



专题：全光网技术与应用

全光网标准化现状与技术发展分析

汤瑞¹, 张庚², 吴冰冰¹, 赵文玉¹, 张海懿¹

(1. 中国信息通信研究院, 北京 100191; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 全光网一直被认作光通信网的终极目标。近年来随着液晶、微电子机械系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)技术的发展和波长选择开关(wavelength selective switch, WSS)等可配置光器件的成熟, 全光网再次成为研究和应用的焦点。在介绍全光网技术现状和系统架构的基础上, 重点梳理了相关标准化研究的最新进展, 进一步探讨了全光网有待解决的技术问题, 最后对其未来发展前景进行了展望。

关键词: 全光网; 可配置光分叉复用器; 微电子机械系统; 标准化

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019067

Analysis on the progress of all-optical network standardization and technology development

TANG Rui¹, ZHANG Geng², WU Bingbing¹, ZHAO Wenyu¹, ZHANG Haiyi¹

1. China Academy of Information and Communication Technology, Beijing 100191, China

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China

Abstract: All-optical network has been considered as the ultimate goal of the optical communication network. With the development of liquid crystal and MEMS technologies and the maturity of configurable optical devices such as WSS, all-optical network has once again become the focus of research and application. Based on the technical status and system architecture of the all-optical network, the technical problems to be solved in the all-optical network were discussed, the latest developments in standardization research were sorted out, the typical problems existing in the all-optical network standardization were further analyzed, and its future developments were finally forecasted.

Key words: all-optical network, ROADM, MEMS, standardization

1 引言

全光网(all-optical network, AON)是指信息从源节点到目的节点之间全部采用光信号完成信

息交换和传输的网络。一方面技术发展使得单根光纤传输容量高达数十 Tbit/s, 另一方面随着互联网业务、数据中心互联等需求的迅猛膨胀, 传统电信号处理设备面临“电子瓶颈”限制, 用电信

收稿日期: 2019-03-06; 修回日期: 2019-04-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2016YFF0200205); 国家电网科技项目(No.5442XX180003-XX71-18-006)

Foundation Items: The National Key Research and Development Project (No.2016YFF0200205), The Project of State Grid Corporation of China (No.5442XX180003-XX71-18-006)



号处理设备构建网络将使节点变得庞大而复杂，直接在光域处理信息，可以避免“电子瓶颈”，充分利用光层组网灵活性。另外，随着液晶、微电子机械系统（micro-electro-mechanical system, MEMS）技术的发展和波长选择开关（wavelength selective switch, WSS）等可配置光器件的成熟，基于 WSS 的可重构光分叉复用器（reconfigurable optical add-drop multiplexer, ROADM）光交换技术已在部分运营商干线网络启动规模应用，全光网的研究及应用再次成为焦点。本文在介绍全光网关键技术的基础上，重点结合全光网面临的挑战探讨全光网标准化进展及技术发展趋势。

2 全光网关键技术

全光网的典型特征是端到端实现光域信息的传输和交换，涉及全光传输、波分复用和全光交换以及相应的管理控制等环节，关键技术主要包括光交换（如光交叉连接/光分插复用技术）、光波长转换以及波长管控技术等。

2.1 光交换

光交换/光路由即通过软件的灵活配置完成指定波长的交叉和上下路，保持光层的透明性而不影响其他波长通道的传输。目前光逻辑器件还无法完成控制部分复杂的逻辑处理功能，因此目前的光交换单元还是由电信号控制，即属于电控光交换，设备形态主要包括 ROADM 和 OXC（光交叉连接设备）两种。

ROADM 可以在一个节点上完成光通道的上下路（add/drop）以及穿通光通道之间的波长级别的交叉调度，也可以通过软件远程控制网元中的 ROADM 子系统实现上下路波长的配置和调整。目前，ROADM 子系统主要有 3 种结构，即 WB（波长阻断器）、PLC（平面光波导电路）和 WSS（波长选择开关），采用的工作机制主要采用电子机械开关（MEMS）、硅基液晶等新型光开关，其中最典型的 WSS 结构示意图如图 1 所示。另外，

近两年 $N \times M$ WSS 和 $N \times M$ MCS（多播光开关）也已经成熟并可商用，使得 ROADM 的波长配置更加灵活，可实现方向无关、波长无关、方向无关多种功能，同时 ROADM 也支持灵活栅格功能，实现最小 6.25 GHz 的栅格调整功能^[1-3]。

