



专题：未来光通信技术

## ROADM 全光交换网络关键技术与应用展望

吕凯<sup>1</sup>, 齐斌<sup>2</sup>, 钟胜前<sup>2</sup>, 张安旭<sup>1</sup>, 冯立鹏<sup>1</sup>

(1. 中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209; 2. 华为技术有限公司, 广东 东莞 518129)

**摘要:** 介绍了可重构光分插复用器 (reconfigurable optical add/drop multiplexer, ROADM) 网络的发展历程、ROADM 技术方案以及国内 ROADM 网络的部署情况。全面阐述了 ROADM 关键技术的发展方向, 包括光交叉连接 (optical cross-connect, OXC) 设备、高维度波长选择开关 (wavelength selected switch, WSS)、波长无关/方向无关/竞争无关 ROADM (colorless/directionless/contentionless ROADM, CDC-ROADM)、400 Gbit/s FlexGrid ROADM、下一代波长交换光网络 (next-generation wavelength switched optical network, WSON2.0) 智能控制平面技术。分析了现有 ROADM 网络应用场景与技术发展趋势, 展望了 ROADM 全光交换网络未来发展前景。

**关键词:** 全光网; OXC; CDC-ROADM; 400 Gbit/s; WSON

**中图分类号:** TN915

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2022157

## Key technologies development and application prospect of ROADM all-optical switching network

LV Kai<sup>1</sup>, QI Bin<sup>2</sup>, ZHONG Shengqian<sup>2</sup>, ZHANG Anxu<sup>1</sup>, FENG Lipeng<sup>1</sup>

1. Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Beijing 102209, China

2. Huawei Technologies Co., Ltd., Dongguan 518129, China

**Abstract:** The development history of reconfigurable optical add/drop multiplexer (ROADM) networks, ROADM technical solutions and the deployment of ROADM networks in China were described. And the development direction of the key technologies of ROADM was described, including optical cross-connect (OXC), high dimensions wavelength selected switch (WSS), colorless/directionless/contentionless ROADM (CDC-ROADM), 400 Gbit/s FlexGrid ROADM, and next-generation wavelength switched optical networks (WSON2.0) intelligent control plane technologies. The existing ROADM network application scenarios and technology development trend were analyzed, and the future prospects of the ROADM all-optical switching network were looked forward to.

**Key words:** all-optical network, OXC, CDC-ROADM, 400 Gbit/s, WSON

### 0 引言

在数字经济时代, 各个行业正积极推进数字

化转型, 与此同时 5G、云计算、AI、大数据、物联网等新兴数字技术得到迅猛的发展, 这对传输带宽与网络质量提出了更高的要求<sup>[1-3]</sup>。应对这样

收稿日期: 2022-06-13; 修回日期: 2022-07-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2018YFB1801200)

**Foundation Item:** The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1801200)



的网络挑战,推进全光网络的建设是至关重要的解决途径和手段。“以波长选择开关(wavelength selected switch, WSS)为基础的我国全光网(all-optical network, AON)”概念首次出现在2008年前后,主要在城域接入层采用光纤替代铜线,即“光进铜退”<sup>[4-5]</sup>,继而以波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)为代表的的全光传输技术在骨干网普及,这一时期被称为全光网1.0阶段。而“全光网2.0”的概念由中国电信于2017年在中国光网络研讨会(Optinet China)上首次提出。2021年11月,中国电信发布了《中国电信全光网2.0技术白皮书》,全面阐述了中国电信全光网2.0的概念和“三化”愿景。全光网2.0要在全光网1.0的基础上,满足云网融合和数字化经济发展趋势下的业务需求,需要引入可重构光分插复用器(reconfigurable optical add/drop multiplexer, ROADM)等新技术和组网,在设备和运营层面进行创新<sup>[6]</sup>。

ROADM技术可实现自动路径调度和业务恢复,将传统的点到点链路变为灵活的光网络,是目前商用程度高、技术成熟的全光交换技术。在ROADM网络中,从合波信号中分插出任意单波或合波信号通过WSS实现多个维度的动态光波长调度<sup>[7]</sup>。网络节点采用ROADM后,网管系统可以控制某个波长通过这个光节点或者从本地端口下路,主要特点是支持动态调度,即波长级别可远程调度,无须人工进站跳纤,从而实现快捷的业务指派、更加自动化的处理及简化的网络规划和施工,使得具有比传统波分更为强大的网络监控能力和网络扩展能力。

