

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240278.

光通信系统与网络技术

卢刚,肖礼,喻杰奎,等. 基于SDN控制器的白盒ROADM动态调度技术研究[J]. 光通信研究, 2026(4):171-178.

Lu G, Xiao L, Yu J K, et al. Research on Dynamic Scheduling Technology of White Box ROADM based on SDN Controller[J]. Study on Optical Communications, 2026(4):171-178.

基于SDN控制器的白盒ROADM动态调度技术研究

卢 刚,肖 礼,喻杰奎,徐 健,罗 清,王文忠

(武汉光迅科技股份有限公司 子系统产品业务部,武汉 430205)

摘要:【目的】目前,数据中心互联(DCI)的光网络广泛使用内部组件解耦的白盒化光传输设备,并通过软件定义网络(SDN)控制器基于标准模型进行管控。由于对业务调度灵活性的需求提升,DCI网络部署方式也由通常的点对点部署扩展到网格化部署,大量白盒可重构光分插复用(ROADM)设备被应用到网络中。白盒ROADM设备解耦后缺少自动交换光网络(ASON)功能特性,使得动态调度及快速故障恢复的能力对SDN控制器提出了较大挑战。【方法】文章提出了一种白盒ROADM网络的动态波长调度技术,利用SDN控制器对ROADM网络故障进行动态检测,通过调度策略精准控制业务路由切换并使用配置命令并发控制提升重路由由中媒体通道配置和功率调整性能。【结果】文章通过使用该技术方案,在实际白盒ROADM网络中基于点对点以及网格化场景进行部署,在白盒ROADM网络故障发生后,实现了SDN控制器快速恢复业务的功能。【结论】实验表明,在4~20个通道同时重路由的情况下,SDN控制器最快可在1 min 30 s内完成重路由配置;并且随着通道数的增多,整体重路由时间增幅可控制在10%以内,较大提升了现有SDN控制器管理下白盒ROADM网络的生存性与可靠性,重路由性能可接近于传统支持ASON特性的ROADM网络。

关键词:白盒;可重构光分插复用;软件定义网络;动态调度

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Research on Dynamic Scheduling Technology of White Box ROADM based on SDN Controller

LU Gang, XIAO Li, YU Jiekui, XU Jian, LUO Qing, WANG Wenzhong

(Subsystem Product Service Group, Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract: 【Objective】In current Data Center Interconnect (DCI) optical networks, white box optical transmission devices with internal component decoupling are widely used and controlled based on standard models through Software Defined Network (SDN) controllers. Due to the increasing demand for business scheduling flexibility, DCI network deployment has expanded from the usual point-to-point deployment to grid deployment. A large number of white box Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexing (ROADM) devices have been applied to the network. Due to the lack of Automatically Switched Optical Network (ASON) functionality after decoupling of white box ROADM devices, the dynamic scheduling and fast fault recovery of white box ROADM pose significant challenges to SDN controllers. 【Methods】This article proposes a dynamic wavelength scheduling technique for white box ROADM networks, which utilizes an SDN controller to dynamically detect ROADM network failures. It can also accurately control business route switching through scheduling strategies, and use Remote Procedure Call (RPC) concurrency control to improve channel power adjustment performance in rerouting. 【Results】By deploying this technique based on point-to-point and grid scenarios in actual white box ROADM networks, the SDN controller can quickly restore business after a white box ROADM network failure occurs. 【Conclusion】Experiments show that when 4~20 channels are rerouted at the same time, the SDN controller can complete the rerouting configuration in 1 min and 30 s. With the increase of the number of channels, the overall rerouting time increase is controlled within 10%. This greatly improves the survivability and reliability of the white box ROADM network under the management of the existing SDN controller, achieving rerouting performance comparable to that of traditional ROADM networks that support ASON capabilities.

Key words: white-box;ROADM;SDN;dynamic scheduling

0 引 言

近年来,白盒化光传输设备被大量部署于数据中心互联(Data Center Interconnect, DCI)网络中,其应用场景也逐渐从原有的点对点扩展到网格化。可重构光分插复用(Reconfigurable Optical Add/

Drop Multiplexing, ROADM)设备^[1]为DCI网络提供了网格化组网的基础。白盒光传输设备内部各组件相互解耦,设备间控制平面基于控制协议的交互能力被弱化,转而由网络配置协议(Network Configuration Protocol, Netconf)/下一代数据建模语言(Yet Another Next Generation Modeling Language,

收稿日期:2024-12-25; 修回日期:2025-02-05; 纸质出版日期:2026-08-10

作者简介:卢刚(1977—),男,湖北武汉人。高级工程师,硕士,主要研究方向为SDN和白盒光网络技术。

通信作者:卢刚,高级工程师。E-mail:gang.lu@accelink.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