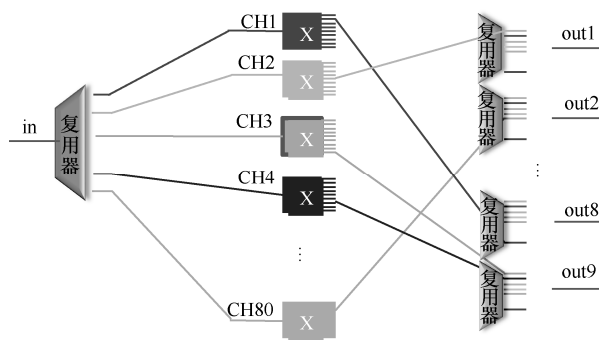


图 1 WSS 结构示意图

与此同时，基于低插损、高可靠的光背板交叉连接技术以及高维度的 WSS 技术的 ROADM/OXC 成为光交换技术新的发展方向，并逐步走向成熟。新一代的 ROADM/OXC 基于光背板技术，解决了传统 ROADM 连纤复杂的问题，能够简化光层连接，实现光层多维度互联，以满足光网络向大容量、低时延、低功耗的方向发展的诉求。

目前应用的 ROADM 和 OXC 还是固定带宽波长级的粗粒度带宽处理光交换节点设备，其他发展方向包括 OBS（光突发交换）或 OPS（光分组交换）等，以期更加灵活、有效地利用带宽，但受限于目前光学处理器件的性能，OBS、OPS 尚处于实验室研究阶段，商用尚待时日。

2.2 波长转换

全光网在交叉节点引入 ROADM/OXC 和波长转换器，通过波长转换器解决波长一致性的限制条件，可以大大提高波长利用率。尤其是对大容量、多节点的网状网，波长转换器的加入能大大降低网络的阻塞率。常见的波长转换技术主要有光/电/光波长转换技术和全光波长转换技术。

光/电/光波长转换技术需要将该光信号先转换为电信号,然后再将电信号调制为所需波长并发送,从而实现波长转换。这种技术的优点是可以将光信号精确地变换成所需的波长,还可以对信号进行再生、再整形和再定时,经过光/电转换,原先光信号的相位、幅度等信息会丢失,无法实现光信号的完全透明传输。但是,由于其技术成熟、性能稳定,是目前 ROADM 组网应用的首选方式,在电层使用中继型 OTU(光传送单元)或电交叉完成波长转换。

全光波长转换技术是在光域内将某一波长的光信号直接转换到另外的一个波长上,避免了光/电转换过程中的效率问题。目前全光的波长转换器还处于试验阶段,其成本仍有待降低而可靠性有待提高,而且基于全光的全谱工作范围波长转换器实现的难度更大。

2.3 波长管控

传统光网络是一种点到点的静态网络,随着 ROADM 技术以及 ASON(自动交换光网络)网络的发展,光网络的动态化成为可能。波长交换光网络(WSON)通过将控制平面引入光网络中实现波长路由的动态调度,通过自动完成波长路由计算和波长分配,实现波长资源的分布式管控。

在波长交换光网络中,光路径的配置受到底层物理传输系统和链路层物理特性的诸多限制。例如,在 WSON 中,路由和波长分配需要考虑的设备单元包括波分复用器、可调谐激光器、ROADM 以及波长转换器,对于光层的损伤,在接入、城域和长距 WSON 系统中考虑的技术因素存在典型差异。因此,在 WSON 中,为了实现动态的光路径建立,就需要对现有的 GMPLS(用多协议标记交换协议)和 PCE(路径计算单元)控制平面协议进行扩展,通过静态配置或者动态监测等手段,获取底层的物理层信息,通过动态信令和路由控制,完成端到端光路径的配置。

与 WSON 的分布式管控不同,ITU 正在定义的光媒质层以及 Open ROADM 组织定义的光层信息模型使光层更加开放,而管控机制也开始转向 SDN,基于灵活栅格的 CDC ROADM、超级通道和自适应速率调制等,光网络将变得比以往更加智能。

