

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.260136.

专题:智算中心光网络算网融合关键技术

刘元皓, 谢晓岚, 邓宁, 等. 高韧性智算中心光网络[J]. 光通信研究, 2026(4):1-9.

Liu Y H, Xie X L, Deng N, et al. High-Resilience Optical Network for Artificial Intelligence Data Centers[J]. Study on Optical Communications, 2026(4):1-9.

高韧性智算中心光网络(特邀)

刘元皓¹, 谢晓岚^{1,2}, 邓宁¹, 樊敏伟^{1,3}, 陈操¹

(1. 大湾区大学 a. 信息科学技术学院; b. 东莞市智能信息技术重点实验室, 广东 东莞 523000;

2. 深圳大学, 计算机与软件学院, 广东 深圳 518060; 3. 南方科技大学, 电子与电气工程系, 广东 深圳 518055)

摘要:【目的】智算中心光网络(AIDCON)的韧性问题已成为制约大规模人工智能(AI)高效训练与应用的核心瓶颈。文章系统阐述面向高韧性 AIDCON 的关键技术, 分别从智算中心内与智算中心间两个维度展开研究。【方法】在智算中心内, 文章针对潜在交换机和链路故障, 提出了韧性流完成时间(rFCT)指标, 将韧性约束内嵌于网络规划与调度过程, 并提出了高韧性文章高效率网络调度方案; 在智算中心间, 针对自然灾害导致的大规模网络故障, 基于分立式可调谐 C+L 收发器提出了多波段光网络保护方法, 基于芯间交换技术提出了空分复用光网络保护方法。【结果】分析表明, 将韧性内嵌于调度过程可减少故障对作业完成时间的冲击; 多波段与空分复用保护方法能够在不同扩容维度下提供灾害场景的业务恢复能力。【结论】文章所提方案能够有效提升 AIDCON 在故障与灾害场景下的韧性, 为大规模 AI 基础设施的高可靠光网络设计提供了系统性的方法与理论依据。

关键词: 智算中心光网络; 网络韧性; 故障恢复; 多波段光网络; 空分复用光网络

中图分类号: TN929

文献标志码: A

High-Resilience Optical Network for Artificial Intelligence Data Centers

LIU Yuanhao¹, XIE Xiaolan^{1,2}, DENG Ning¹, FAN Minwei^{1,3}, CHEN Cao¹

(1. a. School of Computing and Information Technology; b. Dongguan Key Laboratory for Intelligence and Information Technology, Great Bay University, Dongguan 523000, China; 2. College of Computer Science and Software Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. Department of EEE, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: 【Objective】The resilience of Artificial Intelligence Data Centers Optical Network (AIDCON) has become a core bottleneck limiting the efficiency of large-scale distributed Artificial Intelligence (AI) training. This paper systematically elaborates on key technologies of high-resilience AIDCON, covering two levels: intra and inter-artificial intelligence data center. 【Methods】For the intra-artificial intelligence data center, targeting potential switch and link failures, a resilient Flow Completion Time (rFCT) metric is designed. The resilience is embedded into the network planning and scheduling process, and a network scheduling scheme is proposed. For the inter-artificial intelligence data center, addressing large-scale network failures caused by natural disasters, a multi-band optical network protection method based on disaggregated tunable C+L transceivers and a protection method for space-division multiplexing optical networks based on inter-core switching technology are proposed. 【Results】Analysis demonstrates that embedding resilience into the scheduling process mitigates the adverse impacts of failures. Moreover, the protection scheme combining multi-band and space-division multiplexing enables service restoration under disaster scenarios across various capacity expansion dimensions. 【Conclusion】The proposed schemes can effectively enhance the resilience of AIDCON, providing a systematic methodology and theoretical basis for designing highly reliable optical networks for large-scale AI training infrastructures.

Key words: AIDCON; network resilience; failure recovery; multi-band optical network; space-division multiplexing optical network

0 引言

人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术正驱动新一轮科技与产业变革,以 ChatGPT 和 DeepSeek 为代表的大语言模型参数量级已快速攀升至十万亿级别^[1-2],推动分布式训练成为核心训练技术范式。在该范式下,海量图形处理器(Graphics

Processing Unit, GPU)算力节点通过智算中心光网络(AI Data Center Optical Network, AIDCON)进行高频次和高带宽的协同通信同步全局参数,使得网络通信性能直接决定了整体训练效率^[3-4]。

AIDCON 作为承载 AI 大模型训练任务的关键基础设施,其高可靠运行对保障训练效率至关重要。然而,分布式训练技术与通信效率的强耦合关系导

收稿日期:2026-05-15; 修回日期:2026-06-17; 纸质出版日期:2026-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62571085);广东省基础与应用基础基金资助项目(2026A1515011597);东莞市基础研究基金资助项目

作者简介:刘元皓(1993-),男,陕西西安人。助理研究员,博士,主要研究方向为韧性光网络。

通信作者:邓宁,教授。E-mail:ndeng@gbu.edu.cn

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

致 AI 大模型训练任务对网络故障异常敏感,任何网络中断都会引发相关任务的全局算力空转^[5-6],使单点故障演变为系统性失效^[4,7],这种大规模算力空转不仅会导致训练进度滞后,更会造成巨额经济损失。因此,如何保障 AI 训练任务在故障场景下的持续高效开展,构建高韧性 AIDCON 已成为支撑智算集群的关键瓶颈^[8-9]。

