

400G 传输网络 现网测试性能优化研究

Research on Performance Optimization of 400G Transmission Network in Live Network

廖江,李炎强,薛强(中国联通广东分公司,广东 广州 510627)

Liao Jiang, Li Yanqiang, Xue Qiang (China Unicom Guangdong Branch, Guangzhou 510627, China)

摘要:

随着数字化转型的加速推进,算力互联网迅猛发展,其核心算力节点间海量数据的交互对传输网络提出了更高的诉求,尤其是单纤传送能力。400G 技术是满足这一诉求的关键。阐述了 400G 技术能力特点,剖析其技术优势,客观呈现了 400G 的测试结果,论证 400G 能力的优势及不足,并结合当前网络现状进行调优,提出对未来部署的思考,旨在全面推动 400G 技术在算力互联网传输中的广泛应用,助力网络传输性能的跨越式提升。

Abstract:

As digital transformation accelerates and intelligent computing networks develop rapidly, the massive data exchange between core computing nodes places higher demands on transmission networks, particularly on single-fiber transmission capabilities. 400G technology is key to meeting these demands. It elaborates the characteristics of 400G technology, analyzes its technical advantages, and objectively presents the test results of 400G. The strengths and limitations of 400G are discussed, optimizations are conducted based on current network conditions, and considerations for future deployment are proposed, aiming to comprehensively promote the widespread application of 400G technology in intelligent computing network transmission, thereby significantly enhancing network performance.

Keywords:

400G transmission network; Live network test; Network optimization; Network evolution

引用格式:廖江,李炎强,薛强. 400G 传输网络现网测试性能优化研究[J]. 邮电设计技术, 2025(11): 77-81.

关键词:

400G 传输网络; 现网测试; 网络调优; 网络演进

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2025.11.015

文章编号: 1007-3043(2025)11-0077-05

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



1 需求和背景

在 5G、云计算、AI 和物联网等新兴技术爆发式发展的驱动下,全球数据流量正以超过 30% 的年均增速持续攀升。这一趋势对传送网络提出了更高要求,传统 100G/200G 波分网络已难以满足数字经济时代对带宽和传输效率的极致需求。在此背景下,400G 波分技术凭借其卓越的传输能力、灵活的组网方式以及超高的可靠性,正加速成为新一代光网络建设的核心解决方案^[1]。

1.1 超强运力

400G 波分技术的超强运力核心在于高阶调制技术与波特率的突破、C+L 频谱扩宽以及核心器件技术革新,推动单纤容量突破 48 Tbit/s+, 实现大容量长距离传输。

从 100G 到 400G 的演进,本质上是以高阶调制和波特率突破为核心的技术升级路径。早期的 100G 系统主要基于双偏振正交相移键控(DP-QPSK)和约 32G baud 的波特率,频谱效率仅为 4 bit/s/Hz,适用于长距传输,但容量有限。400G 系统通过更高阶调制(如 64QAM)和更高波特率实现了突破,400G PCS-16QAM 采用 90G baud+波特率,可满足城域的传输,面向超长

收稿日期: 2025-10-10

距传输场景,波特率需提升至 130G baud^[2]。

另外,400G 长距传输若需满足 80 波的传输容量,占用的通道间隔更大(80×150 GHz),C 波段谱宽不够,需要在 Super C 波段的基础上,继续扩展可用频谱带宽,将 L 波段的光频谱资源利用起来,构成 Super C+L 光系统,谱宽将从传统 C6T 频谱扩展至 C6T + L6T 频谱^[2]。

400G C+L 传输系统的核心器件包含相干光模块、一体化 WSS、L 波段光放。400G 相干光模块采用光电合封技术,将 oDSP、调制器、驱动、接收机等共基板合封,可消除关键阻抗不连续点,大幅降低反射,提升带宽(>130G baud),降低的功耗超过 30%,支撑未来向更高速率 1.6T 演进。一体化 WSS 是 OXC MESH 网络的核心部件,相比 C/L 分离式 WSS,一体化 WSS 架构简洁,器件集成度更高,可以实现 C+L 全波段可调。光放是 400G 传输系统的“加油站”,L 波段 EDFA 通过调整铒纤掺杂比例以及气相沉积法工艺,实现 L 波段 EDFA 性能(增益、噪声系数)和 C 波段相当,确保长距传输稳定性。