YANG)集中控制。虽然软件定义网络(Software Defined Network, SDN)控制器可以完成业务编排和控制,但在实际应用中动态重路由仍需高度依赖设备上的自动交换光网络(Automatically Switched Optical Network, ASON)^[2-3]功能,而解耦的白盒光网络设备并不具备 ASON 功能。因此,白盒光网络的 SDN 控制器仍无法高效、动态地进行路由自动恢复,这限制了 ROADM 网络配置的实时性与灵活度。

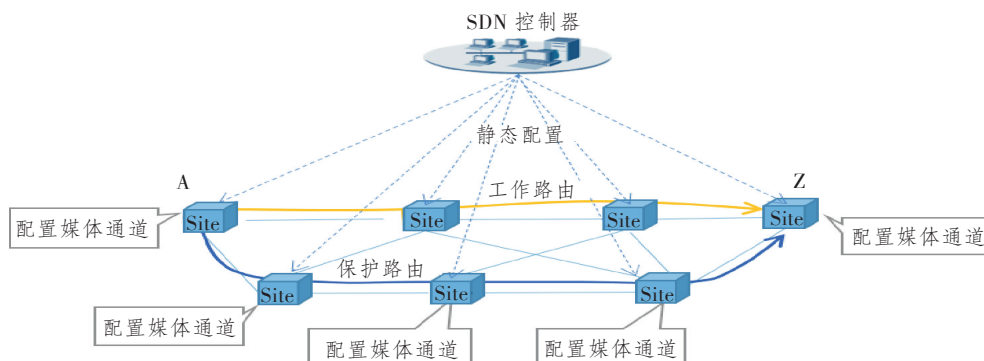
本文探索了基于 SDN 控制器的白盒 ROADM 网络动态路由自动调度的技术方案,实现了光网络故障情况下的快速重路由,从而大幅度提升了网络的自愈性和生存能力。

1 白盒 ROADM 光网络现状和问题

网格化光传输网络的核心网元是 ROADM 设备,其内置波长选择开关^[4](Wavelength Selective Switch, WSS)模块,以实现波长的灵活调度。传统

的 ROADM 网元基于通用多协议标签交换(Generalized Multiprotocol Label Switching, GMPLS)协议栈,通过 ROADM 设备的 ASON 控制功能实现网络的动态重路由。当网络链路出现中断故障时,通过网络设备上的 ASON 功能单元自主触发动态重路由,将业务路径切换至非故障的路由,从而恢复业务,目前业界普遍的 ASON 光层恢复性能在分钟级别^[5]。GMPLS 协议栈对设备主控的处理能力要求较高,且因设备间互操作协议的私有化,无法在解耦的白盒设备间实现协议的互通,因此该协议栈不能在 SDN 控制器控制的白盒光传输网络中运行。

白盒光传输设备的 SDN 控制器采用标准化的开放配置模型(OpenConfig)^[6]。白盒 ROADM 工作路由和保护路由配置如图 1 所示,业务路由配置需要 SDN 控制器根据用户需求下发相应的命令,设备间并不存在强耦合的指令交互,因此 SDN 控制器不具备动态的网络调度和重路由能力^[7-8],此为目前白盒光网络 SDN 控制器的局限。



注: Site A 和 Site Z 均为业务的源宿站点。

图 1 白盒 ROADM 工作路由和保护路由配置

Figure 1 The configuration of white-box ROADM working and protection routes

2 白盒 ROADM 网络动态调度方案

针对目前 SDN 控制器控制白盒 ROADM 设备存在动态调度局限,本文所提基于 SDN 控制器的白盒 ROADM 调度框架如图 2 所示。设备层中 Site A 和 Site Z 为业务的源宿站点, Site X 和 Site Y 为业务的中间站点。WSS(绿色)为本地 WSS 组件, WSS(黄色)为线路 WSS 组件, Common 端口为 WSS 组件的线路端口, Trib 端口为 WSS 组件的支路端口(比如 20 维 WSS 的支路端口记为 Trib1~Trib20),中间使用无源配线单元(Shuffle)连接。其他组件还包括光放大单元(Optical Amplifier, OA)、多路复用器(Multiplexer, MUX)、光线路保护单元(Optical Line Protection, OLP)和光传送单

元(Optical Transport Unit, OTU)等。控制层包括 SDN 控制器中的 ROADM 业务控制模块、ROADM 拓扑模块和 ROADM 配置模块,具体描述如下:

①ROADM 业务控制模块

SDN 控制器定义对白盒 ROADM 设备的信息采集模型。通过重路由触发检测模块实时获取网络中关键故障信息,判断是否触发重路由;其次,在业务控制模块的动态路由调度过程中,通过获取网元内拓扑和网元间拓扑,根据动态调度策略和路径计算算法来完成路由切换信息和业务路由选择,确定切换路由的业务配置。