3 全光网标准化进展

目前,全光网的标准化主要集中在以 ROADM 为主要实现方式的设备节点和网络技术要求,其中针对 ROADM 的国际标准化工作主要在 ITU-T SG15 开展。ROADM 属于广义 OTN(光传送网)框架范围,ITU-T 已经定义了 OTN 的一系列标准,涵盖了 ROADM 网络的各个方面,包括体系架构(ITU-T G.871、ITU-T G.872)、结构和映射(ITU-T G.709、ITU-T G.7041、ITU-T G.7042)、功能特性方面(ITU-T G.798)、物理接口方面(ITU-T G.959.1、ITU-T G.693、ITU-T G.695、ITU-T G.698.2)、网络性能方面(ITU-T G.8251、ITU-T M.2401)、网络保护方面(ITU-T G.808.1、ITU-T G.873.1、ITU-T G.873.2)、网络安全方面(ITU-T G.664)等。

针对 ROADM 节点及子系统,ITU-T 定义了 ITU-T G.680(《光网元的物理传递功能》)、ITU-T G.671(《光器件和子系统的传输特性》)、ITU-T G.672(《多维可重配光分插复用器的特征》)等几个主要建议,定义了光网络网元的物理传递参数。对光网络单元进行了分类,如光交叉连接、光分插复用器、波长转换器等,列举了物理损伤特性(如光噪声、色散等),定义了 ROADM 器件和子系统的相关参数。

国内 ROADM 标准化工作在 CCSA(中国通信标准化协会)TC6 进行。目前,行业标准 YD/T 2003-2018(《可重构的光分插复用(ROADM)设备技术要求》)以及 YD/T 2489-2013(《可重构的光分插复用(ROADM)设备测试方法》)已经发布,



设备标准规定了 ROADM 设备的功能和性能, 包括 ROADM 设备的参考模型和参考点、ROADM 设备的基本要求、ROADM 设备光接口参数要求、波长转换器和子速率复用/解复用要求、监控通道要求和管理要求等以及相应的测试方法。

在控制平面方面, ITU-T G.8080 对自动交换光网络 (ASON) 的体系架构和功能需求进行了规范, 该架构和功能需求基于通用的网络模型, 适用于底层基于 SDH、基于 OTN 和基于分组交换技术的传送网络。基于 OTN 的 ASON 技术, 就是在基于光层和电层交换技术之上的控制平面技术。而 WSON 主要规范了基于波长交换光网络中的控制平面技术, 它并没有规定底层的传送平面接口规范, 而是对控制平面中的信令、路由、光层损伤控制进行了规范。目前 OTN 设备主要定义了 4 种类型: 终端复用设备、电交叉设备、光交叉设备、光电混合交叉设备, 因此, 从这个意义上来说, WSON 技术是 OTN 控制平面技术的一种。

ITU-T 目前正在讨论制定的与控制平面相关的标准主要是 ITU-T G.807 和 ITU-T G.876, 拟对光层的架构和管理需求等作出规范, 与控制平面相关的 WSON 技术主要在 IETF (Internet Engineering Task Force) 完成。对于 WSON 技术的具体实现, 目前主要采用 IETF 的 GMPLS 协议体系框架进行扩展。目前 IETF 对 WSON 的框架结构、信息模型、信令和路由需求、光层损伤需求等方面的研究已经基本成熟, 并形成了一系列的 RFC 文档包括 RFC6163、RFC7446、RFC7449 等。

另外, 控制平面及 SDN 的引入让解耦型的 Open ROADM 应用成为可能。Open ROADM 将 ROADM 根据功能模块进行拆解, 不同的功能模块可以由不同的厂商提供, 不同功能的模块提供开放接口, 可以由 SDN 控制器/编排器来统一调度。Open ROADM 目前主要由 Open ROADM MSA 来规范, 目前聚焦在城域部分, 定义了

ROADM 交换、波长转换器和可插拔光模块的规格, 包括光层互操作性和数据模型等。Open ROADM MSA 也正在研究对更长传送距离 (1 000 km) 和灵活频谱栅格的支持, 以满足更多的应用场景要求。

与 ROADM 相关的国际国内标准主要工作进展见表 1。

综上所述, 围绕常规 ROADM 全光组网的标准化工作在设备、网络、管理和控制等方面已经基本完成, 下一步标准化研究方向则应聚焦更多维度、更大容量光交叉的新型 ROADM/OXC 等节点类型。同时, 光层网络的开放趋势愈加明显, ROADM 和 OTN 电交叉混合组网, 结合跨层的网络协同优化、光层可编程的能力等实现广域 SDN 是光网络下一步标准化和应用的发展方向之一。

