

算力时代光传送网规划与运维

Planning and Operation & Maintenance of Optical Transport Network in Era of Computing Power

张传熙¹,段致岩²,刘刚¹,李乐坚¹,段宏¹,沈世奎³,胡雅坤³(1. 中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司,河南 郑州 450007;2. 中国联合网络通信集团有限公司,北京 100033;3. 中国联通研究院,北京 100037)

Zhang Chuanxi¹,Duan Zhiyan²,Liu Gang¹,Li Lejian¹,Duan Hong¹,Shen Shikui³,Hu Yakun³(1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd. Zhengzhou Branch, Zhengzhou 450007, China; 2. China United Network Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China; 3. China Unicom Research Institute, Beijing 100037, China)

摘要:

总结了算力发展对光传送网的要求,光传送网应具备稳定大带宽、安全高可靠、确定低时延、智能化服务等特点。分析了面向算力网络的新型光传送网,及其在规划、维护和运营等方面应具备的能力和相关的技术要求。在规划方面,要关注400G高速系统、网络的可靠性、超低时延的网络架构等;在维护方面,需考虑多波段系统备品备件、功率动态控制,以及光电协同保护的配置;在运营方面,则应关注智能化的统计、分析、感知、预测等手段。

关键词:

C+L系统;子网连接保护;波长交换光网络;光信噪比

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2024.12.001

文章编号:1007-3043(2024)12-0001-07

中图分类号:TN913

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

The requirements for optical transport networks in the era of computing power are summarized, which should have the characteristics of stable large bandwidth, high security and reliability, low and deterministic latency, and intelligent services. It analyzes the capabilities and related technical requirements of new-type optical transport networks oriented towards computing power networks in terms of planning, maintenance, and operation. In planning, attention should be paid to 400G high-speed systems, network reliability, and ultra-low latency network architectures. In maintenance, it is necessary to consider the spare parts for multi-band systems, dynamic power control, and the configuration of optical-electrical cooperative protection. In operation, focus should be on intelligent statistics, analysis, perception, and prediction methods.

Keywords:

C+L system; SNCP; WSON; OSNR

引用格式:张传熙,段致岩,刘刚,等. 算力时代光传送网规划与运维[J]. 邮电设计技术,2024(12):1-7.

0 前言

随着人工智能(AI)、云计算、大数据等新型信息技术的蓬勃发展,数字经济与实体经济加速融合,传统产业数字化智能化转型提速,基于AI大模型等技术的各类企业及家庭用户数字化应用不断涌现,催生的海量数据处理过程需要强大的算力资源和高品质的

网络连接来共同支撑。2024年8月,工业和信息化部等十一部门联合发布《关于推动新型信息基础设施协调发展有关事项的通知》,通知提出要统筹规划骨干网络设施,鼓励网络与算力设施协同发展。

1 算力时代的光传送网

1.1 算力网络的特征

算力网络是一种融合计算、存储、网络等资源的新型网络架构,旨在通过智能化调度和管理多样化算

收稿日期:2024-11-15

力资源,提供高效、灵活、按需的计算服务。国际货币基金组织认为,人工智能将促进全球经济增长,企业和个人用户对人工智能和算力服务的需求,将会像用水用电一样成为必需,对算力服务的及时性、便捷性和可靠性,也会有更高要求;另一方面,大模型训练对计算资源的需求急剧增加,然而数据中心受到地域空间、供电能力、供需不均衡等因素的制约,多个数据中心实现分布式算力集群需高质量的通信网络提供连接,协同调度发挥最大的效能。这种需求推动了光传送网的技术创新,使其向着更高的质量发展^[1]。

1.2 算力发展对光传送网的要求

光网络作为算力资源互联与调度的关键桥梁,其重要性日益凸显。面对算力互联需求持续升级,光网络正面临着前所未有的挑战与机遇。

算力时代的光传送网呈现出如下四大特征。

- a) 稳定大带宽。根据各行业数字化、智能化应用需求,提供稳定充足的大带宽以支撑数据流量的激增。
- b) 安全高可靠。提供高可靠高安全的网络连接,确保智算业务随时在线流转,保障各行业应用顺畅和数据信息的安全。
- c) 确定低时延。降低传输链路的时延和时延抖