②ROADM 拓扑模块

ROADM 拓扑模块通过设备交叉配线单元设

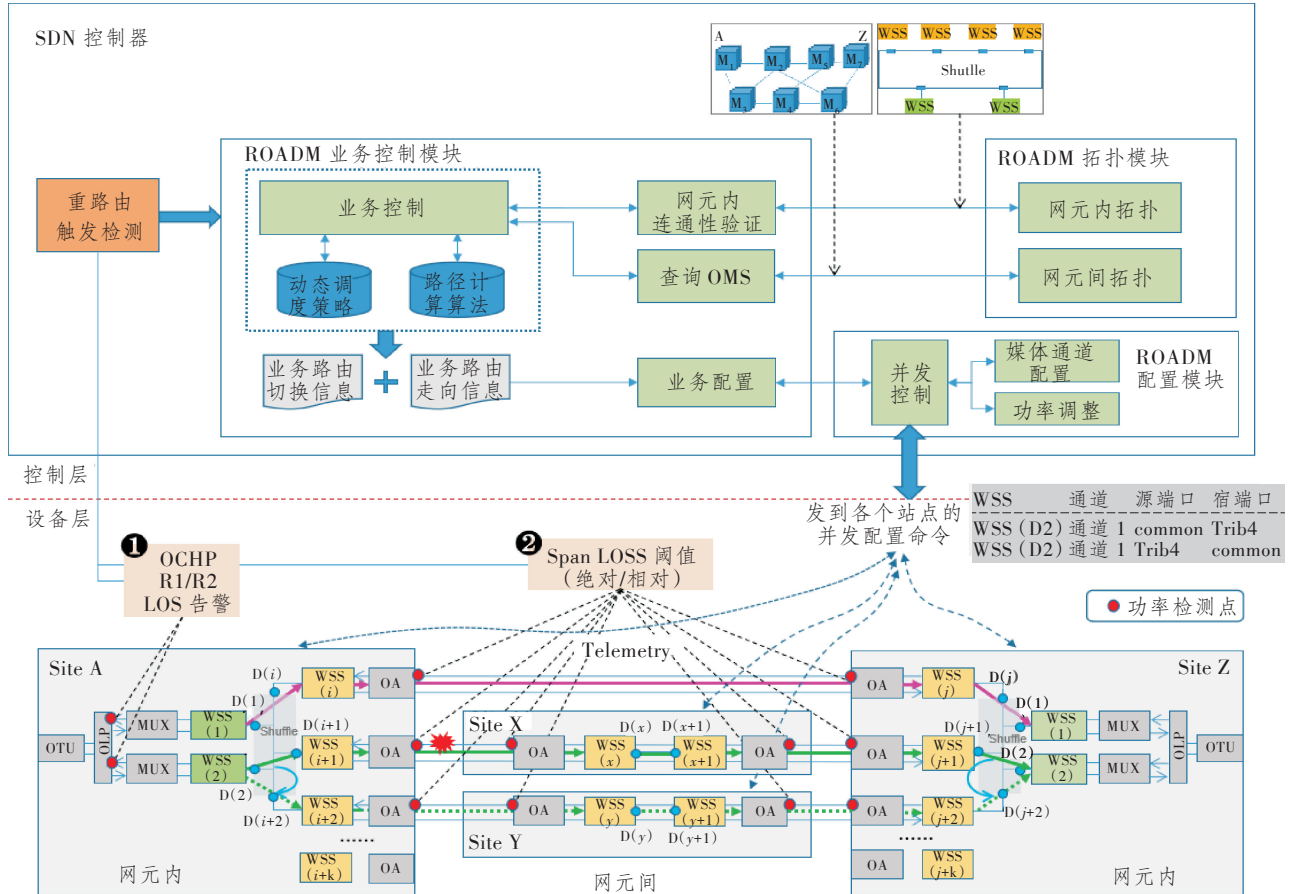
置和存储白盒 WSS 组件的连接关系,形成网元内部拓扑。通过光复用段(Optical Multiplex Section, OMS)信息获取网元间拓扑(自动发现或手动创建)并维护和存储。

③ROADM 配置模块

通过并发控制组件协调远程过程调用(Remote Procedure Call, RPC)命令的并发执行,对路由上所有网元批量下发重路由配置和功率调整指令,指令包括 WSS 各媒体通道的源宿端口、起止频率、目标

功率和衰减等配置信息,并确保多通道能互不干扰地完成各自重路由动作。

借助并发控制组件协调远程过程调用(Remote Procedure Call, RPC)命令的并发执行,向路由上所有网元批量下发重路由配置和功率调整指令。指令涵盖 WSS 各媒体通道的源宿端口、起止频率、目标功率和衰减等配置信息,确保各通道重路由动作互不影响。



