



专题:光纤发明 50 周年

光纤通信系统技术的发展、挑战与机遇

崔秀国,刘翔,操时宜,周敏

(华为技术有限公司,广东 深圳 518129)

摘要: 光纤通信系统是现代互联网时代的核心支撑系统之一。首先概述了光纤通信系统关键技术的发展,并分析了其在蓬勃发展的云时代中的发展驱动力及在此驱动力下未来光纤通信系统面临的挑战与机遇。结合这些挑战与机遇,分别从光纤通信系统总体网络架构、骨干网络技术、城域网络技术、接入网络技术和基于软件定义网的新型光传送网络技术等多个方面,综合阐述光纤通信系统技术在云时代的演进发展趋势,以更为有效地为未来互联网、数据中心互联、物联网、5G 移动网络及智能家居和智慧城市提供强有力的技术支撑。

关键词: 光纤通信;云时代;光传送网;数据中心互联;5G 移动网络;智能家居和智慧城市

中图分类号:TN914

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016129

Development, challenge and opportunity of optical fiber communication system technologies

CUI Xiuguo, LIU Xiang, CAO Shiyi, ZHOU Min

Huawei Technologies Co., Ltd., Shenzhen 518129, China

Abstract: Optical fiber communication system is one of the core supporting systems of the modern internet age. Firstly, major recent technological advances in optical fiber communication system were summarized. Then, the driving forces for its future development in the emerging cloud era, the future challenges and opportunities that it faced were analyzed. With the consideration of these challenges and opportunities, the future evolution paths in key areas such as optical fiber communication system overall network architectures, core network technologies, metro network technologies, access network technologies and novel software-defined optical transport network technologies in the upcoming cloud era were described, aiming to support future generations of internet, data center interconnect, internet of things and 5G mobile network, as well as the smart home and smart city initiatives more effectively.

Key words: optical fiber communication, cloud era, optical transport network, data center interconnect, 5G mobile network, smart home and smart city

1 引言

从高锟(Charles K Kao)博士在 1966 年发表了《Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies》,首次提出了低损光纤理论,为光通信产业打开了一扇希望之门,到

今天光通信系统的大规模应用部署,促进了全社会的发展,给全人类的工作生活带来了便利,光通信产业已经度过了整整 50 周年的风风雨雨。现如今,光通信不仅仅局限于电信业本身,实际上已经成为影响和促进社会众多其他产业发展的中坚力量,关系到全世界的经济发展和社会进

收稿日期:2016-03-04;修回日期:2016-04-08

步。站在今天,至少可以说现在取得的成就是辉煌的。展望未来,不禁要思考如何把握光通信系统技术的发展趋势,迎接瞬息万变的社会产业变革带来的挑战,构建光通信产业健康发展的美好未来。

2 光纤通信系统近期的发展

在过去的 30 年,光纤通信系统高速发展^[1-5]。如图 1 所示,光纤通信的单通道速率从 1985 年的 2.5 Gbit/s 迅猛提高到 2015 年的 400 Gbit/s,是原来的 160 倍。主要技术包括高速电光调制、高速光探测、硬判决前向纠错(HD-FEC)、差分二相位及四相位调制(DPSK/DQPSK)、相干检测(coherent detection)、光数字处理(ODSP)、软判决前向纠错(SD-FEC)、偏振复用(PM)、高阶正交幅度调制(QAM)和超奈奎斯特调制与解调(FTN)^[6-15]。随着超通道(superchannel)技术的引入^[16-18],通道速率已超过 1 Tbit/s^[19]。

同时,宽带光纤光纤放大器(如掺铒光纤放大器(EDFA)及拉曼光纤放大器(Raman amplifier))的引入使得波分复用(WDM)成为现实。光纤通信的单光纤传输容量从 1985 年的 2.5 Gbit/s 大幅提高到 2015 年的 20 Tbit/s,是原来的 8 000 倍。

链路也由早期的单跨段发展到今天的多跨段、可自由切换的透明波分网络和弹性波分网络(flexible-grid WDM)^[20]。

2.1 相干检测及光数字处理

在光通信系统发展早期(2.5 Gbit/s/10 Gbit/s 时代),采

用简单的强度调制/直接检测(IMDD)技术来实现光传输。在波分系统的 40 Gbit/s 时代,基于直接检测的差分二相位及四相位调制(DPSK/DQPSK)显示出一定的优势。当波分系统进入 100 Gbit/s 时代以后,相干光技术迅速成为了高速光通信系统的主流。目前,100 Gbit/s 相干已经大规模部署,400 Gbit/s 已经商用,目前产业界正逐渐向 Tbit/s 量级演进,而未来助推光通信系统传输能力持续向前发展的主要技术趋势有超强 DSP 技术、超低损光纤+拉曼放大技术、C+L 传输波段扩展技术以及 FTN 传送技术。具体如图 1 所示。

ODSP 技术是光通信系统传送技术中最具划时代意义的技术,其将光网络从模拟光时代带入数字光时代。ODSP 技术在相干通信系统兴起过程中迅速发展,不仅能够补偿色散、偏振旋转、相位噪声和非线性等信道损伤,也能补偿发射机和接收机的器件损伤。图 2 显示了相干检测及光数字处理在过去 10 年的迅猛发展。

2.2 可软件定义收发器及弹性波分网络

目前的 ODSP 技术,可以采用灵活可变的 flex 调制方式,根据不同的传输距离和场景,选择灵活的通道间隔(flexible grid)和调制格式(flexible format),实现更高效的大容量光传输。flexible grid 可以将波长间隔从 50 GHz 降低到 37.5 GHz 甚至 33 GHz,使得 C 波段波长数量增加 1.6~1.8 倍,最大可以支持 128~145 个波长。目前 16 nm 的 ODSP 普遍可以支持 100 Gbit/s QPSK、150 Gbit/s 8QAM、200 Gbit/s 16QAM、400 Gbit/s 64QAM,不同传输距离、不

