提升^[2]; 20 世纪 90 年代, EDFA 等光放大器的实现奠定了光纤通信长距离传输的基础^[3]; 2000 年, AWG 等波分复用/解复用器件在 DWDM 系统商用, 极大地扩展了光纤通信传输容量^[4]; 2010 年, 相干光通信技术大力发展, 与传统的 IM/DD 相比, 相干光通信系统具有灵敏度高、传输距离长、波长选择性好、通信容量大的优势, 相干技术把光通信系统的传输容量提升了一个台阶^[5]。

光网络的升级换代, 其内在的驱动力是各类服务的日益增长对带宽、速度等方面的要求。目前正在大力发展的 5G 网络, 对下一代通信解决方

案的期望包括更快的速度、更短的时延和更短的响应时间, 5G 设计用于支持各种不同的应用程序, 这些应用程序包括增强的移动宽带、海量物联网和超可靠、低时延的机器通信。新的应用程序要求低时延, 将推动光通信网络架构的重大变化。这些新的 5G 需求将为光纤通信和光网络系统创造新的市场机会。为了满足 5G 对网络质量的严苛要求, 光网络的各个方面都需要进行更新换代。灵活光网络的提出、相干技术的发展、光器件集成度的提升以及在增大光纤传输容量方面的努力, 都促进了光网络在速度、容量和响应时间等方面的进步。

2 ROADM: 迈向动态可调的可重构光网络

国际电信联盟 ITU-TG.694.1 规定的 DWDM 栅格有: 12.5 GHz、25 GHz、50 GHz 和 100 GHz 光网络的栅格^[6], 在 100 Gbit/s 时代, 如图 1 (a) 所示, 50 GHz 的固定栅格就可以实现 10 Gbit/s、40 Gbit/s 和 100 Gbit/s 速率的信号混传, 在超 100 Gbit/s 时代, 不同传输速率所需的通道带宽不同, 固定栅格已无法满足合理利用带宽资源的需求, 需要使用灵活栅格根据传输速率调节传输通道带宽, 如图 1 (b) 所示。

当前, 长距离无光电转换的波长交换光网络

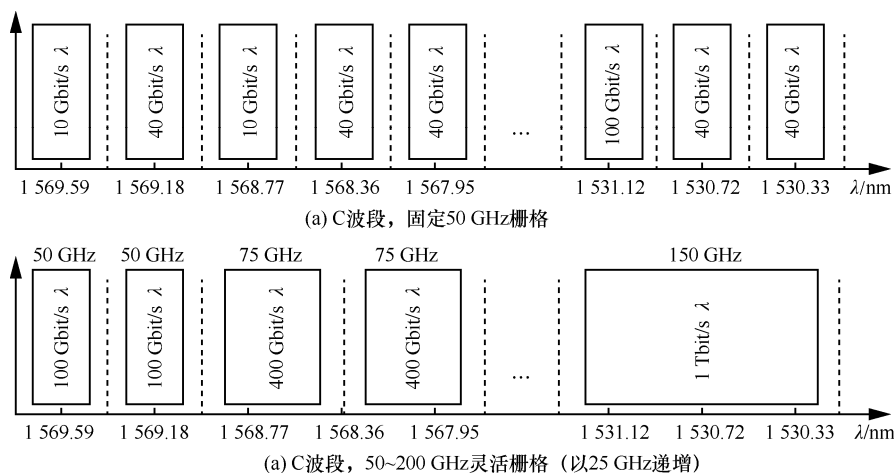


图1 固定栅格和灵活栅格 ROADM



已经达到一定水平,但波长交换网络的大粒度、低灵活性经常产生频谱的浪费,导致频谱利用率降低等问题。使用 ITU 标准固定栅格的传统波长分割复用网络逐渐不能满足多样化的业务需求,同时栅格网络的频谱粒度也逐渐成为传输带宽增长的瓶颈。使用灵活光网络(FWDM)能够有效地弥补固定栅格网络的不足,提高光网络传输能力与频谱资源效率^[7]。基于可重构光分插复用器(ROADM)和灵活栅格技术,可以实现波长间隔按需分配,主要体现在以下两方面。

