



专题:光纤发明 50 周年

光网络 30 年:回顾与展望

郑小平, 华楠

(清华大学光网络与微波光子学实验室, 北京 100084)

摘 要:作为信息网络基础架构的核心一环,光网络具有不可替代的重要地位。首先回顾了光网络的诞生过程并总结了其 30 年研究和发展历程中具有重大意义的里程碑事件,并根据未来网络需求探讨了光网络发展所面临的挑战和可能的发展方向。

关键词:波分复用;自动交换光网络;软件定义网络;全光网络;光/IP 融合网络;光/无线融合网络

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016145

Review and outlook of 30 years of optical network development

ZHENG Xiaoping, HUA Nan

Laboratory of Optical Networks & Microwave Photonics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: As the core of the information network infrastructure, optical network has an irreplaceable important role. The birth process of optical network and the important milestones in its 30 years research and development course were reviewed firstly, then the challenges and possible development trends of optical networks according to future network demands were discussed.

Key words: wavelength division multiplexing, automatic switched optical network, software defined network, all-optical network, converged packet-optical network, converged wireless-optical network

1 光网络发展历程回顾

当前,以信息技术为核心的全球新一轮科技革命和产业变革正在蓬勃兴起,信息网络基础设施建设成为其重中之重。作为信息网络基础架构的核心一环,光网络具有不可替代的重要地位。所谓“光网络”,从严格意义上来说,要求数据的传输、交换均在光域上进行,即“全光网络”。而通常所说的“光网络”,一般指使用光纤作为主要传输介质的广域网、城域网或局域网,而交换、控制可以在电层实现。

可以看到,无论是狭义还是广义光网络,均基于光纤通信。

1.1 光纤的发明

1966 年,英/美籍华裔物理学家高琨(Charles K Kao)博士在 PIEEE 杂志上发表了名为《Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies》的论文^[1],从理论上证明了用高纯度石英玻璃纤维(即光纤)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,美国康宁公司和贝尔实验室分别于 1970 年和

收稿日期:2016-04-01;修回日期:2016-05-09

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2014CB340104/05);国家自然科学基金资助项目(No.61321004, No.61435006)

Foundation Items: The National Key Basic Research Program of China(973 Program)(No.2014CB340104/05), The National Natural Science Foundation of China (No.61321004, No.61435006)

1974年研制出损耗为20 dB/km和1.1 dB/km的低损光纤,后者于1976年在美国亚特兰大开通了世界第一条光纤通信试验线路,中继距离为10km,速率为45 Mbit/s。1977年,光纤通信线路首次在美国芝加哥投入商用,用于电话线路。然而,此时的光纤通信仅局限于点到点传输,尚未形成网络。

1.2 光网络的出现

光网络的出现要追溯到20世纪80年代中期。1985年,贝尔通信研究所提出基于光纤通信的SONet(synchronous optical network,同步光纤网)标准。1988年,国际电报电话咨询委员会(CCITT,ITU前身)根据SONet的概念开始制定更为通用的SDH(synchronous digital hierarchy,同步数字系列)标准,并于1992年形成了第一批建议。SONet/SDH集传输、复用和交叉连接于一体,构成了第一代光网络的基础。

此后,SDH产业化快速发展,622 Mbit/s、2.5 Gbit/s、10 Gbit/s SDH系统分别于1993年、1995年和1996年进入商用化阶段,光通信开始显露出大容量的优越性。然而,让光通信产生革命性变化的,是波分复用(wavelength-division multiplexing, WDM)技术的出现。

波分复用的概念最早在1970年被提出^[2],但直到20世纪90年代,其发展才进入快车道。1992年,美籍华裔光通信专家厉鼎毅(Tingye Li)博士带领他的团队在贝尔实验室开发出了世界第一套8×2.5 Gbit/s WDM光通信系统,并首先提出在WDM系统中使用光放大器^[3,4],推动了长距离大容量光通信的发展。

此后,光通信系统的容量不断提升。2011年OFC大会上,NEC美国实验室的研究人员宣布其在实验室成功实现

了单纤101.7 Tbit/s的数据传输^[5],逼近了单模光纤通信容量的香农极限。如此巨大的带宽一度被认为用之不尽,解决了网络传输过程中的带宽瓶颈问题,WDM光网络也取代了SDH光网络,迅速发展壮大。

如图1所示,最初的WDM光网络与第一代SDH光网络相同,是一种基于点到点传输的光网络,在光网络节点处,数据需进行光—电—光(O-E-O)转换,并在电层进行处理和交换。点到点WDM光网络仍然无法克服节点处电交换速率的瓶颈问题,同时,光—电—光转换过程对协议格式和通信速率均不透明,使得转换设备非常复杂,系统成本因此大幅增加。随着WDM波长数以及单波长数据传输速率的提高,该瓶颈表现得愈加突出。直到全光交换器件出现后,这种情况才得以改变。

1.3 波长路由光网络

为了解决点到点WDM光网络节点处的光电转换瓶颈问题,20世纪90年代中期出现了以OADM(optical add-drop multiplexer,光分插复用器)及OXC(optical crossconnect,光交叉连接器)为代表的的全光交换器件^[6],从而在中间交换节点处避免了O-E-O转换,实现了波长粒度的全光透明交换。在采用这些全光交换器件后,21世纪初,点到点WDM光网络演变为波长路由全光网络^[7,8],第二代光网络由此诞生。

然而,最初的波长路由光网络仅能实现静态配置传输资源的功能,如果要建立一条跨多个路由域的光通路,通常的做法是,综合网管根据业务源/目的节点,查询所经的路由域以及所经路由域的出/入节点和出/入端口。之后通知每一个子网网管的操作人员,根据当时子网资源查询域内路由资源,完成路由所经节点的开关(端口)配置,并将