动,支撑分布式智算集群的创新验证,提高行业应用的业务体验。

d) 智能化服务。提供自动化、智能化的光网络资源调度和运维管理服务,支持算力业务敏捷开通和高效可视运维,满足各行业数智化发展的业务需求^[2]。

2 光传送网的规划

2.1 高速大带宽的网络规划

随着算力互连需求进一步攀升^[3-4],光传送网向更高的传输速度和更大的传送容量发展,为运营商城域网及数据中心间光互联提供单位带宽能效及成本更优的解决方案。高速光传输大约每10年一个技术大代际,当前已进入400G时代^[5-7],基于QPSK调制码型的C+L系统已在骨干网络商用部署,传输系统从传统C波段扩展到C+L波段,谱宽达到12 THz。

400G系统存在16QAM、PCS-16QAM和QPSK等多种技术方案,其中16QAM现网传输距离约为200 km,适用于城域数据中心互连场景;PCS-16QAM现网传输距离约为400 km,适用于省内干线传输,这2种码型的频谱间隔为100 GHz;QPSK现网传输能力可达800 km以上,适用于省际长途干线传输,频谱间隔为150 GHz(见图1)。

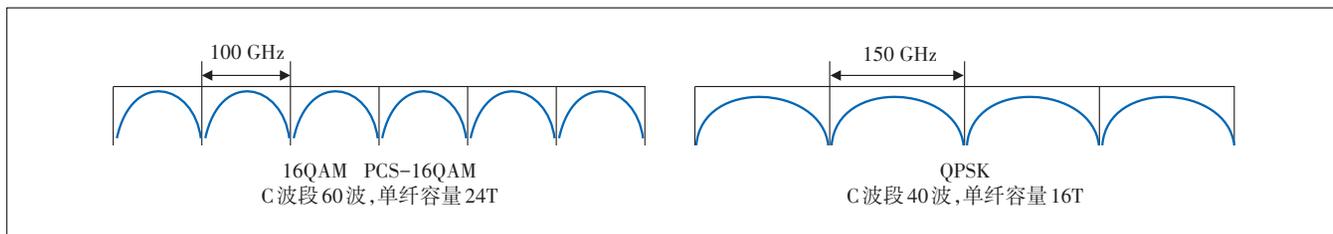


图1 400G系统不同码型的单纤容量与频谱宽度

在对400G高速系统进行网络规划时^[8],应注意以下几点。

- a) 不同码型的OTU不能互通,16QAM和PCS-16QAM这2种码型虽然频率间隔相同,波道规划无差异,但OTU只能落地转接。
- b) 不建议多种码型共用同一套光层系统混传。特殊场景确需混传的,应做好波长规划,将同种码型的波道安排在一起。

光纤具有很宽的受激喇曼散射(SRS)增益谱,在泵浦光频率下移70~100 nm附近有一较宽的增益峰。算力时代的大带宽需求促使光传输引入了L波段,C波段的信号光正好成为L波段的泵浦光,这带来了明

显的SRS功率转移效应(见图2)。

从图2可以看出,对于C6T+L6T系统,经过80 km传输后,G.652D光纤的功率转移为6~7 dB,G.654E光纤的功率转移为3~4 dB。这种功率转移特性将造成系统整体性能的劣化,所以在系统规划设计阶段,需在发送端设置功率预倾斜(见图3)。

C+L传输系统需要根据SRS效应单独制定C波段EDFA规格,与传统C波段EDFA规格差异较大。在设计EDFA时,可以通过输出端预先叠加一个SRS GFF来对信号提前进行SRS效应预均衡,后段经过光纤后保证收端光谱处于较平坦的状态,该方式可极大改善因SRS引起的功率不平坦度,提升传输系统性能。