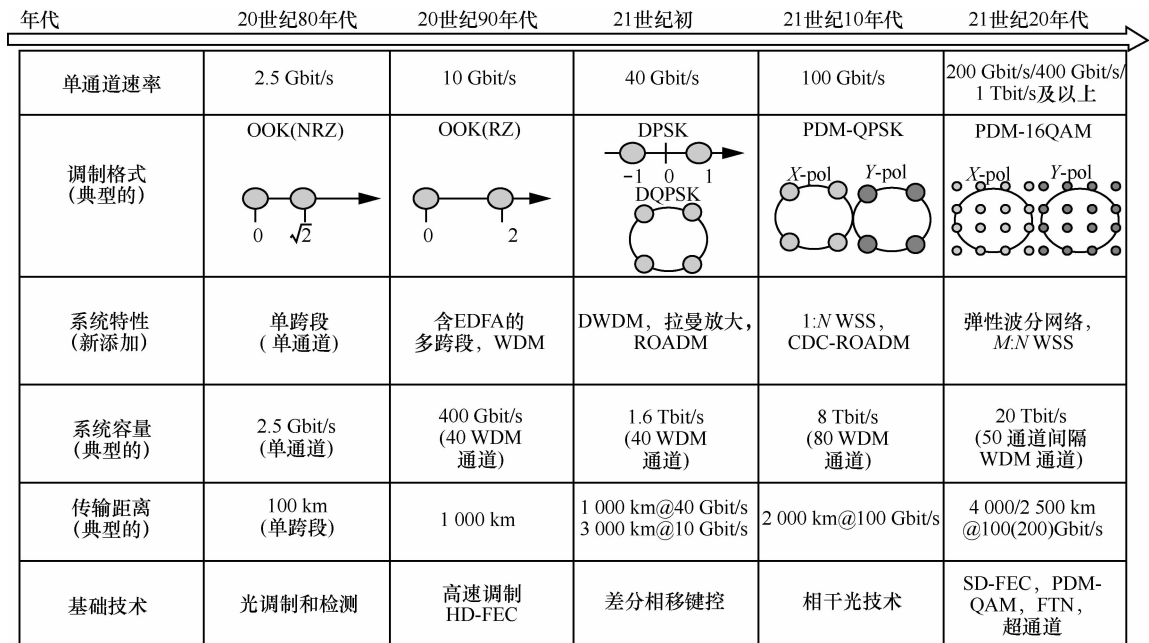


图 1 光纤通信系统传输技术在过去 30 年的大发展

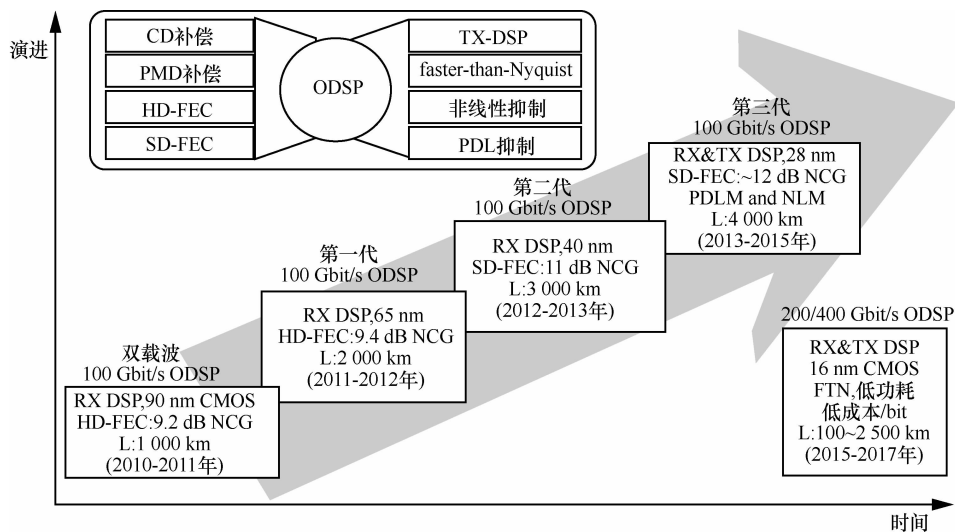


图2 相干检测及光数字处理在过去 10 年的迅猛发展

同的调制技术,兼容同一硬件,从 QPSK 到 16QAM 和 64QAM,频谱效率提升了 2~3 倍。因发送器及接收器均采用 ODSP,收发器可软件定义 (software-defined transceiver)。由此弹性波分网络 (flexible-grid WDM) 得以实现。图 3 描述了可软件定义收发器及弹性波分网络的广泛应用场景。

2.3 电层及光层调度技术

进入 21 世纪,随着光网络功能的进一步增强,其系统架构也越来越复杂,出现具有多个环网或者网状网 (mesh) 拓扑结构,需要多个光纤 (即多个维度) 之间的光交换。得益于大规模集成电路的发展,电层交换技术的发展远远领先光交换,由此诞生了一种基于电层交换的光网络系统,即 OTN,并很快适应了通信传输网的发展需求。2010 年以后,光网络趋向复杂,OTN 技术也在不断自我变革,出现了增强型 OTN 技术,以适应复杂环网和 mesh 网带来的架构与技术变迁。2013 年,CCSA 牵头制定了《分组增强型光传送网 (OTN) 设备技术要求》等国家行业标准,将 SDH 交

叉、分组交换、ODU 交换统一纳入分组增强型 OTN 设备中,集成了 OTN/SDH/PKT3 种业务调度功能。在 100 Gbit/s 光传送技术刚刚开始成熟商用的今天,业界已全面展开对超 100 Gbit/s (beyond 100 Gbit/s) 光传送技术的研究。未来的 OTN 需要具备任意业务的承载能力,同时光层的 flex grid 技术变革也正驱动着 OTN 向灵活性演进,能够根据传送的业务流量和传送距离灵活选择光调制方式、光频谱资源大小、载波数量等参数,以达到最优化高效的网络配置。

