



专题：全光网技术与应用

## 智能城域光传输网及核心光器件

肖礼, 袁志林, 付成鹏, 马卫东

(武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430205)

**摘要:** 以城域光传输网在数据业务驱动下, 对智能化和灵活性的要求不断增加, 带来网络架构的革新为背景, 阐述了可重构光分插复用器 (reconfigurable optical add-drop multiplexer, ROADM) 网元及其动态组网技术面临的挑战; 研究了 ROADM 网元中核心光器件的低成本解决方案, 以及 ROADM 网元设备白盒化、解耦合以及可编程性的需求, 得出低成本、白盒化的 ROADM 网元是城域光传输网智能化的关键有效手段的结论。

**关键词:** 城域光传输网; ROADM; 阵列光放大器; 波长选择开关; 多播光开关; 软件定义网络

**中图分类号:** TN191.05

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2019081

## Intelligent metro optical networks and key optical components

XIAO Li, YUAN Zhilin, FU Chengpeng, MA Weidong

Accelink Technology Co., Ltd., Wuhan 430205, China

**Abstract:** Driven by the background of escalating internet traffic, the requirements of intellectualization and flexibility on metro optical transportation networks were dramatically increasing, which promoted network architecture revolution. ROADM network element and its dynamic networking technology which played the core role in intelligent all-optical metro networks were introduced. Metro network was cost sensitive, thus low-cost key optical components as the keys for physical realization of ROADM network element were studied, as well as decoupled white box optical components and their programmability. It was concluded that the low cost white box ROADM network elements were the key and effective means for optical metro networks intellectualization.

**Key words:** metro optical network, ROADM, optical amplifier array, wavelength selective switch, multi-cast switch, software defined networking

### 1 引言

城域光传输网是指跨度为几百千米的光传输网络, 在运营商网络和数据中心互联网络中以不同的架构和网络形态出现。在运营商网络中它是骨干网和接入网之间的桥梁, 组网形式多样, 业

务调度颗粒度灵活。城域数据中心互联网络目前还以点到点为主, 在数据量激增的驱动下, 多个数据中心互联也逐渐有更丰富的组网需求<sup>[1]</sup>。因此城域光传输网一方面需要支撑大数据业务容量的吞吐, 另一方面还要兼顾多样化业务类型的灵活调度, 同时成本方面也有更苛刻的要求。满足



数据业务需求的城域光传输网是目前国内外光通信运营商、系统商和器件商的共同目标，业务需求的提高和业务特性的变化正在推动全光化和智能化深入城域光传输网，给终端用户带来更低组网成本、更高性能和效率的网络<sup>[2]</sup>。

城域光传输网的智能化和全光化演进，不仅是速率的提升、现网技术的进步，还是光传输网总体系统架构的革命性变化。理想情况下的智能城域光传输网架构应具备以下特征：

- 业务的起始、终结和互通、调度不受限制，与信号种类、速率无关；
- 易于升级扩容，可按需求随时扩展带宽；
- 支持多厂商设备的互联互通。

目前多数城域光传输网采用如图 1 所示的经典静态环网架构。受限于技术和成本，采用无源复用/解复用器（Mux/DeMux）实现固定波长和信道数的上下，无光层业务调度能力。ROADM（reconfigurable optical add-drop multiplexer，可重构光分插复用器）网元的加入给密集波分复用（dense wavelength division multiplexing，DWDM）网络提供了波长颗粒度全光调度的能力，解决了电交叉的容量瓶颈，能耗和空间利用更加优化；灵活可靠的网状网保护机制更加灵活，光纤资源利用率更高，支持的业务调制速率和格式也更加多样。