- 传统光通信领域,骨干网基本实现全光化,传输节点全光交叉连接,ROADM 向高纬度、方向无关、波长无关、竞争无关、灵活网络(colorless、directionless、contentionless、

gridless, CDCG)和软件定义网络(SDN)化发展。

- 新兴市场,网络云化,云市场规模巨大,数据中心(DC)互联需求持续增长,尤其是当前数据中心和数据中心之间的互联,缺乏直达路由,时延高,无法合理分配资源,需要光承载网提供大带宽、灵活性调度能力,ROADM 技术可以将数以百计的 DC 连接形成大的云网络。

ROADM 的两种网络组成如图 2 所示,ROADM 早期通过光分束器(splitter)、波长选择开关(WSS)和阵列波导光栅(AWG)的结合,组成方向相关、波长相关网络,此种方案是ROADM 比较常见的配置方式,成本最低,如图 2(a)所示,

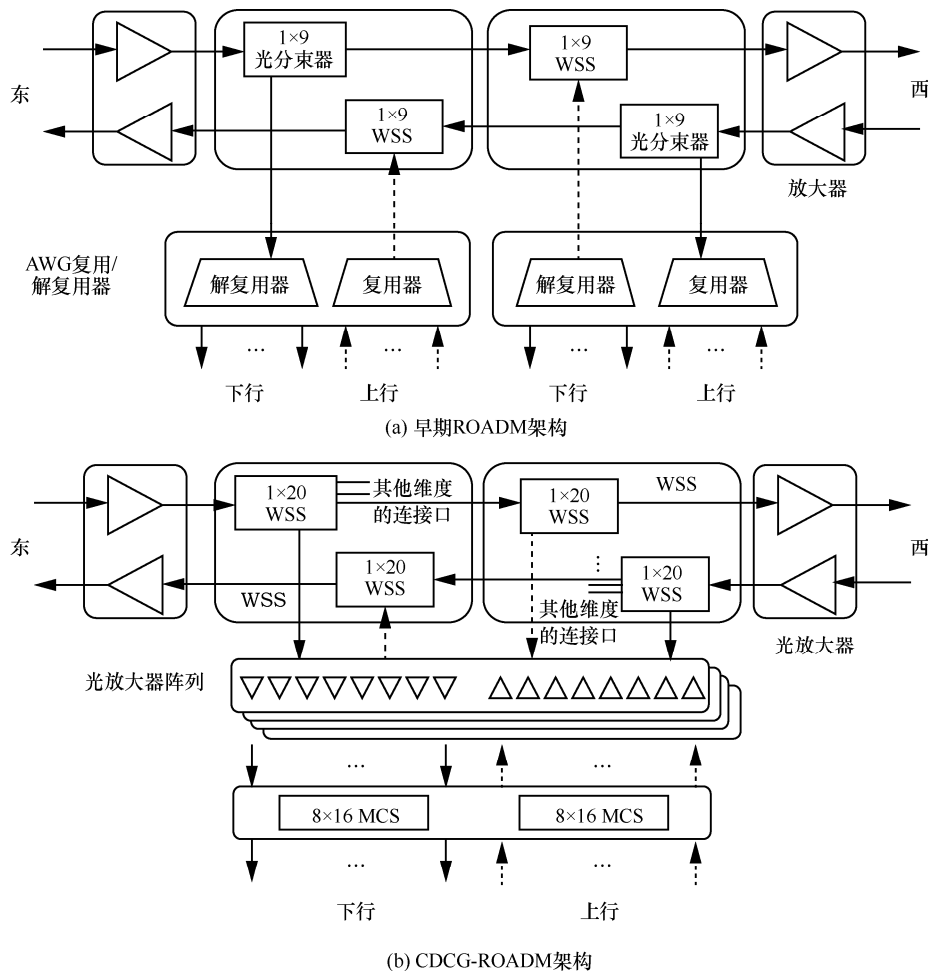


图2 两种ROADM架构(两个方向)对比

随着智能网络的发展, CDCG-ROADM 成为趋势, 如图 2 (b) 所示, 利用 WSS 组建波长无关、方向无关、通道带宽可调网络, 采用多播交换(MCS)模块实现 ADD/DROP 端竞争无关, 由于 MCS 损耗大, 需要使用放大器阵列进行光功率补偿。