ROADM技术于2017年由中国电信引入我国经济发达的长三角区域干线网络<sup>[8-9]</sup>,在此后的几年内,中国电信又相继建成了华北、华南、东北、西南、西北等区域干线网络,通过分大区ROADM网络实现了全国范围内的覆盖<sup>[10]</sup>。同时引入网络保护恢复技术波长交换光网络(wavelength switched optical network, WSON)技术,实现了业务的动态

重路由保护功能,大大提升了网络的可靠性、安全性及生存能力。中国联通也在2019年启动了京津冀区域ROADM网络建设,并逐步扩大覆盖范围,现已通过“全国一张网”的方式覆盖了京津冀、长三角、粤港澳、鲁豫鄂、成渝五大经济圈,实现了IP169超核节点、中国联通自有IDC 100%覆盖,可实现枢纽间的光电协同调度<sup>[11]</sup>。

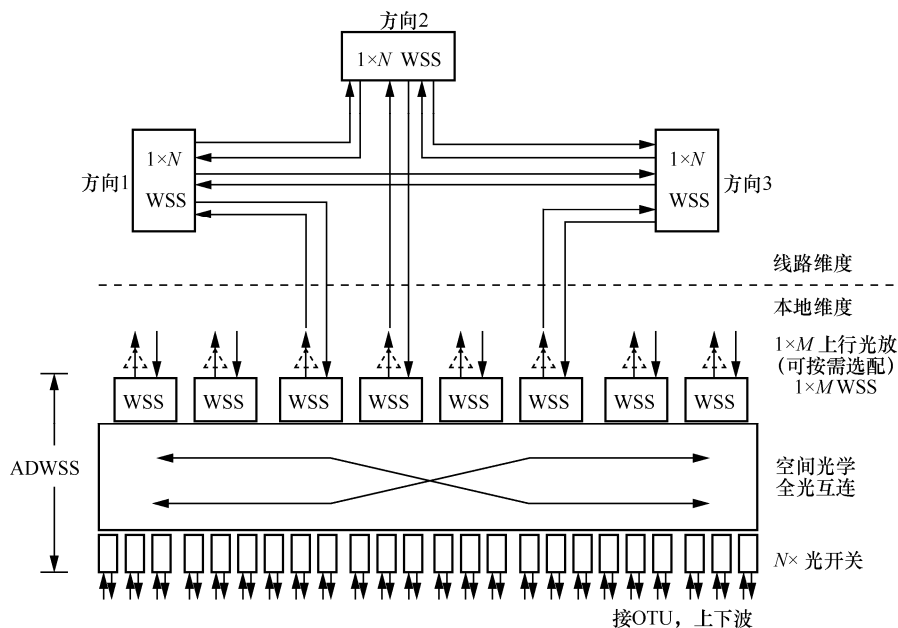
## 1 ROADM 关键技术发展

### 1.1 ROADM 设备

ROADM设备形态有多种,当前在现网中广泛使用的是CD-ROADM,其中,C(colorless)、D(directionless)分别指波长无关和方向无关。采用WSS级联的方式,可以实现光层业务上下端口波长可调、本站上下路端口可任意改变传送方向。而CDC-ROADM是一种灵活的ROADM设备形态,在C、D的基础上多了一个表示竞争无关的C(contentionless)<sup>[12]</sup>,CDC的功能通过多维度上下路波长选择开关(add and drop wavelength select switch, ADWSS)实现,基于 $M \times N$  ADWSS的CDC-ROADM结构如图1所示, $M \times N$ 的ADWSS构成的CDC组网模式可实现最多 $M$ 个使用相同波长的业务光信号同时进行线路到本地的下波或者本地到线路的上波,弱化了波道规划要求,提高了组网灵活性,当前已有部署案例<sup>[13]</sup>。

在当前的ROADM网络中广泛使用20维WSS,随着业务的不断发展,已经逐步出现方向维度数量不足的情况,因此,需要更高维度的32维WSS器件,但维度变高,光纤连纤数量大幅增加,32维需要 $32 \times 32 \times 2 = 2\,048$ 根光纤,这大大增加了连纤错误概率以及维护难度。为了解决这些问题,基于光背板的ROADM设备——光交叉连接(optical cross-connect, OXC)器问世了。