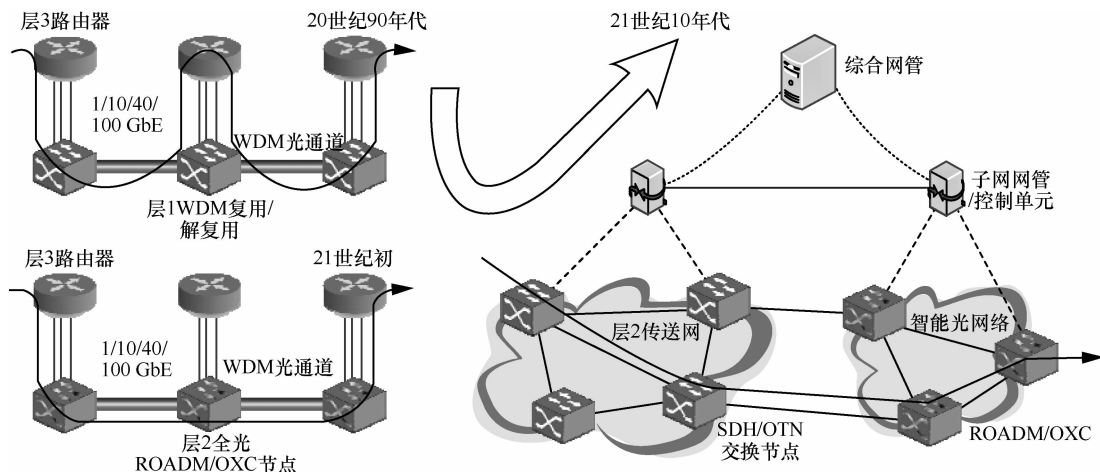


图1 WDM光网络演进路线

配置结果和资源变动情况上报综合网管。综合网管在接收到所有经由路由域的成功光通路配置上报信息后,判断整个跨域光通路建立成功。通常,这种通过人工配置的建路方法建立一条光通路需要几小时甚至几天的时间,无法满足动态业务需求。而且,随着光网络规模的扩大、业务的增多,光网络的管理和维护成本也将逐步提高,业务服务质量和网络生存性难以得到保证。

1.4 自动交换光网络

为了实现光网络的高度灵活性、扩展性并保证业务的服务质量和网络生存性,一种新型的自动交换光网络(automatically switched optical network,ASON)^[9]体系结构出现了,它将光层组网技术和基于IP的智能网络控制技术相结合,在传统波长路由光网络传输平面和管理平面的基础上增加了控制平面,并引入路由、信令和链路管理等协议,自动完成数据的交换、传输等功能,从而使光网络由静态的传送网变为可动态重构的智能光网络。这种光网络通常被认为是第三代光网络。

随着光网络规模的不断扩大,对其控制和管理变得异常困难。应对这个问题的主流思想是对网络进行分域管控,将整个光网络基础设施根据地理位置、管理区域、设备类型等因素划分为多个独立的域。这些基础设施可能来自

不同的设备制造商,并采用不同的交换技术或控制技术,使得光网络呈现明显的多域异构化趋势。

1.5 异构光网络互联

单域ASON体系结构在进行多域异构化扩展的过程中遇到了很大障碍。为了实现跨域光通道的自动建立和拆除,ITU-T在G.8080中定义了外部网络—网络接口(ENNI)^[9],它规定了ASON控制域之间需要交互的信息格式。在此基础上,光互联论坛(OIF)提出了基于ENNI的OSPF分层路由协议^[10]和ENNI信令协议^[11],用于异构厂商控制平面的互通。然而至今为止,其仍未能达到预期目标。

如何实现大规模多域异构光网络的互联成为迫切需要解决的问题。

为解决该问题,清华大学提出了ICCME异构光网络管控架构,如图2所示,并基于该架构在2014年于商用设备平台上实现了全球首次跨3个设备商路由域的端到端动态连接建立、拆除、保护倒换和重路由^[12]。ICCME架构在传统ASON“三平面”基础上建立了“通用域间管控平面”,抽象域内信息,并通过统一的域间通信协议完成跨域路由计算和域间连接控制。ICCME架构同时引入“适配平面”统一各设备商控制信息,消除不同路由域之间的异构性,实现不同类型、厂商设备的异构互联^[13]。