4 问题和前景

目前以 ROADM 为主要实现方式的全光网一定程度上实现了光域交换、光域传输和光域自愈, 但在诸多方面特别是光域管控和光域性能监视等方面还面临许多挑战。

(1) 光域交换方面

目前的光域交换主要以波长为粒度, 无法像电层一样实现精细的业务调度功能, 同时光开关的响应速度也极大影响业务的恢复性能。目前 OBS 和 OPS 都面临着短期无法完全解决的技术挑战。对 OPS 来说, 无论是基于分组头电处理, 还是基于光交换和光缓存, 目前所实现的技术都非常复杂, 仅处于实验室探索阶段, 距离实际应用尚有一段距离。另外, 虽然 OBS 回避了一些 OPS 的技术难题, 国内外的研究机构也建立了一些实验网络, 但距离实际商用依然尚待时日。

(2) 光域传输方面

全光网络的另外一个关键特征就是实现端到端的全光传输。由于目前信号的在光域实现 3R 的技术尚不成熟, 光信号在传输过程中受到光纤的色度色散 (CD)、偏振模色散 (PMD)、通道内和

表 1 与 ROADM 相关的标准和研究课题

标准组织	标准名称	备注
CCSA	可重构的光分插复用 (ROADM) 设备技术要求: YD/T 2003-2018	
	可重构的光分插复用 (ROADM) 设备测试方法: YD/T 2489-2013	
	波长交换光网络 (WSON) 技术要求	报批稿
	可重构的光分插复用器件 (ROADM) 技术研究	研究课题
	可变带宽波长选择开关: YD/T 2970-2015	
	波长选择开关 (WSS) 技术条件: YD/T 2718-2014	
ITU-T	光网元的物理传递功能: ITU-T G.680	
	光器件和子系统的传输特性: ITU-T G.671	
	多维可重配光分插复用器的特征: ITU-T G.672	
	光媒质层架构: ITU-T G.807	
	媒质层的管理需求和信息模型: ITU-T G.876	
IETF	WON GMPLS 和路径计算单元 (PCE) 控制框架: RFC6163	
	WON 路由和波长分配信息模型: RFC7446	
	用于波长交换光网络 (WSON) 路由和波长分配的路径计算单元通信协议 PCEP 需求: RFC7449	
	控制网络通用网络单元约束编码: RFC7579 MPLS	
	波长交换光网络路由和波长分配信息编码: RFC7581	
	WSON 路由和波长分配 PCEP: draft-ietf-pce-wson-rwa-ext-09 (2018-11-04)	工作组文稿
Open ROADM MSA	单波和多波光接口规范 V3.0	
	YANG 数据模型 Release 4.1.0	
	Open ROADM 白皮书 V1.0	
	Open ROADM 设备白皮书 V1.1	
	Open ROADM 网络模型白皮书 V2.2.1	
	Open ROADM 业务模型白皮书 V0.1	

通道间非线性效应、光纤放大器的噪声积累等多种因素的影响, 光脉冲信号在传输过程中随着距离的增加发生严重的变形, 而基于光纤放大器的 2R 技术并不能完善地解决脉冲重新整形的问题, 因此, 光域传输距离限制了端到端全光网络的实现, 目前的全光网络都只能按分域全光的方式构建^[4]。

(3) 光域自愈方面

目前网络的生存性机制主要依赖于电层网络的控制机制来实现, 比如基于 SDH/OTN 的通道和线路保护等。基于光层的保护机制初步得到应用, 如基于光通道 1+1 的保护、光线路复用段保护等; 对于其他光域自愈技术 (例如复用段共享保护环等), 由于受到光域信号传输距离的限制,



无法实现全光的组网与保护,而且实现的保护都是通过电域的控制来实现的。

(4) 光域性能监视方面

在光域的性能监视方面,目前只能通过监视模拟光信号的信噪比(OSNR)、功率来衡量业务信号的传送性能,但在光纤的非线性效应比较明显的时候,简单的光层参数并不能完全说明信号的实际性能。另外,对于整个网络的故障和告警、性能等信息,目前都需要通过电层的处理来实现,完全采用光域的性能监视方式有待其他光域处理技术(如光域逻辑电路、光域控制等)等技术发展完善。