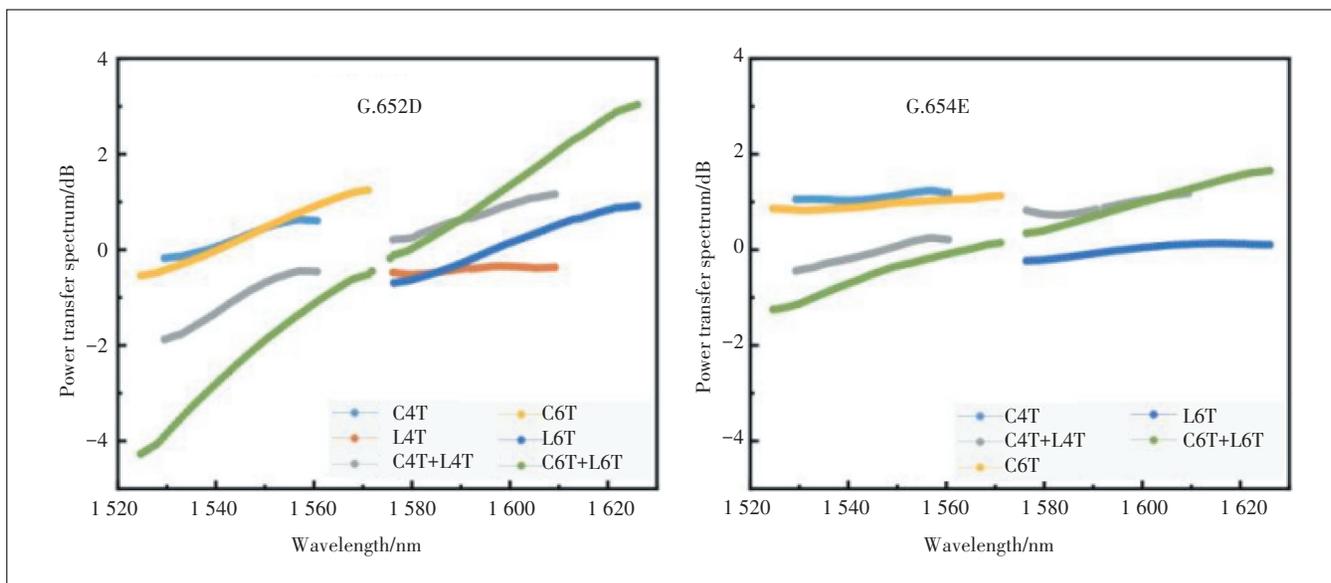


图2 80 km 光纤长度下的功率转移特性

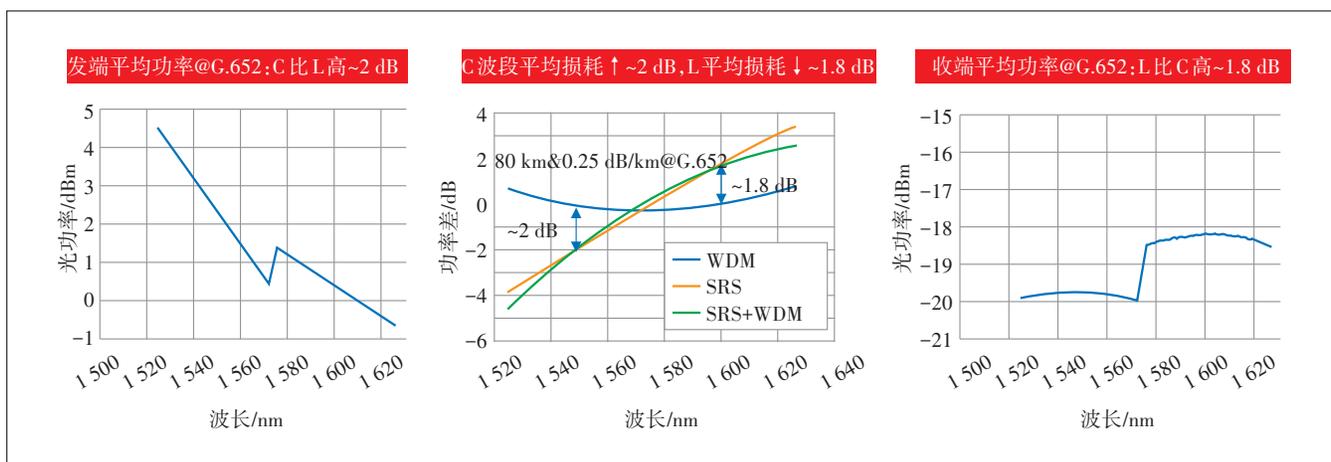


图3 C+L系统中的光功率谱传输特性

由于C+L系统中的功率转移程度与光纤中的功率分布关系密切,为保证系统扩容过程中的功率稳定,需在建设初期将系统中未使用的波道用噪声占用,让系统始终保持满波状态,实现对功率的动态监控和调整。

当前L波段EDFA的性能较C波段还有一定差距,图4给出了实验室测试数据,在相同增益条件下,L波段的噪声系数比C波段大1.5~2 dB。

因此,当前C波段和L波段的传输性能有一定差异,在做网络规划时,需要单独进行OSNR仿真测算,同时考虑到光纤中的SRS功率转移效应,并不能简单地将C波段的OSNR降低1.5~2 dB作为L波段性能达标与否的依据。