OXC是目前最先进的光交换技术,不仅解决了光纤连接的问题,而且具备高集成度、易扩展、易开局、易运维的优点。相比于传统ROADM基

图1 基于  $M \times N$  ADWSS 的 CDC-ROADM 结构

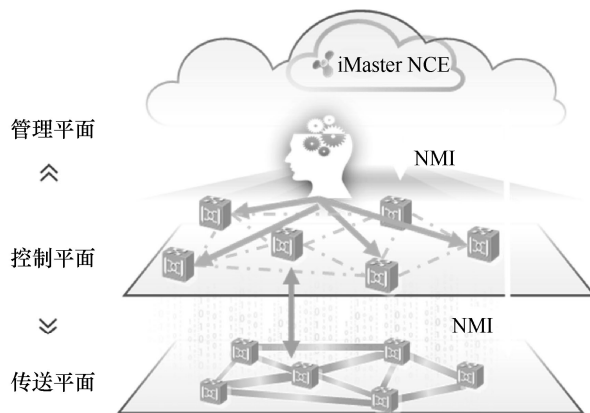
于板件分离的方式，OXC 通过光背板实现集成式全光路互连，可实现插卡式扩容，且新增板卡能立即通过光背板与已有业务形成互连关系，构建全光交换资源池，实现高集成度、无纤化的全光交叉，有效地提升了大颗粒业务的交换效率，同时简化了网络规划难度并节省了机房空间。OXC 部署过程中连纤少，能有效避免工程和维护中的错连情况，因此其安装维护成本非常低。同时，OXC 这种创新的架构使接入和线路侧模块分离，还能极大简化网络扩容工作。

## 1.2 WSON 技术

现有 ROADM 网络的 WSON 采用分布式算路策略，即首节点负责计算业务路径/恢复路径，同时也负责从首节点到末节点端到端业务连接的建立、删除和连接状态管理等。分布式 WSON 存在支持网络规模小、恢复性能不确定的特点。随着业务云化、网络规模的超大化，分布式架构已经无法满足未来 ROADM 网络的演进需求。

为应对面临的挑战，WSON 需要持续发展演进到 WSON2.0 时代<sup>[14]</sup>。WSON2.0 的架构需要在原有分布式架构的基础上，具备集中+分布式协同的全新架构，集中+分布式 WSON2.0 架构如图 2

所示。WSON2.0 架构具备动态全局资源管理和路由统一计算能力，提供更丰富的全局性路由策略，而且网络中每个业务节点仍保留路由计算和业务控制管理能力，从而让整网路由由计算能力具备更高的稳健性。WSON2.0 架构有效地解决了路由资源冲突问题，并为确定的业务恢复时间提供了架构能力基础，2020 年在中国电信西南区域 ROADM 网络中就基于 WSON2.0 的技术方案进行了验证测试。结果表明，重路由资源冲突问题得到有效解决，重路由性能提升了 50% 以上。



注：网管名称：iMaster NCE；  
网络管理接口（network management interface, NMI）

图2 集中+分布式 WSON2.0 架构



同时, 光传输单元 (optical transport unit, OTU) 快速变波长、信令协议报文的硬化转发、智能调测等技术, 可以将恢复时间从秒级到分钟级不确定时间优化为可确定性的时间, 有效提升业务的可用率指标, 可以进一步提升 ROADM 网络的恢复性能。

### 1.3 单波 400 Gbit/s FlexGrid ROADM 组网

业务流量持续增长需要全光网能够具备单波 400 Gbit/s 速率以满足带宽需求。而对于 ROADM 网络而言, 单波速率的提升需要光交叉 WSS 技术同步进行创新和优化。

400 Gbit/s 光传输系统采用 Super C+L 波段, 需要挑战在有限的 WSS 模块空间内实现更宽谱宽的无阻塞波长调度。WSS 的光交换引擎可以对光束进行智能化控制, 现有的光交换引擎主要包括数字光处理器芯片、液晶芯片、微机械机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 芯片以及硅基液晶 (liquid crystal on silicon, LCoS) 芯片等<sup>[15]</sup>。不同的交换引擎有不同的特性, 其中数字光处理器芯片和液晶芯片只可以实现两个光束偏转角度的切换, 因此难以实现大端口的 WSS 器件。MEMS 芯片可以在一定的角度范围内实现任意光束偏转角度的切换, 但 MEMS 芯片镜面尺寸较大 (通常大于 50  $\mu\text{m}$ ), 无法支持 FlexGrid 功能。LCoS 芯片是一种灵活可编码的相位型空间光调制器, 通过控制光束相位, 实现高衍射效率的光束偏转及光功率的精细控制, 支持大端口调度。LCoS 芯片的像素尺寸可达到 4  $\mu\text{m}$  左右, 具有 FlexGrid 特性, 支持 WSS 通道带宽的灵活调配。经过多年的技术方案研究和实践, LCoS 芯片已经作为 WSS 主要的光交换引擎被用于全光网络的建设。WSS 的滤波带宽由 LCoS 在色散方向分配给单位信道间隔的像素数量和像素尺寸决定, 像素数量越多、像素尺寸越大, 则 WSS 滤波带宽越高。WSS 的端口数目由 LCoS 在端口方向分配给单位信道间隔的像素数量和像素尺寸决定, 像素数