波长选择开关(WSS)一般基于改进的 MEMS (如单晶硅反射镜)、液晶 (LCD) 或硅基液晶 (LCOS) 技术, 并结合准直器等阵列器件, 具有频带宽和色散低的优点, 并且同时支持 100 Gbit/s 和 400 Gbit/s 光信号。WSS 采用自由空间光交换技术, 上下路波长数少, 但可以支持更高的维度, 集成的器件较多, 控制复杂, 开发成本较高。目前的 WSS 器件发展迅猛, 在 1×2 、 1×4 、 1×9 等常规维数模块已成熟, Lumentem 公司已开发出 8×24 的 Twin-WSS^[8]。WSS 已成为多维 ROADM 的首选技术, $N \times M$ WSS 和 Flex-Grid WSS 将在 CDC-ROADM 和 400 Gbit/s 相干传输系统中广泛使用。

国内 CDCG-ROADM 网络的应用方面, 上海电信与烽火通信携手建设了 OTN 本地传输网, 该网络是全球首个在本地网中部署 20 维 ROADM 的超大规模应用案例。该 OTN 本地传输网, 共计 17 个核心骨干站点、101 个汇聚站点。全网 20 维双向灵活栅格 WSS 部署数量约 240 个, 9 维双向灵活栅格 WSS 数量约 440 个, 其中最大的传输调度节点已使用 19 个维度 (17 个方向维度、2 个本地维度), 最大的业务核心节点已使用 15 个维度 (4 个本地维度、11 个方向维度), 所有节点均配置“方向无关”模式。

3 集成光电子技术大幅提升光网络传输性能

近年来, 相干光通信技术发展迅速, 相干光通信充分利用了相干通信的混合频率增益、良好的信道选择性和波长可调性。与传统的 IM/DD 相比, 相干光通信系统具有灵敏度高、传输距离长、波长选择性好、通信容量大的优势, 系统采用电

均衡算法和色散补偿技术, 提高了系统的 OSNR 容限^[9]。目前, 100 Gbit/s 的相干系统正在大规模部署, 400 Gbit/s 的相干系统也已投入商用。随着行业逐步向 1 Tbit/s 及以上发展, 新技术如超级通道传输、大规模光子集成和高阶 QAM 调制等技术正在引入。

3.1 光子集成技术发展之路

光纤通信已成为现代信息咨询的主要传播途径, 光通信网络中的骨干网、城域网、接入网是需要越来越多种类的光收发模块。随着光通信系统集成度的不断提升, 光模块也正在向高速率、小型化、低成本、低功耗、热插拔 5 个方向发展, 光子集成技术应运而生。图 3 列举了相干光模块的发展历程, 相干模块从 MSA 向可插拔 CFP 发展, 尺寸和功耗也在大幅减小。

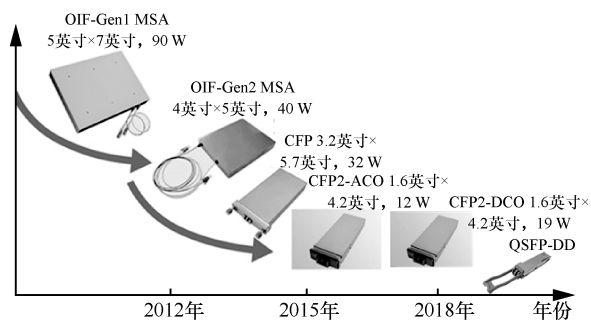


图3 相干光模块的发展历程

光子集成电路 (PIC) 集成的是各种不同的光学器件或光电器件, 比如激光器、电光调制器、光电探测器、光衰减器、光复用/解复用器, 光集成技术是未来光器件的主流发展方向, 光子集成技术相对于目前广泛采用的分立元器件, 在小尺寸、低功耗、低成本和高可靠性等方面优势明显, 是未来光器件的主流发展方向。