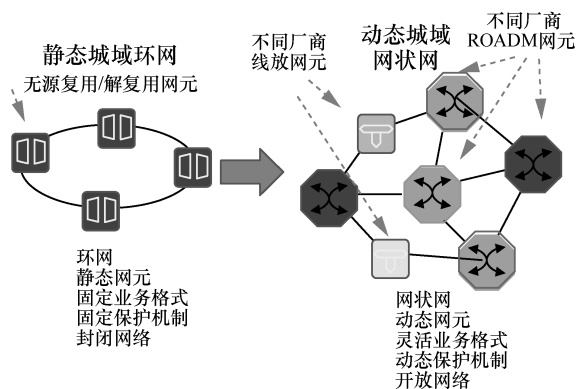


图1 城域光传输网架构全光化和智能化发展趋势

由网络架构的演变可以看出，ROADM 网元

是赋予城域光传输网智能的核心。众多的厂商联合不断推进以 ROADM 网元及其功能单元为代表的传输设备硬件接口和软件接口的标准化，为光传输设备白盒化和解耦合铺平了道路。软件定义网络（software defined networking，SDN）将光纤带宽作为灵活配置的网络资源，以满足全局优化的需求。本文在 SDN 对 ROADM 网元需求的基础上，重点介绍了硬件上支撑城域光传输网智能化的 ROADM 网元涉及的核心光器件及其在城域光传输网应用中面临的挑战，包括波长选择开关（wavelength selective switch，WSS）、多播光开关（multi-cast switch，MCS）、阵列光放大器以及光信道监测器（optical channel monitor，OCM）等；最后对智能城域光传输网的发展做出总结和展望。

## 2 软件定义城域光传输网的优势和需求

传统的城域光传输设备硬件和网管软件都是封闭的系统。不同域的网络、不同厂商的设备线路侧光接口在物理上无法互通，网管软件遵循各系统商的私有协议。不仅网络效率有限，能耗较高，而且分割的私有系统不利于网络的运维和统筹。ROADM 网元内部通过光纤直通，无光电光转换实现低时延波长颗粒度的交叉和信道光功率的调节和均衡，无需人工手动操作，通过远程配置即可实现本地业务、直通业务的切换和调度。伴随着 ROADM 网元给光物理层带来的波长级业务调度能力，原本封闭单一的物理设备控制功能需要融入统一的网络控制系统中，传输设备接口标准化迫在眉睫。不同网络层级由 SDN 统筹管理，根据业务需求和物理设备传输能力优化路由，增加了城域网的灵活性、可扩展性，网络功能不再受到设备的限制，也不会被不同系统商封闭系统分割。

光传输设备常用的控制接口协议包括由 Google 等厂商倡导的 OpenConfig 和由 AT&T 等厂商倡导的 Open ROADM。Open ROADM 多源协

议 (multi-source agreement, MSA) 将 ROADM 网元根据功能模块进行拆解, 针对城域网定义了 ROADM 交换、波长转换器和可插拔光器件的规格, 包括光层互操作性数据模型和物理端口的指标<sup>[3]</sup>。Open ROADM MSA 的 SDN 基本控制架构如图 2 所示, 在多层 SDN 控制器管理下, 多厂商通用物理层 SDN 控制通过应用程序接口将网络和功能解耦的多厂商网元和设备统一调度和管理, 以实现带宽的自动检测和调整、故障的侦测和自动恢复以及对光性能的感知, 实时准确地优化网络性能<sup>[4]</sup>。

