



专题：全光网技术与应用

全光交换网络的技术发展与演进趋势

周敏, 张健, 王寅

(华为技术有限公司, 广东 深圳 518129)

摘要: 5G 时代, 新兴业务发展驱使网络带宽增长, 尤其是横向突发流量的暴增, 网络由多层平面架构向立体架构演进, 由此促进全光交换技术的发展和演进。介绍了光交换网架构的发展历史及技术演进, 阐述了目前全光交换设备的关键技术能力及应用, 并探讨了未来全光交换技术的演进趋势。

关键词: 5G; 全光交换; OXC; ROADM

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019085

Technology development and evolution trend of all-optical switching networks

ZHOU Min, ZHANG Jian, WANG Yin

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

Abstract: In the 5G era, growth of network traffic is driven by the development of emerging services, especially the burst of east-west traffic. The network evolved from a multi-layered planar architecture to a three-dimensional architecture, thereby promoting the development and application of all-optical switching technology. The development and technology evolutions of optical switching architecture were introduced, the key enabling technologies and applications of all-optical switching equipment were described, and the future trends of all-optical switching technology were discussed.

Key words: 5G, all-optical switching, OXC, ROADM

1 引言

2000 年前后兴起的光分插复用 (optical add/drop multiplexing, OADM) 技术, 开启了光交换的时代, 但是只能简单完成光网络节点单向上下的波长。波长进入 OADM 节点, 一部分波长直接穿通, 另一部分波长在节点被本地下载接收,

同时本地波长也经过 OADM 单元上传到线路测光端口, 并进入某一光方向传播出去。OADM 使光网络具备单点上下波长的能力, 只能组成环网, 是光交换的最早雏形, 但其局限性主要是不具备全互联 (mesh) 交换能力。

2008 年前后, 可重配 OADM (ROADM) 技术的出现, 使光层开始具备全互联交换功能^[1],

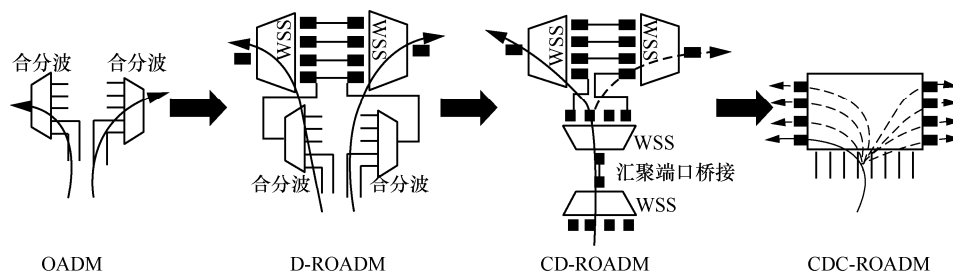


图 1 全光交换的发展历程

其主流架构为基于多个 $1 \times N$ 波长选择交换（wavelength selective switching, WSS）单元构成的多维 ROADM（MD-ROADM）。随后，依据光交换节点在本地上下波长的不同实现方式，演化出经历了三代 ROADM 的发展，使得交换功能越来越齐全，组网越来越灵活。全光交换的发展历程如图 1 所示。

第一代 ROADM 是无方向的可重配光分插复用器（directionless ROADM, D-ROADM），在线路侧引入 WSS 技术，实现了线路侧的 mesh 光交换，但在支路侧依旧保留 OADM 的合/分波器（Mux/Demux）结构，仅能支持单方向的上下波。

第二代 ROADM 为波长无关、方向无关的可重配光分插复用器（colorless directionless ROADM, CD-ROADM），在支路侧利用两个 $1 \times N$ 型 WSS 器件对接，替代 D-ROADM 使用的合/分波器（Mux/Demux），由此来实现波长无色无方向上下和交换。但是，这种结构的上下两个波长选择开关是由汇聚端口桥接的，分路侧分别接线路端口和支路端口，因此仅有单个上下波通道，当多个波长进行上下交换时，通路带来阻塞。

第三代 ROADM 为波长无关、方向无关、无阻塞的可重配光分插复用器（colorless directionless contentionless ROADM, CDC-ROADM），其核心技术就是解决二代 CD-ROADM 的上下波阻塞问题。CDC-ROADM 在支路侧整合了多通道广播功能光开关（multi-cast switch, MCS）技术，使得所有线路端口和支路端口都相互连接，由此