针对高韧性 AIDCON 问题,本文首先从智算中心内与智算中心间光网络两个层面出发,对其研究进展进行系统综述。在智算中心内,本文针对潜在的单交换机和单链路故障,提出了以韧性流完成时间(resilient Flow Completion Time, rFCT)为核心指标的高韧性网络调度和优化方案,旨在为网络提供面向潜在故障的主动韧性机制;在智算中心间,本文针对大规模自然灾害故障,分别介绍了基于分立式可调谐 C+L 收发器的多波段(Multi-Band, MB)光网络保护方法和基于芯间交换(Inter-Core Switching, ICS)的空分复用(Space Division Multi-

plexing, SDM)光网络保护方法,旨在为光网络提供面向大规模故障的保护机制。本文所述研究工作可为大规模 AI 训练基础设施的高韧性 AIDCON 设计提供参考。

1 AIDCON 及网络韧性

AIDCON 可以分为智算中心内与智算中心间光网络两个层面,如图 1 所示。

智算中心内光网络在单个智算中心内部采用光通信网络连接 GPU 等算力资源,旨在为 AI 大模型训练与推理提供超高带宽、极低延迟、低功耗且高可靠的通信通道,从而突破传统电互联的瓶颈,支撑千卡乃至万卡级算力集群的高效协同计算。

智算中心间光网络在多个智算中心之间利用骨干光网络连接不同地点的算力集群形成超级算力网络,从而突破单智算中心算力边界,旨在为跨地域的 AI 大模型分布式训练提供超大带宽、低抖动、高安全且弹性可靠的通信通道。

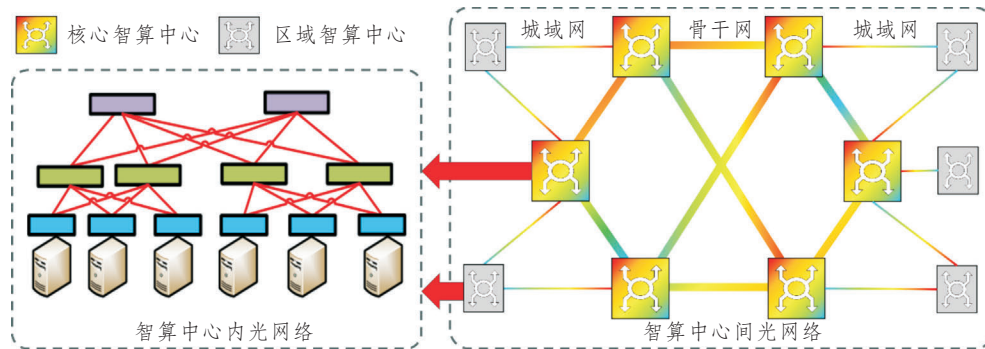


图 1 AIDCON 架构

Figure 1 Architecture of AIDCON

接下来,本文对网络韧性这一概念进行界定。传统上,可靠性侧重于网络组件无故障运行的概率,即尽量减小故障发生的可能性;生存性侧重于网络在故障发生后维持最低限度服务的能力,即网络抗毁顽存的能力。而韧性的概念更为丰富,其包含了网络生存性的概念,更强调在故障发生后快速恢复至正常或接近正常性能水平的能力,以及通过自适应调整应对未知或多变威胁的适应性。在高韧性网络场景下,即使发生单点或多点故障,网络仍能在可接受的时间范围内恢复其对上层业务的通信服务。本文后续所讨论的主动调度及灾害保护方案,均以提升上述韧性为最终目标。

2 高韧性智算中心内光网络

智算中心内光网络的韧性问题已成为制约训练

效率的核心瓶颈之一。行业数据表明,Google 第 4 代张量处理单元(Tensor Processing Unit Version 4, TPUv4)集群每日约有 0.08% 的设备和 0.005% 的链路发生故障^[9];Microsoft 在超过 18 万台交换机的部署中,前 3 个月观测到约 2% 的故障率^[10];阿里巴巴报告其架顶式(Top of Rack, ToR)链路交换机的月故障率分别达 0.057% 和 0.051%^[11]。在高度同步的分布式训练场景中,智算中心内光网络中各组件任何单点故障都可能被急剧放大,导致训练任务整体中断,通常的恢复手段是从最近的检查点(checkpoint)上读取备份恢复参数,从检查点到故障点之间的所有计算均作废(时间跨度通常为分钟~小时级),造成已消耗算力的浪费和大量经济损失^[12],这种方法同时需要大量通信开销用于模型参数备份。因此,智算中心内光网络的快速弹性恢复,

已成为学术界与产业界共同聚焦的核心研究方向。

光电路交换(Optical Circuit Switching, OCS)技术的引入为智算中心内光网络的韧性设计提供了关键技术支撑。OCS 通过在光域内建立和切换连接,使网络能够在数十毫秒内完成物理连接的动态重配。这一动态重构能力支持网络在故障发生时得以快速自适应恢复,从而保障网络的完整性与吞吐量等性能。然而,OCS 的引入也使网络拓扑的动态性大幅增加,网络故障对集合通信的影响模式更为复杂,对韧性机制的设计提出了更高要求。