虽然 OTN 在不断自我变革以应对新兴网络发展潮流,但依旧有其难以逾越的技术瓶颈。随着 OTN 交叉容量的增加,其 ODSP 功耗线性增加,且只能通过减小芯片纳米工艺数值来降低功耗,如 16 nm 工艺向 10 nm 演进。随着后摩尔时代的到来,集成电路的集成度提升也将达到极限,芯片散热成为最终限制,功耗已经很难继续降低。未来大容量电交叉的功耗势必给运营商机房运作带来极大压力。此外,电交换需要 O/E 及 E/O,带来了相对较高的时

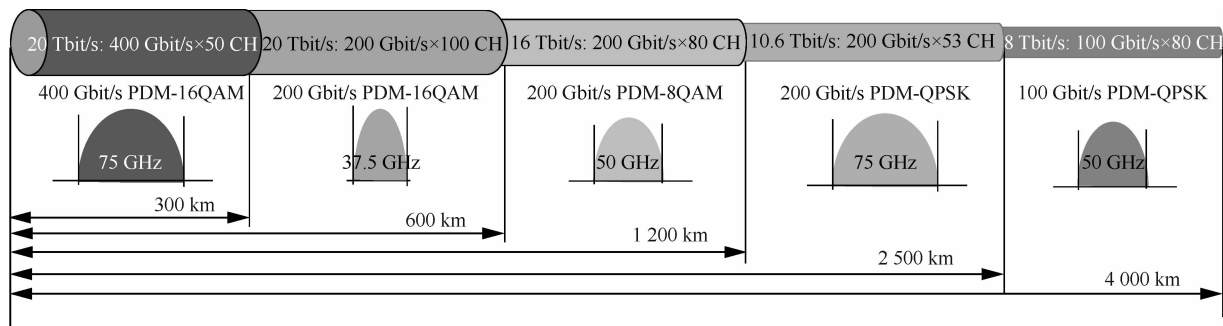


图3 可软件定义收发器及弹性波分网络的广泛应用场景

延。因此,产业界还是希望技术允许时将交换功能从电域转到光域,这被称为全光交换,并希望将此作为构建全光网的基础。全光交叉最早的实现路线是延续早期对波长的光上下路复用(OADM),继续对光波长(光频谱)进行功能增强的波长交换与调度,即可重配 OADM(ROADM)。至 2010 年前后,波长交换的业界主流商用架构演进成为基于多个 $1 \times N$ 波长选择交换单元(WSS)构成的多维 ROADM(MD-ROADM)^[21,22],每个 WSS 也与本地上下路的交换单元连接,进行波长的上下路(可重配)。根据本地上下路的不同实现方式,可以有波长无关(colorless)、方向无关(directionless)、无阻塞(contentionless)特性的一种或多种。CDC ROADM 就是指具有全部 3 种特征的 ROADM。现阶段,产业界主流厂商正集中力量加快 CDC ROADM 的研发进程,多项核心技术已经突破,实现商用化指日可待。CDC ROADM 之后,产业界希望全光交叉持续向全光网演进,但由于光缓存以及实用化的快速光交换阵列难以实现,使得全光网的核心技术光突发交换(OBS)和光分组交换(OPS)技术在中短期内难以突破^[23,24]。因此在全光网真正到来前,近年来产业界针对中短期实用化,探索了两条发展路径,其中一个趋势是波长交换粒度的灵活化与精细化。目前,波长交换已经实现了基于 50 GHz 波长通道粒度的密集波分复用(DWDM)系统和基于大于 50 GHz 波长通道粒度的超通道(superchannel)的灵活粒度光交换。图 4 描述了基于超通道的电层及光层调度,进一步提升了系统光谱利用率和系统传输容量。

2.4 高速光电器件技术

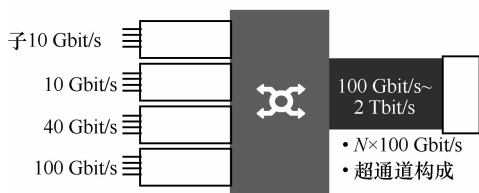
光器件性能、设计水平和工艺是实现高性能光通信系统的必要保障,也是整个光通信产业链的硬实力和基石。传统的光器件的不同功能必须采用不同的材料来实现,由众多分立元件组成,生产环节多、大量依靠手工调试和校验、生产效率低、价格昂贵。而光子集成技术,尤其是采用大规模半导体制造工艺(如 CMOS)的硅光集成技术,能一举突破器件成本、集成度和功耗的诸多瓶颈,开始引领光

器件技术的新一轮产业变革。

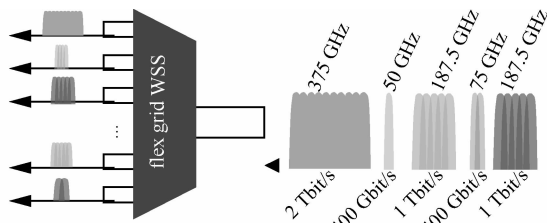
光子集成最初源于 20 世纪 90 年代初提出的 PIC (phonic integrated circuit) 技术,即采用三五族材料(如 InP)实现包括光源在内的所有光器件的单片集成,并且已经实现了商用。然而基于三五族材料的集成光器件加工复杂、成本较高,光通信产业急需一种集成度更高、加工成本更低的统一平台来实现未来的单片集成和光电集成。受到硅在集成电路中广泛运用的启迪,业界从 20 世纪 80 年代开始致力于利用硅材料实现光电子器件的功能,利用现有的 CMOS 工艺线进行加工,实现光电器件的 Fabless(设计和生产分离)模式。

2004 年,美国 Intel 公司和美国康奈尔大学的研究人员^[25,26]分别在《自然》杂志上报道了基于马赫—增德尔干涉仪结构和微环谐振腔结构的 GHz 高速硅光调制器,开启了硅光研究的新纪元。2010 年,IBM^[27]发布了史无前例的 40 Gbit/s 的锗波导型雪崩探测器,工作电压低至 1.5 V,对于低功耗的接收端应用具有不可估量的意义。硅光关键器件单点技术的陆续突破为下一步的大规模集成奠定了坚实的基础。2015 年底,IBM^[28]联合美国几所高校利用 45 nm CMOS 工艺将 6 000 万个晶体管和 850 个光子器件集成在一个芯片上,达到了硅光集成领域的新高度。目前,硅光技术已经基本成熟,并开始在光通信系统上商用,典型代表是美国创新公司 Acacia,其硅光子 100 Gbit/s 相干光模块代表了硅光技术商用的最高水平。