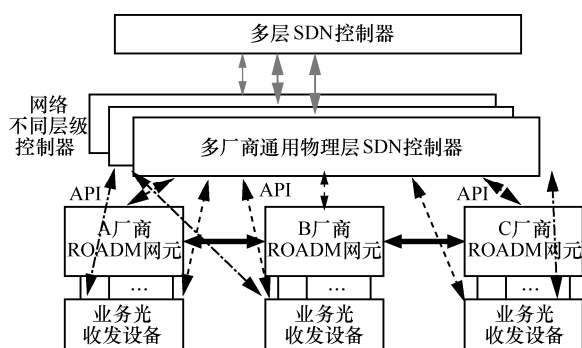


图 2 Open ROADM MSA 的 SDN 基本控制架构

遵循 Open ROADM MSA 的智能城域光传输网具有以下优势。

## 2.1 光传输性能全网优化

在 SDN 中, 光纤的带宽资源像虚拟计算和存储能力一样, 根据需求被实时调用。物理层网络资源与传输性能息息相关。在网状城域光传输网中, 信道的建立存在多条路径的选择。业务开通前, SDN 控制器可通过选择不同拓扑路径, 计算并比较得到最小传输代价或最大传输余量的路径。这一方面需要 ROADM 网元支持业务的任意路径切换, 选择传输光纤的方向, 即支持无方向性; 还需要 ROADM 网元提供实时传输性能检测。在相干业务使能的城域光传输网中, 不同调制格式的传输距离和所需物理带宽相互权衡, 同样业务速率下, 越高阶的调制格式传输距离越短, 占用光纤带宽越窄。支持灵活栅格的 ROADM 网元

可以根据业务传输路径的距离, 选择合适的调制格式, 使得在满足光信噪比 (optical signal noise ratio, OSNR) 容限的情况下, 尽可能减少对光纤带宽资源的消耗, 提高网络整体的效率<sup>[5]</sup>。

## 2.2 多种业务保护恢复机制并存

传统的光纤物理层保护包括 1+1 光复用段保护 (optical multiplex section protection, OMSP) 和光信道保护 (optical channel protection, OCHP), 依赖光纤线路的冗余和业务板卡的冗余实现, 波长利用率低, 但时间效率高, 能满足 50 ms 的时延。由 ROADM 网元使能的动态网状网新增基于波长交换光网络 (wavelength switching optical network, WSON) 协议的保护机制, 分为预置重路由恢复和动态重路由恢复。前者当故障发生时直接调用预留的路由建立恢复波道, 后者当故障发生后由网管根据当时全网带宽资源进行路由计算从而建立恢复路由。WSON 保护机制光纤资源利用率高, 且恢复机制抗多点故障, 能提供网络的全局保护, 可靠性更高。但由于它的恢复过程需要建立新的光信道, 恢复速度受到 ROADM 网元光器件响应速度的限制, 在目前的技术条件下一般需要秒级才能提供有效业务恢复。

考虑到不同方案各自的优缺点, 目前在网络中根据不同业务等级对恢复时间的不同需求, 采用多种保护恢复机制并存的方案, 由网管系统提供有效的协同工作方案<sup>[6]</sup>。一般情况下, WSON 不参与 OMSP 和 OCHP 的倒换, 而 OMSP 和 OCHP 的倒换也不触发 WSON 的重路由。1+1 备份的光纤资源在 WSON 路径中作为单个链路, 而较慢的 WSON 也应该实时监控链路的性能和状态。

## 2.3 异构网络互通和多层网络协同

ROADM 网元使得信道可以在波长颗粒度交叉, 通过跨异构网络的 SDN 控制器互通, 可实现接入网、城域网、骨干网之间物理信道资源联合调度, 以提供更智能的业务管道, 有效降低对路由器的容量需求, 打破网络容量的电交叉瓶颈,



降低网络综合承载成本。多层 SDN 控制器可以实现物理光传输网和 IP 层网络之间的资源优化和协同控制。由于数据业务的突发性和方向选择的灵活性, ROADM 网元需要尽可能减少由硬件带来的信道路径选择的限制, 支持无颜色性 (colorless)、无方向性 (directionless) 和无冲突 (contentionless) 的 CDC ROADM 网元是跨异构网络互通和多层级网络协同最灵活、最高效的选择。