2.1 智算中心内光网络韧性相关研究

基于 OCS 的设备支持在毫秒级时间尺度内完成光路重配这一能力,学术界与产业界开展了多项网络动态恢复研究。2021 年,麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)与哥伦比亚大学、Google 和 NVIDIA 合作,面向智算中心内部光互连网络提出了硅光子学-机器学习(Silicon Photonics-Machine Learning, SiP-ML)架构^[13],该架构采用多 OCS 交换机冗余配置,通过整数线性规划(Integer Linear Program, ILP)预计算路由调度方案,在交换机出现故障时自动将流量切换至正常 OCS 交换机,实现网络拓扑的快速重构,无需中断训练。Google Jupiter 网络采用基于 ILP 的离线预计算路由策略,结果显示,其流完成时间(Flow Completion Time, FCT)的降低不超过 12.37%^[9]。中国科学技术大学在 2025 年研究了 OCS 网络中流量动态变化导致的连接碎片化与突发流量鲁棒性矛盾^[8],考虑了性能故障(拥塞、带宽瓶颈和延迟)所导致的业务中断场景并展开了容错机制设计。

近期许多工作通过预先部署备份设备实现了业务的快速和无损切换,该类方案的核心逻辑是以额外的硬件开销换取确定性的恢复性能。2024 年,Meta 提出了基于融合以太网的远程直接内存访问(Remote DirectMemory Access over Converged Ethernet, RoCE)网络^[14],采用具备超配比上行链路的两级 Clos 拓扑,结合备份路由与自适应流量控制等多层机制,以容忍多条并发链路故障。阿里巴巴则采用双 ToR 和双平面的硬件设计,双 ToR 在两个平面内独立运行、互为备份,以彻底规避单 ToR 单点故障,在链路故障时仅产生约 6.25% 的性能衰减^[11]。2023 年~2025 年,NVIDIA 在其 4 篇论文中^[15-18]提出并发表了基于备份交换机和双端口网卡的智算中心内光网络架构,该架构支持对链路和交换机故障的无损完全恢复,且实测单交换机故障的

应用层恢复时延约为 7 s,单链路故障恢复时延不大于 4 s,且与流量负载呈正相关。该方案无需预留冗余路径即可 100% 还原集群性能,无带宽损耗。

综合来看,现有工作普遍呈现出网络韧性依赖物理层快速切换与事后动态重路由,缺乏与上层任务调度动态协同的被动模式;网络规划多聚焦无故障场景下的资源分配优化,容错机制仅作为次要功能附带考量。此外,当前缺乏统一量化故障影响的评估指标,造成规划与韧性需求脱节。针对上述局限,本课题组前期工作将故障韧性的首要目标从单一事后补救提升至事前联合调度,提出融合任务调度与故障恢复协同设计的主动韧性框架。

2.2 面向潜在故障的高韧性智算中心内光网络

现有研究普遍采用 FCT 等作为智算中心内光网络调度的核心指标,该指标在无故障环境下能够良好表征各训练任务的通信效率。然而,现有调度策略在设计时忽略了故障对作业通信的潜在影响,导致优化目标与实际韧性需求之间存在明显的协同缺失。针对这一问题,本课题组提出面向潜在故障的高韧性智算中心内光网络,旨在构建主动韧性机制。

本工作采用两层智算中心内光网络架构,如图 2 所示。各服务器组之间通过 OCS 层实现互联,OCS 层可按需动态重构网络拓扑,从而灵活支持服务器组间通信。具体地,为该架构在网络中部署 1 台备用交换机,并将其连接至 OCS 链路的剩余端口,以应对单点故障。当检测到设备故障时,相应的 OCS 将重新配置,将备用交换机接入网络,整个过程由可编程数据平面统一调度。在服务器侧,双端口网卡以高可用模式运行:主端口连接上行链路,备份端口在主端口发生故障时自动接管。该架构可在秒级时间尺度内从交换机故障和链路故障中恢复^[18]。

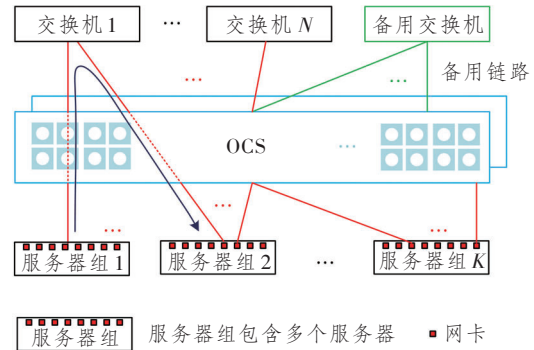


图 2 韧性智算中心内光网络架构

Figure 2 Architecture of the Resilient Intra-AIDCON

基于智算中心内光网络架构设计 rFCT 指标,核心思想如图 3 所示。图 3(a)所示为通信过程中发生故障时的实际 FCT,其中包括 OCS 重配置与网络恢复所引入的延迟。如图 3(b)所示,韧性技术面临的挑战在于,调度阶段无法预知未来故障发生的具体时间与位置。为此,本工作将潜在故障影响纳入模型。针对每个时隙定义估计 FCT(estimated FCT, eFCT),该指标量化了若下一时隙发生

故障时所预期的性能损失。通过将潜在故障的影响分摊至整个调度周期,模型主动规避高故障风险的资源配置,从而在优化基准 FCT 的同时提升了系统韧性。具体地,在每个调度时隙,假设下一时隙可能发生故障,将其对 FCT 的影响加权纳入当前决策。eFCT 考虑所有可能的链路故障与交换机故障场景,量化了故障在当前网络状态下对作业通信的潜在中断代价,旨在实现性能与韧性的协同优化。

