



专题：智算光互联

面向跨智算集群互联的新型HIC-OTN技术

张德朝, 孙将, 曹珊, 左铭青, 王东, 李晗
(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 随着全球 AI 产业蓬勃发展, 大模型技术对算力需求越来越高, 国内外大型科技公司正积极投建超万卡/超十万卡集群。超十万卡集群的发展受限于水电供应、建设投入等因素, 而通过高速全光网构建多集群互联的基础网络底座, 实现跨集群高效协同训练是重要的潜在解决方案。为满足跨智算集群互联超大带宽、超低时延、超高可靠需求, 提出了无损智算光传送网 (hitless intelligent computing optical transport network, HIC-OTN) 的技术架构及关键技术方案, 并基于 HIC-OTN 完成了首个 104 km 跨智算集群流水线并行 (pipeline parallelism, PP) 拉远训练现网技术试验, 探索和验证了百公里级跨集群 PP 训练的可行性。基于 800 Gbit/s HIC-OTN 互联在 52 km 和 104 km 两个智算集群场景下, HIC-OTN 完成了等同单节点训练效率 98% 以上的高效协同训练, 并实现了光网络保护倒换对训练效率的无损和无感知。

关键词: 跨集群训练; HIC-OTN; 无损保护; 超大带宽; 超低时延

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025117

Novel HIC-OTN for interconnection of cross-intelligent computing clusters

ZHANG Dechao, SUN Jiang, CAO Shan, ZUO Mingqing, WANG Dong, LI Han
China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: With the rapid development of the global AI industry, the computational power demands of large-scale models continued to grow, prompting major technology companies worldwide to actively construct ultra-large-scale clusters exceeding 10 000 or even 100 000 GPU. Limited by natural resource supply, construction investment, and other constraints, the construction of a multi-cluster interconnected fundamental network through a high-speed all-optical network is an important potential solution for achieving efficient collaborative training across clusters. To meet the ultra-large bandwidth, ultra-low latency, and ultra-high reliability requirements of intelligent computing interconnection, a hitless intelligent computing optical transport network (HIC-OTN) and its key technological solutions were proposed. Based on HIC-OTN, the first field trial of 104 km cross-cluster pipeline parallelism (PP) training had

收稿日期: 2025-03-04; 修回日期: 2025-04-15

通信作者: 张德朝, zhangdechao@chinamobile.com

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2024YFB2908305)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2024YFB2908305)



been demonstrated, verifying the feasibility of 100 km-class cross-cluster PP training. Based on the 800 Gbit/s HIC-OTN interconnection, highly efficient collaborative training was achieved in two scenarios (52 km and 104 km clusters), delivering over 98% of the single-node training efficiency. Moreover, hitless and imperceptible optical network protection switching was demonstrated, ensuring zero impact on training performance.

Key words: cross-cluster training, HIC-OTN, non-destructive protection, ultra-large bandwidth, ultra low latency

0 引言

近年来, 伴随人工智能生成内容 (artificial intelligence generated content, AIGC) 等新技术、新业务的涌现, 全球AI产业呈现出蓬勃发展的强劲态势^[1-2]。智能算力需求呈现爆炸式增长, 智算中心成为数字经济新基建。当前国内已实现超万卡单体AI集群, 以中国移动智算中心(哈尔滨)为例, 作为全球运营商最大单集群智算中心, 实现了1.8万张智算卡单集群部署, 可提供6.9 EFLOPS智能算力; 全球头部科技企业也已在尝试更大规模的超级集群, 如近期特斯拉最新发布的Grok 3大模型, 它是基于20万片英伟达(Nvidia) H100智算卡的智算超级集群训练完成的。面向多模态训练、更大参数规模的大模型技术的深入发展, 未来的模型训练及应用可能需要由超10万量级图形处理器(graphics processing unit, GPU)组成的超大计算集群来满足其算力需求。