注:OHP为光通道保护;LOS为信号丢失;Span LOSS为跨损;Telemetry为秒级的流式性能数据上报;R1/R2均为通用 OLP 包含的 2 个接收端口; $D(*)$ 为 ROADMs 的维度/方向, $D(1)$ 为方向 1, $D(2)$ 为方向 2,以此类推;WSS(*)为第 ij 个 WSS 单盘;Common 为 WSS 单盘的线路端口;Trib4 为 WSS 单盘的第 4 个支路端口(仅为举例),如 20 维 ROADM,每个 WSS 单盘具备 Trib1~Trib20 的 20 个支路端口。

图 2 基于 SDN 控制器的白盒 ROADM 调度框架

Figure 2 White-box ROADM scheduling framework based on SDN controller

2.1 重路由触发逻辑设计

如图 2 中的①②所示,感知重路由触发条件主要有两种,一种是由白盒系统 OHP 接收端口 R1/R2 上报 LOS 告警触发,可理解为通道级触发;另一种是基于上下游 OA 的线路功率流式性能上报(Telemetry)上报,由 SDN 控制器计算得到上下游的跨段损耗(Span LOSS)进行触发,当 Span LOSS

达到绝对或相对阈值后触发重路由,可理解为复用段级触发。图 2 中标记了功率检测点,OHP R1/R2 LOS 的通道放入集合 T_1 ,跨段损耗超过阈值的全部通道放入集合 T_2 ,通过两种方式确定的重路由通道集合的并集为 $T = T_1 \cup T_2$,对 T 中的所有通道触发重路由处理。该逻辑处理过程如图 3 所示。

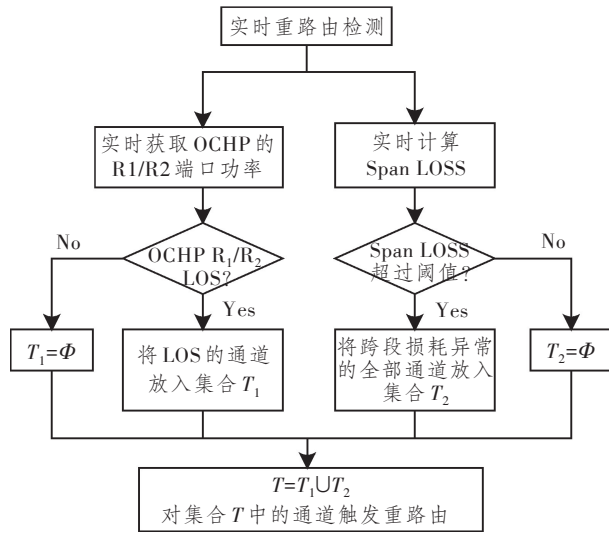


图3 重路由触发逻辑流程

Figure 3 Rerouting triggers logical flow

2.2 动态调度策略设计

采用图4中所示动态调度处理流程,并以图2中网络为例,描述如下:

①当重路由触发后,查询并确定故障路由为 Site A→Site X→Site Z,并相应确定该路由上的受损业务列表。查询并确定故障路由中各站点内的媒体通道交叉端口设置,其中每个交叉记为 $R_1, R_2, \dots, R_n$,记为集合 $M(n$ 为本路由经过的站点个

数)。M包括3组交叉设置:Site A中的 WSS($i+1$)模块的 D($i+1$)端口 ↔ WSS(2)模块的 D(2)端口的交叉 R_1 、Site X中的 WSS(x)模块的 D(x)端口 ↔ WSS($x+1$)模块的 D($x+1$)端口的交叉 R_x 和 Site Z 站中的 WSS($j+1$)模块的 D($j+1$)端口 ↔ WSS(2)模块的 D(2)端口的交叉 R_n 。

②确认可用的重路由路径,可通过预置路径方式或动态路由计算方式确定新路由为 Site A→Site Y→Site Z。查询并确定新路由上各站点内的媒体通道交叉端口设置,其中每个交叉记为 $R_1', R_2', \dots, R_n'$,所有交叉的集合记为 M' 。 M' 包括3组交叉设置:Site A中的 WSS($i+2$)模块的 D($i+2$)端口 ↔ WSS(2)模块的 D(2)端口的交叉 R_1' 、Site Y的 WSS(y)模块的 D(y)端口 ↔ WSS($y+1$)模块的 D($y+1$)端口的交叉 R_y' 和 Site Z 的 WSS($j+2$)模块的 D($j+2$)端口 ↔ WSS(2)模块的 D(2)端口的交叉 R_n' 。

③当媒体通道为预置或非预置模式时分别处理:(a)媒体通道预置模式:在不删除媒体通道情况下,从集合 M 的端口配置修改为集合 M' 的端口配置;(b)媒体通道非预置模式:则需要删除集合 M 中的所有交叉的媒体通道,并创建集合 M' 中的所有交叉的媒体通道。