硅光技术目前正悄悄引领光网络产业的一次划时代的技术变革,将光通信产业从分立器件时代带入了自动化、规模化生产的集成芯片时代,其影响力不亚于从电子管时代进入晶体管集成电路时代给电子线路产业带来的巨大震撼,但硅材料本身并不是最完美的材料。目前发现的二维材料石墨烯用于光电器件上,相比于硅材料,在理论上能够得到更大的带宽、更低的驱动电压和更小的尺寸^[29]。而且,由于石墨烯的生产制备可以兼容硅基 CMOS 工艺,因而目前的硅光技术和工艺可以进一步移植到石墨烯器



(a) 信道集合与 flex-OTN



(b) 超通道路由与 flex grid WSS

图 4 基于超通道的电层调度及光层调度



件的生产制备上。此外,在目前的硅光器件中直接引入石墨烯,能够实现两种材料的优势互补,构成更加强大的下一代“超硅光”技术。

未来,硅光/石墨烯技术作为一种平台技术,将能够实现下一代全光网络的各种光交换、光路由、光逻辑、光存储和光信号处理器件^[30-36]。而且,基于硅光的量子通信^[37,38]、微波光子学^[39-41]也是目前的研究热点。一旦光电器件的加工技术能够像微电子加工技术一样不断取得进步,利用光子晶体和人工介质材料的新型光电器件将在不远的未来走向实用^[42-44]。这些器件的优势在于能够实现新型的光学操控机理,完全有可能从物理上颠覆现有光网络中的器件种类和网络架构,实现光网络的大幅度简化和光通信产业的革命。

2.5 其他新型技术

(1) 超低损耗光纤+拉曼放大

采用超低损耗光纤及拉曼放大器技术,可以大幅度提升高速传输距离。两项技术的结合可带来 4.4~6 dB 的增益,使得传输距离可提升 200%以上,大大缓解香农极限的距离限制。

(2) C+L 传输波段扩展

将传输通道从 C 波段扩展到 L 波段,通过 C+L 两个波段可以覆盖接近 200 个 50 GHz 间隔的波长通道。未来几年,随着 L 波段器件的工艺和性能(功率、增益)更加成熟,相应的抑制非线性干扰(如受激拉曼效应、交叉相位调制)的技术也更加完善,预计在光纤缺乏且很难部署新光纤的长途干线上,C+L 波段传输方案会率先少量部署应用。

(3) 非正交 WDM 传送技术

所谓 FTN 系统是指载波频率间隔小于调制信号的符号率,而在以往的正交频谱系统中,载波间隔则远大于调制符号率,并通过 DSP 技术对串扰损伤进行补偿和消除。通过非正交信号处理技术,采用高符号率低阶调制格式,可获得高阶调制相同的频率效率和单纤容量,也能利用低阶调制的 OSNR 优势,实现更长的传输距离。

除此之外,一些其他的光传输技术,例如量子通信、轨道角动量(OAM)和光孤子传输等研究也取得了重要的进展,这些为未来光传输系统的探索提供了重要的信息和参考。

3 光纤通信系统未来发展的驱动力及挑战

光通信系统技术发展的驱动力来自新兴业务,具体如

图 5 所示。纵观信息产业发展潮流,DC 云互联业务、超宽视频业务、5G 移动网络业务无疑将逐渐成为未来支撑光通信发展的主要支柱,并将驱动光通信产业实现全新的架构转型。



图 5 光纤通信系统在云时代所需支撑的新兴应用及服务

(1) DC 云互联业务

互联网的发展,导致传统城域+干线的企业专线逐步演进为云专线接入+DCI 云干线的模式。以 DC 为中心的网络重构的关键在于干线网络品质(时延、QoS),这要求网络架构简单扁平,实现大带宽管道光层一跳直达。

(2) 超宽视频业务

目前,视频流量已占到通信管道流量的 70%以上,随着未来虚拟现实和增强现实(VR/AR)、360°全景、高速摄影、多角度 MV 等新视频技术的发展,数据带宽将呈几何量级增加。城域 NFV 是适用这一趋势的目标架构,可以减少网络节点规模,降低建网成本,确保 CO 到 vBRAS 间的大带宽、低时延以及灵活可达,满足视频体验的要求并确保了可靠性。

(3) 5G 移动网络业务

5G 技术承载了物联网、车联网、语音、数据等各类业务,未来高频 200 Mbit/s 下前传单路 CPRI 非压缩带宽可达 200 Gbit/s。且由于提供的业务种类繁多,业务的处理机制和网络节点不尽相同,所以需要进行差异化处理,针对不同的业务,提供不同的网络功能切片、不同的处理机制、不同的管道和 QoS 等级需求。

未来光网络在 DC 云互联、超宽视频和 5G 业务驱动下向极简化演进,其核心需求就是超带宽、低时延,并且需要网络具有高可靠性、业务快速发放且开放协同。这些都将成为下一代光通信网络的典型特征。

(4) 超宽带

从光通信诞生之日起,带宽一直是其发展最内在和最主

要驱动力。随着历史的发展,通信系统的传输容量在不断扩大,尤其进入 WDM 时代,好似半导体领域的摩尔定律,高速传输每 4 年会出现一次飞跃。WDM 单波传输速率由 1996 年的 2.5 Gbit/s 增长到 2016 年的 400 Gbit/s,以 flex grid 传输 100 波计算,单纤容量达到 40 Tbit/s。然而,近 10 年来,光通信在传输带宽方面的发展速度已经明显放缓,落后于互联网流量的增长速度,产业界正在探寻更加有效的突破性技术,各种形式的空分复用技术可能是最终的扩容手段。