### 3 智能城域光传输网的核心光器件

城域光传输网的全光化和智能化主要体现在由 ROADM 网元带来的物理层波长交叉的革命。从硬件功能上来说, ROADM 网元包括如图 3 所示的 3 个层次。

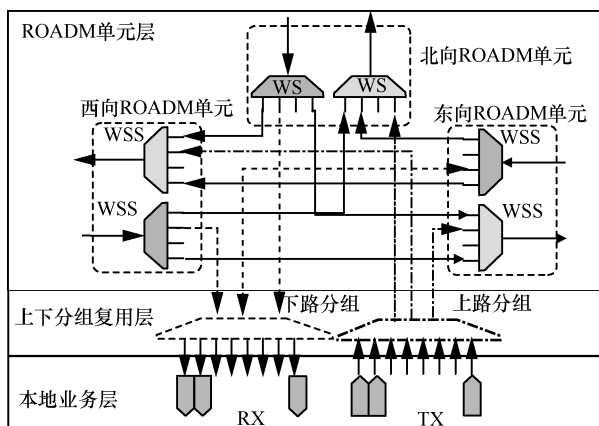


图3 典型的ROADM网元结构 (以3方向ROADM网元为例)

#### (1) ROADM 单元层

提供本地业务向多个光纤方向 (维度) 的接入和多个方向间业务的交叉。其中, 核心光器件是  $1 \times N$  WSS, 它是提供信号波长调度和功率调控的关键。经过多年的技术方案争论和沉淀, 目前多采用基于硅基液晶 (liquid crystal on silicon, LCoS) 技术的 WSS, 它为 ROADM 提供了无颜色性和灵活栅格的特性。

#### (2) 上下分组复用 (add/drop group multiplexing, ADGM) 层

提供本地业务的分组以及向各个方向ROADM

单元的调度。ADGM 层对于 ROADM 网元来说并非必须, 如果 ROADM 网元仅需要无颜色性, 业务可直接接入 ROADM 单元。但由于 SDN 对于 ROADM 网元灵活性的需求不断增加, 成本可控的 CDC ADGM 是实现本地业务灵活无阻塞的重要手段。ADGM 层目前有多种技术方案, 包括基于  $M \times N$  WSS 的方案和基于 MCS 的方案。后者在低成本和低滤波代价方面的优势, 使其成为城域网络的首选。

#### (3) 本地业务层

主要指城域网络中的本地业务光收发设备。目前的城域网络不仅包括 10 Gbit/s 及更低速率的业务, 还包括 100 Gbit/s 甚至更高速率、更多样调制格式的业务。它的技术实现方案在本文不做赘述, 但它的波长灵活、频谱宽度可配置、OSNR 容限各异、需要多样化混传、未来可拓展等需求给 ROADM 单元层和 ADGM 层提出了技术挑战。

在 ROADM 网元中提供传输线路光功率放大的仍然是 DWDM 系统必不可少的掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA), ROADM 网元中线路前置放大器 (booster-amplifier, BA)、预放大器 (pre-amplifier, PA) 以及线路放大器 (line amplifier, LA) 和静态城域网中相应位置的 EDFA 无本质差异, 本文中不做赘述。ROADM 网元特有的光器件是提供光信道交叉和调度的 WSS 和 MCS 器件。这些器件使 ROADM 网元内部插损比静态城域网的无源 Mux/Demux 网元有较大增加, 且网元内部光纤连接数量众多, 需要阵列掺铒光纤放大器 (EDFA) 来提供多路功率的放大。ROADM 网元的调节需要针对所有信道的功率监控, 光信道监测器 (OCM) 是给 ROADM 网元提供反馈机制的关键器件。

#### 3.1 $1 \times N$ 波长选择开关

WSS 的基本功能框架如图 4 所示。WSS 通过衍射光栅将入射光纤中的不同波长在空间上重新编排, 微机电系统 (MEMS) 或 LCoS 将不同波

长的光信号重新指向或切换,实现光信号的衰减或开关。以下路的  $1 \times N$  WSS 为例,其基本工作原理为公共端口的入射光经过衍射光栅解复用后,控制单元控制不同波长光信号进行相应的衰减,再经开关切换至不同的端口,由各输出端口的衍射光栅复用合波后从各支路输出。其中,光衰减和各支路开关切换受控于 WSS 的控制单元<sup>[7]</sup>。图 4 中省略部分波长的路径和端口;光开关隔离度会带来的功率串扰,仅绘出最上一个波长信道虚线所示的串扰功率的路径。