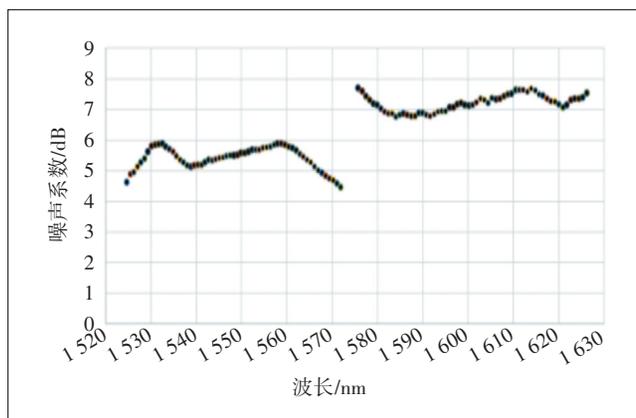


图4 C波段和L波段EDFA参数比较

2.2 高可靠性的网络规划

光传输网的可靠性是指网络的可用性和抗毁性,即故障情况下网络的生存能力。网络的可靠性分析主要采用如下几个指标。

a) 平均故障间隔时间(Mean Time Between Failure, MTBF),即在规定的条件下和规定的时间内,系统累计运行时间和故障次数之比,MTBF 越长表示可靠性越高,MTBF 可用该设备总的计划运行时间/故障次数来表示。

b) 平均修复时间(Mean Time To Repair, MTTR),即在规定的条件下和规定的时间内,产品修复性维修总时间与被维修产品的故障总数之比。MTTR 越短表示易恢复性越好。

c) 可用度(Availability),指可维修产品在规定的条件下和时间内,维持其规定功能的能力,它综合反映可靠性和维修性。计算方法:产品能工作时间除以产品能工作时间和产品不能工作时间之和,即 $A = MTBF / (MTBF + MTTR)$ 。光网络中所有业务的可用度直接反映了网络可靠性的高低。

对于无保护的业务,可用度的计算方法如下:

可用度=设备可用度ⁿ×光缆可用度×光缆长度

对于有保护的业务,可用度的计算方法为:

可用度=[1-(1-工作链路可用度)×(1-保护链路可用度)]×保护倒换可用度

其中,链路可用度与平均光缆年故障次数、故障修复时间密切相关;保护倒换可用度与保护倒换时间有关。

假设每站点设备可用度为 99.99%,光缆年平均故障次数为 1.057 次,故障修复时间为 4 h。以典型局向业务 A 市—B 市为例,粗略测算不同保护类型下的可用度(路由长度为 2 700 km,6 个复用段,42 个局站),结果如表 1 所示^[9-10]。

光层 WSON 可抗多次故障,但光层重路由时间较长,尤其是过中继、变波长等场景,故障中断时间在几十秒到分钟级不等;OMSP 故障中断时间在 50 ms 以下,但每个 OMS 只能抗 1 次故障,可用度提升有限;

表 1 不同保护方式下的业务可用度对比

保护类型	可用度/%	备注
无保护	98.20	-
WSON	>99.95	抗多次故障,每次故障中断时间 1 min
OMSP	99.90	每个 OMS 段抗 1 次故障,每次故障中断时间 <50 ms
SNCP+WSON	>99.99	抗多次故障,每次故障中断时间 <50 ms