对于 DWDM 系统的光合/分波器模块, 平面光波导 (PLC) 集成技术是阵列波导光栅 (AWG) 模块成熟的解决方案, 除非有新的技术可以实现 AWG 模块低成本、低插入损耗、高波长稳定性和低功耗等性能, 否则这种情况将在未来几年继续



下去。铟磷光子集成技术是一种用于电吸收调制激光器 (EML)、可调谐激光器和高性能调制器的光子学技术,然而,它的制造效率远低于 CMOS 工艺。硅光子集成技术是许多光学元器件和模块的一种新技术解决方案,可实现小体积、低功耗、低成本:可用于传输线路的 100/400 Gbit/s 集成收发相干器件 (IC-TROSA)、接入侧的 25 Gbit/s 调制可调谐激光器、数据中心的 100/400 Gbit/s 模块、5G 前传的 25 Gbit/s 光模块以及未来光电单片集成芯片。

3.2 相干 DSP 技术发展之路

随着相位调制和相干检测技术的发展,数字信号处理 (DSP) 技术开创了光通信系统的数字时代,采用先进的数字信号处理技术则能进一步提升频谱效率延长传输距离。通过自适应调制、调制带宽可变和调制格式可调,可以更有效地利用大容量光传输系统。DSP 技术在相干系统应用中的功能结构如图 4 所示。

如图 4 所示,DSP 技术中采用了色散补偿技术,大幅提高了系统色散容限,简化了系统设计,节约了成本,其对色度色散容限达到 60 000 ps/nm,偏振模色散容限为 180 ps,省去了原有 10 Gbit/s 系统中色散补偿模块 (DCM) 或色散补偿光纤等。同时采用 FEC 软判决和硬判决相结合,其纠错编码增益提升,系统传输性能更优。随着 DSP 的更迭发展,更多的算法和功能在不断的加入^[10],如非线性补偿技术、多编码调制解调技术,同时,

随着相干光器件产业化转向 400 Gbit/s 和可插拔数字相干光学 (DCO) 模块,相干 DSP 也在向支持 64 Gbaud 波特率和 DP-64QAM 复杂码型调制/解调方向发展。如图 5 所示,随着 CMOS 工艺节点的不断优化提升,DSP 的集成度和功耗也在不断降低,下一代将开发 7 nm 工艺的 DSP 芯片,以满足下一代 QSFP-DD 封装的相干模块更低功耗、更小尺寸的需求。

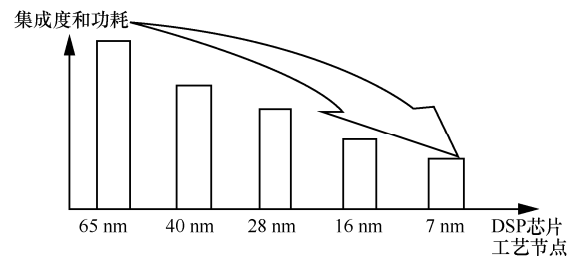


图 5 CMOS 工艺节点不断提升,光通信电芯片功耗不断降低

传统的基于 DSP 技术的长距离相干接收,优先考虑性能和传输距离,对于数据中心应用来说不是最优的,因为数据中心成本、功耗和端口密度是最重要的。为了降低能耗及成本,采用 DSP-Free 技术^[11],在链路中采用基于模拟信号处理的低功耗架构设计,从而避免 ADC 和数字信号处理带来的高能耗。

另外,诺基亚贝尔实验室发明了一种新的调制技术——概率星座整形 (PCS)^[12],概率星座整形 (PCS) 通过正交调幅 (QAM) 格式,在给定的信道上实现更高的传输容量,大幅提升了光纤通信的频谱效率。PCS 通过使用星座点 (传输符号) 调整概率,一般情况下,所有星座点使用