经过以上步骤,即完成动态调度过程。

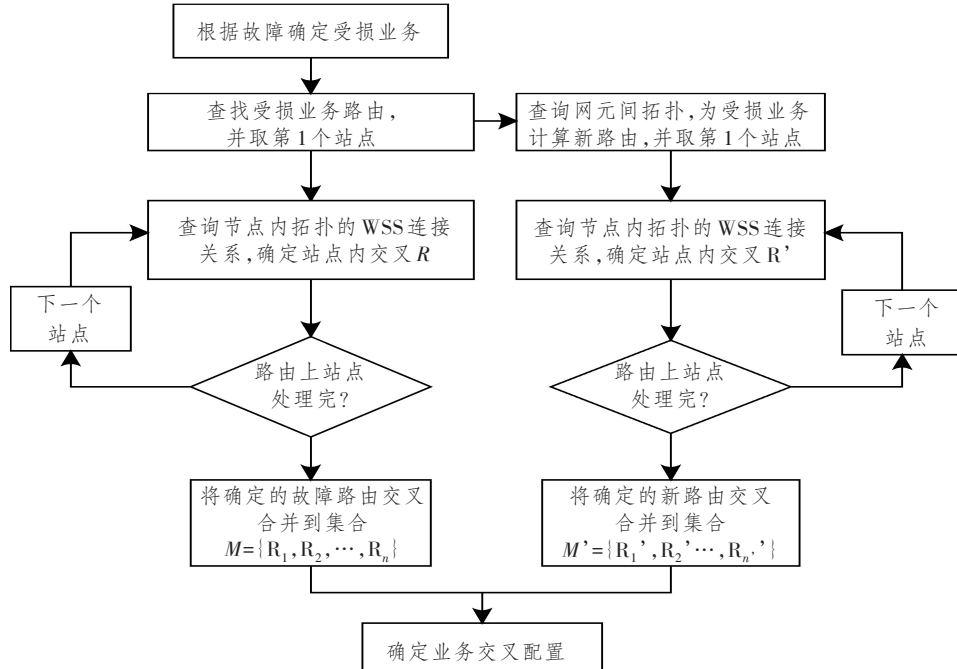


图4 动态调度流程

Figure 4 Dynamic scheduling process

2.3 多通道重路由并发设计

为了提升多通道同时重路由的配置效率,如

图 5 中所示,基于 3 个过程来实现并发重路由请求的下发。

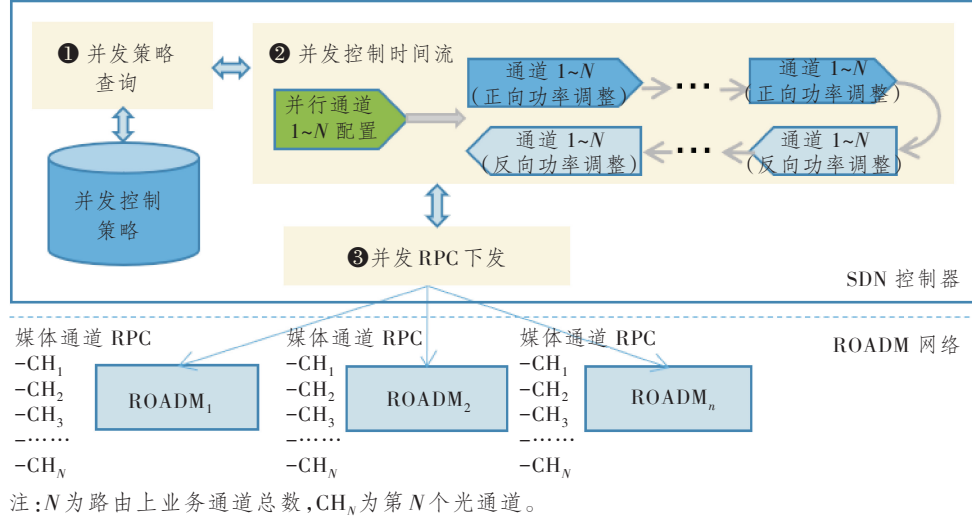


图 5 并发动态调度框架图

Figure 5 The diagram of concurrent dynamic scheduling framework

①并发策略查询:根据阻塞规则创建并发操作集合与串行操作集合。并发策略主要包括:(a)部署相关性策略:若不同 WSS 盘存在同框部署,则这两块 WSS 盘的配置操作存在相关性,需要进行串行处理,纳入串行处理列表;(b)业务相关性策略:若 WSS 盘对单次下发业务的媒体通道配置数量有限,则可对同一个 WSS 盘下发的所有通道业务进行分组,分组方式包括平均分组和根据业务等级分组两种,业务依据分组结果进入串行操作列表,每个分组的业务数量可按需配置。

②并发控制时间流:整个重路由过程可划分为 2 个顺序执行阶段,其一为受损业务媒体通道配置阶段,即把媒体通道的数据配置到设备上,但此过程不能保证功率最优;其二为受损业务通道功率调整阶段,此阶段会把所有通道功率调整至目标功率水平。