经过节点的线路波长和所有本地波长都可以自由地随时交换，真正实现了波长的完整交换功能，满足无色、无方向、无阻塞地自由上下要求。

2 全光交换技术的现状及挑战

目前，基于 WSS 技术的 CDC-ROADM 已经成为业界商用主流，成为大容量、高可靠光层组网的硬件基础^[2]。CDC-ROADM 架构上通常分为线路侧和支路侧，二者之间有多组的光端口，通过光纤进行连接，构成 mesh 化的光通路。典型的 CDC-ROADM 技术结构如图 2 所示。

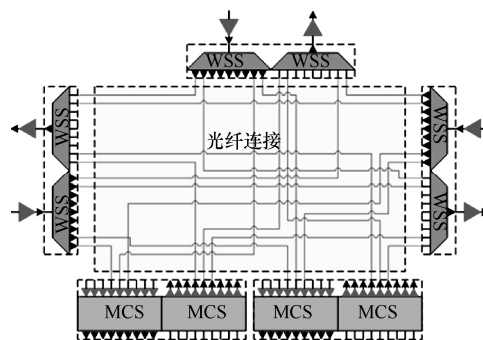


图 2 典型的 CDC-ROADM 结构

在线路侧，每个方向上由两个 $1 \times N$ 的 WSS 构成双向通路，分别作为该方向进出光路端口。在支路侧， N 个 MCS 器件构成上下波结构，每个 MCS 器件具有 $N \times M$ 的接口结构， N 接口对接 WSS 的分路口， M 接口为上下波方向。目前通常的 CDC-ROADM 能够支持最大 20 个维度方向上的任意信道上下波。

CDC-ROADM 的出现，使得物理光层在波



长级别的调度上彻底摆脱了限制，实现了与电交换在路由方向上相同的自由度，使真正意义的 mesh 化全光交换网成为可能，是全光交换技术和产业上发展的里程碑。但是，随着业务带宽不断增加，光交换维度急剧增长，机房难以承受交换容量暴增所带来的空间、供电和运维的压力，传统 CDC-ROADM 正面临越来越多的挑战。

2.1 交换维度受限，容量不足

交换维度是 CDC-ROADM 的关键能力指标，主要考量其线路侧维度和支路侧上下波维度两项。WSS 模块是 CDC-ROADM 的基础单元，并直接线路侧可支撑的交换方向。目前 CDC-ROADM 在线路侧普遍采用的有 MEM 技术和液晶盒 (liquid crystal cell) 技术来实现 $1 \times N$ 的线路 WSS 模块。

MEM 技术最早被光交换机采用，主要用于短距数据中心互联，只能进行光纤端口交换，无法对具体波长进行重新分配和单独路由。后来，通过在 MEM 结构前加入衍射光栅，将端口进来的波长组细分后通过 MEM 进行反射，通过电压控制 MEM 反射镜角度，进而实现波长的反射偏移，由此也能实现波长路由，但是由于 MEM 的最小映射单元是端口，所以无法支持 flex-grid 应用。

液晶盒技术则能够支持 flex-grid，其结构有一个光学平面接收经过衍射光栅分开的细分光线。如图 3 所示，衍射光线前向透射经过液晶盒，光学平面上分布有液晶点阵用于控制波长方向。液晶盒通过施加电压控制液晶点阵的偏振态，进而控制光线前进的路径。由于光仅有 2 个偏振态，所以单层液晶盒的液晶点阵仅能实现 2 个方向光路由 (P1 和 P2)。对于一个 1×9 维度的交换矩阵，需要 5 层的液晶点阵面级联，器件厚且体积大，而且多级级联造成的传输插损也大。此外，光线在液晶盒中透射向前传输，输出端口上的光

斑截面宽，而多级级联造成信号滤波通道变窄，因此光信号受损，传输质量差。因此，基于液晶盒技术的 WSS 模块，9 维交换已经是技术极限。虽然液晶盒技术能够支持 flex-grid，但是其基于偏振路由的液晶点阵是分立的线阵排布，每个点阵需要单独控制，因此密度不能很高，精细度不够，光谱分辨率仅有 12.5 GHz，通常处理 75 GHz/100 GHz 间隔波长路由，而处理 50 GHz 及以下间隔波长间隔偏差较大。