(5) 光域管控方面

受限于光层功率、OSNR等物理性限制,目前还无法基于ROADM的单域大规模组网,同时由于不同厂商的节点设备采用的长距离传输技术如编码、调制、放大技术并不一致,ROADM跨域需要背靠背连接,其成本高、功耗和时延也高,跨域调度和业务恢复复杂。多种原因导致不同公司的全光设备无法在光层直接对接,因此全光网需要尝试从物理层开启网络架构的重构,逐步走向基于SDN/NFV软硬件解耦的开放网络架构。目前行业正在通过统一信息模型、开放接口标准化解决这一问题,标准成熟仍需要假以时日。而光域控制技术目前仅可以通过基于光学双稳态等技术的与门以及基于非线性效应等技术的或门等逻辑门电路,更复杂和可应用的光集成电路尚在进一步的探索当中。

因此,无论是光域交换技术、光域传输技术,还是光域管控技术、光域网络自愈和光域性能监视等方面,基于理想的全光网络在目前的发展技术条件下还无法实现客户业务端到端的全光域传送、调度和管控等功能。目前阶段的全光网已经实现电域和光域混合交换,基于波长粒度交换的ROADM/OXC在未来几年内依然将是全光网络主要应用技术^[5-6]。未来随着光域交换技术的进一步

发展,面向分组特性业务的光交换技术可能成为主要的光网络交换技术之一,同时随着光域处理和逻辑电路等技术的发展,全光网络在未来可实现基于光域的控制方式。

5 结束语

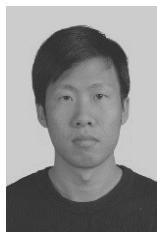
近年的技术研究、设备研制、网络建设和示范应用发展较为迅速,基于ROADM的全光网是目前解决高速大容量业务调度的有效技术方案之一。本文在介绍全光网络关键技术的基础上,对近来标准化研究的最新进展进行了介绍,同时探讨了全光网未来面临的问题和前景。ROADM/OXC依然将是未来几年全光组网应用的主要技术,后续随着光通信新型技术的发展,特别是超长距传输、光交叉连接、全光波长转换、光监控等技术的发展,全光网络将逐步分阶段走向成熟,原有的多个彼此非透明的局部全光网将被打通,形成相对完整的全光网,同时未来较长时间内随着光存储、光交换、多路光复用解复用器件等技术和产品成熟,光突发交换技术、光分组交换技术将会推动全光网走向一个更加动态灵活的全光网。

参考文献:

- [1] 韦乐平. 迈向全光网: 大连接时代的光通信进阶之路[N]. 通信产业报, 2017-01-09.
WEI L P. Towards all-optical network: the advancement of optical communication of big connection era[N]. Communications Weekly, 2017-01-09.
- [2] 李从奇, 陈娟. 全光网的发展趋势及其挑战[J]. 电信网技术, 2006, 3(3): 13-16.
LI C Q, CHEN J. The development trend and challenge of all-optical networks [J]. Telecommunication Network Technology, 2006, 3(3): 13-16.
- [3] SALEH A A M, SIMMONS J M. All-optical networking—evolution, benefits, challenges, and future vision[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(5): 1105-1117.
- [4] STRASSER T A, WAGENER J L. Wavelength-selective switches for ROADM applications [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2012, 16(5): 1150-1157.
- [5] 崔秀国, 刘翔, 操时宜, 等. 光纤通信系统技术的发展、挑战与机遇[J]. 电信科学, 2016, 32(5): 34-43.

- CUI X G, LIU X, CAO S Y, et al. Development, challenge and opportunity of optical fiber communication system technologies[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(5): 34-43.
- [6] STRASSER T A, WAGENER J L. YANG/NETCONF ROADM: evolving open DWDM toward SDN applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(15): 3105-3114.

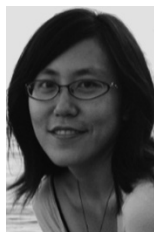
[作者简介]



汤瑞（1984—），男，中国信息通信研究院高级工程师，主要研究方向为高速光传输、WDM/OTN、光网络技术等。



张庚（1983—），男，中国电力科学研究院高级工程师，主要研究方向为电力信息通信仿真和能源互联网等。



吴冰冰（1984—），女，博士，中国信息通信研究院高级工程师，主要研究方向为光传输系统、高速光传输与光网络、量子通信与量子信息技术。



赵文玉（1973—），男，博士，中国信息通信研究院高级工程师、技术与标准研究所宽带网络研究部主任，主要研究方向为高速光纤通信网、量子保密通信等光网络新技术、标准制订和系统测试评估等。



张海懿（1972—），女，中国信息通信研究院高级工程师、技术与标准研究所副所长，主要研究方向为高速光纤通信网、自动交换光网络、SDN 和量子信息等新技术、体制标准制订、运营商技术咨询等。