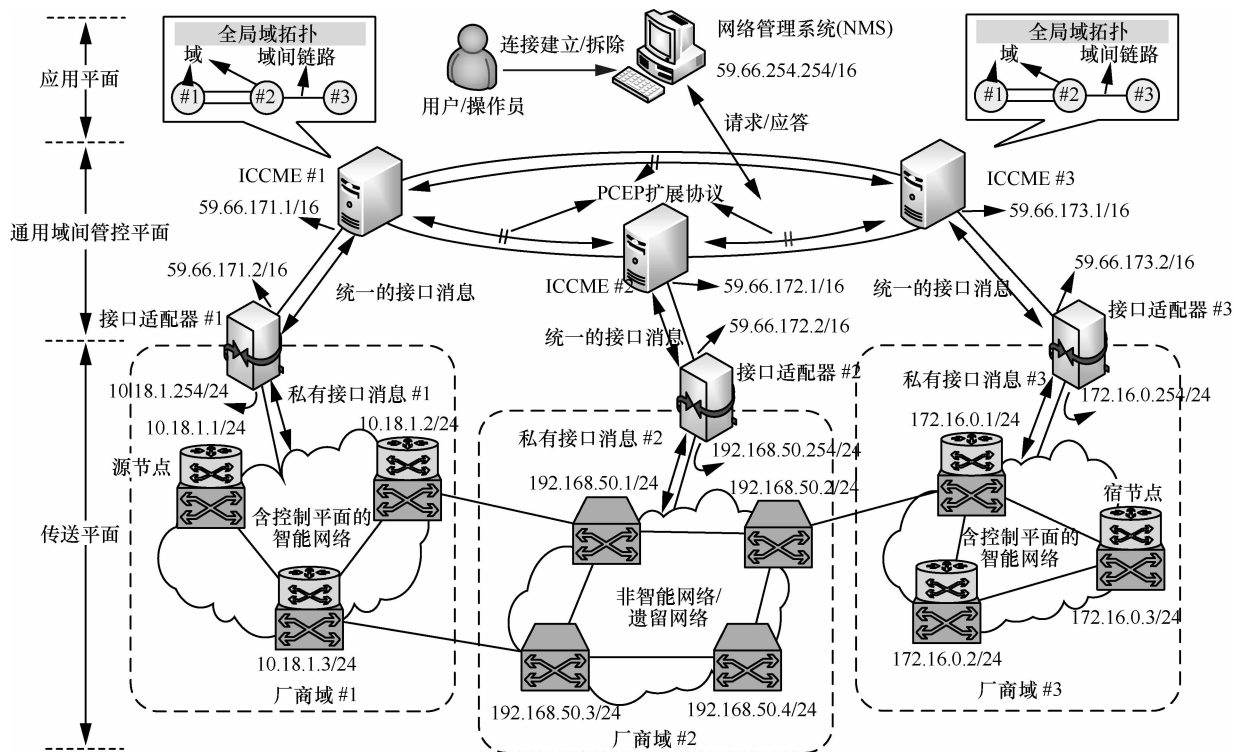


图2 基于 ICCME 的多域异构光网络管控架构^[12]

2015年,中国电信也通过扩展 OpenFlow 协议,成功完成了基于 SDN 的跨 3 个 OTN 设备厂商路由域的多域互通测试^[14]。

以上两项工作均依靠自主研发,解决了国际上多年未解决的光网络互通重大问题,受到了学术界和产业界的高度关注,为光网络的发展带来了深远的影响。

2 光网络发展面临的瓶颈

回顾光网络走过的历程,30 年来发展迅猛并取得了巨大成就,奠定了其在信息网络基础架构中不可替代的核心地位。然而,随着人们对网络带宽需求的持续高速增长以及云计算、物联网、数据中心、4G 及未来 5G 移动通信等新型应用和网络业务的不断涌现,现有的光网络已难以满足未来需求,光网络的发展也面临着巨大瓶颈。

2.1 传输容量和网络建设成本

单纤数据传输达到的巨大容量一度被认为用之不尽,然而,随着人们对网络带宽需求的快速增长,这个看法将发生改变。如图 3 所示为思科公司(Cisco)在 2015 年发布的全球可视网络指数(visual networking index, VNI)预测白皮书中对 2014–2019 年全球 IP 数据流量增长的预测^[15]。思科公司预计:2014–2019 年,全球 IP 数据流量将增长近 3 倍,折合复合年增长率(CAGR)23%。到 2019 年,全球 IP 数据流量将达到 2 ZB/年,相当于 28 万亿小时的音乐流,或 5 万亿小时的网络会议流量。与此相对的是,光通信容量的增速已大幅落后于 IP 流量增速,在过去 5 年间,单模光纤的实验室传输容量已达到了 100 Tbit/s 左右的理论极限;而在商用系统中,考虑传输容量和距离的乘积,现网实验水平也距离极限不远,扩展空间很小。

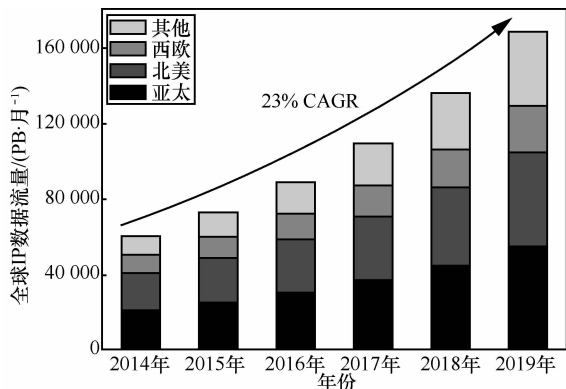


图3 2014–2019 年全球 IP 数据流量预测
(数据来源: Cisco VNI 2015)

为了满足 IP 数据流量增长的需求,光纤通信可能需要向着空分复用(spatial division multiplexing, SDM)的方向发展。一般来说,SDM 技术可以通过两种方法来实现:使用多芯光纤实现纤芯层面的复用;使用少模光纤实现模式层面的复用。当然,也可以通过使用少模—多芯光纤同时实现纤芯和模式的复用。不管采用哪种方法,都是通过增加并行系统来加倍传输容量。2012 年,日本 NTT 公司使用 12 芯光纤实现了 1.01 Phit/s 容量的 52 km 传输^[16],2015 年,日本信息通信研究院公布了 36 芯 3 模的 5.5 km 混合传输实验,每个纤芯模式实现了 40×100 Gbit/s 的数据传输^[17]。

然而,在实际网络中,光信号在多芯光纤和少模光纤中进行传输时会受到芯间串扰和模间串扰的物理限制,在长距离传输时会严重降低信噪比和传输容量^[18]。在接收端采用多输入多输出数字信号处理(MIMO DSP)可有效提高信噪比并增加传输容量,但整个系统的传输距离和容量将受限 DSP 处理能力^[19]。采用强耦合技术替代弱耦合可大幅降低接收端对 DSP 处理能力的要求,从而实现更高的网络容量^[20],如图 4 所示。但现有的 DSP 技术水平尚难以做到接收信号的实时在线处理。

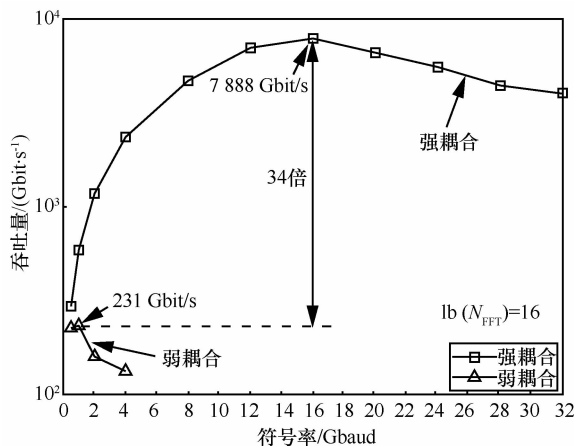


图4 模分复用网络容量^[20]