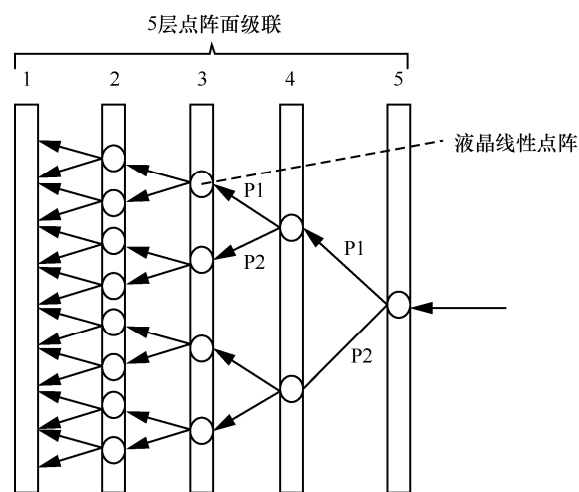


图 3 液晶盒偏振态波长路由原理

在支路侧，目前 CDC-ROADM 均采用 MCS 实现无阻塞上下波长。由于 MCS 采用光功率分路器 (splitter) 来分光，分支越多，光功率损耗越大，虽然加了光放大器，但是受放大器饱和和功率限制，目前在支路侧最大仅能支持 16 路上下。

2.2 设备集成度低，占地大，机房空间不足

目前，CDC-ROADM 受限于器件工艺水平，普遍集成度较低。如图 4 所示，CDC-ROADM 的光层板卡通常只能支撑 1~2 个光处理功能单元，考虑到一个交换方向需要 2 块 OAU 单板、2 块 FIU 单板、1 块 OSC 单板、1 块 OPM 单板以及双 DWSS 器件，因此每个方向需要占用单独 1 个子架，由此占用大量的机房空间，特别是站点方向增多后，机房空间将严重不足。

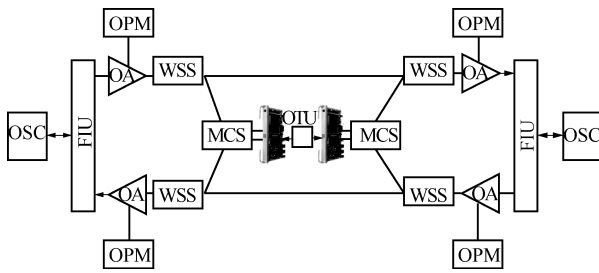


图4 CDC-ROADM的光层板卡数量众多

2.3 连纤复杂，难运维

CDC-ROADM的线路端口和支路端口的连接完全靠光纤，需要按业务增加逐一手动连接光纤。

CDC-ROADM连纤的复杂度如图5所示，反映了随着交换维度增加机房光纤布放的复杂程度。如图5(a)和图5(b)所示，对于一个8维的CDC-ROADM，其线路端口的连纤数量达到112根，而支路侧本地上下连纤数量达到768根；而对于16维的CDC-ROADM，线路侧和支路侧的连纤数量将分别达到480根和1536根。按照通常一般工程人员会产生5%的连纤错误评估，9维以上的CDC-ROADM已经非常难以运维和管理了。而且随着交换维度不断增加，光纤连接越来越多，设备连接越来越复杂，导致原先的连接线路无法重置，资源浪费，错误难以排查，新增方向操作困难，给机房光层运维带来极大的挑战。图5(c)所示为典型的机房连纤照片，可见相关的运维工作几乎是难以展开的。

2.4 可靠性差，功耗大

光交换节点处理光波调度，是整个光网络中的交通枢纽，其可靠性是至关重要的，影响整个

光通信系统的顽健性和安全性。

在线路侧，衍射光栅+MEM的WSS器件在可靠性上具有明显的局限性。MEM技术主要采用微机电控制反射镜面偏转来实现对入射光的方向控制，反射镜片偏转角度是光方向偏转角度的1/2，因此稍微一点MEM电控偏差，就会导致2倍偏转方向的误差。MEM由于采用机械旋转原理，其受温度热胀冷缩、受震动影响，会产生偏转精度变差，以致失效。基于液晶盒的WSS器件，由于采用偏振控制光路由，无机械部件，可靠性较优。