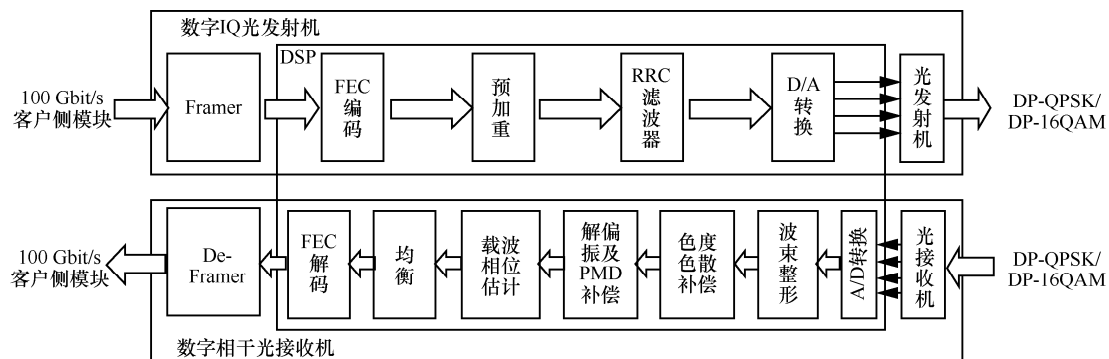


图 4 DSP 在相干系统应用中的功能结构

的都是同一频率, PCS 会更多地选择使用低振幅的星座点来传输信号, 这样的机制对噪音与其他损伤来说更具弹性。这使得可以通过调整传输速率来完美适应传输信道, 将传输距离提升 30%, PCS 技术将弥补常规相干 DSP 技术在处理复杂调制码型 (如 64QAM、128QAM) 时, 传输性能劣化的问题, 有利于实现更大容量的光纤传输。

4 光纤传输技术发展趋势: 超高速、大容量、长距离

伴随着网络的迅速普及、宽带业务需求的快速上升以及互联网行业的快速发展, 包括企业、个人、政府在内的各行各业对信息的需求呈现爆炸式增长, 并且每年增长速度的增幅都在 40%~60%。对于现在的光纤通信系统而言, 超高速、超大容量、超长距离传输成为必然的发展趋势^[13]。光纤通信的传输速率也从原来的 40 Gbit/s、100 Gbit/s 向 400 Gbit/s 飞跃, 甚至达到了 1 Tbit/s, 容量从 10 Mbit/s 到几十 Tbit/s, 跨距可以实现从 200 km 到 5 000 km 的提升。

单模光纤 (SMF) 的容量在 20 多年增长约 3 个数量级之后, 正迅速接近香农信息论与非线性光纤效应相结合的能力极限。这种容量增长的成功很大程度上归功于波长分复用、偏振分复用 (PDM) 和更高阶调制格式。低损耗、大传输带宽的单模光纤是实现长距离高速光通信的关键, 是当今信息驱动社会的中坚力量, 然而, 即将达到单模光纤传输能力的基本极限。目前, 在提高光纤的传输极限方面主要有 3 种途径: 提升单波长的传输速率、扩大光纤可用的信道带宽、空分复用。

4.1 提升单波长信号的传输速率

图像视频、云计算、大数据、社交媒体以及移动数据的快速增长推动着互联网流量以每年 30% 的幅度增长。为满足带宽需求并降低每波特每赫兹的成本, 传输网络需要更高的频谱效率和

更高的传输速率, 提升频谱效率主要依靠更复杂的调制码格式而提高传输速率主要依靠提高信号的波特率。目前商用的 100 Gbit/s 产品都是基于相干探测的单载波极化复用的 QPSK 调制码技术, 频谱效率为 2 bit/(s·Hz), 传输容量为 10 Tbit/s。如图 6 所示, 目前, 城域光网络正在向 400 Gbit/s 升级, 未来将实现 1 Tbit/s 的传输速率, 其频谱效率需要达到 4 bit/(s·Hz) 或更高, 容量将达到 20 Tbit/s 及以上, 随着调制格式复杂度不断提升, 其传输容量也相应增加, 同时, 受 OSNR 限制, 其传输距离缩短, 在长距离 (40~120 km) 大容量数据中心互联中应用前景广阔。