400G 超强运力正是依赖“调制+频宽+器件”三位一体创新,推动光网络向 Tbit/s 级容量迈进。

1.2 灵活敏捷

400G 系统基于 OTN 电层交叉技术,实现波分业务速率的动态智能调整,支持从 GE 到 400GE 的多粒度业务灵活适配,线路侧从 100G 到 200G/400G 速率可调。光层从 FOADM 演进到 ROADM,引入全光交叉 OXC 架构,凭借免连纤、高集成、低功耗和快速扩展等优势,成为支撑网络快速交付和业务敏捷开通的关键。通过光电协同架构,结合 SDN 智能管控系统,可实时感知业务需求变化,在分钟级完成业务带宽无损调整与通道重配,大幅提升网络资源利用率^[3]。

在 400G 时代,C6T+L6T 光系统需采用 OXC 技术实现 C+L 波段的统一调度。传统方案将 C 和 L 波段分离处理,通过滤波器将 2 个波段分开后,由 OXC 内独立的 C 波段 WSS 和 L 波段 WSS 分别调度,技术实现相对简单,但无法支持 C+L 全波段统一平面交叉调度。为突破这一限制,业界提出 C+L 一体化 OXC 架构,其核心在于将 C 和 L 波段在同一 WSS 模块内实现联合交叉调度,从而构建全波段可调、全平面交叉的 OXC 系统。该架构的技术难点在于一体化 WSS 模块的开发,需通过 2.4K 或更高分辨率的 LCoS 芯片实现高维度光交叉能力。这一技术演进将显著提升 400G 光网络的灵活

性和效率,为未来超高速、大容量光传输系统奠定基础。

1.3 超高可靠

基于 OTN 电交叉的纯电 ASON 具备高资源利用率和毫秒级业务恢复能力,但成本较高;而纯光波长交换光网络(WSON)通过 OXC/ROADM 光交叉实现秒级恢复,成本较低。随着技术进步,ASON2.0 融合光电协同架构,兼具光层低成本与电层毫秒级恢复优势,支持业务永久保护,打造钻石级网络可靠性。其智能保护机制可区分业务优先级,确保高优先级业务确定性恢复,低优先级动态保障,同时实现恢复路由可预知、可视、可管理,并通过全量断纤模拟预测网络风险,支持预防性扩容^[4]。

OXC 全光交叉架构采用 3D Mesh 技术实现无阻塞波道切换,支持毫秒级重构,解决传统 ROADM 波长冲突问题。采用光复用段保护(OMSP)+WSON 协同保护的保護模式,OMSP 提供 50 ms 硬保护,WSON 通过智能算法实现路径预计算,两者协同使抗多断纤能力提升 300%。实验室测试表明,该技术在 3 点断纤场景下仍可保持 99.999% 的可用性。

2 测试实践

随着人工智能大模型训练的深入发展,对智算资源的需求呈现出急剧增长的态势,单一数据中心已难以承载如此庞大的算力需求,需要多个数据中心实现跨集群的分布式协同训练。中国联通算力智联网(AINET)在此背景下进行建设,确保算力资源间高效互联与灵活调度,实现高可靠、大带宽的智算网络互联^[1]。

作为 AINET 网络的重要部分,400G/800G ROADM 网络依托“新八纵八横”骨干光缆网进行建设,全面覆盖算力枢纽节点,实现“高通量、高性能、高智能”三大核心能力,并通过网络架构、组网和设备技术的创新,可以很好地服务智算时代的多元化^[5]。

为进一步验证 400G 全光运力网络的商用化能力,适应未来多业务的维护运营需求,本次结合省内骨干光网络,选取 A 市、B 市、C 市开展专项测试,重点突破三大验证目标:单波 400G 超高速率的稳定传输能力、资源灵活调度能力以及超高可靠保障能力,测试成果将直接服务于粤港澳大湾区算力集群建设^[6]。测试组网示意图如图 1 所示。