SNCP+WSON 光电协同保护机制可依靠光层的 Mesh 化实现端到端抗多次断纤的能力,其工作原理如图 5 所示^[11]。

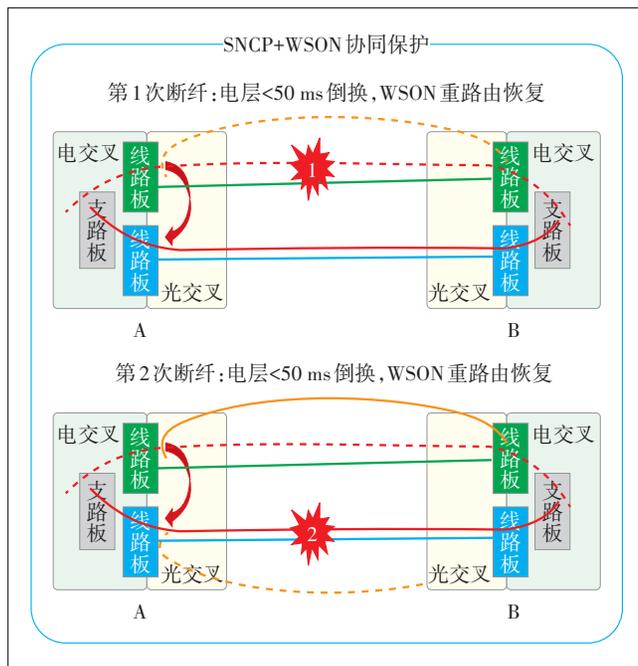


图 5 SNCP+WSON 协同保护工作原理

电层实现 50 ms 的业务快速保护倒换能力,光层变波长、重路由性能不影响业务恢复性能;光层恢复实现冗余保护板卡的重利用^[12]。即采用传统 1+1 保护的方案,提供永久 1+1 即永久 50 ms 的保护能力,实现最优成本的高可靠保障^[13]。采用 ROADM 方式组网,引入 SNCP+WSON 光电协同保护等多重保护机制,可大幅提升网络可靠性和可用性,实现高品质光互连。

面向广域智算互联的超高速长距光传输系统对线路质量要求极高,智算场景的单次丢包会导致后续所有数据重传,因此需提供稳定可靠的网络快速保护机制,支持无损传输和抗多次断纤的保护恢复能力。

光网络应具有高可靠性,能够在发生故障时迅速恢复,保证业务的正常运行。在进行网络规划设计时,应采用相应工具和手段,测算业务端到端可用度,根据业务 QoS 需求,配置合适的保护策略。

2.3 超低时延的网络规划

低时延是算力网络最根本的需求。在算力时代,低时延网络能够显著提升业务体验,支撑分布式智算集群的创新验证。因此,光传送网需要实现更低的时延,以满足各类算力应用场景的需求。

随着算力网络的到来,光传送网需要从当前基于

行政规划的分层建网架构演进为以算力(DC)为中心的建网模式。骨干网架构要跟随智算中心布局,推进超长距400G ROADM与智算网关覆盖建设,实现智算中心直连骨干网络,重点业务连接方向一跳可达。接入网规划应考虑多种全光入算连接方案,满足不同客户的差异化入算诉求。波分下沉,实现全光一跳入算。面向家庭及企业园区等用户,可采用PON+OTN接入方案,为不同业务提供差异化的服务管道;面向中小企业用户,可采用OTN P2MP方案,在实现硬管道隔离服务的同时提供业务快速开通并降低用户入算成本;面向大企业用户,提供OTN P2P方案,实现大带宽、高品质用户入算。城域汇聚引入低成本ROADM实现全光业务一跳直达,采用矩阵式WSS扩展WSS的线路端口,实现多个接入环上联一个汇聚节点并共享一组WSS,减少环间转接,降低时延、功耗和成本(见图6)。

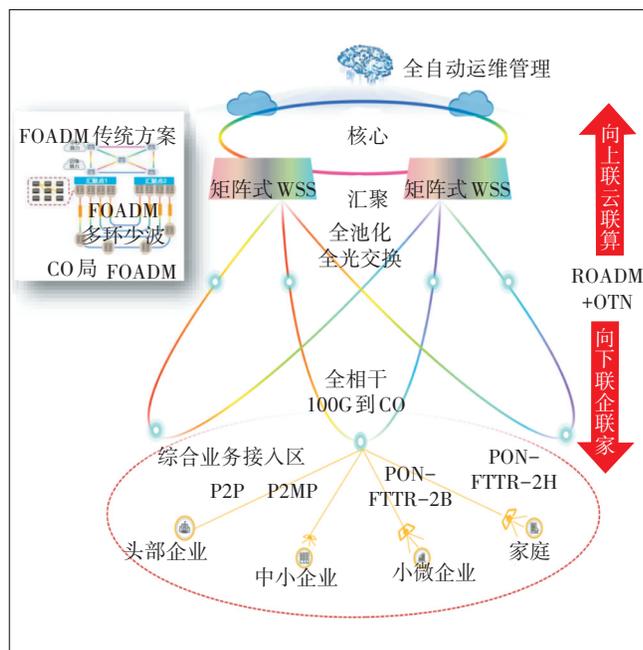


图6 ROADM+OTN 端到端城域网

OSU/fgOTN 为小颗粒专线业务提供了良好的解决方案,将 OTN 技术下沉到网络边缘和客户边缘,为业务提供硬管道,具有硬隔离、高安全的特性。传统 MPLS-TP 组网采用统计复用、动态时延的方案,无法满足算力网络确定低时延的要求,OSU/fgOTN 具备映射层级少、刚性管道无阻塞等优点,可以提供确定低时延,为高品质行业客户提供确定性体验,同时可以支持单通道速率持续演进和无损快速带宽调整,满足