然而, 单体智算中心集群规模的扩大, 将面临供电、空间、散热等多方面的挑战^[1,3]。一方面, 随着智算集群规模的持续扩大, 电力消耗呈指数级增长, 部分地区电力供应不足或者电力指标难以获取, 都将成为制约单体智算中心集群规模的重要因素。另一方面, 智算中心集群内设备众多, 包括服务器、存储设备、网络设备等, 需要合理的空间布局以确保设备正常运行和维护方便^[4]。在经济发达、对算力需求旺盛的地区, 存在土地资源稀缺的情况, 智算中心建设选址更为困难。若在建设初期没有预留足够的扩展空间, 后期进行扩建时, 可能面临土地获取困难、与现

有设施兼容性不足等问题, 这增加了扩建成本和难度, 从而限制集群规模的进一步扩大。

为了满足智算中心分阶段建设及资源整合的需求, 同时解决机房空间、供电限制、算力规模等问题, 跨智算集群互联成了一种潜在的新型解决方案^[4]。通过光网络将多个智算集群互联, 形成高效灵活的智算资源池。根据跨智算集群的部署情况, 主要有十公里、百公里、千公里3类互联场景, 可分层分级满足不同层次大模型训练需求。一是园区内十公里智算互联场景, 主要解决单机楼节点能力受限、超万卡组网问题; 二是园区间百公里智算互联场景, 主要解决单园区节点能力受限、超万卡到十万卡组网问题; 三是区域间千公里智算互联场景, 主要解决多个超大规模集群的互联, 实现超十万卡集群组网问题。当前十公里和百公里级智算集群互联是工业界亟须解决的场景, 千公里以上跨智算集群互联面临更高的技术挑战, 其可行性和实施方案需要更多的前沿技术探索。

本文主要研究内容如下。

(1) 根据智算训练基本原理, 深入研究了影响训练效率的关键因素, 总结分析并定位了跨智算集群光网络在闪断、故障等非理想场景下需要具备“0丢包”超高可靠无损传输特性的核心需求。

(2) 提出了面向跨智算集群互联的新型无损智算光传送网(hitless intelligent computing optical transport network, HIC-OTN)技术架构, 阐述了超大带宽、超低时延、超高可靠HIC-OTN关键技术。

(3) 通过系列技术实验揭示了在流水线并行 (pipeline parallelism, PP) 跨集群部署场景下不同传输距离、算法参数等对训练效率的影响, 以及 HIC-OTN 的无损保护性能。

1 跨智算集群互联对光网络的需求

由于模型的参数量及数据量巨大, 单卡算力无法满足训练需求, 当前主要通过模型和数据切分实现多机协同训练。其中, 数据并行 (data parallelism, DP) 通过每组设备单独存储一份完整的模型, 且每组设备针对一份独立数据进行模型训练, 训练后通过全局梯度同步 (如 All-Reduce) 更新模型。PP 将模型按层放置到不同的计算设备, 通过微批次和调度策略减少单个计算设备的显存占用和减少计算空闲时间占比, 从而实现超大规模模型训练。张量并行 (tensor parallelism, TP) 在单机内将张量沿特定维度 (如行/列) 拆分, 将原本庞大的计算任务分解成多个小任务协同计算。专家并行 (expert parallelism, EP) 将大模型拆分成多个小模型, 每轮迭代根据样本决定激活一部分专家用于计算, 达到了节省计算资源的效果, 该并行方式需要多对多通信, 传输的数据量大。

在以上并行模式中, TP 和 EP 需要在集群中进行大量的集合通信操作, 传输的数据量大, 带宽占用高, 对网络时延敏感性强, 主要部署于单机或单数据中心内。DP 对带宽需求大, 通信时延基本可通过优化并行算法实现掩盖, 对算效影响可控; PP 通信时延可通过优化并行算法部分覆盖, 通信时延对算效的影响需重点考虑。综合考虑以上各并行模型的工作特点, 通过合理设计网络及通信时延隐藏等技术优化, DP 和 PP 可用于跨智算集群的分布式训练。相关理论仿真和实验表明, DP 训练跨集群拉远的算效劣化率基本随拉远距离呈线性关系, 拉远百公里时劣化率为 3.75%^[5]。相比 DP, PP 对基础网络在时延、可靠