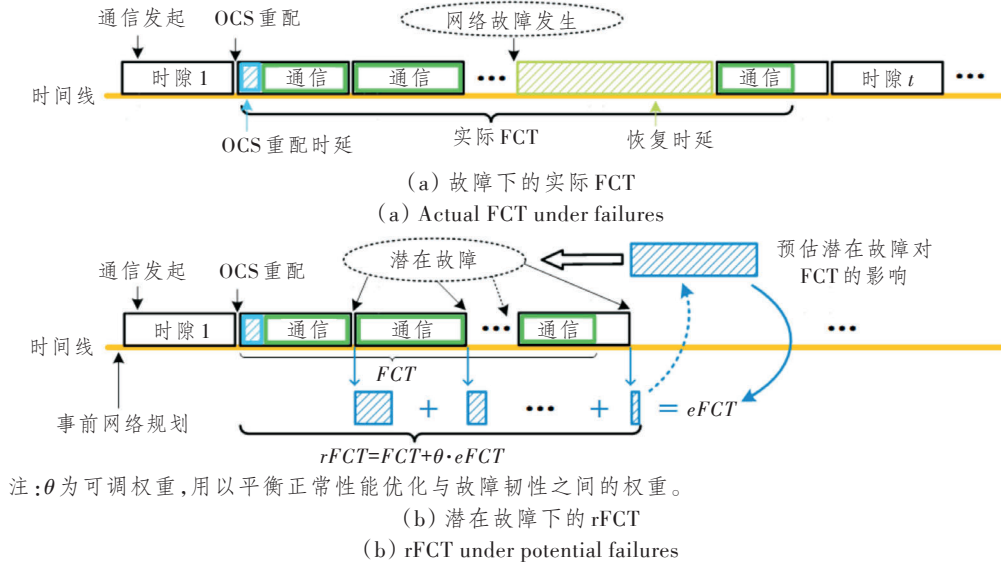


图 3 韧性智算中心内光网络的 rFCT 设计

Figure 3 rFCT design in the resilient intra-artificial intelligence data center optical network

对于潜在故障的不确定性,本文设计了 rFCT 指标,将基准 FCT 与潜在故障影响统一纳入优化目标,rFCT 指标可表示为

$$rFCT = \max_j \left\{ \sum_{t \in T} \left(FCT_j^t + \theta \cdot \frac{1}{|T|} eFCT_j^t \right) \right\}, \quad (1)$$

式中: FCT_j^t 为作业 j 在时隙 t 无故障下的 FCT; $eFCT_j^t$ 为在时隙 t , 假定下一时隙发生故障时,作业预期的额外 FCT 增量(期望值);对于每一个作业 j 取 max 是为了最小化所有任务中最大的 rFCT,以取得 min-max 公平性目标,以避免某个任务因资源分配不合理或故障影响而严重拖长完成时间。另外,由于在调度时,我们不知道未来何时、何处会发生故障,因此采用 $\frac{1}{|T|}$ 作为时间上等概率假设下的期望损失来估计韧性代价。这是一种风险中性的估计方法,在后续工作中基于历史故障统计或故障预测等数据集,可扩展为非均匀概率分布。问题的约束可分为 4 类:

①连接分配约束,确定哪些服务器组间需要通

信以及为每条流分配的带宽,确保连接建立满足通信的一个服务器组对、空闲的交换机以及空闲的链路;

②通信过程约束,刻画待传数据量的动态更新并考虑 OCS 重配时延的影响;

③故障恢复约束,针对潜在链路或交换机故障所需的恢复时间。该恢复时间不仅取决于故障类型,还依赖于故障发生时受影响组件上的流量分布,通过对所有链路故障恢复时间和交换机故障恢复时间取均值计算 eFCT;

④网络容量约束,保证服务器组端口、交换机及链路带宽的物理可行性。

3 高韧性智算中心间光网络

随着 AI 与超大规模智算中心互联需求的爆发式增长,骨干光网络流量呈指数级高速增长态势^[19]。现有 C 波段频谱资源趋近香农极限^[20],MB 和 SDM 技术已成为突破容量瓶颈的核心手段,并逐步进入规模化部署阶段^[21]。作为关键基础设施,智算中心间光网络须具备高度生存性以应对自然灾害、光纤切断或设备故障等事件。

智算中心间光网络主要依托骨干光网络连接不同地理位置的智算中心,其网络韧性技术与传统光网络韧性技术类似,其网络故障可以分为链路故障、节点故障、共享风险链路组(Shared Risk Link Group, SRLG)光纤故障和自然灾害故障。研究前期主要针对网络保护的机制和方法,包括链路保护、路径保护和预置圈保护在内的网络保护方法已经较为成熟,目前该方面的研究主要转向在新兴光网络架构下针对自然灾害保护的组合优化问题^[22-24]。虽然基于动态重路由的波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)自动交换光网络(WDM Automatic Switch Optical Network, WASON)也是光网络常用的保护恢复机制,但本文暂不考虑故障发生后的实时路径计算场景。