业务带宽增长和不同业务灵活带宽的需求^[14]。

OSU/fgOTN 的建设应按需规划,接入层可直接新增 OSU/fgOTN 设备,核心汇聚层应根据业务增量、网络规模、应用场景等因素统筹考虑,采用新增 OSU/fgOTN 支线路板卡,或新增 OSU/fgOTN 桥接板卡的方式。

光信噪比(OSNR)是衡量系统传输性能的重要指标,根据 ITU-T G.692 给出的 OSNR 计算公式,可以看出光纤链路衰减和非线性效应成为限制系统性能的重要因素。

$$OSNR_{out} = 58 + P_{ch} - S - NF - 10 \times \ln N$$

其中, P_{ch} 表示入纤光功率, S 表示光缆损耗, NF 为放大器的噪声系数, N 表示跨段数。影响 OSNR 的 2 个主要参数为 P_{ch} 和 S , 其中 P_{ch} 正比于光纤有效面积, S 正比于光纤衰减系数。

相比 G.652D 光纤, G.654E 光纤以其低非线性效应(大有效面积)和低衰减系数特性,成为省际干线光缆的优选解决方案。同等站距设置情况下, G.654E 光纤有更大的有效面积, OSNR 性能优化 1.5 dB, 考虑衰减因素, G.654E 光纤提升效果更明显。综合测算, G.654E 光纤在标准模型下, 传输距离能提升 50% 左右, 有效减少电中继配置, 降低网络中的设备时延。

受限于材料本身及自身结构, 传统的 SiO₂ 光纤存在着先天不足的情况, 主要存在光纤损耗已接近理论值无法继续优化、入纤光功率受限、非线性效应无法克服等问题。空芯光纤在近年来取得了显著的成就, 主要体现在其技术特性、市场趋势等多个方面。空芯光纤以空气为传输介质, 替代了传统以“玻芯”作为传输媒介的光纤。这种设计使得空芯光纤具有超低时延、超低非线性、潜在的超低损耗及更宽的通带带宽等特性。由于光是在近乎空气孔的芯区传输, 折射率比实芯玻璃低, 传输速率更快, 端到端的光纤传输时延相比于现有光纤小 33%。据相关研究, 若算网中全部采用空芯光纤, 网络时延降低的效果相当于算力提升 10% 以上。同时, 空芯光纤还具有超低非线性、大模场直径、低色散、超宽工作频段等诸多优势, 特别适合于高速、大带宽、低时延的光传输, 是新型光纤最重要的发展方向。

3 光传送网的维护与运营

3.1 多波段系统的维护

3.1.1 备品备件

光网络已进入 400G 时代, 工作频段也由 C 波段扩

展至 C+L 波段,系统的基本构成如图 7 所示。

目前 C+L 一体化的 WSS 器件的研发已完成,C+L 一体化的相干光模块和光放大器仍在研究中。由于 C 波段和 L 波段是 2 套设备,系统内有多次合波与分波,连纤复杂度翻倍,维护时需做好标记,备品备件也应按照 2 套分别配置。

3.1.2 功率动态控制

C6T+L6T 超宽频谱的启用,使得受激拉曼散射(SRS)成为了新的链路损伤,给系统传输性能和网络的运维能力带来全新挑战。在规划阶段根据光缆参数测算的 SRS 等性能指标会在长期的网络运营中发生变化。在光路割接、光纤衰减发生变化时,中间各站点光参数和各通路平坦度性能将发生改变,系统应能动态调整各通路的光功率,实现每个通路的光功率和 OSNR 的优化,使系统整体性能最佳。

3.1.3 日常操作

C+L 相当于 2 套系统耦合进一根光纤,入纤光功率翻倍,最高可达 26 dBm 以上,已接近拉曼功率,部分大衰减跨段可能会用到高功率放大器,大于 26 dBm 的,会增加烧纤风险,需做好接头清洁。强光存在烧伤人员风险,操作时需注意安全。

3.2 光电协同保护配置

SNCP+WSON 协同保护机制为光网络提供了强大的故障恢复能力,同时优化了网络资源的利用,是算力时代光网络的重要保护方式。SNCP 是基于传送平面 ODUk 层的子网连接保护,能够快速检测网络中的故障,并通过单节点控制快速做出响应。WSON 是基于控制平面的重路由恢复,它的波长路由能力可以重新配置光路,以绕过故障节点或链路,实现网络资源的高效利用。