性等方面的挑战更大, 本文主要聚焦于研究可满足 PP 并行的跨智算集群互联光网络。

基于 PP 并行模式的跨智算集群训练效率受单芯片带宽、算卡规模、协同效率、可用性等因素影响, 对光网络在容量、时延、可靠性方面提出了新需求。

(1) 在容量方面, 互联带宽主要受端口速率、单纤容量两方面影响。以万卡集群互联为例, 32:1 收敛的情况下互联带宽也高达 64 Tbit/s, 单纤容量需进一步提升。当前交换机的端口速率为 400 Gbit/s, 且正在走向 800 Gbit/s, 甚至 1.6 Tbit/s, 因此, 线路速率需要进一步提升到超 800 Gbit/s。

(2) 在时延方面, 时延与传输距离、网络质量有关。在单智算中心内, 时延一般是 μs 级, 但在跨智算集群场景下, 时延将大幅增加至 ms 级, 对计算和通信的掩盖带来巨大挑战。为了降低跨智算集群传输时延的影响, 光网络需要稳定的低时延能力。

(3) 在可靠性方面, 从单智算集群训练到多智算集群训练, 不可控因素增多、网络故障域增大, 网络的丢包、闪断、故障等都会影响集群可用性, 给算力效率 (算效) 带来不良影响, 甚至可能导致训练中断。与智算中心内丢包相比, 长距丢包将带来千倍的重传时延, 光网络需要具备无损机制以保障不丢包。

2 HIC-OTN 关键技术

面向跨智算集群互联对光网络的新需求, 本文提出 HIC-OTN, 围绕超 400 Gbit/s 光传输、低时延 OTN 设备新架构及 BIT 封装、无损保护等关键技术, 从超大带宽、超低时延、超高可靠三方面构建面向智算中心的新型 OTN 技术体系。

2.1 HIC-OTN——超大带宽光传输

为满足人工智能基础大模型训练带来的跨智算集群巨大数据传输带宽需求, 当前 400 Gbit/s 作为继 100 Gbit/s 后十年一代的关键代际性技



术^[6]，是构建超高速、超大容量HIC-OTN的坚实底座。2021年以前，工业界以电域“延长线”技术为攻关主线，采用16正交幅度调制（quadrature amplitude modulation, QAM）或16概率整形QAM（QAM with probabilistic constellation shaping, QAM-PCS）高阶调制格式实现100 Gbit/s向400 Gbit/s的速率跨越^[7-8]。然而，高阶码型存在抗噪声及抗光纤非线性损伤能力不足的问题，传输性能受限。为此，工业界在2021年末由电域转向光域寻求技术突破，基于正交相移键控（quadrature phase shift keying, QPSK）低阶调制、130 Gbaud超高速器件、C6T+L6T宽谱的技术体系逐步成了400 Gbit/s新型全光网的主流技术路线^[9]。同环境对比试验表明，400 Gbit/s QPSK相对400 Gbit/s 16QAM-PCS整体性能可提升2 dB、传输距离提升超50%。基于400 Gbit/s QPSK技术路线，工业界已创6 028 km现网最长距传输^[10]、7 000 km实验室极限距传输^[11]、现网经典配置下1 673 km传输等多项400 Gbit/s长距传输纪录，全面检验了400 Gbit/s QPSK的技术先进性及规模部署能力。2024年，中国移动完成全球首个400 Gbit/s QPSK全光骨干网建设并投入运营。

面向HIC-OTN的百公里级应用需求，共享400 Gbit/s QPSK技术及产业可快速催化数据中心互联等大容量、中短距场景由400 Gbit/s向800 Gbit/s演进，包括130 Gbaud相干光模块、C6T+L6T宽谱光层基础设施、基于填充波和C+L联动放大等方案的受激拉曼散射均衡技术。试验结果表明，在纯EDFA放大下，基于22 dB/跨段衰耗G.652.D光纤链路可实现880 km 80×800 Gbit/s（130 Gbaud 16QAM-PCS）信号极限传输^[12]，如考虑现网应用所需的5 dB光信噪比余量^[13]，仍可有效覆盖百公里级传输场景需求。