(5) 低时延

未来的网络将围绕数据中心组网,对时延的要求非常苛刻,比如对一家华尔街交易公司来说,交易过程中 1 ms 的改进可能意味着一年 1 亿美元进账,此外,网络游戏对时延非常敏感,根据 3GPP 标准,良好的网游体验需要少于 10 ms 的时延。因此,未来网络需要光波长一跳直达,由此避免了百倍的带宽增长需要百倍电层处理的恶性循环,极大地降低了时延。

(6) 高可靠性

目前,电信网络的安全保障建立在多种保护和恢复技术之上,包括每个功能模块的高度可靠、1+1/1:1 系统备份、网络层面的恢复机制等。任何一种保护和恢复机制的失效都会引起对网络和业务的不同程度的影响。未来网络无疑将更深地渗入社会生产生活中,网络业务的中断将造

成更加重大的影响,因此要求网络具备更加可靠的保护和预防措施,“秒级中断恢复”将成为网络的必备功能。

(7) 业务快速发放

目前,WDM 端到端发放一条波长业务,需要到站点现场做大量的手工操作,开通的时间为几周到几个月不等。在云时代,人们普遍追求实时按需提供带宽,“分钟级业务开通”,实现近乎实时的业务开通体验,将是下一代光网络的关键特征之一。

(8) 开放协同

未来网络向云数据中心演进,以提供越来越多的有竞争力的云服务,对中间的承载网络提出了更高的开放、协同的要求。不同的光网络系统间需要更多的互联互通,进行多点多域协同,以实现业务的快速匹配,并通过共享硬件资源来降低网络建设成本。

4 光纤通信系统未来发展的演进趋势

DC 云互联、超宽视频及 5G 业务将引领光通信系统朝超带宽、低时延、高可靠性、业务快速发放和开放协同五大网络特性演进,而未来光通信系统的技术发展也必然与之相匹配。光通信系统的技术发展主要有 4 根主线:网络调度、器件、传输和管控。图 6 描述了光纤通信系统未来发展的演进趋势。

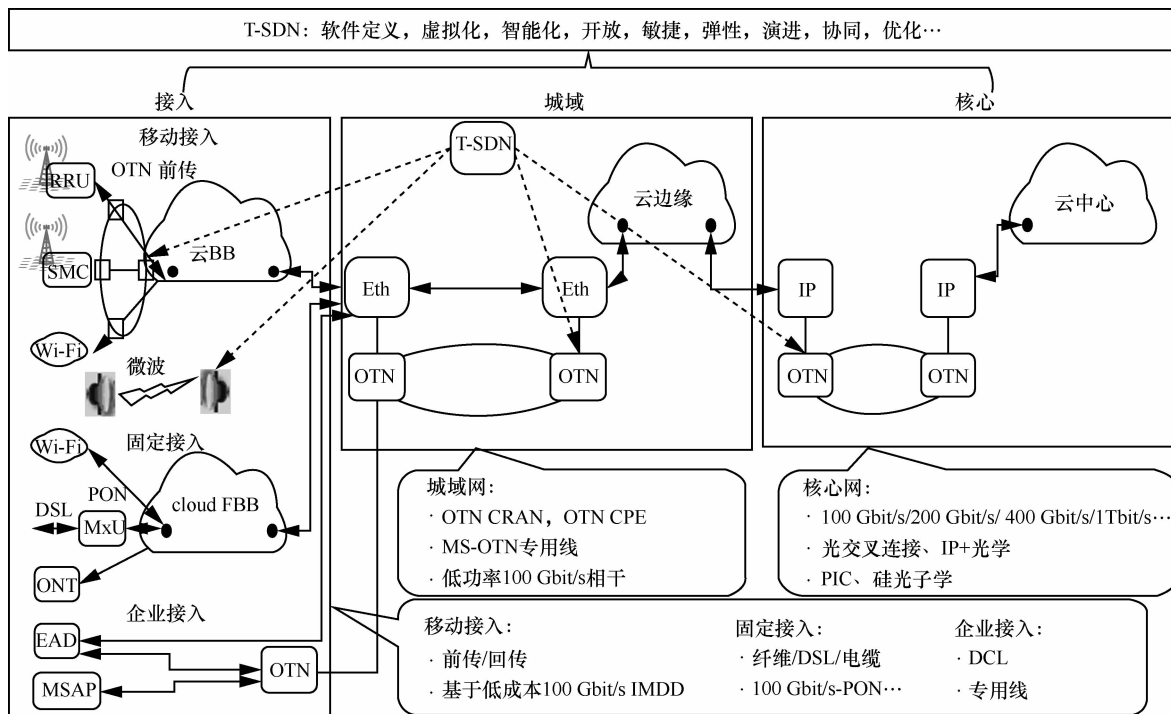


图 6 光纤通信系统未来发展的演进趋势



4.1 骨干网络

骨干网络将在以下几方面继续发展:

- 单波速率继续提高(100 Gbit/s/200 Gbit/s/400 Gbit/s/1 Tbit/s),性能进一步提升;
- 高维度大容量光交换及 WSS 的广泛应用;
- IP 与光的协同;
- 高密度光芯片集成与硅基光电子的成熟化。

4.2 城域网络

城域网络将在以下几方面继续发展:

- 降低收发器的成本、功耗和体积将成为一个重点的攻关方向。比如,将 100 Gbit/s 相干光收发器做成 CFP 级乃至 CFP2 级是一个研发热点;
- 结合简单的强度调制/直接检测(IMDD)和 ODSP 实现低成本单波 100 Gbit/s 非相干光收发器。比如,20 GHz 带宽光电器件和 Poly-binary PAM-4 或 DMT 调制的结合;
- 网络的简化和优化;
- 企业专线的普及应用;
- 移动承载的进一步深入。

4.3 接入网络

接入网络将在以下几方面继续发展:

- 移动前传与回传的低成本解决方案;
- 高容量微波传送方案;
- 高速光纤到户(如 100 Gbit/s PON)及铜线接入的支撑;
- 现代企业专线;
- 数据中心互联(DCI)。