如图 5 所示,SNCP+WSON 的配置分为 2 个部分。

a) 在业务源宿节点选取 2 对线路板,创建 2 条 OCh 光路,其中一条的路由策略(如最小时延、最少跳数)应满足业务需求,作为工作路由。这 2 条 OCh 路由应满足节点分离、链路分离、SRLG 分离的约束条件,同时应具备重路由功能,重路由次数可根据业务 SLA 进行配置。

b) 业务源宿节点选取 1 对支路板,分别与上述创建了 OCh 的线路板建立 ODUk 交叉,配置 SNCP 保护,工作路径应与 OCh 的工作路由一致,对应到线路侧 WSS 端口。

当工作路径发生故障,首先在电层进行 SNCP 倒换,实现小于 50 ms 的快速保护;原工作路径通过 WSON 重新配置光路,提供更多恢复资源,为下一次故障进行 SNCP 倒换提供保障。在成本不增加的情况下,提供抗多次小于 50 ms 的断纤恢复能力,满足算网业务的可靠性要求。

3.3 维护与运营的智能化

3.3.1 智能化维护

光传送网维护的目标是保证网络运行状态稳定,及时发现和处理故障,当网络需要进行操作时,也务必使操作的影响最小化。光传送网维护日常监控的数据多种多样,例如光功率、衰减、FEC 等性能数据及告警等。维护工作中也有类似 OTDR 等技术手段,辅助定位故障位置。面向算力网络的光传送网应具备多维信息感知能力,结合当前类似 AI、大数据分析等技术手段,可以满足较多场景的智能化需求。

对网络性能数据进行长期不间断获取、观察、分析,从而对已发生或即将发生的故障做出判断,分析故障原因并定位,制定处理方案,最终帮助运维人员

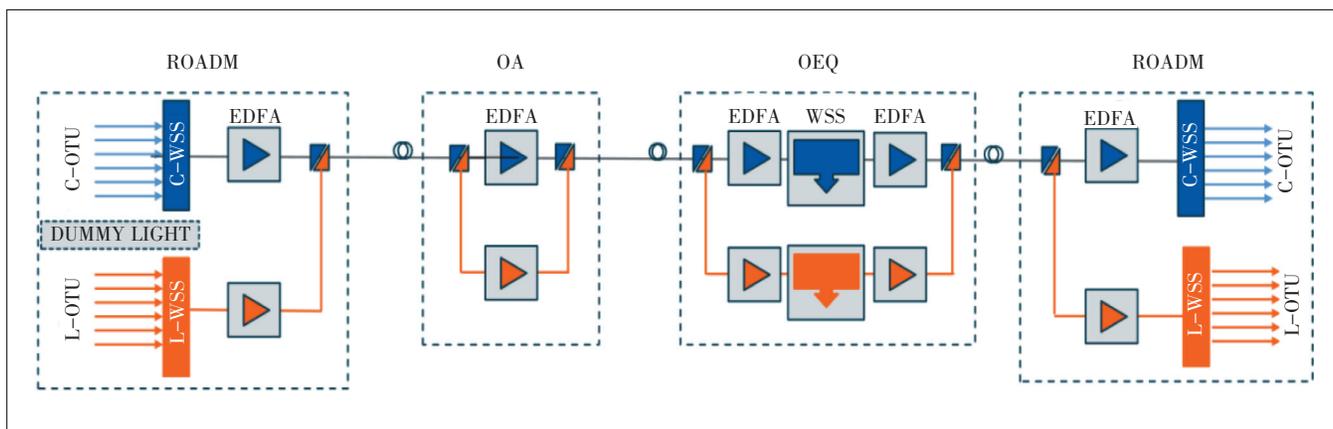


图 7 C+L 系统基本构成

及早排除故障^[15]。例如,统计某段光缆历史时期内的故障位置、时间、原因、修复时长等信息,对光缆同沟同缆风险进行检测及上报,利用AI大模型等手段对该段光缆未来可能发生的故障做出预警;同时,可分析该光缆的可用度信息,为网络的可靠性测算提供有效数据。

3.3.2 智能化运营

网络运营主要包括业务的开通,以及在业务运行期间监测运行状态、维护业务质量,保证网络高效低成本运行。面向算力网络的光传送网的运营,一方面需要增强网与算的联动,通过网络资源和算力资源的综合评估,实现算网资源协同编排的综合最优;另一方面需要增强光网络的业务感知和保护协同能力,满足算网低时延运行要求,实现算网业务的高可靠和算力集群的高安全。