2.1 超高速传输能力测试

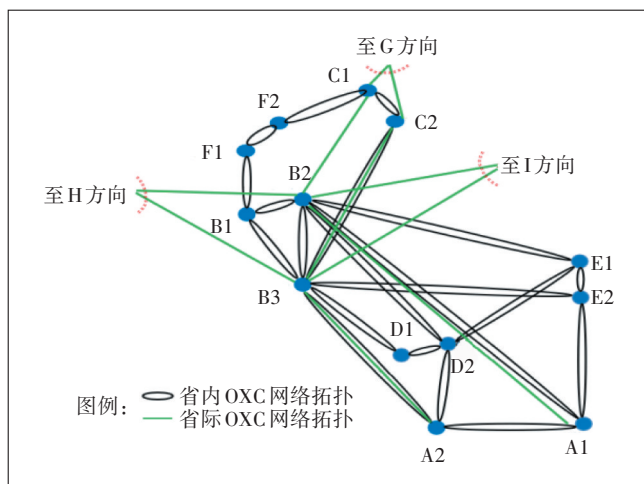


图1 测试组网示意

超高速传输能力的测试内容为:创建 C+L 波段的 400G 波长业务,C 波长 196.00 THz,L 波长 189.65 THz,业务路由为 A 市—B 市—C 市,距离为 356 km。

其测试结果为:业务正常开通,时延为 3.49 ms,网络具备 400G 超强运力。相较于 G.652.D 光纤,G.654.E 光纤全光传输距离提升 20%~30%。

2.2 资源灵活调度能力测试

资源灵活调度能力的测试内容如下。

a) 在不需要对光层配置进行任何修改情况下,电层通过软件编程实现 400G/200G/100G 速率调整。

b) 基于无栅格动态调制灵活速率技术,支持 100G/200G/400G 多码型、多速率、多谱宽混传。

c) 在 C 市—B 市和 C 市—A 市段落进行业务拆建测试,可以在分钟级完成业务配置、算路、业务下发并实现业务开通。

其测试结果为:网络具备灵活敏捷的资源分配能力,满足算力业务、大客户业务等不同类型业务按需灵活配置资源,实现资源实时同步以及网络资源利用最大化,同时降低企业的数据搬运成本。同时,网络具备快速业务发放能力,可以针对算力业务数据传输时间集中且短暂的特点,支持业务快拆快建,在分钟级实现业务部署配置,实现网络资源效率最大化^[3]。

2.3 超高可靠性保障能力测试

超高可靠性保障能力的测试内容为验证多种保护方式保障业务安全的效果,具体如下。

a) 光电协同(WSON+SNCP)(见图2)。现网应用该保护方式实现抗多次断纤,测试中最多测试9次断纤在 50 ms 内完成保护倒换。该保护方式的业务安全

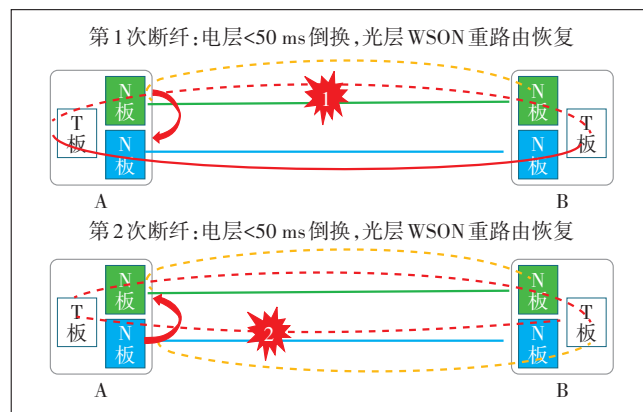


图2 光电协同保护方式示意

可靠性最高,大客户等重要业务可考虑采用该方式^[7]。

b) 电层 SNCP。抗 1 次断纤,保护倒换时间小于 50 ms。一般重要且对保护倒换时间有要求的业务可考虑采用该方式。

c) 光层 WSON。抗多次断纤,保护倒换时间为秒级到分钟级。一般重要且对保护倒换时间要求不高的业务可考虑采用此方式。

其测试结果为:所测试的多种保护方式能够保障业务安全,能为包括智算在内的多种业务提供多种保护机制,具备丰富的 SLA 能力,满足不同业务场景下的多样化需求。采用光电协同保护机制,实现了端到端的抗多次断纤能力,提供永久 50 ms 的保护能力,网络可用性可达 99.999%,为智算业务的无损传输提供了坚实的保障。