在支路侧，MCS板卡的结构如图6所示，每个板卡包括下波和上波两个模块，下波模块接收来自线路侧的波长，并选择相应的波长进行下载，上波模块对接线路侧的出光接口，实现本地波长上载并在线路侧选定一定的方向发出。以图6左侧下波模块为例，对接线路侧的端口是 N 个并行的splitter，分别接收来自线路侧 N 个方向的下载光波长，每个splitter进行 M 路的功率均等分，分别接 M 个光开关阵列。每个光开关阵列含有 N 个光开关，每个光开关对接splitter的分光支路。因此，线路口的光进入MCS后被splitter均分为 M 个功率相同的光分路，并传递到所有的下波端口，系统通过控制下波端口的光开关实现线路口到支路口传播光线的通断，由此实现波长的选择下载。图6右侧为上波模块，本地波长同样通过本地光开关端口，穿过splitter进入对应的线路口，进入线路侧方向。

由此可见，MCS的CDC的下波采用splitter

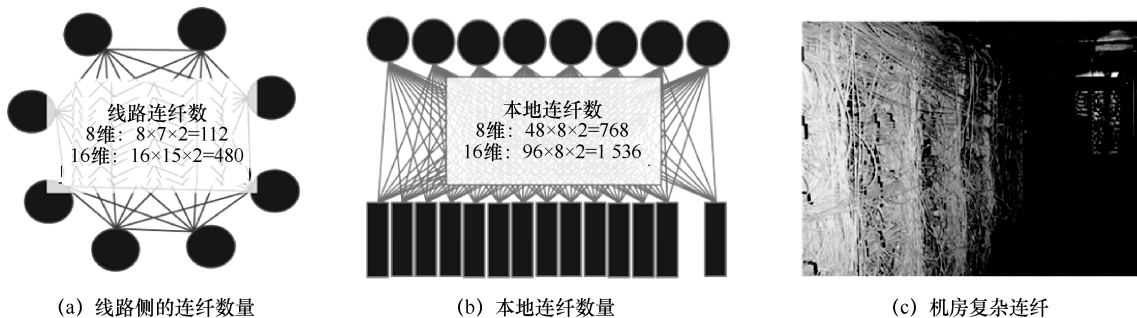


图5 CDC-ROADM连纤的复杂度

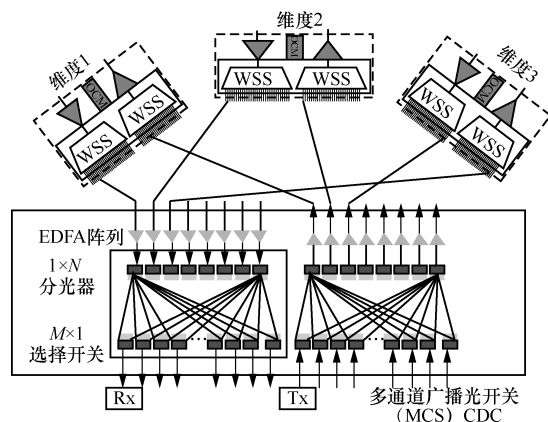


图6 基于MCS架构模块的CDC-ROADM

广播的方式，有分光造成的光功率损耗，上波也同样要经过 splitter 的损耗。因此，在线路口每个 splitter 主路都设置 EDFA 进行光放大来补偿损耗。光放是功率型器件，功耗大，并且可靠性弱于无源器件。以一个简单的 8×16 维 CDC-ROADM 计算，单个 MCS 板卡包含 16 个 EDFA、16 个 splitter、32 个光开关组和 288 个光纤熔点，而全波上下则需要 128 个 EDFA 和 splitter、256 个光开关组和超过 2 000 个光纤熔点。对于普通的 16×32 维 CDC-ROADM，全波上下光放的 EDFA 数量将达到 500+，光开关组达到 1 000+，光纤熔点数以万计。因此，MCS 的众多分立器件和光纤熔点，都使现有 CDC-ROADM 的支路板卡十分复杂，并且现有光开关组通常基于 MEM 器件，因此面临巨大的可靠性问题，加之数量众多的 EDFA，功耗也形成巨大挑战。

目前有些技术采用 PLC 波导替代 splitter，并通过构建波导干涉结构实现光开关功能，虽然相比 MEM 开关，可靠性好，也消除了光纤熔点，但是依旧没有解决插损问题，还是需要光放，光放的可靠性和功耗依旧造成困扰。