3.1 智算中心间光网络韧性相关研究

随着流量需求持续攀升,光网络的容量扩展经历了从传统 WDM 光网络到弹性光网络(Elastic Optical Network, EON),再到 MB 和 SDM 光网络的多维度演进历程。作为关键基础设施,光网络的韧性研究也随之经历了由单一维度向多维度、由单一故障向复杂故障场景的演进。

在 MB 光网络的研究中,许多工作聚焦于从 C 波段向 C+L 光网络的频谱升级过渡方案。为了提高频谱效率并降低阻塞率,Yao 等人^[25]研究了基于信道间受激拉曼散射感知的频谱分配方法;而 Bao 等人^[26]则引入了一种链路级资源均衡方案;Petale 等人^[27-28]和 Jana 等人^[29]提出了一种用于 EON 的渐进式升级方法,该方法支持从 C 波段逐步向 MB 和 SDM 系统的平滑演进。此外,许多研究探讨了专为 C+L 光网络设计的频谱分配策略。而在 MB 光网络的生存性方面,Hosseini 等人^[30]提出了一种针对放大器故障保护的频谱分配方法,随后提出了基于服务等级协议的差异化保护机制^[31];对于单链路保护,Luo 等人^[32]在不同波段分配工作路径和备份路径,同时利用 SDM 技术来提高容量。

SDM 网络的韧性研究近年逐渐成为热点。现有保护方案主要面向单链路或单节点故障;Chandra 等人^[33]提出了一种面向 SDM 数据中心光网络的流量负载均衡生存性路由框架,在考虑多芯光纤(Multicore Fiber, MCF)芯间串扰的同时,提供面向单数据中心与单链路故障的多路径保护;Liu 等人^[34]则在 SDM-EON 中联合优化路由、纤芯分配与频谱分配,提升了单链路故障下的网络韧性。相比之下,面向灾害的保护研究则主要集中于基于单

模光纤的网络,如 Sarma 等人^[35]则对 EON 进行了全面综述,系统地梳理并分类了基于单模光纤 EON 在各类故障场景下的解决方案。

现有面向 MB 和 SDM 光网络的生存性研究大多针对单链路或单节点故障^[34,36],对自然灾害引发的大规模故障关注不足。C+L 波段虽扩展了频谱资源,但带来了更复杂的多维协同规划问题;SDM 网络中 ICS 与非 ICS 架构的选择直接影响了资源效率与保护路径的可达性^[37],而灾害场景下两者的量化性能差异尚无系统分析。本课题组针对以上两方面分别开展了研究。

3.2 高韧性 C+L 智算中心间光网络

C+L WDM 系统在容量翻倍的同时,也引入了若干挑战:

①传输能力受限。由于传输损伤加剧,C+L 系统的覆盖距离较单 C 波段系统显著缩短。比如,针对骨干网部署最广泛的 G. 652D 光纤,本文考虑双偏振正交相移键控(Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying, DP-QPSK)、双偏振概率成形 16 进制正交幅度调制(Dual Polarization Probabilistic Shaping 16-ary Quadrature Amplitude Modulation, DP-PS-16QAM)与双偏振 16 进制正交幅度调制(Dual Polarization 16-ary Quadrature Amplitude Modulation, DP-16QAM)3 种主流调制格式的最大传输距离分别为 2 000、1 400 和 720 km^[38]。

②硬件约束带来的波段耦合限制。当前单 C 或单 L 可调谐收发器已在前些年广泛商用,而 C+L 可调谐收发器技术成熟较晚,近期刚进入商用。单 C 或单 L 可调谐收发器导致同一业务的工作路径与备份路径只能在同一波段内提供服务。此外,考虑商用收发器与波长交换机的实际能力,该类 C+L 系统常采用 25.0 GHz 灵活 WDM 栅格粒度,而非传统的 12.5 GHz^[39-40]。

③多故障场景的普遍性。事故或自然灾害可能引发跨链路和跨节点的区域性故障。传统面向单链路/单节点故障的保护机制难以有效应对大规模关联故障。灾害发生时,途经受灾区域的通信业务将被中断,需切换至预先分配的备份路径,这一过程会消耗额外的频谱资源;尽管 C+L 波段提供了大量的频谱资源,但也引入了更复杂的网络保护与资源规划问题。

针对上述问题,本课题组提出了一种面向多故障场景的 MB-专用路径保护(Dedicated Path Protection, DPP)方案^[41],将灾害保护研究从单一 C 波

段扩展至 C+L 波段,同时综合考虑了 MB 分配、多故障弹性保护、距离自适应调制格式选择以及频谱分配 4 个子问题,并在建模过程中融入了商用 C+L 系统的实际特性。

图 4 所示为 1 个 MB-DPP 的简单示例, MB-DPP 要求业务的工作路径和备份路径不能经过同一个灾害区域(业务源和宿节点所在的区域除外),同时两条路径在链路和节点上也互不相交。如图 4 所示,备份路径 1 和备份路径 2 在传统方案中均可以生成,以保护单链路故障。然而对于灾害区域 3 所引发的网络故障,工作路径和备份路径 2 则会一起失效。