4.4 软件定义传送网络

早期的光通信系统结构简单、功能单一,主要依托硬件构建网络运行机制。但经过数十年的发展,光通信网络结构越来越复杂,不同时期、不同体系、不同功能的设备共存,同时也带来了巨大的管理维护开销,导致对客户需求响应的缓慢,由此诞生了软件管控技术,以提升运维效率。光通信管控技术的发展主要分 3 个阶段:自动化控制、开放化协同和物联智慧化。

4.4.1 自动控制化

2000 年以前的 SDH 光网络还是基于网管的人工管理配置系统。2000 年后,随着互联网业务的迅猛增长,光网络也开始向 IP 化方向演进(MSTP),网络建设规模也越来越大。产业界开始在光网络中引入自动交换光网络(ASON)控

制平面技术,实现了光网络的自动资源发现、自动拓扑发现、自动业务发放和自动业务恢复这 4 个自动化技术,使光网络成功实现了人工管理到自动控制的转型和演进。

4.4.2 开放协同化

ASON 等自动管控技术的引入虽然从很大程度上缓解了运维复杂性的问题,但多域间的网络协同依然困难重重,如跨层网络独立运作、网络资源利用率等,尤其是面对 OTT 的挑战时,当前的传送网络系统显得更加捉襟见肘。2008 年,美国斯坦福大学在产业界首次提出了 SDN 的概念,启动了网络智能化的转型。T-SDN 技术的出现给光网络带来了新的曙光,以控制器为核心的新一代的传送网络系统架构已经基本成型并被产业界认可。

在 SDN 技术的影响下,当前的传送网络正朝着虚拟化、开放化的方向发展,这些 SDN 技术不但给传统业务注入了新的活力,还能很好地匹配和适应当前出现的一些新业务对网络的需求。比如典型的虚拟传送网络服务(VTNS)技术,不但能够提供点到点的虚拟专线、点到多点虚拟多播网、多点到多点虚拟专网等多种典型网络业务,而且还能够满足客户动态按需带宽请求,分钟级在线发放以及满足客户自主进行虚拟网络运维等一系列需求。目前,T-SDN 技术发展迅速、产业环境良好,很快将实现业务快速响应、资源配置优化、简化运维和开放第三方协同等综合网络系统管控能力。图 7 描述了一种基于软件定义网的新型光传送网络技术平台,其致力于更佳的用户体验(其中,*表示商用进程模型)。

4.4.3 物联智慧化

T-SDN 未来的演进需要具备对业务的深度感知。系统通过各种业务的流量数据,进行大数据分析和预测,自动调整优化承载网络,使网络自动适应业务变化,实现人工智能化的 T-SDN 解决方案。而在连接万物的背后,承载网络将变得更加瞬息万变,这对其控制管理系统将提出更大的挑战。

(1)带宽大

对超大带宽的调度,会对网络资源分配的合理性造成较大的冲击,这就要求网络任何一处局部的变化,都需要从全局角度衡量,这对管控系统的处理能力来说是很大的考验。

(2)变化频

未来网络业务瞬息万变,考验网络管控系统对大量业务变化的并行处理和优化能力以及对未来网络变化的预

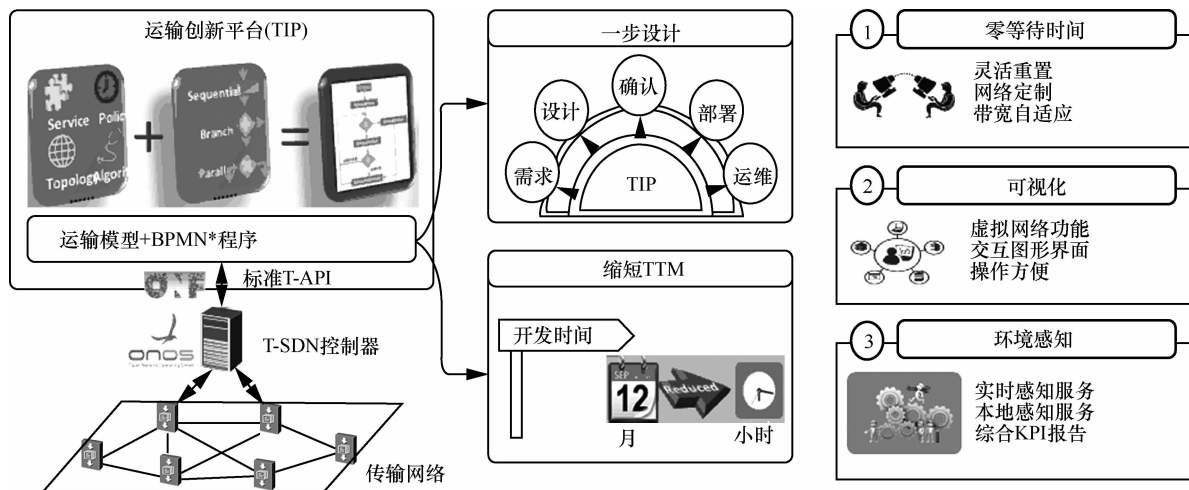


图7 一种基于软件定义网的新型光传送网络技术平台

测能力。

(3) 响应快

“零等待开通”、“零中断倒换”将成为多数业务的普遍需求,这就要求网络管控系统能以最快的速度对网络事件进行响应。

(4) 类型多

未来网络面向万物,对网络的需求五花八门,因此要求网络管控系统能够按需在线加载新网络功能,考验软件平台在线编程和快速创新的能力。

(5) 要求高

未来网络将如同自来水一样重要,因此网络业务的中断将造成更大的影响,因此要求网络具备更加可靠的保护和预防措施。

巨大的挑战意味着将孕育出更大的网络变革。前沿的软件技术和网络控制管理技术的深度融合是应对这一挑战的关键。云计算、大数据分析、预测、人工智能自学习等IT顶尖技术普遍应用到网络管控系统,将使管控系统实现从执行命令式的“智能”到自主决策式的“智慧”的质变。