3 下一代全光交换的发展及技术演进

下一代光交换技术，在满足现有 CDC-ROADM 基本功能的基础上，将朝着更大维度、更高集成度、更低功耗和简化运维的方向发展，

由此产生了 OXC（optical cross connection）技术。

相比 CDC-ROADM，OXC 开创了全光交换的新时代，主要体现在：

- OXC 采用全光背板，省去 ROADM 的复杂连纤，简化了部署和运维；
- 具备远程可视化监控能力，轻松实现大网光层自动化管理；
- 线路侧引入基于 LCoS 技术的 $1 \times N$ WSS 器件，替代传统 MEM 和液晶盒技术，在支持 flex-grid 的同时，满足 32 维以上的交换能力要求，同时通过器件集成实现多组功能板卡合一，实现一个槽位一个方向；
- 支路侧引入 $M \times N$ WSS 替代传统 MCS 模块，大幅降低分光带来的损耗，使得能够支持全波长全方向上下波，并省去了光放，降低了功耗，并且提高了设备的可靠性。

3.1 从手动光纤连接演进到光背板连接

在 CDC-ROADM 中，线路口和支路口的连接全部通过外部光纤连接。要消除手动连纤，需要在设备内部设置光路通道。显然，从 OTN 电交叉设备得到启发，OXC 创造了全光背板，将所有的光路通道全部集中内置到背板中，由此消除外部连纤。OXC 的关键技术是实现端口全 mesh 互联及高可靠性。

（1）光纤编织技术实现端口全互联

相比 CDC-ROADM，OXC 线路、支路的交换维度大幅度增加。端口全互联下，仅仅 16 维的 OXC，其支路、线路的总连接光纤数量超过 2 000，而 32 维的 OXC 连接光纤数量将超过 5 000。将如此多的光纤收纳进仅有 4 cm 厚度的背板中，几乎是不可能的。因此，OXC 全光背板采用光纤编织技术来实现光纤通路的小型化、高密集成。

光纤编织技术，在去除了涂覆层的裸光纤外部，用化学沉积方法生长一层纳米尺寸的聚合物材料，构成光纤丝线。直径仅有 $200 \mu\text{m}$ 的光丝，

其柔韧度、防护性和稳定性与传统毫米量级光纤缆线相同。光纤细小,通过高精度光路编织设备,在聚合物柔性板上可以织出密集的光丝光路。由于聚合物柔性板可以多层叠加聚合,因此最高密度的一张A4纸大小的光丝背板,相当于1 000+的光纤连接,真正实现了OXC的无纤化端口全互联。

(2) 光接口防尘和高可靠连接

光背板脱离光纤实现自由空间的端口连接,接口镜头极易沾染灰尘,阻挡光路,影响传输质量,因此防尘极其重要。

OXC在光背板接口处设有主被动两级防尘技术。如图7(a)所示,第一级防护利用自动感应防尘盖进行主动防尘,在非连接状态时,自动感应防尘盖封闭保护连接口;在单板插入时自动感应,打开盖子实现连接。第二级防护利用光斑变换技术进行被动防尘。通常的光接口,在对接光纤末端通过光纤透镜进行空间光路耦合,光纤透镜的直径和光纤直径相仿,大约 $10\text{ }\mu\text{m}$,而灰尘也多为 μm 尺寸,极易阻挡光路,造成损耗和烧纤。如图7(b)所示,透镜A、B为接口两侧的光纤透镜,光斑变换技术在原先光纤透镜对之间插入一组透镜组C、D、E、F,其中C为扩束镜,光斑经C扩大后到达D,D和E为一组准直透镜组,分别在背板和板卡光接口的外侧,F为聚焦镜,将E处汇聚的光聚焦射入光纤透镜B,由此完成一次光线在OXC光接口的传输。显然,由于出射光斑扩大后,同样大小的灰尘落在D和E处,相比原先落在A和B处,所占的面积比例大大缩小,其对光路的影响也相应弱化。此外,OXC光接口还设计了灵活的多级卡扣,一旦接口对接,能保证小于亚微米的抗震精度,由此确保光性能无损的背板接口随意插拔。