SDM 传输系统中的物理限制在网络层面表现为一些新的网络约束条件,使得 SDM 网络容量的提升难以达到理想情况下的理论极限^[20];另一方面,这些新的网络约束条件通过影响业务的路由和资源分配过程,对网络的部署成本产生影响,从而影响 SDM 技术的应用场景^[21]。可见,从网络容量和建设成本角度看,SDM 技术目前尚看不到明确的商业应用前景。需要一方面进一步通过技术研发提高其容量并降低成本;另一方面为其寻找应用突破口,例如,

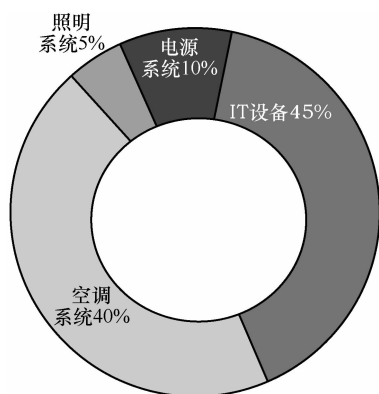


应用于数据中心网络(DCN)和高性能计算网络(HPCN)中降低所需光纤的数量,或应用于长距离海底通信,减少光放大器所需的电力供应等。

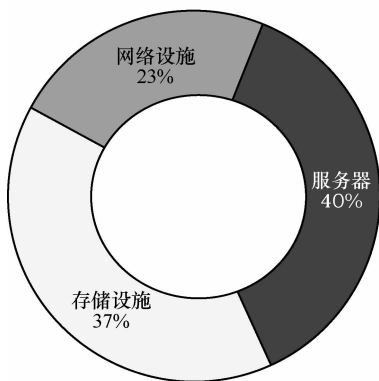
2.2 光交换粒度

传输容量的急剧增长带来网络节点处巨大的数据交换压力,采用电交换技术节点的体积、成本及能耗随交换容量的增加成线性增长趋势,网络容量将受限于路由器或交换机的带宽和能耗瓶颈。该问题在具有大容量密集交换需求的数据中心网络和高性能计算网络中尤为突出。以数据中心能耗为例,美国斯坦福大学的一项调查显示:2010年全球数据中心电力消耗为2 355亿度,约占全球电力消耗的1.3%。中国的数据中心能耗也高速增长:2012年我国数据中心能耗高达664.5亿度,占当年全国工业用电量的1.8%^[22]。

图5(a)所示为数据中心的能耗分布^[23],其中,IT设备的能源消耗占到了45%。在这45%的能耗中,网络设施的能耗又占到了23%,如图5(b)所示。因此数据中心网络设施的能耗约占总能源消耗的10.35%,十分可观。



(a) 能耗分布



(b) IT设备能耗分布

图5 数据中心能耗分布

采用全光交换是突破带宽能耗瓶颈的有效途径。然而,现有全光电路交换只能提供波长级的大交换粒度,远大于现有IP网络中的业务粒度。这种粒度失配造成对光网络进行波长扩容并无法带来有效网络容量的增加,导致光网络巨大的带宽资源难以得到充分利用,削弱了全光交换的优势。

全光分组交换(optical packet switching, OPS)和全光突发交换(optical burst switching, OBS)可以提供亚波长级细粒度交换,但其依赖全光缓存及全光逻辑器件,而这些器件目前尚不成熟,且在可以预见的将来,其实用前景并不乐观。

远低于波长粒度、不依赖光缓存的细粒度光交换及组网技术亟待突破,其实现将为未来光网络的发展带来质的变革。目前国际上这方面的研究正处于萌芽阶段,但已有加速发展的趋势。

2.3 网络控制

目前,单域光网络的智能控制问题已基本得到解决并逐步商用化,多域异构光网络的跨域控制问题也已取得巨大进展,已实现多厂商多设备类型网络跨域互通的基本功能测试。然而,随着云计算、物联网、数据中心、4G及未来5G移动通信等新型应用和网络业务的出现和快速发展,作为信息网络的基础,光网络面临着和IP网络及无线网络在更广义上的无缝动态异构融合,如图6所示,这些难以通过现有光网络的控制架构实现。

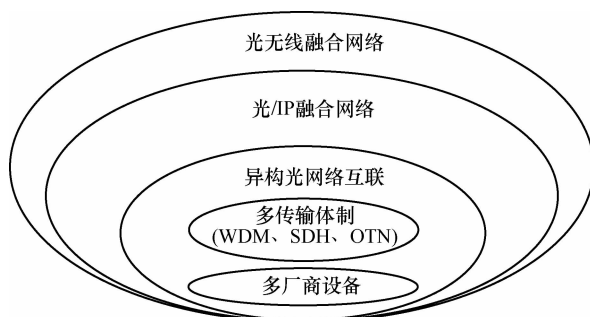


图6 异构光网络互联以及光/IP、光无线网络融合

3 光网络的发展趋势

3.1 光/IP网络的融合

随着互联网IP业务在传送网络中所占比重越来越大,如何将IP网络和光网络更好地配合起来,为分组数据业务提供容量更大、粒度更灵活、更可靠、更智能的传送已经成为光网络和IP网络共同的愿景,驱动着光网络的研究向着IP层与光层融合方向发展。

然而, 基于分组交换的 IP 网络和基于电路交换的光网络的交换机制和组网模式有本质不同, 二者实现动态互通和统一控制难度非常大, 需要面对众多技术挑战。首先, 光/IP 融合网络的统一控制架构需要考虑光网络物理层的限制, 例如光功率、物理损伤、信号可达性、连接建立速率、可用带宽、交换粒度等因素。其次, 与光网络与 IP 网络的业务建立(传送)方式不同, 它们之间存在巨大的时延差异。由此导致的业务建立和故障恢复时的协同控制问题也是需要解决的瓶颈问题。研究表明, 商用光传送网的业务建立时延, 即使在小规模情况下也将达到几百毫秒到几秒量级, 这对于 IP 网络中的时延敏感业务来说明显过高, 构成光网络与 IP 网络互通的巨大障碍。