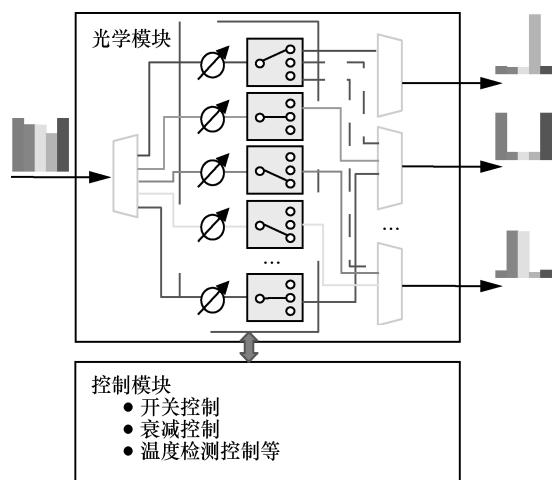


图4 WSS的基本功能框架

城域光传输网对于价格敏感。WSS 器件内部光学精密度较高,校准工作量大,控制逻辑复杂,使得 WSS 目前仍占 ROADM 网元成本的主要部分。WSS 的价格居高不下是 ROADM 网元在城域网推广最大的成本阻力。由图 5 可以看出,越多的 WSS 支路数目意味着越高的光路复杂度,价格基本随端口数呈线性增加。目前城域网 ROADM 网元的方向数目不多,基本上以不大于 4 维为主。若采用多端口数 WSS,仅 WSS 器件的成本就占到整个网元成本 50%以上,并不合算。而  $N \leq 4$  的低端口数 WSS 可拓展性受限,未能使得 ROADM 网元针对不同业务需求提供不同灵活度的分层空间。因此中端口数的  $1 \times N$  WSS ( $N \sim 9$ ) 为适合城域网应用的更富竞争力的选择。

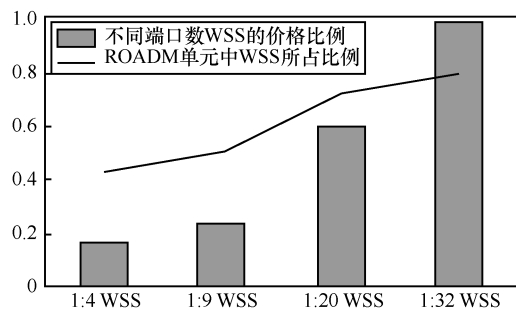


图5 WSS占ROADM网元的成本分析

数据业务驱使下的城域网业务存在突发性,需要满足快速部署的需求;重路由保护对 ROADM 网元的切换调节速度的要求仍然不断增加。目前商用的 LCoS WSS 无串扰的信道配置速度往往是秒量级,这使得信道路由的建立过程需要若干秒才能完成。为了保证不同端口间有足够的瞬态空间光隔离度,空间光的重新路由不得不通过逐波长多次调节,寻找到安全的空间光路径。若能在一定程度牺牲对 WSS 模块小型化的苛刻要求,可以在一定程度上缓解调节速度的压力。

### 3.2 多播光开关 (MCS)

满足无方向性和无冲突的 CDC ROADM 网元能够将来自任意方向任意波长的业务调度到任意本地光收发端口,这主要靠位于 ROADM 单元层和本地业务层之间的 ADGM 层来提供本地业务交叉的能力。以  $N \times M$  ADGM 为例,  $N$  代表输入/输出上层 ROADM 单元的数量,  $M$  代表业务收发模块的数量。在业务下行一侧,ADGM 承接来自  $N$  个方向多个波长的业务,将它们分组并选择合适的路径,分别导入相应的  $M$  个本地业务接收机;在业务上行一侧,  $M$  个本地发射机也经过 ADGM 选择合适的路径汇入相应方向的 ROADM 单元。无方向性要求  $M$  个发射机的业务可以通往  $N$  个 ROADM 单元中的任何一个。发射机的波长取决于它通往方向光纤的可用带宽资源,而该波长有可能已经被其他方向的光纤占用,如果 ADGM 层器件存在波长唯一性,则会发生不同端口相同波长业务之间的冲突。为了最大化光纤带宽资源的