太比特级全光网有望成为后400 Gbit/s时代的下一个重大代际技术，目前已基本明确存在三大核心技术挑战。

（1）技术路线不明确，太比特级全光网技术路线面临光纤、速率、放大、码型等多维度组合，需要尽快研究明确。

（2）系统频谱需拓展，太比特系统频宽需至少扩展至24 THz，激光器、光放大器等有源器件面临严峻挑战。

（3）传输介质待变革，面向太比特多波段传输需求，超低损G.654E光纤需克服截止波长等问题。

400 Gbit/s与太比特级光通信系统频谱规划对比如图1所示。超宽带太比特光传输技术作为产学研界的重点研究方向已取得系列技术突破，例如，日本NICT公司报道了基于OESCLU波段、总容量402 Tbit/s的光传输纪录，传输距离50 km，是当前基于单模单芯光纤的最大容量^[14]；中国移动已实现305 km 96 Tbit/s的单波1.2 Tbit/s现网最大传输容量纪录^[15]，以及跨18.7 THz S+C+L波段214 Tbit/s@150 km的单波太比特最大传输容量纪录^[16]；中国电信也报道了总容量128.7 Tbit/s的75 km多波段光传输试验^[17]。这些研究表明，当下太比特级光传输原型系统在速率和容量方面已有显著进展，但传输距离较超千公里骨干网应用还存在显著差距，仍需进一步攻关超200 Gbaud光管芯等核心组件。

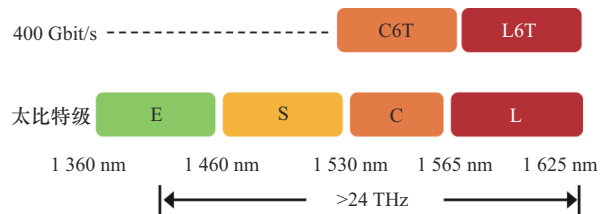


图1 400 Gbit/s与太比特级光通信系统频谱规划对比

2.2 HIC-OTN——超低时延光传输

光传输时延构成示意图如图2所示。光传输时延主要由传输设备时延和光纤线路时延两部分组成，其中设备时延主要包括交换时延和业务映射时延。

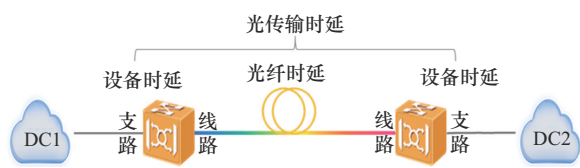


图2 光传输时延构成示意图

围绕光传输时延的主要构成，HIC-OTN从交换架构、B1T协议两方面进行了时延的优化。

(1) 交换架构优化：为匹配算力互联超100 Gbit/s大颗粒为主的业务特征，将传统“支路-交叉-线路”三级交换架构创新为“支路-线路”两级交叉架构，支路和线路单板直接通过高速背板互连，以实现业务的超低时延传输。OTN交换架构示意图如图3所示。新型HIC-OTN交换架构既继承了传统OTN支线路灵活演进、按需扩容、时延稳定等优势，又大幅降低了设备时延。

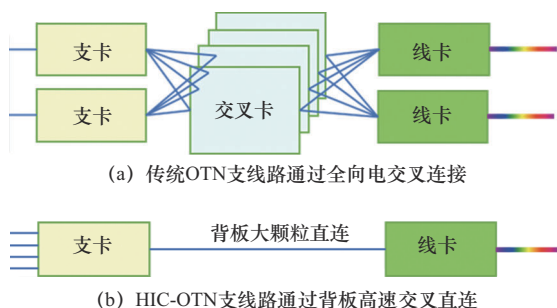


图3 OTN交换架构示意图

(2) B1T协议优化：中国移动联合工业界面向B1T线路速率的骨干网、数据中心互联等应用推动了ITU-T标准立项，创新性提出超大带宽多级通道层、双速率接口归一、简洁映射复接、面向以太网优化新容器等核心技术机制。和传统的OTN映射方式相比，B1T协议面向主流大颗粒以太业务（100 Gbit/s至1.6 Tbit/s）的超低时延高效承载，更能匹配智算互联新场景需求，由传统小颗粒逐级映射扩展为大时隙高效复接，通过简化映射层次降低了映射时延。