面对算网对时延的高要求,针对算力节点,根据实际计算时延值,划分多级时延圈,运用可视化手段,搭建时延地图、时延矩阵,实现入算评估、绕路分析等功能。基于实时采集和分析的网络资源状态信息,通过带宽+时延+可用率等多因子选路算法,评估满足算力接入业务SLA诉求的网络路由,支撑算网编排系统实现运力通道的敏捷调度。

算力对光网络的需求存在距离、带宽、时延等不确定性的问题,常呈现出大带宽、短时长和周期性的特征。因此需要合理调配网络资源,通过业务带宽自适应的灵活动态传输,实现不同时间、不同距离下的最佳容量配置,提供业务按时预约、运力管道按流量计费和分时复用的能力,实现网络资源利用的最大化,同时降低企业的数据搬运成本。

4 结束语

在算力时代的大背景下,光传送网作为支撑数据中心互联和大规模数据传输的关键基础设施,其发展日新月异,发挥着举足轻重的作用。大带宽、高可靠、低时延、高效运维等需求,使光传送网站在了新的历史起点上,发展前景广阔,光传送网将为构建高速、智能、绿色、安全的算力传输体系提供有力支撑。光传送网将为我国数字经济的发展注入强大动力,助力我国在全球算力竞争中占据有利地位。

参考文献:

[1] 中国信通院. 算力时代全光运力应用研究报告[R/OL]. [2024-

09-28]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202409/P020240927691929390649.pdf>.

[2] 中国信通院. 算力时代全光网架构研究报告[R/OL]. [2024-09-11]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202409/P020240927655738412203.pdf>.

[3] 中国信通院. 算力网络运载力指数评估报告(2024年)[R/OL]. [2024-09-30]. https://www.sohu.com/a/812800363_121876967.

[4] 余少华,胡先志. 超高速超大容量超长距离光纤传输系统前沿研究[M]. 北京:科学出版社,2015.

[5] 中华人民共和国工业和信息化部. 城域N×400Gbit/s光波分复用(WDM)系统技术要求:YD/T 3964-2021[S]. 北京:人民邮电出版社,2021.

[6] 中兴通讯股份有限公司. 单波400G长距光传输技术白皮书[R/OL]. [2024-03-04]. <https://www.doc88.com/p-47547626961244.html>.

[7] 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.

[8] 王义涛,赵海广,郭晓非. 本地传输网基础架构研究[J]. 邮电设计技术,2015(3):63-67.

[9] 王鹏,李峥,张传熙. ROADM网络规划设计方法研究[J]. 邮电设计技术,2018(4):6-11.

[10] 费星瑞,段致岩. ROADM网络最优路径计算算法研究[J]. 邮电设计技术,2024(6):58-62.

[11] 中华人民共和国工业和信息化部. 波长交换光网络(WSON)技术要求:YD/T 3598-2019[S]. 北京:人民邮电出版社,2019.

[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 自动交换光网络(ASON)节点设备技术要求 第2部分:基于OTN的ASON节点设备技术要求:GB/T 32657.2-2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.

[13] 中华人民共和国工业和信息化部. 光传送网(OTN)保护技术要求:YD/T 2713-2014[S]. 北京:人民邮电出版社,2014.

[14] 王成运,龚宇光. 基于OSU技术的全光网络弹性NG-OTN研究[J]. 移动信息,2024,46(5):7-10.

[15] 中华人民共和国工业和信息化部. 信息通信网智能化运营管理需求与用例 光传送网络维护:YD/T 4838-2024[S]. 北京:人民邮电出版社,2024.

作者简介:

张传熙,毕业于南京理工大学,高级工程师,硕士,主要从事光传送网咨询规划与研发测试工作;段致岩,高级工程师,学士,主要研究方向为传输网及同步网的数字化转型、管控技术等;刘刚,毕业于华中科技大学,高级工程师,硕士,主要从事开放光网络技术体制研究工作;李乐坚,毕业于北京邮电大学,高级工程师,硕士,长期从事光通信网络的规划、设计和新技术应用研究工作;段宏,毕业于华中科技大学,高级工程师,硕士,主要从事光网络领域WDM、OTN的研究、开发、咨询、设计等工作;沈世奎,毕业于北京理工大学,高级工程师,博士,主要研究方向为高速光通信系统和器件;胡雅坤,毕业于北京邮电大学,工程师,硕士,主要从事高速光通信系统和器件研究工作。