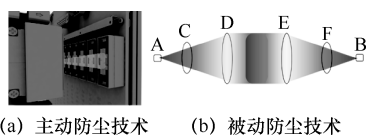


图7 光接口防尘技术

3.2 数字化光层, 实现全网波长信息可视化

传统ROADM,通常增加一条业务时,相应连接一次光纤,并配置网管,缺乏全局统筹和统一规划,业务部署效率低。波长配置后无法追踪,无法获取波长的资源信息和路径信息,难以实现实时运维。OXC在光背板事先设计好光路连接与交换矩阵,实现任意端口、任意波长、任意方向间的光互联路径,并通过软件控制来配置波长,因此运维非常简单,能实现实时的按需业务配置。此外,OXC在电域信号包络进行低频调幅给每个波长设置标签,通过在网络波长切换、放大的节点端口设置低频滤波传感器识别波长信息,由此在不占用额外的电信息通道和光频谱资源下,实现对网络波长资源的实时信息可视化,包括可视化光纤质量、可视化波长性能、可视化波长利用率以及可视化波长路径,达到数字化光层管理的目的。

3.3 基于 LCoS 的 WSS 技术, 提升交换维度、可靠性, 降低功耗

CDC-ROADM能够向OXC代际演进,主要得益于基于硅基液晶(liquid crystal on silicon, LCoS)技术的WSS器件的发展。由此,在整体设备上实现了交换维度和上下波端口的成倍增长,线路侧实现单槽位单方向的高集成度,支路侧支持高可靠、低功耗和30路以上的上下端口。

LCoS技术是一种通过电压控制硅基液晶的折射率,进而控制入射光波长的反射相位,由此来实现光线方向偏转。如图8所示,与光栅+MEM技术、液晶盒技术一样,基于LCoS的WSS器件

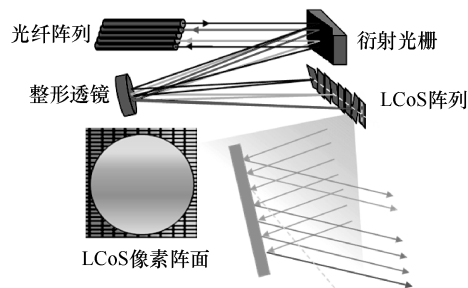


图8 LCoS技术实现波长选择



在其前端也有一个衍射光栅，波长从光线阵列射入，经过衍射光栅分解为许多细分波长，经过一些列透镜阵列的光束整形后进入 LCoS 芯片。LCoS 芯片阵面上有诸多众横排布的液晶像素点。LCoS 阵面通过电压控制和改变每个像素点的折射率变化，即给每个入射的细分波长都附加一个控制相位，由此调节其反射回原光路的偏转角度。因此，通过不同的电压就可以方便地实现细分波长偏转到输出面的不同端口并连接到光背板，实现波长的重新分布和组合输出。

相比液晶盒，基于 LCoS 技术的器件厚度薄，非常适合制作方向和维度较高的 WSS 器件。此外，光线在 LCoS 中反射传输，输出端口的光斑截面窄，信号质量也高于液晶盒。不同于液晶盒的线形点阵分立排布、密度低、精细度不够，LCoS 得益于硅基结构的高集成性，其液晶点阵呈矩阵排布，具有更细的精细度，达到 5 GHz 以下的波长精度，能够处理 50 GHz 及更窄波长间隔，对于未来 OXC 向更小间隔子载波（25 GHz/12.5 GHz）交换的演进具有积极意义。

相比 MEM 技术，LCoS 技术除了能够支持 flex-grid，还提供了高可靠性。MEM 技术是对每个固定端口进行镜面反射，由于反射镜片采用微机械驱动，因此机械振动和热胀冷缩都会影响反射镜的偏转精度，进而影响波长反射的位置。MEM 是一个镜面反射一个或多个波长，因此一旦镜面受热或机械应力影响，则整个波长的反射方向都有偏差。LCoS 是矩阵式晶面，芯片的像素点阵密集，一个波长的光斑占用一大片点阵，因此其中部分点阵失效，不影响整体波长的走向，只是损失些功率，可靠性很高。

如图 9 所示，LCoS 技术实现 WSS 器件的小型化，同时结合光器件集成技术，使得 OXC 在 1 个槽位线路板上集成了包括 2 块 OAU 单板、2 块 FIU 单板、1 块 OSC 单板、1 块 OPM 单板以及 DWSS 器件，整体集成度提升 7 倍以上，因此可以实现