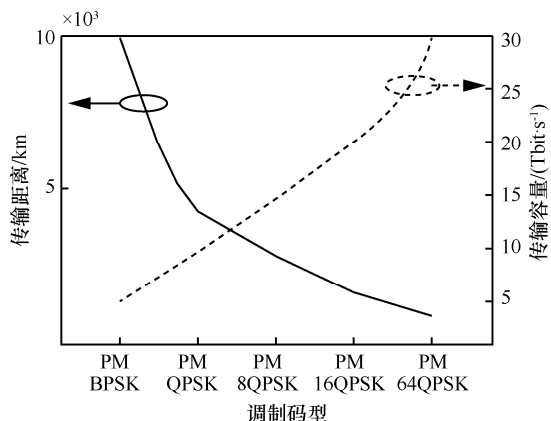


图6 不同速率和调制格式下的相干光通信系统传输容量

4.2 扩大光纤可用的信道带宽

光通信波长划分及应用主要依据光纤在不同波长的传输损耗和色散等因素, 1 260~1 625 nm 波长窗口传输损耗小, 适合将光纤作为介质进行传输, 并且此窗口被划分为 5 个波段, 见表 1。

在现有的光通信网络中, 支持近距离传输 (<100 m) 的主要以多模为主, 例如多模光纤搭配 850 nm 的 VCSEL 激光器; 长距离应用中, 单模光纤搭配能发射 1 310 nm 或 1 550 nm 波长的 FP、DFB 或 EML 激光器, 从实际应用中可以看出, 目前大部分单根光纤仅仅在一个波段内传输, 并且这个传输波段大部分集中在 O-band 和 C-band, 只是利用了很小一部分的光纤带宽资源。



表 1 光纤带宽的划分及其应用

带宽	波长范围	应用场景
O-band	1 260~1 360 nm	GPON 上行, 数据中心
E-band	1 360~1 460 nm	水峰, 作为 O-band 的扩展
S-band	1 460~1 530 nm	GPON 下行
C-band	1 530~1 565 nm	DWDM, EDFA, CATV, NG-PON2 上行
L-band	1 565~1 625 nm	DWDM 的扩展波长, NG-PON2 下行

密集波分 (DWDM) 技术是在合理利用单模光纤在 1.55 μm 波段低损耗区产生的带宽资源的背景下产生的, 早期主要用于光纤骨干网, 为提升传输容量、节省光纤资源, 现在城域网、接入网也大量引入 DWDM 技术, C-band 可利用带宽资源不足, 需要向相邻波段扩展, L-band 是最好的选择, 扩展之后的 C+L 波段 (1 530~1 625 nm) 的通道数扩展到 192 (50 GHz 通道间隔), DWDM 传输系统在传输容量上较现在提升 1 倍, 同时 L-band 光纤传输损耗可以满足骨干网长距离传输应用场景, 现在商用光纤基本可以同时覆盖 C-band 和 L-band 的应用。

光纤只是光通信网络中光信号的传输介质, DWDM 传输系统传输带宽向 L-band 扩展还需要光电子器件的硬件支撑, 例如 L-band 的可调激光器及光收发模块、EDFA、AWG 等, 表 2 列举了 C-band 和 L-band 的 EDFA 模块使用的光器件的现状, 新开发的 L-band EDFA 需要保持和 C-band EDFA 相同的性能指标和价格。

表 2 C-band 和 L-band 的 EDFA 光器件技术

EDFA 中的光器件	C-band	L-band
隔离器, taps	已商用	已商用
C+L 波段光耦合器	已商用	研制中
增益平坦滤波器	已商用	研制中
掺铒光纤	已商用	研制中
泵浦激光器	980 nm, 1 480 nm	980 nm, 1 480 nm