利用率,满足无冲突的 ROADM 需要 ADGM 支持多套波长,才能保证任何方向的新增业务波长不受其他方向光纤已存在波长的限制。ROADM 无方向性无冲突性示意图如图 6 所示,以二维 CDC ROADM 为例,无方向性表示任一业务可通过 ADGM 任意切向西向或东向 ROADM 单元。实线所示业务已运行在西向光纤中,新增东向同波长虚线业务在 ADGM 中不会与已有实线业务冲突。

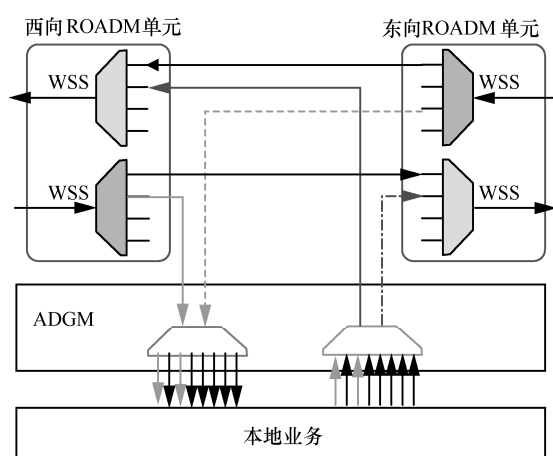


图 6 ROADM 无方向性无冲突性示意图

CDC ROADM 网元的 ADGM 层可基于  $M \times N$  WSS 或 MCS。一般的  $1 \times N$  WSS 各端口共享一套波长,由它重构的  $M \times N$  WSS 无法实现无冲突性。真正能提供  $N$  套无波长冲突的  $M \times N$  WSS 成本随着端口数增加呈级数增长。以 8 维度,每方向 96 波为例,对不同方案 CDC ROADM 的每业务端口成本进行分析,如图 7 所示。从图 7 可以看出,无论是基于  $M \times N$  WSS 还是基于 MCS 的 ADGM,当冲突概率降至 10% 以下时,每业务端口平均成本急剧上升。维持 20%~25% 的冲突概率是性价比最优的 CDC AGDM 选择。在此范围内,基于  $M \times N$  WSS ADGM 成本大约是同端口数基于 MCS ADGM 成本的 1.5~2 倍。