单框“P”bit/s 以上的交换容量。

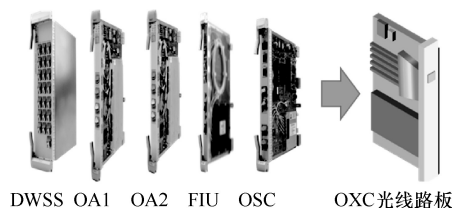


图 9 OXC 提示设备集成度

在支路侧，光交换中的上下波技术决定本地和线路侧之间的波长交互。在 CDC-ROADM 时代，由于 WSS 技术只能实现 $1 \times N$ 结构，因此只能通过两个 WSS 在汇聚端口桥接来构成上下波结构，因此仅有单个波长通道，导致多个波长上下交换时带来阻塞。CDC-ROADM 要实现无阻塞上下，引入了 MCS 技术，但同时也有一定局限性，如上下波方向少、功耗和体积大。

在 OXC 时代， $N \times M$ 和 $N \times N$ 型的 WSS 技术得到突破^[3]，使基于 $N \times M$ 和 $N \times N$ WSS 技术的 AD WSS (add/drop WSS) 器件能够替换回 MCS 器件。如图 10 所示，AD WSS 采用级联的两级 LCoS 结构，中间通过傅里叶透镜消除球差和慧差，通过自由空间光路在一个平面内同时实现多路的上下波交换，由此省去了 MCS 器件中因 splitter 分光导致功率损耗而设置的光放大器，整体功耗大幅降低。由于不受 splitter 分光限制，AD WSS 的交换维度占比从 30% 提高到 100% 上下波。整个模块采用自由空间光学，相比传统的 MCS 模块，内部部件数量减少 85%，整个模块的体积也仅有原先的 1/4，同时消除了 MCS 交换模块的光纤焊点，失效率也下降 50%。

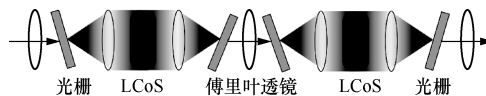


图 10 级联 LCoS 的 AD WSS 原理

4 全光交换技术的进一步发展

目前 OXC 的光背板主要采用光纤连接，随着

硅光技术的进一步发展,未来将采用硅光背板构建 OXC 任意端口的 mesh 化互联^[4],并且由于硅光技术方便实现多通道集成,可以在背板内部形成 1+1 光通道保护,可靠性大幅度提高。

此外,为了实现更低颗粒度的光交换,以满足多业务颗粒的快速处理。具有极细粒度光谱处理能力的 flex-grid 子波长全光交叉技术,使传统光交叉能力从波长级进一步延伸到子波长级^[5-6],一举突破运营商在汇聚层/接入层节点业务颗粒度小、无法实现快速光交换的产业技术瓶颈,实现了从核心层到接入层端到端的全颗粒度、超低时延全光交换及一跳直达。

OXC 带来了光交换网络的新一轮技术与产业革命,使光交换网络在满足大容量、低时延用户体验的同时,确保了设备体积与功耗上的控制,简化运维。未来光承载网络将逐渐演进到以 OXC 网络节点扩展的极简全光网络,提供超大带宽和超低时延体验,实现多业务快速发放和一跳直达以及全自动化和智能化的高效网络运维管理。

参考文献:

- [1] 汤瑞,赖俊森,吴冰冰. 新型全光交换技术研究[J]. 现代电信科技, 2015(6).
TANG R, LAI J S, WU B B. Study of all optical switching Technologies[J]. Modern Science & Technology of Telecommunications, 2015(6).
- [2] 陈高庭,蔡海文,方祖捷. 光纤通信网络系统中的全光交换技术[J]. 现代通信, 2002(1).
CHEN G T, CAI H W, FANG Z J. All optical switching technologies in optical fiber communication network system[J]. Communications Today, 2002(1).

- [3] Characteristics of multi-degree reconfigurable optical add/drop multiplexers: ITU-T Recommendation G.672[S]. 2012.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] DENG N, YANG Y, CHAN C K, 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.

[作者简介]



周敏(1984-),男,博士,华为技术有限公司光技术专家,主要研究方向为光源、光交换、光传输信号处理、光学材料、光学显示与成像等。



张健(1984-),男,华为技术有限公司光网络领域资深专家,主要研究方向为中国区光网络市场支持及光网络领域产业合作。



王寅(1984-),男,博士,华为技术有限公司光网络专家,主要研究方向为新型光器件以及高速传输系统及光产业合作。