为实现光/IP 网络的无缝融合, 清华大学在 2015 年提出了一种基于“超级虚拟路由器”的光/IP 融合网络架构以及一种基于该架构的“资源缓存”技术, 实现了 IP 业务在光传送网上的无缝传输^[24]。

图 7 展示了基于“超级虚拟路由器”的光/IP 融合网络控制架构。为了规避光网络与 IP 网络的交换机制和组网模式差异, 该架构将每一个光子网视作一个“超级虚拟路由器”, 并通过一个支持 OpenFlow (OF) 协议的虚拟路由器代理将该光子网与 SDN 控制器相连。从控制角度看, 在采用这种架构后, 光网络和 IP 路由器在层 3 拓扑上实现统一, SDN 控制器不必对其进行区分。因此, 无需对现有基于 IP 网络的 SDN 架构和协议进行本质改变或扩充便可实现光/IP 混合网络的统一控制。同时, 该架构保留了现有光网络的控制平面, 规避了 SDN 控制器难以对存在物理层限制的光网络进行动态控制的难题。

统一的控制架构并不能消除光网络的业务建立时延,

因此不能解决时延敏感 IP 业务在光网络的传输问题。“资源缓存”技术的提出可有效解决这个问题。“资源缓存”的概念如图 7 所示。首先整个光网络资源被分为两部分, 用其中小部分资源构建“缓存层”, 其余资源构建“负载层”。在缓存层预先为每个光网络边缘节点对, 即“超级虚拟路由器”的一组出入端口, 建立一定带宽的固定光通道。当 IP 业务到达光网络边缘节点时, 如负载层不存在对应的已有光通道, 则首先用“缓存层”的固定通道为其提供临时数据传输, 如图 8(a)所示。由于该操作不存在建路过程, 因此从根本上消除了建路时延。与此同时, 利用光网络控制平面在负载层为上述业务建立新通道, 当新通道建立完成后, 将缓存层业务切换至负载层的新光通道, 完成整个业务传送流程, 如图 8(b)所示。由于光通道的切换过程不改变光网络对 IP 网络端口的配置, 因此该过程对 SDN 控制器来说是不透明的, 也就是说, SDN 控制器对虚拟路由器(光子网)和 IP 路由器的控制不存在本质区别。

3.2 光/无线网络的融合

图 9 给出了思科公司在 2015 年发布的全球可视网络指数 (visual networking index, VNI) 预测白皮书^[19]中对 2014–2019 年全球移动 IP 数据流量增长的预测。思科公司预计: 2014–2019 年, 全球移动 IP 数据流量的复合年增长率 (CAGR) 将达到 57%, 远高于占全部 IP 数据流量 23% 的 CAGR。同时, 移动 IP 数据流量将在 2019 年占比近 15%。如此快速的移动业务流量增长将推动光网络更紧密地和无线接入网融合, 为其提供更好的带宽调配。