基于 MCS 的 ADGM 是 CDC ROADM 在城域网大规模推广的低成本解决方案,它的基本架构

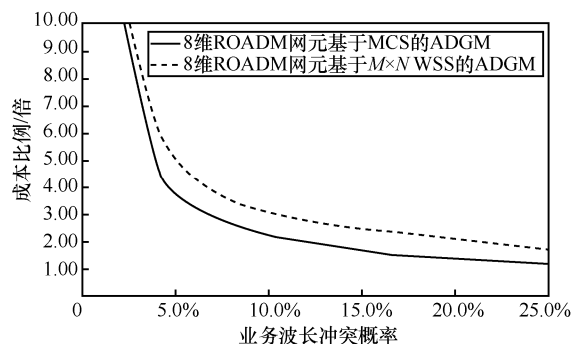


图 7 每业务端口成本分析

如图 8 所示<sup>[8]</sup>。来自各个方向 ROADM 单元的信号经过  $1 \times M$  分路器多播,再通过  $N \times 1$  光开关选择相应的接收机。对于非相干接收的业务还需要加入可调滤波器以消除带外噪声。 $N \times 1$  的光开关只选择来自期望方向的信道,同时屏蔽其他方向的同频信号和噪声。基于 MEMS 的光开关可实现大于 45 dB 的端口隔离度,且插损和成本不随开关端口数增加而急剧增加,整个 ADGM 设备带来的光串扰更小。由于每一个端口的开关相互独立, $M$  个业务之间的波长无冲突。光开关状态可掉电保存,上电启动时间较快,而基于  $M \times N$  WSS ADGM 则上电需要若干分钟的配置时间。如果 ROADM 单元的 WSS 或 ADGM 的  $1 \times M$  光分路器在设计时冗余端口, MCS 的 ADGM 可在不影响已有业务的条件下根据需求随时扩充本地上下业务的通道数量。

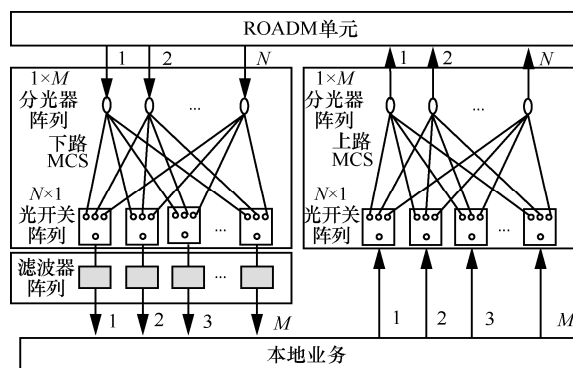


图 8 基于 MCS 的 ADGM 架构示意图

### 3.3 阵列光放大器

由于 ROADM 网元比无源 Mux/Demux 网元

支持更多的功能,网元内动辄存在大于 10 dB 的内部损耗,这些损耗需要额外的内部功率补偿。ROADM 网元内部光纤连接较多,低成本高集成度的 EDFA 阵列 (EDFA array) 是补偿 ROADM 网元内部多路插损的有效方案。EDFA array 指同一个模块中存在多个结构相似的 EDFA。由于多个 EDFA 功能相似,一方面可以采用混合集成无源器件,以减少设备尺寸和工艺复杂度;另一方面可以共用泵浦技术,可以有效提高泵浦利用率,大大减少产品成本。常见的共泵 EDFA array 的设计原理如图 9 所示。一种为并联结构,将大功率泵浦分光后分配给多个 EDFA;一种为串联结构,前序 EDFA 的残余泵浦可注入后序 EDFA,充分利用泵浦为多个 EDFA 提供能量。共泵设计为 EDFA array 低成本化提供了可能,适合 ROADM 网元节点内部插损的补偿。该设计控制难度较大,为了降低不同链路功率负荷不均衡时各路 EDFA 之间的串扰,需要巧妙地设计各路放大器中的铒离子的饱和程度以及优化实时控制算法,保证在光功率瞬态变化时还能提供有效反馈控制机制。

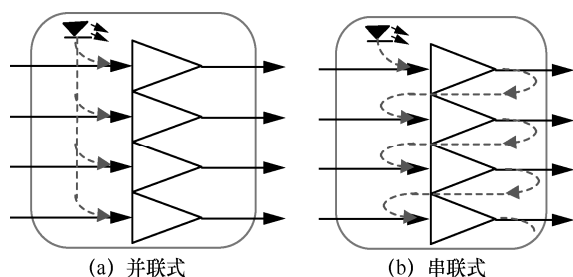


图 9 常见共泵 EDFA array 的设计原理

### 3.4 光信道监测器 (OCM)

WSS 和 MCS 等器件是 ROADM 网元实现信道动态调整的手段,而能够监控全工作带宽内个信道性能的 OCM 光性能感知技术是 ROADM 网元的调节的基准。目前常用的 OCM 有滤波型和干涉型两种。干涉型 OCM 精细度高,但需要本地窄线宽光源,成本较高,在局域网中一般不考虑使用。滤波型 OCM 基本工作原理如图 10 所示,