③并发 RPC 下发:采用多个网元并行向各网元下发 RPC 媒体通道配置,并且每个 RPC 采用多通道批量下发,二者结合可加快重路由配置过程,理论上重路由配置时间为单网元重路由配置时间。后续通道功率调整则采用多网元依次由上游正向配置到下游,之后再由下游反向配置,理论上通道功率调整时间为各网元的正/反向功率调整时间之和。

为了更好地评估并发处理性能,下面对重路由中的并行场景和串行场景进行性能分析和理论估算。本文假设:各网元媒体通道的配置时间相同,通道功率调整时间相同,并将多通道并行模式下所产

生的并行任务控制的额外耗时记为并行固定耗时,所使用符号及含义如表 1 所示。

表 1 使用符号及含义

Table1 Symbols and their meanings

符号	含义
n	路由上网元总数
ΔT	单网元媒体通道配置耗时
Δt	单网元单向功率调整耗时
T_i	单网元单通道媒体通道配置完成时间
t_i	单网元单通道单方向功率调整的时间
X_0	媒体通道配置并行固定耗时
Y_0	功率调整并行固定耗时

根据以上定义,多通道串行媒体通道配置时间 X' 可表示为

$$X' = N \times \Delta T。 \quad (1)$$

多通道串行功率调整时间 Y' 可表示为

$$Y' = N \times 2 \times \sum_{i=1}^n t_i = N \times 2 \times n \times \Delta t。 \quad (2)$$

多通道并行媒体通道配置时间 X 可表示为

$$X = \Delta T + X_0。 \quad (3)$$

多通道并行功率调整时间 Y 可表示为

$$Y = 2 \times \sum_{i=1}^n t_i + Y_0 = 2 \times n \times \Delta t + Y_0。 \quad (4)$$

多通道串行重路由整体时间可表示为 $X' + Y'$, 多通道并行重路由整体时间可表示为 $X + Y$ 。

3 方案性能验证

为验证本文所提技术方案,采用 OpenDaylight

(ODL)^[9]作为白盒 ROADM 的 SDN 控制器,并使用实际工程部署的 OpenConfig 模型定义的黑盒 ROADM 设备和电层设备进行物理组网。测试组网包括 20 个 OCHP 通道,其中 200 Gbit/s 速率通道 5 波(C25~C26,C59~C61),400 Gbit/s 速率通道 15 波(C14~C20,C30~C37),通道适当间隔分布。验证拓扑包括 2 种拓扑,图 6(a)所示为 2 个 ROADM 站点的点对点拓扑(路由为 2 站 3 路由,10 个 WSS 单盘,使用 Shuffle 互联);图 6(b)所示为 6 个 ROADM 站点的网状网拓扑(路由为 4 站 3 路由,22 个 WSS 单盘,使用 Shuffle 互联)。测试分别选择不同通道数(4、10、14 和 20),媒体通道采用预置方式,站点间均使用 50 km 光纤,通过断纤触发 SDN 控制器重路由操作。

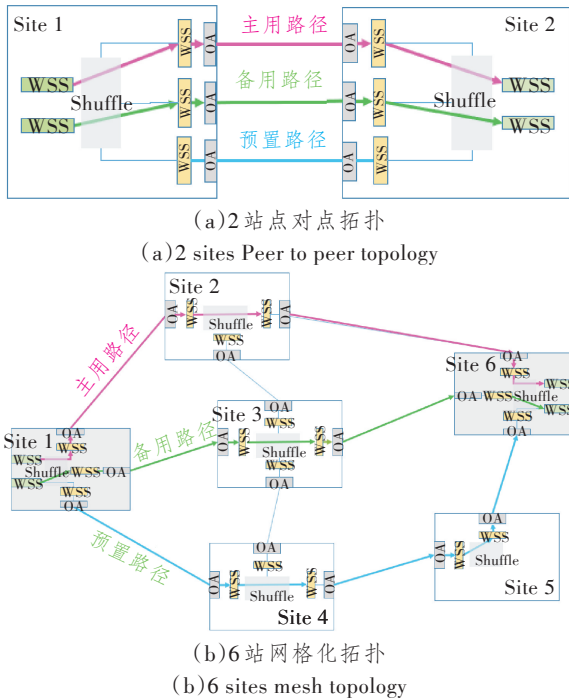


图 6 2 站及 6 站 ROADM 测试组网图

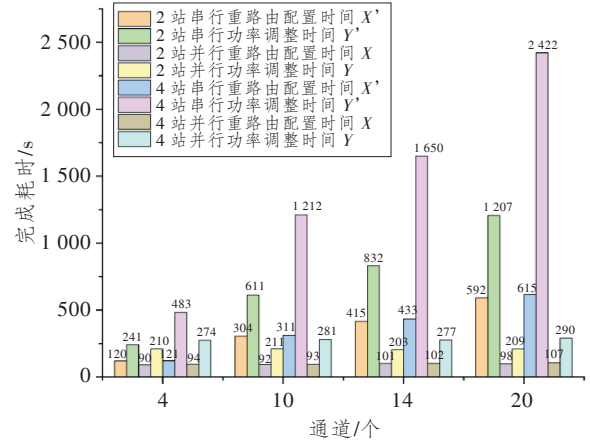
Figure 6 ROADM test topology(2 sites and 6 sites) diagram