(6) 管理与控制在软件上深度融合

未来对下层物理设备的管理和对上层业务的控制将深度结合,形成一个“有机生命体”,实现网络控制和管理功能的模块化、可组装化,各功能模块之间通过软件交互紧密配合。

(7) 真正的网络可编程

未来SDN将通过对基础功能组件化设计封装以及提供全新的“面向意图”的传送网编程方式,实现ICT编程的融合,从而极大地降低了编程创新门槛,方便和鼓励运营

商或第三方进行业务创新,共同繁荣传送网络的生态。

(8) 自学习与人工智能

未来的网络管控系统,不仅在空间维度对底层物理信息和上层网络、业务信息深度感知,而且在时间维度上对网络的历史数据了若指掌,通过对这些“四维”立体数据的深入分析和不断积累的自学习,可帮助运营商快速准确做出各种预测和决策。

(9) 云计算

未来网络网络管控系统云化、并行存储与计算是必然的趋势。与此同时,“全息”软件计算将在云化控制器中广泛使用,保证任何服务器、存储设备的故障均不会影响网络管控,大大提升管控系统的可靠性。

5 结束语

将来网络的应用基于DC云互联、高清视频和5G业务驱动,将呈现出多样化的场景,新型应用对网络的诉求除了带宽,还有低时延、高可靠性、业务快速发放和开放协同等要求。比如,自动驾驶、触觉互联网以及新一代视频业务对网络时延敏感,金融和工业自动化对网络可靠性敏感,云专线需要业务快速发放。这些都是未来电信网络面临的巨大挑战,也是光网络产业发展的良机,因为只有光通信系统技术能够满足这些需求。而支撑光网络成功应对这些挑战的主要核心技术包括基于4K+LCoS的多维多路WSS的下一代CDC ROADMs,硅光集成技术推进光器件/模块的高集成化、低成本,ODSP+高波特率器件构建的超大带宽长距传输技术和基于T-SDN的超强管控技术。

展望更远的未来,随着科学进步以及一系列技术难点



的突破,未来的光网络将逐渐发展成为一种泛在光网——全光网。首先,“光”覆盖的范围将进一步加大;在设备层面,机框之间已经是光互联了,处理板卡之间会进行光互联,甚至芯片之间也会进行光互联;在网络层面,光将会用于连接网络设备、家庭,甚至还会用于连接人和“物”。光无线将和光有线网络融合,这会导致光网络需要管理控制的实体增长多个数量级,未来光网络的管理控制机制将更为高效和灵活。其次,“光”应用的功能将进一步增强。“光”逻辑处理将更加实用化,全光子波长交换将会成熟。“光”还将实现其他更多功能,例如光 AD/DA 转换、光傅立叶变换、光再生、量子通信等。各类显示技术,如各类图片、视频、VR/AR 等将广泛应用,这些也是基于“光”,“光”显示将会与“光”网络有机地融合。物联网将普及,各类传感技术将逐步成熟。可以预期,光纤通信及其带动的相关产业将在未来的 50 年继续为人类文明做出更大的贡献。

参考文献:

- [1] KAMINOW I P, KOCH T L. Optical fiber telecommunications IV[M]. Salt Lake: Academic Press, 2002.
- [2] KAMINOW I P. Optical fiber telecommunications V [M]. Salt Lake: Academic Press, 2007.
- [3] KAMINOW I P, LI T, WILLNER E. Optical fiber telecommunications VI[M]. Salt Lake: Academic Press, 2013.
- [4] WELLBROCK G, WANG T, ISHIDA O. New paradigms in optical communications and networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(51): 22-23.
- [5] TOMKOS I, MUKHERJEE B, KOROTKY S K. The evolution of optical networking [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(5): 1017-1022.
- [6] XU C, LIU X, WEI X. Differential phase-shift keying for high spectral efficiency optical transmissions [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10(2): 281-293.
- [7] JANSEN S L, VAN D B D, SPINLER B, et al. Optical phase conjugation for ultra long-haul phase-shift-keyed transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1): 54-64.
- [8] HO K P. Phase-modulated optical communication systems [M]. New York: Springer, 2005.
- [9] LOWERY A J, LIANG D, ARMSTRONG J. Orthogonal frequency division multiplexing for adaptive dispersion compensation in long haul WDM systems[C]//2006 National Fiber Optic Engineers Conference, March 5-10, 2006, Anaheim, California. New Jersey: IEEE Press, 2006: 1-3.
- [10] SHIEH W, ATHAUDAGE C. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing[J]. Electronics Letters, 2006, 42(10): 587-589.
- [11] SAVORY S J. Digital filters for coherent optical receivers [J]. Optics Express, 2008, 16(2): 804-817.
- [12] SHIEH W, DIORDJEVIC I. Orthogonal frequency division multiplexing for optical communications[M]. Salt Lake: Academic Press, 2010.
- [13] WELLBROCK G, WANG T, ISHIDA O, et al. New paradigms in optical communications and networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(51): 22-23.
- [14] WANG, TINGWELLBROCK, GLENNISHIDA. Next generation optical transport beyond 100G [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(2): s10-s11.
- [15] BOYDEN E S, FENG Z, ERNST B. Millisecond-timescale, genetically targeted optical control of neural activity [J]. Nature Neuroscience, 2005, 8(9): 1263-1268.
- [16] CHANDRASEKHAR S, LIU X, ZHU B, et al. Transmission of a 1.2-Tb/s 24-carrier no-guard-interval coherent OFDM superchannel over 7200-km of ultra-large-area fiber [C]//35th European Conference on Optical Communication, Sept 20-24, 2009, Vienna, Austria. New Jersey: IEEE Press, 2009.
- [17] LIU X, CHANDRASEKHAR S, WINZER P J. Digital signal processing techniques enabling multi-Tb/s superchannel transmission [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(2): 16-24.
- [18] LIU X, CHANDRASEKHAR S. Superchannel for next-generation optical networks [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 9-13, 2014, San Francisco, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1-33.
- [19] ZHOU Y R, SMITH K, PAYNE R, et al. Field trial demonstration of real-time optical superchannel transport up to 5.6 Tb/s over 359 km and 2 Tb/s over a live 727km flexible grid link using 64G [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 34(2): 805-811.
- [20] JINNO M, TAKARA H, KOZICKI B, et al. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(11): 66-73.
- [21] Characteristics of multi-degree reconfigurable optical add/drop multiplexers: ITU-T Recommendation G.672[S]. 2012.
- [22] ANSHENG L, RICHARD J, LING L, et al. A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor [J]. Nature, 2004, 427(6975): 615.
- [23] YOO S J B. Optical packet and burst switching technologies for the future photonic Internet [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4468-4492.
- [24] DENG N, YANG Y, CHAN CK, et al. Intensity-modulated labeling and all-optical label swapping on angle-modulated optical packets [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(4): 1218-1220.