相比于 IP 网络的融合, 光网络和无线网络的融合面临一些更本质的问题。例如, 现有动态光网络的业务源节点和目的节点都是固定的, 不随时间的推移而发生变动。

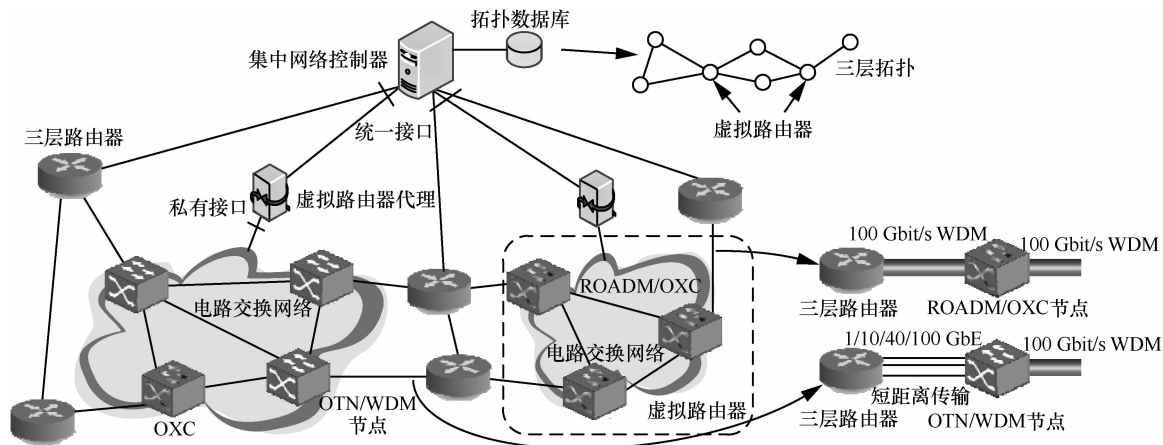


图 7 基于“超级虚拟路由器”的光/IP 融合网络控制架构

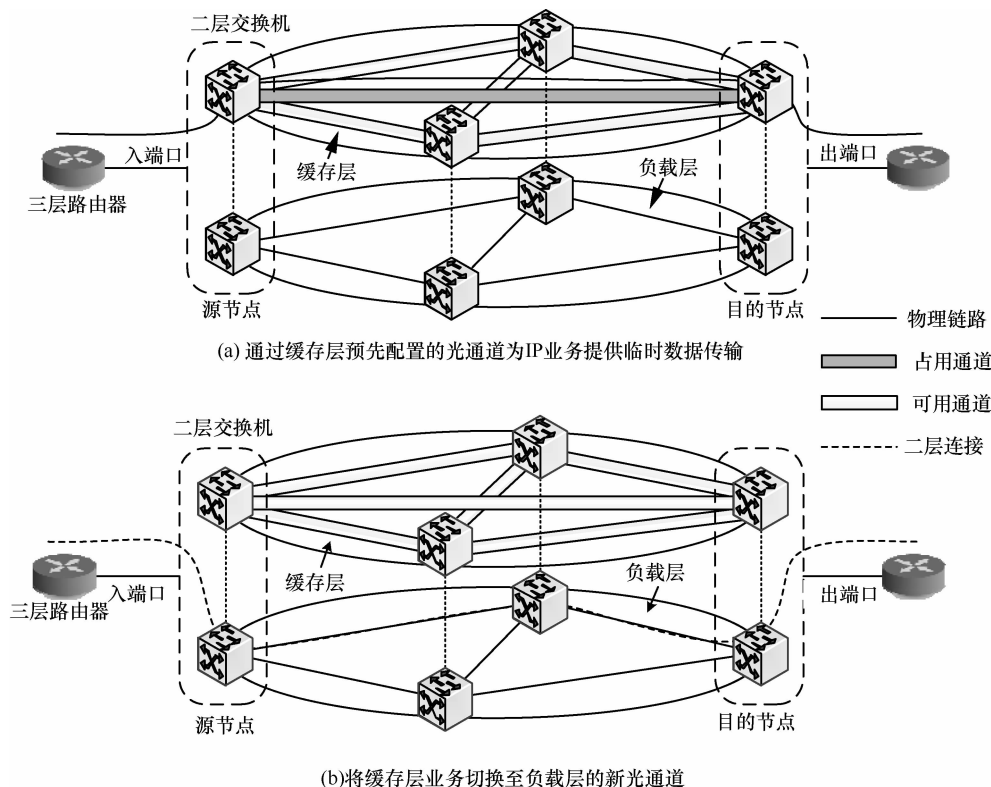
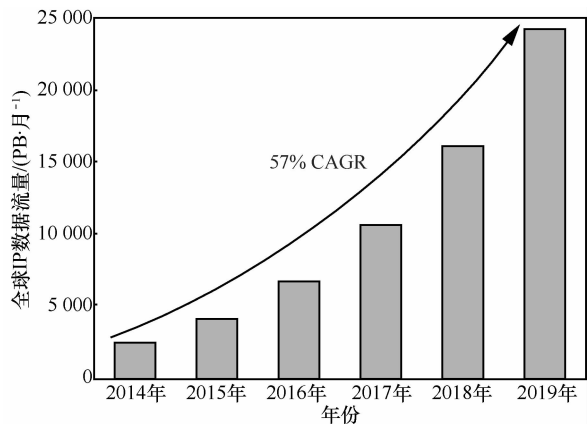


图8 通过“资源缓存”实现IP业务在光传送网上的无缝传输

图9 2014–2019年全球移动IP数据流量预测
(数据来源: Cisco VNI 2015)

然而,这种情况将随着移动通信容量的增加以及交通工具速度的提高而改变。在可以预见的未来,为高速铁路提供大容量通信的需求将给底层光网络带来类似“越区切换”的问题,导致业务的源/目的节点不再固定,光网络的路由模型由此将发生改变。目前,已有针对高铁通信这种最简单的一维“移动源”路由问题的研究,并已取得了一些初步成果^[25]。

相比业务的“移动性”,在光/无线融合网络中,网络资

源的“不确定性”将使问题更加复杂化。随着移动通信领域的大规模 MIMO (massive multiple-input multiple-output) 技术以及多点协同 (coordinated multiple points transmission/reception, CoMP) 技术的出现,灵活、大容量的按需无线覆盖成为可能。这导致在光/无线融合网络中为移动业务计算路由和调度资源时,业务的源/目的节点和网络拓扑、链路资源都可能是不确定的,无法通过传统的网络模型解决。目前相关研究正处于起步阶段,有广阔的发展空间。

3.3 细粒度全光交换网络

在第 2.2 节中提到,为了支撑未来数据中心和高性能计算中心中的业务需求,光网络必须具备细粒度、高灵活度的全光交换能力。现有光网交换粒度一般为单个波长或光纤级,交换粒度粗糙,与大部分 IP 业务的粒度不匹配,造成光网络带宽效率低下,网络资源浪费严重,不能充分发挥光网络在带宽容量上的优势。另一方面,由于光网络信息传输需要预先建立通道连接,连接数受限于光纤数量、波长数量和网络拓扑,因此在大型数据中心和高性能计算中心中,光网络能提供的连接数远不能满足所有服务器之间的全连接需求,这就大大地削弱了数据中心和高性能计算中心光网络的性能和优势。因此,全光网络的细粒

度化成为了一个重要的发展趋势。

目前可实现远低于波长粒度的细粒度光交换技术均为时域光交换技术。光分组交换(OPS)/光突发交换(OBS)技术是其代表,于20世纪90年代末由美国研究人员提出。OPS/OBS技术可以通过调整光分组大小,将网络的交换粒度做到远小于波长带宽容量的水平。然而,在光缓存和光逻辑器件一直未能取得实质性突破的情况下,这两种技术均无法摆脱电处理过程,例如,光分组头的解析、用于拥塞控制的电缓存等。这导致OPS/OBS的能耗相比电交换没有质的降低,无法充分发挥光交换的优势。此外,OPS/OBS的分组头处理和拥塞控制非常复杂和困难,成本高昂,难以大规模应用于实际的商用设备。

为了克服OPS/OBS的局限,实现不依赖光缓存的无冲突超细粒度全光交换,清华大学于2013年提出了全光时片交换(optical time slice switching, OTSS)技术^[26],并于2016年通过实验验证了其在数据中心光网络中应用的可行性^[27]。OTSS基于全网高精度时间同步,利用全网统一的时间标签实现全网可用资源状态的实时获取以及动态业务路由规则计算,并通过各个节点的高速光开关在精准的时间执行其对应的路由规则,完成业务数据交换,如图10所示。该技术从原理上就可实现在无光缓存情况下的任意粒度无冲突全光交换,其最小交换粒度取决于业务时延需求、时间同步精度、传输时延抖动量以及光开关速度等因素。作为OTSS的使能技术,高精度网络时间同步和高速光开关经过多年发展已日趋成熟。