国外对 L-band 光器件进行了相关研究^[14-15], FINISAR 公司开发的宽波段 EDFA 可以支持 C+L

波段工作, Amonics 公司开发了 C+L 波段宽带 ASE 光源。国内华中科技大学通过调整 980 nm 半导体激光器的输出功率和掺铒光纤的长度, 得到在 1 525~1 600 nm 的范围内, 在不添加任何增益平坦滤波器的情况下, 自发放大辐射谱的平坦度达到 2 dB、总的输出功率达到 15.58 mW 的宽波光^[16]。

4.3 空分复用技术实现超大容量光传输

光空分复用 (OSDM) 可以扭转信息网络中传输速率受限的状况, 使单位带宽的成本下降, 光空分复用技术是利用空间的分割实现复用的一种方式, 将多根光纤组合成束实现空分复用, 即以多芯光纤作为媒介实现空分复用, 或者在同一根光纤中实现空分复用, 即以多模光纤为媒介实现模式复用, 如图 7 所示。

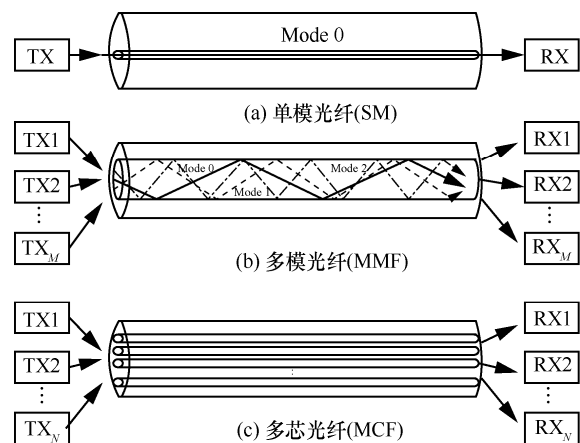


图 7 空分复用光传输技术

普通意义上的单模光纤是由一根纤芯和围绕它的包层构成的, 而所谓的多芯光纤则是在同一个包层里含有多个相同的纤芯, 并按照一定的形

状排列。当光信号通过多个芯径进行信息传输时,这样的一条多芯光纤的传输容量就相当于几条传统单芯光纤的传输容量。相较单芯单模光纤,多芯光纤一方面提高了传输容量;另一方面,不仅没有增加光缆安装铺设的空间和资金投入,而且节约了实际施工成本。

在空分复用传输试验进程中,国际上已经实现了多模多芯光纤的总容量为 10.16 Pbit/s,其中每芯的容量达到 0.5 Pbit/s 以上^[17]。还在实验室条件下实现了在 6 模光纤上传输速度 138 Tbit/s,传输距离可达 650 km^[18]。2017 年,烽火科技在国内首次实现了 560 Tbit/s 超大容量波分复用及空分复用的光传输系统实验,可以实现一根光纤上 67.5 亿对人(135 亿人)同时通话,实验采用单模七芯光纤为传输介质,每根光纤承载了 80 Tbit/s 的数据,结合超密集波分复用技术和正交频分复用技术及数字相干信号处理技术,实现总容量 560 Tbit/s 的单模七芯光纤信道的信号无误码传输。光通信系统在向大容量以及超大容量方向演进,国外已经开发容量超过 1 Pbit/s 的系统,烽火科技研发出的 560 Tbit/s 超大容量光传输系统已经比较接近世界水平。

将多模光纤制作成多芯多模光纤将更大地提升传输容量,其传输容量在单模光纤的基础上增加 $M \times N$ 倍, M 为多模光纤传输的模式数, N 为多芯光纤的纤芯数,这将是除超密集多芯单模光纤之外、提升传输容量的另一个研究方向^[19]。

5 结束语

本文从网络架构、传输网性能等方面对近年来光网络各方面技术的发展进行了综述。CDCG-ROADM 网络及其各组件的研究与商用、光子集成技术的应用、相干光通信技术的发展、进一步扩大传输容量的研究等,都是更高速、更大容量、更灵活网络的发展基础。随着科技的不断发展,光网络将进一步提速扩容,实现自适应