量越多、像素尺寸越小, 则 LCoS 偏转插入损耗越小, 端口间串扰越小, 支持 WSS 端口数目提升。400 Gbit/s 光传输系统所需要的宽谱大端口 WSS 需要将当前 LCoS 的像素数量从 2 000 提升到 2 400 以上, LCoS 像素示意图如图 3 所示。这样可以保证 C120 波段每个 50 GHz 间隔的信道所分配到的像素数量和常规 C80/C96 系统相比没有减少, 避免 C120+L 波段信道数目增加而引起滤波性能变差, 以及因端口隔离度不足而引入信噪比代价。

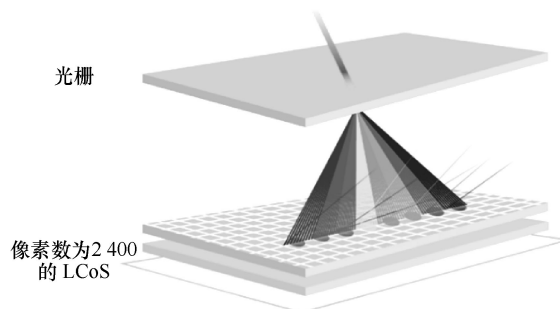


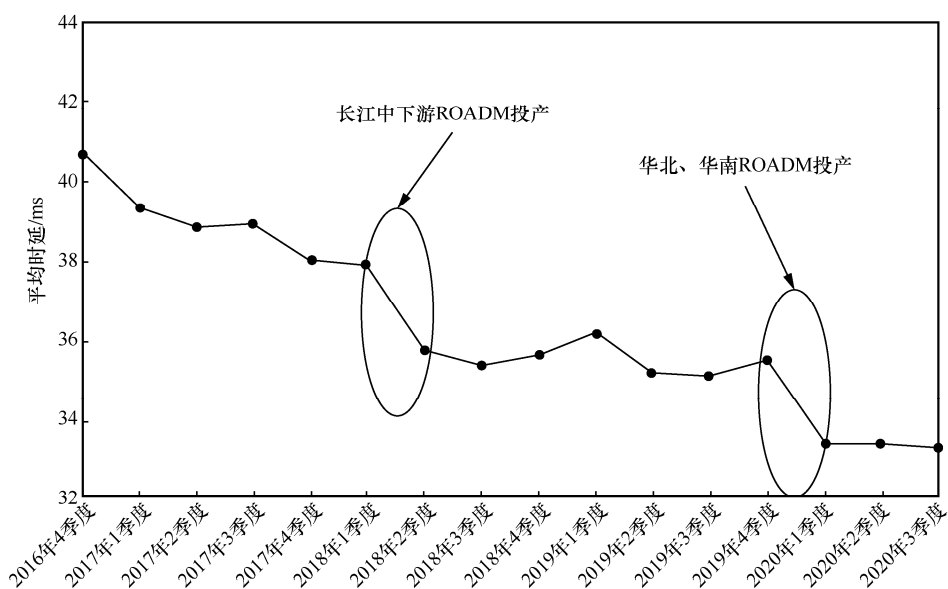
图3 LCoS 像素示意图

另外, C120 波段意味着 WSS 需要在更宽的光频谱范围内实现更多信道的光束偏转, 这些需要 LCoS 芯片控制算法实现。配合更多像素的 LCoS 芯片需要多维度的创新性 LCoS 芯片控制算法, 使能高维度的光束偏转, 保障当 LCoS 芯片承载更多波长的时候, 插入损耗、端口串扰和滤波损伤等性能不会有太大的劣化。

## 2 ROADM 网络应用展望

ROADM 网络创新性地采用一二干融合架构, 使得一二干波道资源可以共享, 盘活了网络资源, 提升了网络利用率, 减少了机房和纤芯。同时, 还减少了从大型枢纽不必要的路由迂回以及背靠背的电层中继, 优化了网络时延, 从网络结构和路由组织上减少了时延, 实现了降本增效和节能减排。