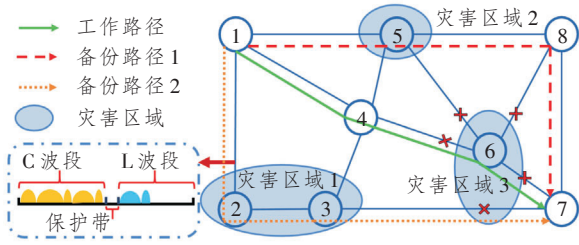


图 4 MB-DPP 方案示例

Figure 4 Example of the MB-DPP scheme

本工作将联合问题建模为数学问题,目标函数为最小化占用频隙索引与频谱使用量的加权和:

$$\min \theta_1 \cdot FS_{\max} + \theta_2 \cdot FS_{\text{usage}}, \quad (2)$$

式中: θ_1 和 θ_2 为两个指标所占权重; FS_{usage} 为网络中所有链路上的总频谱使用量; $FS_{\max}$ 为网络中所有链路上已占用的最大频隙索引, $FS_{\max}$ 可表示为

$$FS_{\max} = Band_{\max} \cdot FS_C + FS_{\text{band-max}}, \quad (3)$$

式中: $Band_{\max}$ 为使用的最大波段索引, $Band_{\max}=0$ 表示仅使用 C 波段, $Band_{\max}=1$ 表示使用了 L 波段; $FS_{\text{band-max}}$ 为该波段上的最大频隙索引; FS_C 为 C 波段内的频隙总数。本工作采用首次命中法(First Fit)进行频谱分配,式(3)的物理含义为优先使用 C 波段的低索引频隙,在 C 波段无可用频谱时再使用 L 波段的低索引频隙,其中 C 和 L 波段的频隙索引均从 0 开始计算。最小化 $FS_{\max}$ 可使网络的频谱资源消耗趋向于分配 C 波段的低索引频隙,并尽量避免某一链路的频谱消耗过大,以平衡网络负载。模型约束可分为以下 6 类:

①流量守恒约束,基于节点流入流出关系保证路径合法生成;

②灾害区域、节点和链路不相交约束,判断工作/备份路径是否受灾害区域影响,并确保同一业务的工作路径与备份路径灾害区域不相交、节点不相交及链路不相交的特性,以保证工作路径因故障失

效时备份路径不受影响,从而恢复连接;

③自适应调制格式选择约束,确保所选调制格式满足传输距离要求,且每条路径仅选择 1 种调制格式;

④频谱分配约束,包括频谱连续性(同一路径上所有链路使用相同频隙)、频谱一致性(每条光路分配的频隙连续)与频谱冲突约束(链路上的同一个频隙不会被用于多个光路);

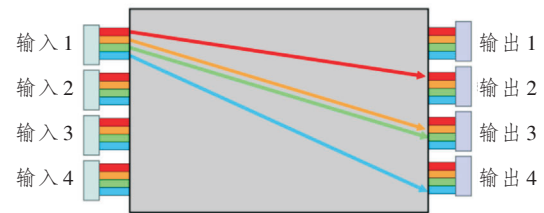
⑤MB 设置约束,确保在 C 和 L 波段之间的保护带不会被使用,并特别约束同一业务的工作路径与备份路径位于同一波段(C 或 L 波段),以适配成熟商用收发器的调谐能力。

3.3 高韧性 SDM 智算中心间光网络

SDM 系统借助 MCF 引入额外空间维度以突破容量瓶颈,同时也引入了区别于传统单模光纤网络的若干挑战:

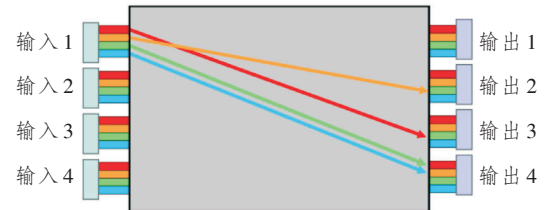
①芯间资源耦合的约束性。SDM 网络中,业务路径须在路由、调制格式、频谱与纤芯 4 个维度上进行联合优化分配。备份路径在满足生存性的同时,其资源规划还需兼顾纤芯维度的可用性,使得优化复杂度远超传统 EON 场景^[37]。

②节点交换能力的异构性。SDM 网络中存在两类典型节点架构,如图 5 所示:不具备 ICS 能力的节点要求光信号在全程路径上保持同一纤芯,而具备 ICS 能力的节点则允许信号在不同链路段上动态切换纤芯^[36]。前者部署成本较低但空间灵活性受限,后者虽能有效缓解频谱碎片化,却需要更高的硬件投入。



(a) 使用 ICS 的结构

(a) With ICS



(b) 未使用 ICS 的结构

(b) Without ICS

图 5 ICS 技术示意图

图 5 Illustration of ICS

针对上述问题,本课题组将进一步研究 SDM 光网络。类似于本文 3.2 小节中的目标函数,本工作的目标函数同样采用频谱使用量与最大频隙索引的加权和,同式(2)。然而由于 SDM 光网络中未引入 C+L 系统,因此可定义 $FS_{\max}$ 为

$$FS_{\max} = (c_{\max} - 1) \cdot S_{\max} + f_{\max}, \quad (4)$$

式中: $c_{\max}$ 为整个网络中被占用的最大纤芯索引(从 0 开始); $S_{\max}$ 为单纤芯上的最大频隙索引; $f_{\max}$ 为该纤芯上使用的最大频隙索引,各纤芯上的频隙索引均从 0 开始。类似于式(3),式(4)的物理含义为优先使用低索引纤芯的低索引频隙,在平衡网络负载的同时降低了硬件成本与芯间串扰。模型约束分为两类:

①流量守恒约束,灾害区域、节点和链路不相交约束,自适应调制格式选择约束,频谱分配约束,如本文 3.2 小节所示。

②纤芯一致性与唯一性约束:在无 ICS 场景下,同一路径在所有经过链路上必须使用同一纤芯,即路径在空间维度上须保持连续;在有 ICS 场景下,该空间连续性约束得以放松,允许路径在不同链路段上动态切换纤芯。无论是否启用 ICS,每条路径在任意单段链路上均只能占用一个纤芯,不允许单链路上的多芯并行。

4 结束语

本文从智算中心内和智算中心间两个维度,系统梳理和总结了高韧性 AIDCON 的关键技术与最新研究进展。在智算中心内光网络方面,针对基于 OCS 的网络中故障不确定性与任务调度缺乏协同设计的空白,介绍了以 rFCT 为核心指标的主动韧性调度方案。在智算中心间光网络方面,面向 C+L 光网络提出了 MB-DPP 灾害保护方案,同时针对 SDM 光网络提出了考虑 ICS 的灾害保护方案,从而将灾害保护研究从单波段与单模光纤场景系统性拓展至 MB 与 SDM 场景。

参考文献:

- [1] Xiao C, Cai J, Zhao W, et al. Densifying Law of LLMs[J]. Nature Machine Intelligence, 2025, 7(11): 1823–1833.
- [2] Guo D, Yang D, et al. DeepSeek-R1: Incentivizing Reasoning Capability in LLMs via Reinforcement Learning [EB/OL]. (2026-01-04) [2026-05-15]. <https://arxiv.org/abs/2501.12948>.
- [3] Weissberger A. Superclusters of NVIDIA GPU/AI Chips Combined with End-to-End Network Platforms to Create Next Generation Data Centers [EB/OL]. (2024-11-25) [2026-05-15]. <https://techblog.com-soc.org/2024/11/25/superclusters-of-nvidia-gpu-ai-chips-combined-with-end-to-end-network-platforms-to-create-next-generation-data-centers/>.
- [4] 王冬柔, 李新, 赵辰宇, 等. 面向大模型分布式训练的光组网技术综述[J]. 光通信研究, 2025(6): 250050. Wang D R, Li X, Zhao C Y, et al. A Review of Optical Grouping Techniques for Distributed Training of Large Models[J]. Study on Optical Communications, 2025(6): 250050.
- [5] Wang W, Khazraee M, Zhong Z, et al. TopoOpt: Co-Optimizing Network Topology and Parallelization Strategy for Distributed Training Jobs[C]//Proceedings of the 20th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 21). Boston, MA, USA: NSDI, 2023: 00433.
- [6] Tang B, Chen X, Pang A, et al. TPE-Enabled Proactive Scheduling of Collective Communications in OCS-based DCNS[C]//2025 IEEE 25th International Conference on Communication Technology (ICCT). Shenyang, China: IEEE, 2026: 11373972.
- [7] Liu Y, Deng N, Chen C, et al. On Resilient OCS-based Data Center Networks[C]//2026 IEEE International Conference on Communications (ICC). Glasgow, Scotland: IEEE, 2026: 1–6.
- [8] Dong X, Chen X, Zhu Z. On the Risk-Aware Connection Defragmentation in OCS-based Data-Center Networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2025, 22(5): 3909–3920.
- [9] Poutievski L, Mashayekhi O, Ong J, et al. Jupiter Evolving: Transforming Google's Datacenter Network via Optical Circuit Switches and Software-Defined Networking [C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference. Amsterdam, Netherlands: ACM, 2022: 66–85.
- [10] Singh R, Mukhtar M, Krishna A, et al. Surviving Switch Failures in Cloud Datacenters[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2021, 51(2): 2–9.
- [11] Qian K, Xi Y, Cao J, et al. Alibaba HPN: a Data Center Network for Large Language Model Training[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2024 Conference. Sydney, NSW, Australia: ACM, 2024: 691–706.
- [12] Dylan P, Daniel N. 100000 h100 Clusters: Power, Network Topology, Ethernet vs Infiniband, Reliability, Failures, Check-pointing [EB/OL]. (2024-06-17)