图 7(a)所示为重路由性能结果对比图,图中 8 项指标值均为相应通道数下测试 100 次的时间性能平均值。如图 7(b)所示,串行重路由方式中的重路由配置时间和功率调整时间均存在明显的线性递增趋势

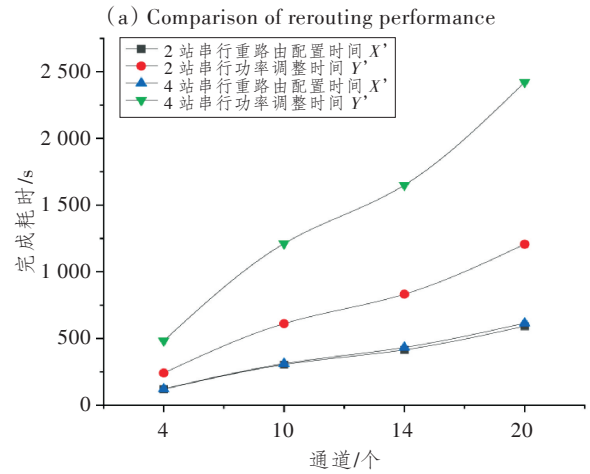
$$P = \frac{[(X + Y)@4\text{站}20\text{通道}] - [(X + Y)@4\text{站}4\text{通道}]}{[(X + Y)@4\text{站}4\text{通道}]} = \frac{397 - 368}{368} = 7.9\% < 10\%。$$

为进行重路由性能量化分析,可根据图 7 中的 8 组样本数据,通过式(1)~式(4)得出 8 组样本数据下各自的 Δt 、 ΔT 、 X_0 和 Y_0 ,如图 8 所示。以图中 2 站 4 通道为例,可得: $X' = N \times \Delta T = 4 \times \Delta T = 120$, $Y' = N \times 2 \times n \times \Delta t = 4 \times 2 \times 2 \times \Delta t = 241$, $X = \Delta T +$

势(与站点数和通道数均相关)。并行重路由方式中重路由配置时间基本不随站点数和通道数变化,功率调整时间虽然不随通道数变化,但随站点数的增加小幅增加。由测试结果可知,2 站 4 通道的并行重路由配置时间为 90 s。



(a) 重路由时间性能对比



(b) 串行重路由时间趋势

(b) Serial reroute time trend

图 7 重路由时间性能和趋势对比

Figure 7 Comparison of rerouting time performance and trend

整体而言,在并行重路由模式下的性能更为优异,且不随通道数的增加而变化,虽然随路由站点数的增加会平缓增长,但增加速率远低于串行重路由情况。并行重路由模式下从 4 站 4 通道到 4 站 20 通道计算整体重路由时间递增率 P 可表示为

$X_0 = 90$ 和 $Y = 2 \times n \times \Delta t + Y_0 = 2 \times 2 \times \Delta t + Y_0 = 210$ 。可推导出: $\Delta T = 30$, $\Delta t = 15.06$, $X_0 = 60$ 和 $Y_0 = 149.76$ 。提升重路由整体性能可从设备层面提升单通道配置和功率调整效率(降低 Δt 和 ΔT),或从 SDN 控制器层面提升并发控制效率(降低 X_0 和

Y_0)。

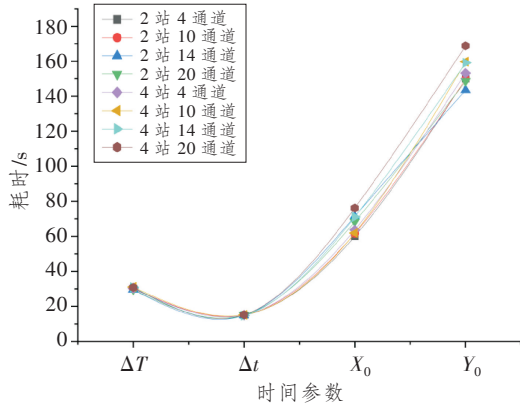


图8 重路由时间性能参数

Figure 8 The parameters of reroute performance

2 站点 20 通道在并行重路由过程中的 OCHP R1/R2 端口功率同步情况如图 9 所示。图中,通过随机抽样,选取单次重路由全部通道的 OCHP R1/R2 端口功率进行分析。因光纤中断,所有通道均在 14:06:39 降为 -45 dBm,经过 1 min 24 s 后重路由配置全部完成,各通道整体同步恢复至接近正常功率状态,此时业务已基本恢复。14:08:03 后,经过 8 min 9 s 自动通道功率优化全部完成,所有通道均恢复至断纤前的功率水平。