作为 ROADM 网络应用的典型案例, 目前已建成的华北、华南、西南、西北和东北五大区域 ROADM 规模应用已充分验证了其可行性和优异性。ROADM 打造了一张高品质基础网络, 基于





高、灵活可靠以及绿色节能的全光底座。

### 3 结束语

ROADM 网络作为全光网 2.0 中的重要组成部分,能够满足网络扁平化、业务大带宽/低时延、网络绿色低碳的发展目标与需求。扩大网络的覆盖范围,适时引入 OXC、32 维高维度 WSS、CDC-ROADM、400 Gbit/s FlexGrid ROADM、WSN2.0 智能控制平面、波长快速调谐和快速交换等新技术,可以实现可承诺的快速故障恢复,进一步夯实网络能力、提升用户体验。并且要深入挖掘 ROADM 的能力,从纵向的网络覆盖层次到横向的网络承载业务内容上进行探索、研究、论证与应用,充分发挥与实现 ROADM 全光交换网络价值。

### 参考文献:

- [1] 赛迪智库电子信息研究所. “新基建”发展白皮书[R]. 2020. CCID Thinktank Electronic Information Research Institute. “New infrastructure” development white paper[R]. 2020.
- [2] 李克强. 2020 年政府工作报告[R]. 2020. LI K Q. Report on the work of the government(2020)[R]. 2020.
- [3] Cisco Global Cloud Index: Forecast and methodology(2016–2021)[EB]. Cisco, 2018.
- [4] 李明达. “光进铜退”光通信第 3 次机遇[EB]. 2008-03-05. LI M D. “Copper access replaced by fiber access” the third opportunity of optical communication[EB]. 2008-03-05.
- [5] 陈维义. 光进铜退 光纤发展新拐点[N]. 中国计算机报, 2008. CHEN W Y. Copper access replaced by fiber access---new inflection point of optical fiber development[N]. China Computer News. 2008.
- [6] 中国电信集团有限公司. 中国电信全光网 2.0 技术白皮书[R]. 2021. China Telecom Co., Ltd.. China Telecom all-optical network 2.0 technical white paper[R]. 2021.
- [7] CHUNG H S, CHANG S H, LEE S S, et al. Multicast technology using WSS based multi-degree ROADM[C]//Proceedings of 2008 7th International Conference on Optical Internet. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-2.
- [8] ZHANG C L, LI J J, WANG H Q, et al. Evaluation of dynamic optical service restoration on a large-scale ROADM mesh network[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(4): 138-143.
- [9] 韩永军. 推动电信网络建设迈入高质量发展新阶段[N]. 人民邮电报, 2018-1-3(2). HAN Y J. Push telecom network construction into a new stage

of high-quality development[N]. People's Posts and Telecommunications News, 2018-1-3(2).

- [10] 安迪. 中国电信骨干建成 5 大区域 ROADM 网, 实现一二干融合[EB]. 2021. Andi. China Telecom has built 5 regional ROADM networks, realizing integration of inter-provincial and intra-provincial backbone networks[EB]. 2021.
- [11] 中国联通携手华为打造全球首个增强型全光交换干线网络, 进一步强化高价值政企专线竞争力[EB]. 2020. China Unicom joined hands with Huawei to build the world's first enhanced all-optical switching backbone network, further strengthening the competitiveness of high-value government-enterprise private lines[EB]. 2020.
- [12] WAY W I. Next generation ROADM architectures[C]//Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference. Washington, D.C.:OSA, 2012: 1-3.
- [13] 张成良. 流量急剧增长驱动 ROADM 快速应用[EB]. 2017. ZHANG C L. Rapid traffic growth drives ROADM's rapid application[EB]. 2017.
- [14] 波长交换光网络 (WSN) 2.0 技术白皮书[R]. CCSA TC618/NGOF, 2020. Wavelength switched optical network(WSN) 2.0 technical white paper[R]. CCSA TC618/NGOF, 2020.
- [15] WALL P, COLBOURNE P, REIMER C, et al. WSS switching engine technologies[C]//Proceedings of OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference. Piscataway: IEEE Press, 2008:1-5.

### [作者简介]



吕凯 (1992–), 男, 博士, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为光传输、光网络等。

齐斌 (1981–), 男, 华为技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为光通信。

钟胜前 (1979–), 男, 华为技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为光网络。

张安旭 (1985–), 男, 博士, 中国电信股份有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为光传输、光网络等。

冯立鹏 (1993–), 女, 博士, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为光传输、光网络等。