- [2026-05-15]. <https://semianalysis.com/2024/06/17/100000-h100-clusters-power-network/open=false#reliability-and-recovery>.
- [13] Khani M, Ghobadi M, Alizadeh M, et al. SiP-ML: High-Bandwidth Optical Network Interconnects for Machine Learning Training [C]//Proceedings of the 2021 ACM SIGCOMM 2021 Conference. Virtual Event: ACM, 2021: 657–675.
- [14] Gangidi A, Miao R, Zheng S, et al. RDMA over Ethernet for Distributed Training at Meta Scale [C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2024 Conference. Sydney, NSW, Australia: ACM, 2024: 57–70.
- [15] Patronas G, Syrivelis D, Bakopoulos P, et al. Software-Defined, Programmable L1 Dataplane: Demonstration of Fabric Hardware Resilience Using Optical Switches [C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023: th2a. 15.
- [16] Bakopoulos P, Patronas G, Terzenidis N, et al. Photonic Switched Networking for Data Centers and Advanced Computing Systems [C]//2024 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2024: 10527068.
- [17] Terzenidis N, Patronas G, Syrivelis D, et al. Programmable Fabrics with Optical Switches in AI Supercomputers [C]//2025 30th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2025 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC). Sapporo, Japan: IEEE, 2025: 1109345.
- [18] Patronas G, Terzenidis N, Kashinkunti P, et al. Optical Switching for Data Centers and Advanced Computing Systems [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2025, 17(1): A87–A95.
- [19] Guo N, Shen G, Deng N, et al. Can Channel Power Optimization with GSNR Flatness Maximize Capacities of C+L-Band Optical Systems and Networks? [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42 (16): 5506–5521.
- [20] Ferrari A, Napoli A, Fischer J K, et al. Assessment on the Achievable Throughput of Multi-Band ITU-T G. 652. D Fiber Transmission Systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38 (16): 4279–4291.
- [21] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-Division Multiplexing in Optical Fibres [J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354–362.
- [22] Liu Y, Zhou F, Chen C, et al. Disaster Protection in Inter-DataCenter Networks Leveraging Cooperative Storage [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(3): 2598–2611.
- [23] Liu Y, Zhou F, Shang T, et al. Disaster Protection for Service Function Chain Provisioning in EO-DCNS [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2023, 20(3): 2356–2369.
- [24] Liu Y, Deng N. Shared and Adaptive Unequal Multi-Path Protection in Inter-Datacenter Optical Networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2026: 1–14.
- [25] Yao Q, Yang H, Bao B, et al. SNR Re-Verification-based Routing, Band, Modulation, and Spectrum Assignment in Hybrid C-C L Optical Networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40 (11): 3456–3469.
- [26] Bao B, Yang H, Yao Q, et al. LoRB: Link-Oriented Resource Balancing Scheme for Hybrid C/C+L Band Elastic Optical Networks [J]. Optical Fiber Technology, 2022, 74: 103071.
- [27] Petale S, Lin S C, Matsuura M, et al. PRODIGY: a Progressive Upgrade Approach for Elastic Optical Networks [C]//GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global Communications Conference. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2023: 2129–2134.
- [28] Petale S, Knapieńska A, Erbayat E, et al. PRODIGY+ : a Robust Progressive Upgrade Approach for Elastic Optical Networks [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2024, 16(9): E48–E60.
- [29] Jana R K, Chatterjee B C, Singh A P, et al. Quality-Aware Resource Provisioning for Multiband Elastic Optical Networks: a Deep-Learning-Assisted Approach [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2022, 14(11): 882–893.
- [30] Hosseini S, de Miguel I, Merayo N, et al. Survivability Against Amplifier Failures in Multi-Band Elastic Optical Networks [C]//2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Shenzhen, China: IEEE, 2022: 1299–1302.
- [31] Hosseini S, De Miguel I, Merayo N, et al. Enabling Service Level Agreement-Differentiated Protection in C+L Multiband Optical Networks [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2025, 6: 316–331.
- [32] Luo Z, Yin S, Zhao L, et al. Survivable Routing, Spectrum, Core and Band Assignment in Multi-Band Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40 (11): 3442–3455.

- [33] Chandra S, Paira S, Singha S, et al. DC-LB-RSCA: a Load-Balanced Framework for Survivable Routing of Crosstalk-Aware Data Center Traffic in SDM-EONs[J]. Discover Applied Sciences, 2025, 7(10): 1049.
- [34] Liu H, Tang C, Chen Y, et al. A Survivable Multipath Resource Allocation Strategy based on Fragmentation-Sensitive Fragmentation-Aware in Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks [J]. Computer Communications, 2023, 204: 78–88.
- [35] Sarma A K, Deka S K, Sarma N. Survivable Elastic Optical Network: a Survey of Failure Scenarios and Solutions[J]. Optical Switching and Networking, 2025, 58: 100823.
- [36] Dikhiyik F, Tornatore M, Mukherjee B. Minimizing the Risk from Disaster Failures in Optical Backbone Networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(18): 3175–3183.
- [37] Rumipamba-Zambrano R, Moreno-Muro F J, Perelló J, et al. Space Continuity Constraint in Dynamic Flex-Grid/SDM Optical Core Networks: an Evaluation with Spatial and Spectral Super-Channels[J]. Computer Communications, 2018, 126: 38–49.
- [38] 通信世界全媒体. 全球首条400 G骨干网链路贯通 400 G 商用元年正式开启 [DB/OL]. (2024-05-13) [2026-05-15]. https://xxzx.fujian.gov.cn/jjxx/xxhdt/202405/t20240513_6447524.htm.
- Communication World All-Media. The World's First 400 G Backbone Network Link is Completed, Marking the Official Start of the First Year of 400 G Commercialization [DB/OL]. (2024-05-13) [2026-05-15]. https://xxzx.fujian.gov.cn/jjxx/xxhdt/202405/t20240513_6447524.htm.
- [39] Deng N, Zong L, Jiang H, et al. Challenges and Enabling Technologies for Multi-Band WDM Optical Networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(11): 3385–3394.
- [40] Khosravi F, Shadaram M. Optimizing Performance in Elastic Optical Networks Using Advanced Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers: a Novel Design Approach and Comprehensive Analysis[J]. Optical Fiber Technology, 2024, 83: 103682.
- [41] Fan M, Liu Y, Deng N. Disaster-Resilient Provisioning in C+L Multi-Band Optical Networks [C]//2025 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Jiangsu, China: IEEE, 2025: 11350878.