3 网络调优

全光网建设目前处于网络启动初期,相对于传统的 OTN 网络,全光网络的建设部署有其独有的特点,网络调优需要考虑以下因素。

3.1 运力倍增:C+L 协同释放 400G 全光潜能

粤港澳大湾区骨干网由于备用光缆路由长度等因素,优先部署 C 波段传输系统。经现网测试验证,省内各地(市)间光缆路由由性能完全满足 400G 系统 L 波段应用要求,现全面升级为 C+L 波段协同部署方案,充分释放 400G 全光潜能。C+L 波段示意如图 3 所示。

该 400G 网络具备显著优势。首先,频谱资源倍增。通过 C 波段(1 529~1 568 nm)与 L 波段(1 570~1 610 nm)的协同使用,可用频谱资源从单波段 6 THz (120 波@50 GHz)扩展至双波段 12 THz (240 波@50 GHz),在相同传输速率和波道间隔条件下实现系统容

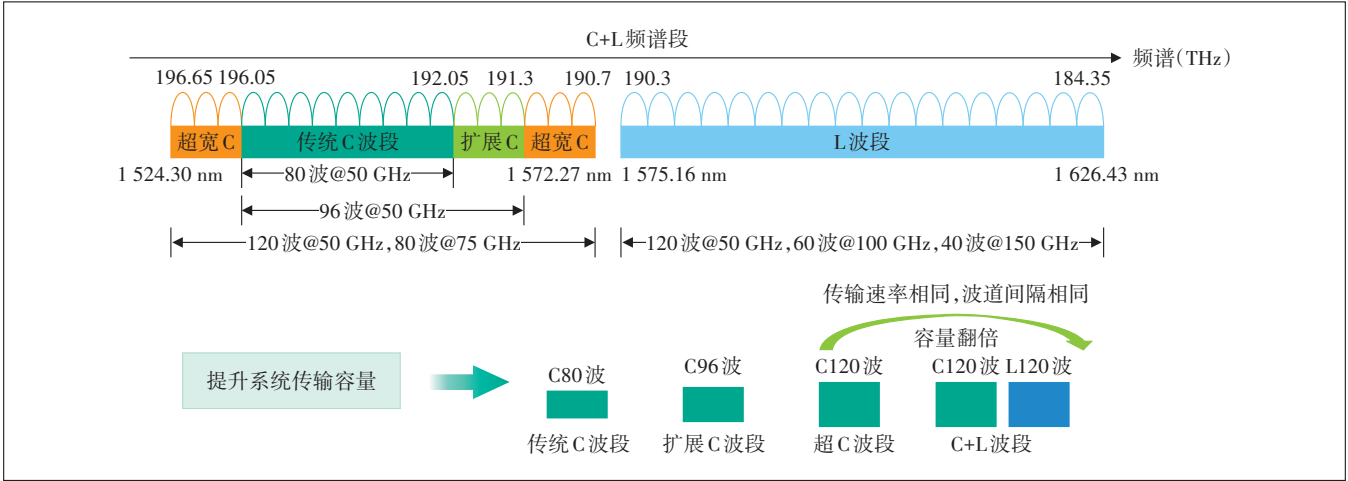


图3 C+L波段示意

量翻倍。其次,传输性能提升。采用EDFA斜率预倾斜补偿、WSS智能填充波管理等先进技术,有效抑制系统受激拉曼散射(SRS)效应,显著改善长波段OSNR指标,确保大容量传输质量。

基于“新八纵八横”国家骨干网架构,采用G.654.E新型光纤部署的400G系统已取得显著成效。测试数据显示,相较传统G.652.D光纤,G.654.E可实现20%以上的传输距离提升,大幅增强全光传输能力。通过系统性测试验证G.654.E/G.652.D混合组网场景下的光复用段性能,已完成全网电中继站的优化配置。经测算,C市至粤港澳大湾区算力枢纽的400G系统建设成本可降低40万元/波道^[3]。