光传输网络,满足更多更新的服务需求。

参考文献:

- [1] WANG L W. Development of semiconductor lasers and their applications[J]. Journal of Chengdu University (Science & Technology Edition), 2003(3): 34-38.
- [2] YANG Q, YU B L, ZHEN S L. The survey of optic fiber lasers[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2002(5): 13-18.
- [3] XING H M, LI Z. Research on optical fiber communication technology[J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Science), 2003(4): 95-97.
- [4] YUAN R. Arrayed waveguide grating component and its applications[J]. Optical Communication Technology, 2010, 34(1): 1-5.
- [5] YU Y. Coherent optical communication and applications[J]. Chinese Journal of Physics, 2001(9): 43-46.
- [6] ITU-T. Recommendation G.694.1[S]. 2012.
- [7] DOWNIE J D, LI M J, MAKOVEJS S. Optical fibers for flexible networks and systems[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2016, 8(7): 1-11.
- [8] COLBOURNE P D, SHELDON M, CHESTER M, et al. Contentionless twin 8×24 WSS with low insertion loss[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 11-15, 2018, San Diego, California, USA.[S.l.:s.n.], 2018.
- [9] ZHANG H, ZHU B, PARK S, et al. Real-time transmission of 16 Tbit/s over 1 020 km using 200 Gbit/s CFP2-DCO[J]. Optics Express, 2018, 26(6).
- [10] FARUK M S, SAVORY S J. Digital signal processing for coherent transceivers employing multilevel formats[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, PP(99): 1.
- [11] PERIN J K. Design of low-power DSP-Free coherent receivers for data center links[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, PP(99): 1.
- [12] CHANDRASEKHAR S. High-spectral-efficiency transmission of PDM 256-QAM with parallel probabilistic shaping at record rate-reach trade-offs[C]//ECOC 2016, Sept 18-22, 2016, Dusseldorf, Germany. Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [13] SCHUH K. Single carrier 1.2 Tbit/s transmission over 300 km with PM-64 QAM at 100 GBaud[C]//OFC, March 19-23, 2017, Los Angeles, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2017.
- [14] ZHOU X F, LI Y, WEI Y Z. Research on L-band linear cavity multi-wavelength erbium-doped fiber laser[J]. Optical Communication Technology, 2016, 40(7): 40-42.
- [15] AMIRHOSSEIN G. Advanced C+ L-band transoceanic trans-

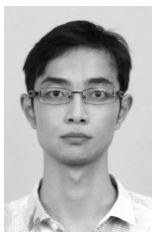


- mission systems based on probabilistically shaped PDM-64QAM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017: 1291-1299.
- [16] LIU H Y, HUANG Y X, XIONG X. Research on C+L-band high flatness fiber-optic light source[J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(3): 36-38.
- [17] SOMA D. 10.16 Peta-bit/s dense SDM/WDM transmission over low-DMD 6-mode 19-core fibre across C+L band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(6).
- [18] WEERDENBURG J V. 138 Tbit/s transmission over 650 km graded-index 6-mode fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(6).
- [19] TONG W J, YANG C, LIU T Q. Progress and prospect of novel specialty fibers for fiber optic sensing[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018(9): 16-29.

[作者简介]



吕向东（1965-），男，武汉光迅科技股份有限公司副总经理、高级工程师，主要从事光通信产品研发及销售工作。



梁雪瑞（1989-），男，武汉光迅科技股份有限公司工程师，主要研究方向为平面光波导、硅光等光集成芯片及器件技术。



喻千尘（1995-），女，现就职于武汉光迅科技股份有限公司，主要研究方向为硅光光集成芯片技术。



马卫东（1968-），男，博士，武汉光迅科技股份有限公司光电技术研究开发部副总经理、教授级高级工程师，工业和信息化部通信科学技术委员会专家咨询组成员，中国信息与电子工程科技发展战略研究中心专家委员会特聘专家，享受政府特殊津贴。主要研究方向为光通信网络新技术、5G、光集成技术及核心光电子器件产业化等。