输入光经过窄线宽可调光滤波器选择相应波长的信号经由光探测器进行探测。可调光滤波器持续不断地在全波段范围内扫描,光探测器接收光功率随时间周期性变化,其探测结果经由高速信号处理器进行处理,即可得到不同信道的功率、波长、OSNR 等数据。由于 ROADM 网元调节的实时性要求,OCM 中高隔离度、可快速扫描的窄带可调滤波器和动态范围的光电探测器是高性能 OCM 的关键。

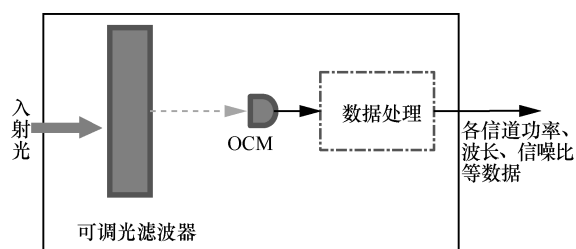


图 10 滤波型 OCM 工作原理

## 4 结束语

数据业务驱动下的城域光传输网正在发生变化,已广泛在光传输网中部署的 ROADM 网元逐渐往城域网中推进,成为下一代城域光传输网架构和网络形态炙手可热的发展重点。伴随着网络智能化的需求,标准化白盒光传输设备打破了传统以硬件为中心的封闭网络形态,逐渐向以软件为中心的开放网络演进。ROADM 网元给城域光传输网带来前所未有的灵活度,不仅为无人工干预的快速可靠部署提供了硬件基础,更能按需分配最大化网络中光纤资源的利用。光器件决定着网络承载最底层的性能,以基于 LCoS 技术的  $1 \times 9$  WSS、MCS、阵列 EDFA 以及滤波式 OCM 为代表的低成本、高性能核心光器件是 ROADM 网元在城域推广的“铺路石”。未来城域光传输网络设备的产业链将会往扁平化发展,“系统”的概念将越来越淡化,由器件商直接向运营商或数据中心提供积木块式带有标准管理接口的灵活可配置即插即用传输设备,通



过跨越多层的开放网络管理平台提供整个网络的统筹管理,实现数据业务主导下城域光传输网的灵活性、可扩展性和效率。

### 参考文献:

- [1] KEYS R. Evolving metro cloud networks through virtualization and automation[Z]. 2015.
- [2] 张成良, 李俊杰, 马亦然, 等. 光网络新技术解析与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.  
ZHANG C L, LI J J, MA Y R, et al. Optical network-new technology and implementation[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2016.
- [3] Metro Open ROADM network model: v1.1.2016[Z]. 2016.
- [4] Open ROADM overview v1.0.2016[Z]. 2016.
- [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 G X, 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] ISHII Y, Ooba N, SAHARA A, et al. WSS module technology for advanced ROADM[J]. NTT Technical Review, 2014, 12(1).
- [7] 张传熙, 王鹏, 刘乘龙. ROADM 智能网保护恢复方式探讨[J]. 邮电设计技术, 2018(9): 76-81.  
ZHANG C X, WANG P, LIU C L. Protection and recovery mode of ROADM intelligent network[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2018(9): 76-81.
- [8] WATANABE T, SUZUKI K, TAKAHASHI T. Multicast switch technology that enhances ROADM operability[J]. NTT Technical Review, 2014, 12(1).

### [作者简介]



肖礼(1981-), 女, 武汉光迅科技有限公司网络与系统集成技术总监, 主要研究方向为光传输系统网络、设备及核心器件。



袁志林(1982-), 男, 武汉光迅科技有限公司高级研发工程师, 主要研究方向为波长选择开关器件等光无源器件。



付成鹏(1973-), 男, 武汉光迅科技有限公司高级工程师, 主要研究方向为光传输系统方案及光放大器与子系统设计。



马卫东(1968-), 男, 武汉光迅科技有限公司芯片部总经理, 主要研究方向为高速光收发芯片以及无源波导芯片的设计、工艺和封装。