3.2 敏捷组网:全Mesh组网与智能频谱协同

全Mesh组网通过多光方向设计为网络提供冗余保护能力。其实际效能取决于2个关键因素:机楼出局光缆数量和节点间直达路由数量。需特别指出的是,若物理光缆资源不足,多方向设计将难以发挥保护作用。根据工程实践,建议Mesh组网核心节点配置≥3个光缆出局路由以确保可靠性^[5]。

传统的100G OTN系统波道频谱间隔为50 GHz,但到了200G、400G及以上技术,就有多种频谱方案选择,如400G有双子波2×37.5 GHz、2×50 GHz及单子波62.5 GHz、75 GHz等多种方案选择。各种方案要综合考虑传输距离、网络信噪比水平以及光交叉能力的设计。在光交叉实现中,要确保相互交换的波长间隔一致,因此选用n×12.5 GHz的频谱间隔兼容性最好。如果网络中同时存在50 GHz和37.5 GHz等多种频谱间隔的彩光信号,则要对ROADM网络进行波长划分设

计,比如将37.5 GHz的波道安排在40波以后等,避免不同频谱间隔的波道冲突^[8]。

结合测试验证,本次新建系统波道将统一频谱间隔,全网选择50 GHz整数倍的频谱间隔,以简化波长规划,提升OXC核心节点间波道业务灵活调度与灵活切换保护能力。线路波分码型及传输能力示意如图4所示。

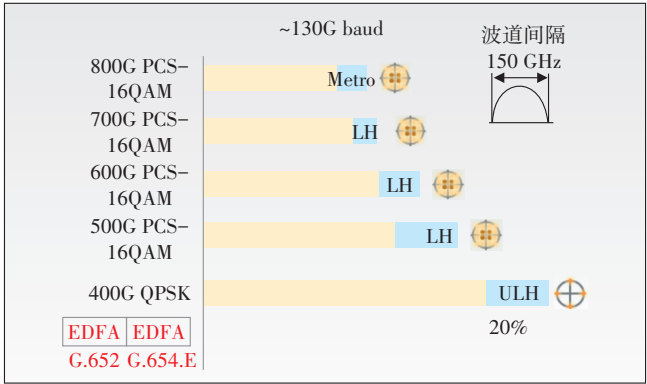


图4 线路波分码型及传输能力示意

3.3 极致可靠:Mesh组网 OMSP+WSON协同保护

全Mesh组网方式并不是要把所有节点都简单Mesh化,这样会造成资源的大幅浪费。在考虑组网结构时,就要贴合业务、流量的需要,重点解决流量需求大的节点。因此,核心节点一般采用全Mesh组网,保证大带宽、低时延、高保护能力,而非核心节点则可降低要求。

结合本次测试验证,根据骨干光缆网覆盖密度,C市至湾区保持环型组网,湾区、B、A、D、E核心节点间

将通过 Mesh 网架构组建,并对同一段落光缆路由具备条件的光复用段进行 OMSP 保护调优配置,通过较低的设备配置成本,提升系统抗光缆中断保护能力。骨干光网络组网示意如图 5 所示。

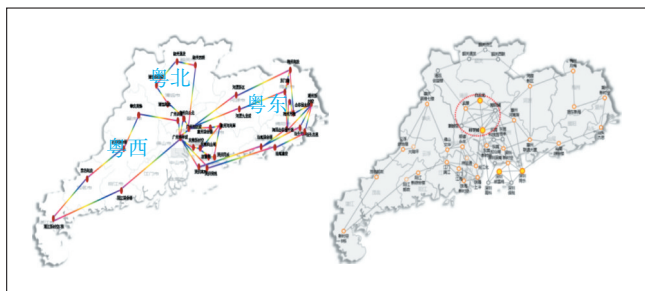


图5 骨干光网络组网示意

经验证,构建 OMSP 与 WSON 协同保护架构(见图 6),可实现毫秒级智能路径重选与光层自动倒换的深度协同。OMSP 保障单节点故障快速恢复,WSON 基于 SDN 智能算法实现多路径动态调度,支持跨域资源共享。特别是创新的共享电中继设计,通过波道级资源复用技术,使网络抗多次断纤能力提升至原架构的 2 倍。实测数据显示,系统在 400G 波道下实现 3 次断纤无业务中断,光层保护倒换时间优化至 50 ms 以内,为算力承载网提供了高可靠的立体防护体系。