- [25] GEORGIOS S Z, JOAN T, NORBERTO A, et al. A novel metro architecture for flexible multi-granular services [J]. Optics Express, 2011, 19(26): B509-B514.
- [26] XU Q F, SCHMIDT B, PRADHAN S, et al. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator [J]. Nature, 2005, 435 (7040): 325-327.
- [27] SOLOMON A, FENGNIAN X, VLASOV Y A. Reinventing germanium avalanche photodetector for nanophotonic on-chip optical interconnects[J]. Nature, 2010, 464(7285): 80-84.
- [28] SUN C, WADE M T, LEE Y, et al. Single-chip microprocessor that communicates directly using light [J]. Nature, 2015, 528(7583): 534-538.
- [29] PHARE C T, LEE Y H D, CARDENAS J, et al. Graphene electro-optic modulator with 30 GHz bandwidth [J]. Nature Photonics, 2015, 9(8).
- [30] SEOK T J, QUACK N, HAN S, et al. Large-scale broadband digital silicon photonic switches with vertical adiabatic couplers[J]. Optica, 2016, 3(1): 64-70.
- [31] TAN D T H, SUN P C, FAJMAN Y. Monolithic nonlinear pulse compressor on a silicon chip[J]. Nature Communications, 2010, 1(8): 173-184.
- [32] FERRERA M, PARKAZZARI Y, RAZZARI L, et al. On-chip CMOS-compatible all-optical integrator [J]. Nature Communications, 2010, 1(3): 605-629.
- [33] FAN L, WANG J, VARGHESE L T, et al. An all-silicon passive optical diode[J]. Science, 2012, 335(6067): 447-450.
- [34] YAN S, DONG J, ZHENG A, et al. Chip-integrated optical power limiter based on an all-passive micro-ring resonator [J]. Scientific Reports, 2014(4): 6676.
- [35] LIU L, DONG J, GAO D, et al. On-chip passive three-port circuit of all-optical ordered-route transmission [J]. Scientific Reports, 2014(5).
- [36] KURAMOCHI E, NOZAKI K, SHINYA A, et al. Large-scale integration of wavelength-addressable all-optical memories on a photonic crystal chip[J]. Nature Photonics, 2014, 8(6): 474-481.
- [37] FAKONAS J S, LEE H, KELAITA Y A, et al. Two-plasmon quantum interference[J]. Nature Photonics, 2014, 8(4): 317-320.
- [38] SILVERSTONE J W, SANTAGATI R, BONNEAU D, et al. Qubit entanglement between ring-resonator photon-pair sources on a silicon chip[J]. Nature Communications, 2015(6).
- [39] KHAN M H, SHEN H, XUAN Y, et al. Ultrabroad-bandwidth arbitrary radiofrequency waveform generation with a silicon photonic chip-based spectral shaper [J]. Nature Photonics, 2010, 4 (2): 117-122.
- [40] SUN J, TIMURDOGAN E, YAACOBI A, et al. Large-scale nanophotonic phased array [J]. Nature, 2013, 493 (7431): 195-199.
- [41] WANG J, SHEN H, FAN L, et al. Reconfigurable radio-frequency arbitrary waveforms synthesized in a silicon photonic chip[J]. Nature Communications, 2015(6): 5957.
- [42] MELIKYAN A, ALLOATTI L, MUSLIJA A, et al. High-speed plasmonic phase modulators [J]. Nature Photonics, 2014, 8 (8): 229-233.
- [43] ANSELL D, RADKO I P, HAN Z, et al. Hybrid graphene plasmonic waveguide modulators[J]. Nature Photonics, 2015(6).
- [44] HAFFNER C, HENI W, FEDORYSHYN Y, et al. All-plasmonic mach-zehnder modulator enabling optical high-speed communication at the microscale[J]. Nature Photonics, 2015, 9(8).

[作者简介]



崔秀国(1974-),男,华为技术有限公司 Fellow,主导华为波分 100 Gbit/s/200 bit/s/400 bit/s 开发,开创同步 OTN 架构,业界率先解决大容量 OTN 系统可实现性问题,带领团队完成 OTN ASIC 套片研发,推进 OTN 产品商用化进程,主导 NG SDH 平台的架构设计与规划。



刘翔(1970-),男,博士,华为技术有限公司美国研究所光网络高级专家,美国光学学会会员,美国光学快报副主编,2016 年光纤通信会议(OFC)的技术委员会主席。曾在贝尔实验室从事了 14 年的高速光纤传输技术研发工作,如 40 Gbit/s/100 Gbit/s/400 Gbit/s/1 Tbit/s 传输。已撰写 300 多篇学术论文,拥有 60 多项美国专利,曾荣获中国国家发明奖二等奖、贝尔实验室总裁奖两次及华为固网总裁奖。



操时宜(1975-),男,华为技术有限公司高端专家、传送技术研究技术负责人,主要从事光传送网络架构研究、光交换技术研究工作等。



周敏(1984-),男,博士,华为技术有限公司传送产品线营销专家,主要从事光网络领域的技术与产业营销工作,目前已发表学术论文 14 篇,拥有国家发明专利 16 项。