典型的高精度网络时间同步协议 IEEE 1588v2 于

2008年发布,由欧美发达地区和国家主导,是目前产业界主流的精确时间同步协议。中国移动已于2014年建成了全球首个基于IEEE 1588v2的商用高精度授时网络,实现了跨千公里的OTN链路和13跳PTN链路以225 ns为精度的时间同步精度^[28],在产业发展方面具备一定的优势地位。

高速电光开关技术在21世纪初被日美公司垄断并蓬勃发展,多家公司都推出4×4 ns级光开关商用产品。其后随着OPS/OBS的研究热潮褪去,高速光开关的发展近乎停滞,直到近年来数据中心建设需求的爆发和光硅基集成技术的成熟,高速光开关技术研发已开始抬头并呈加速之势,且国内外在该方向的研究基本处于同一水平。目前已见国内科研院所报道实现16×16 ns级光开关原型产品^[29]。

4 结束语

回顾光网络的30年发展历程,依次经历了SDH光网络、波长路由全光网络、自动交换光网络3代,网络容量和控制灵活性都有了质的提高。近年来异构光网络互通问题的解决更是推动光网络向更大的规模、更广的范围飞速发展,巩固了其在信息网络基础架构中不可替代的核心地位。然而,也要看到,随着人们对网络带宽需求的持续高速增长以及云计算、物联网、数据中心、4G及未来5G移动通信等新型应用和网络业务的不断涌现,光网络的发展面临着传输容量、交换粒度以及网络控制方面的巨大瓶颈。本文围绕这些瓶颈问题进行了详细的讨论,并在此基础上对光网络的未来发展趋势进行了预测。在可以预见的将

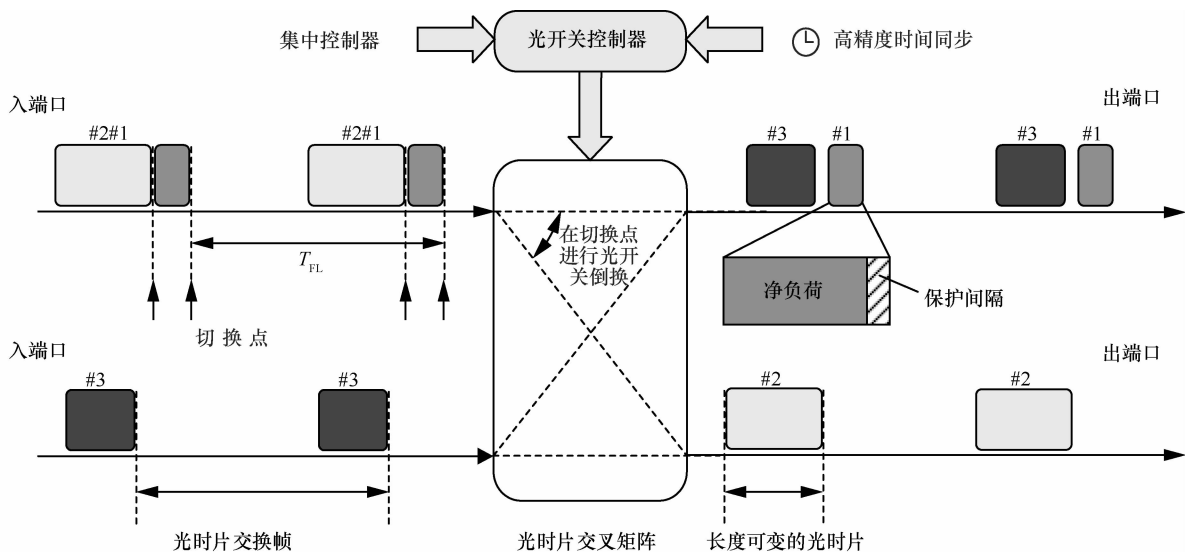


图10 全光时片交换原理示意



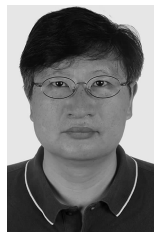
来,光网络将实现与 IP 网络和无线网络的无缝融合,并向着更大的容量和更细的交换粒度发展。

参考文献:

- [1] KAO K C, HOCKHAM G A. Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies[J]. *Optoelectronics*, 1986, 133(3): 191-198.
- [2] DELANGE O E. Wide-band optical communication systems: part II -Frequency-division multiplexing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, 58(10): 1683-1690.
- [3] LI T. High-capacity lightwave transmission: ultra-high speed on wavelength multiplexing[C]//The Fourth OSA Topical Meeting Proceedings on Picosecond Electronics and Optoelectronics, March 13-15, 1992, Salt Lake City, Utah, USA. New York: Springer US, 1992(9): 265-266.
- [4] LI T. Optical amplifiers and transparent networks-a resurgence of excitement in light-wave communications[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 16-21, 1992, San Francisco, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 1992: JMA4.
- [5] QIAN D, HUANG M F. 101.7-Tb/s(370×294 Gbit/s) PDM-1 28QAM-OFDM transmission over 3×55 km SSMF using pilot-based phase noise mitigation[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), March 6-10, 2011, Los Angeles, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2011: PDPB5.
- [6] TACHIKAWA Y, INOUE Y, KAWACHI M, et al. Arrayed-waveguide grating add-drop multiplexer with loop-back optical paths[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29 (24): 2133-2134.
- [7] RAMASWAMI R, SIVARAJAN K N. Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, 14 (5): 840-851.
- [8] BANERJEE D, MUKHERJEE B. Wavelength-routed optical networks: linear formulation, resource budgeting tradeoffs, and a reconfiguration study[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2000, 8(5): 598-607.
- [9] ITU-T. Architecture for the automatic switched optical network (ASON): G.8080/Y.1304[S]. 2001.
- [10] OIF. External network-network interface (E-NNI) OSPFv2-based routing-2.0 (intra-carrier) implementation agreement: OIF-ENNI-OSPF-02.0[S]. 2011.
- [11] OIF. OIF E-NNI Signaling Specification: OIF-E-NNI-Sig-02.0[S]. 2009.
- [12] LIU W, CHEN X, HUA N, et al. A distributed stateful PCE-based architecture for providing end-to-end connections in multi-domain multi-vendor optical networks[C]//2014 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 21-25, 2014, Cannes, France. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1-3.
- [13] LIU W, HUA N, ZHENG X, et al. Intelligent inter-domain connection provisioning for multi-domain multi-vendor optical networks [J]. *Journal of Optical Communications & Networking*, 2015, 7(3): 176-192.
- [14] JING R, ZHANG C, MA Y, et al. Experimental demonstration of hierarchical control over multi-domain OTN networks based on extended OpenFlow protocol [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: WAJ.4.
- [15] INDEX V N. Cisco visual networking index: forecast and methodology, 2014-2019 white paper[R]. 2015.
- [16] TAKARA H, SANO A. 1.01-Pb/s(12 ~SDM ~/~222 ~WDM/~456 ~Gb/s)crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency [C]//2012 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 18-22, 2012, Düsseldorf, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2012.
- [17] SAKAGUCHI J, KLAUS W, MENDINUETA J M D, et al. Realizing a 36-core, 3-mode fiber with 108 spatial channels[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 18-22, 2015, LA, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: Th5C.2.
- [18] LI G, BAI N, ZHAO N, et al. Space-division multiplexing: The next frontier in optical communication[J]. *Advances in Optics & Photonics*, 2014, 6(4): 5041-5046.
- [19] ARIK S O, ASKAROV D, KAHN J M. Effect of mode coupling on signal processing complexity in mode-division multiplexing[J]. *Journal of Light-wave Technology*, 2013, 31(31): 423-431.
- [20] LI Y, HUA N, ZHENG X, et al. Impact of mode coupling on the capacity of mode-division multiplexing networks with MIMO equalization [C]//Optical Fiber Communications Conference, March 22-24, 2016, LA, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2016: Tu2H.5.
- [21] LI Y, HUA N, ZHENG X. CapEx advantages of multi-core fiber networks[J]. *Photonic Network Communication*, 2015: 1-11.
- [22] 胡弘毅. 能耗弥巨已成数据中心发展瓶颈[EB/OL]. (2014-12-10) [2016-01-17]. <http://dc.idcquan.com/jfjs/65392.shtml>.
HU H Y. Huge energy consumption has become a data center development bottleneck[EB/OL]. (2014-12-10)[2016-01-17]. <http://dc.idcquan.com/jfjs/65392.shtml>.
- [23] KACHRIS C, TOMKOS I. A survey on optical interconnects for data centers[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012, 14(4): 1021-1036.
- [24] ZHENG X, HUA N, ZHONG Z. Achieving heterogeneous packet-optical networks inter-connection with a software-defined unified control architecture[C]//Optical Fiber Communications

- Conference, March 22-24, 2015, LA, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015.
- [25] HUA N, ZHENG X. A moving source routing solution for high-speed railway communication in optical core transport networks[C]//Optical Fiber Communications Conference, March 22-24, 2014, LA, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: Th4E.6.
- [26] HUA N, ZHENG X. Optical time slice switching (OTSS): An all-Optical sub-wavelength solution based on time synchronization[C]//Asia Communications and Photonics Conference, November 12-15, 2013, Beijing, China. New Jersey: IEEE Press, 2013: AW3H. 3.
- [27] LI Y, HUA N, ZHENG X. Fine-grained all-optical switching based on optical time slice switching for hybrid packet-OCS intra-data center networks [C]//Optical Fiber Communications Conference, March 22-24, 2016, LA, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2016: W3J. 5.
- [28] HAN L, LI H, WANG L, et al. First national high-precision time synchronization network with sub-microsecond accuracy over commercial optical networks for wireless applications[C]//Asia Communications and Photonics Conference, November 14-17, 2014, Beijing, China. New Jersey: IEEE Press, 2014: PDP-AF4B.6.
- [29] QIAO L, TANG W, CHU T. 16×16 non-blocking silicon electro-optic switch based on Mach-Zehnder interferometers[C]//Optical Fiber Communications Conference, March 22-24, 2016, LA, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2016: Th1C. 2.

[作者简介]



郑小平(1965-),男,清华大学电子工程系教授、博士生导师。面向国家宽带信息网络发展的重大需求,长期致力全光通信网络与微波光子学的研究,先后负责、参与国家重大/点基金、“973”计划课题、“863”计划重大/点、国防专项等 20 余项国家及科研项目。获省部科学技术进步奖二等奖两次、三等奖两次,获授权国家发明专利 20 余项,发表论文百余篇。



华楠(1981-),男,清华大学电子工程系助理研究员、硕士生导师。2003 年 7 月毕业于清华大学电子工程系,获得工学学士学位;同年 9 月免试推荐在清华大学电子工程系直接攻读博士学位;直博期间于 2008 年 5-7 月赴德国夫琅和费电信研究院海茵里希—赫兹研究所(HHI)进行为期 3 个月的访问研究;2009 年 1 月获得工学博士学位,同年留校进行博士后研究,后留校工作至今,从事智能光网络管控及交换方面的研究工作。现为 IEEE、OSA 会员,IEEE JOCN、IEEE JSAC、OSA Optical Express、SPIE Optical Engineering、IET Communication 等杂志的审稿人,OSA Advanced Photonics、IEEE/OSA/SPIE ACP 等国际学术会议的 TPC 成员。获授权国家发明专利 10 余项;发表 SCI/EI 检索论文 90 余篇。