4 部署演进

粤港澳大湾区基于 400G C+L 系统构建的全光算力网络,将持续向超高速率、智能调度和绿色节能三

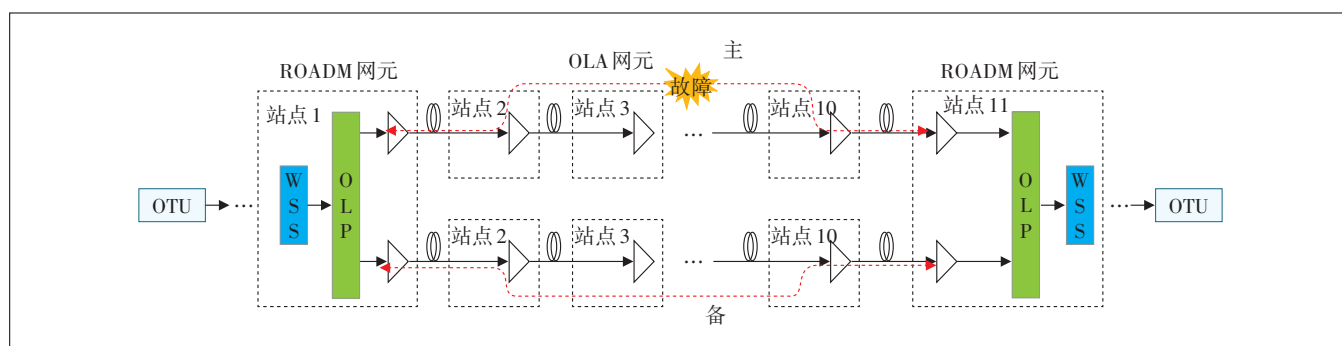


图6 OMSP+WSON 保护示意

大方向演进。在超高速率方面,加速 800G 在 A 市、B 市、C 市核心算力枢纽的商用,匹配 AI 训练与推理的 T 级带宽需求;同时推进 C+L+S 多波段协同,借助 DWSS 一体化滤波器和 EDFA 光放技术,实现单纤 64 T 容量,为 1.6 T/3.2 T 演进预留频谱空间。

通过规模部署 OXC+WSON 实现毫秒级算力资源调度,并结合空芯光纤试点,敏感业务传输时延降低 30%,构建“光层池化+运力地图”体系,实现算力与带宽的智能动态匹配。在绿色节能方面,采用 CPO 和硅光技术,使 800G 模块功耗降低 40%,PUE 优化至 1.2 以下,并开发弹性算力专线,支持东数西训、AI 分布式训练等场景。最终,通过“超宽管道+智能调度+算光协同”的持续升级,打造超低时延、超高可靠的算网一体全光底座,助力数字经济发展。

参考文献:

[1] 于悦,张勇.我国自由贸易试验区双循环网络拓扑结构特征[J].当代经济,2025,42(3):102-111.

[2] 姜国安.面向算力时代的 400G OTN 关键技术及应用[J].中国宽带,2024,20(5):118-120.
[3] 靳志月.浅谈光传送网络的同步测试方法[J].通讯世界,2020,27(4):26-27.
[4] 李宏发,林屹,胡昌军,等.光传送网络同步测试方法研究[J].光通信研究,2018(3):9-12.
[5] 丁涛,杨岳洋,汪顺其,等.配电网拓扑重构下辐射状约束建模综述[J].电网技术,2025,49(10):4228-4244.
[6] 佚名.广东电信完成全国首例 5G 32T32R AAU 现网测试[J].智能城市,2019(16):10.
[7] 祝为,赵婷,陈家璘,等.基于多链路冗余技术的 IMS 现网故障测试研究[J].电子设计工程,2020,28(10):74-77,83.
[8] 刘梦薇.基于波分复用技术的虹桥机场光传输网络设计及应用[J].机电信息,2019(5):26-27.

作者简介:

廖江,高级工程师,负责网络建设发展的管理工作;李炎强,工程师,负责光传输网的规划与建设工作;薛强,高级工程师,负责承载网、云池等的规划、创新工作。