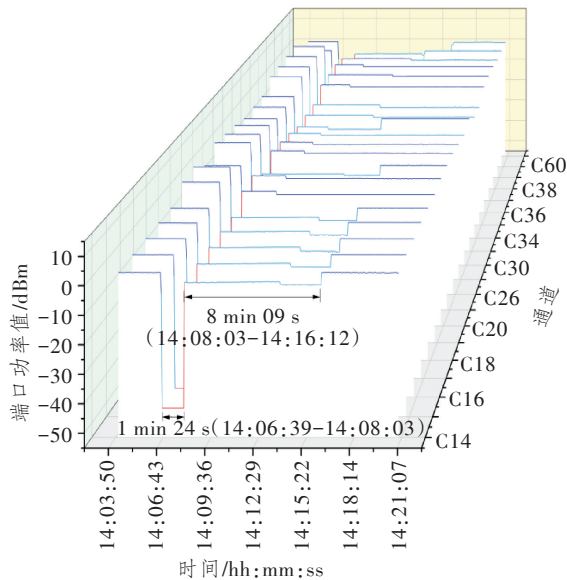


图9 20 通道业务功率同步

Figure 9 Service power synchronization of 20 channels

实验表明,在 4~20 个通道重路由的情况下,SDN 控制器最快可在 1 min 30 s 内完成业务恢复。并且随着通道数的增多,整体重路由时间增幅可控制在 10% 以内,这一成果较大地提升了现有 SDN 控制器控制下白盒 ROADM 网络的生存性与可靠性,且重路由性能接近于传统支持 ASON 特性的

ROADM 网络。

4 结束语

本文通过 SDN 控制器实现了白盒 ROADM 网络的动态控制,首先通过 Telemetry 机制对网络运行健康度进行实时监控,定义了故障检测模式;其次提出了重路由调度策略;最后给出了批量重路由下发的方法。在点到点和网状网拓扑中,对重路由的时效性进行了验证,均达到了分钟级的响应能力。尤其是对多通道批量重路由的优化处理,节省了系统重新到达可用状态的时间。试验表明,优化 SDN 控制器后,其对白盒 ROADM 网络的动态路由控制效果可达到封闭系统 ASON 的调度水平,远高于现有 SDN 控制器调度水平,提升了白盒光传输网络的生存性和可靠性。

在后续工作中,作者将会持续探索,进一步提升动态路由控制在更大规模拓扑,以及更多通道下的实时性能和网络稳定性的相关技术。

参考文献:

- [1] YD/T 2003-2018, 可重构光分插复用(ROADM)设备技术要求[S].
YD/T 2003-2018, Technical Requirements for Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexing (ROADM) Equipment[S].
- [2] GB/T 32657.2-2016, 自动交换光网络(ASON)节点设备技术要求[S].
GB/T 32657.2-2016, Technical Requirements for Automatically Switched Optical Network (ASON) Node Equipment[S].
- [3] 白泽刚. 5G 传送网管控系统架构和功能特征[J]. 光通信技术, 2020, 44(5): 1-4.
Bai Z G. Architecture and Functional Features of 5G Transport Network Management - Control System[J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(5): 1-4.
- [4] 周斌, 张阳安, 黄永清, 等. 基于波长选择开关的 ROADM 实现研究[J]. 光通信研究, 2008, (1): 11-13.
Zhou B, Zhang Y A, Huang Y Q, et al. Research on ROADM Implementation based on Wavelength Selective Switch[J]. Research on Optical Communication, 2008, (1): 11-13.
- [5] 中国移动通信集团有限公司. 下一代全光骨干传送网白皮书[R]. 北京: 中国移动通信集团有限公司, 2023.
China Mobile Communications Group Co., Ltd.. White Paper on the Next Generation All Optical Backbone

- Transport Network [R]. Beijing, China: China Mobile Communications Group Co., Ltd., 2023.
- [6] Albano M. OpenConfig By Example [EB/OL]. (2019-06-07) [2024-12-25]. https://www.openconfig.net/docs/guides/oc_by_example/.
- [7] Xie C J, Wang L, Dou L, et al. Open and Disaggregated Optical Transport Networks for Data Center Interconnects [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(6): 292–303.
- [8] 彭明泉, 卢刚, 余磊, 等. 一种ROADM设备的配置方法、装置、电子设备及存储介质: 中国, CN112104438B[P]. 2023-05-05.
- Peng M Q, Lu G, Yu L, et al. A Configuration Method, Device, Electronic Equipment, and Storage Medium for Roadm Equipment: China CN112104438B[P]. 2023-05-05.
- [9] OpenDaylight. OpenDaylight Controller Developer Guide [EB/OL]. (2024 - 10 - 23) [2024 - 12 - 25]. <https://docs.opendaylight.org/projects/controller/en/latest/dev-guide.html>.