2.3 面向HIC-OTN的超高可靠光传输

为避免数据传输中断影响训练效率，甚至引

发大模型训练回退，跨智算集群互联光网络需具备“0丢包”的无损传输特性，本节主要讨论超高可靠无损传输的两大关键核心技术：同缆同沟检测、无损保护倒换。

在智算分布式训练场景下，同缆同沟的主备路径可能同时发生故障，导致精心设计的保护技术成为“假保护”，进而出现业务中断的严重后果。精确的主备光纤路径检测可避免同缆同沟的光链路相互备份，尽可能降低主备用传输路径因外部干扰而断纤、断缆。针对基于集成学习的光纤同缆同沟在线识别技术方案，工业界已在现网试验中实现超95%的同路由识别准确率^[18]，并采用多模态振动分析技术进一步构建了部分同缆/部分同沟光纤识别定位能力^[19]，已在现网试点中验证实现了米级定位精度。

在确定主备用路径后，HIC-OTN还需无损的主备路径保护倒换技术以确保主备路径切换时不会由于误码或丢包影响训练效果。当下广泛使用的光线路保护（optical line protection, OLP）或光复用段保护（optical multiplex section protection, OMSP）等保护倒换方案均存在不超过50 ms的倒换时间^[20]，该时段内发送的数据包均无法被对端有效接收。HIC-OTN具备无损保护特性，通过重构HIC-OTN芯片转发和存储架构，采用主路径和备路径同时传输数据流，在接收端同时接收主备路径数据并进行识别、比对、保序转发，实现“0丢包”。面向HIC-OTN的无损倒换技术示意图如图4所示，发送端同时主路径和备路径发送数据，接收端同时接收主、备路径数据，当接收端识别到主路径数据出现丢包或误码时，HIC-OTN通过比对确定数据丢失或故障时间点，接续转发备路径接收到的数据，实现由传统OTN 50 ms倒换到“0丢包”保护的绩效提升，避免光路故障导致的数据重传等降低训练效率。需要注意的是，由于主备路径的传输线路不一致，因此各路径码流到达接收端的时刻存在先后，HIC-OTN



采用存储并保序机制，可有效保障主、备路径切换点的数据包相对位置与单路径传输时一致。

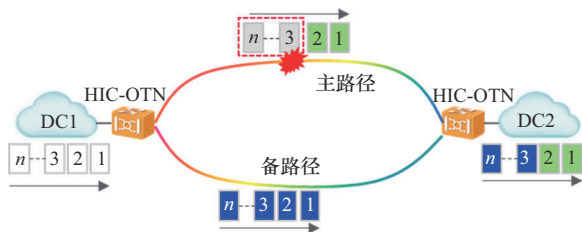


图4 面向HIC-OTN的无损倒换技术示意图

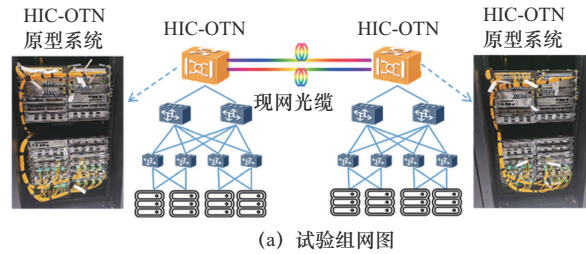
3 HIC-OTN 技术试验

面向跨智算集群训练，搭建了基于 OTN 互联的跨智算集群训练实验室和现网试验环境，详细研究和论证了在不同传输距离、算法参数、网络故障等场景下 PP 跨集群部署对开源大模型训练效率的影响，并完成了 HIC-OTN 的无损技术试验，实现了故障引起保护倒换时的训练效率无影响。

相比 DP，PP 具有通信频次高、通信时间不可全部掩盖等更高难度，其拉远可行性曾在工业界存在较大分歧。近期，在中国移动智算中心（哈尔滨）完成了首个 OTN 承载百公里级 PP 跨集群智算训练现网试验。基于 800 Gbit/s HIC-OTN 互联的 2 个智算集群上运行千亿级参数的大型基础语言模型，在 PP 跨相距 52 km 和 104 km 的 2 个智算集群部署场景下，实现等同单节点训练效率 98% 以上的高效协同训练。

百公里级 PP 跨智算集群现网试验如图 5 所示。试验组网图如图 5 (a) 所示，在现网试验中搭建了 64 卡、4 个 PP 域的双智算集群（每个集群 32 张卡、2 个 PP 域），采用 800 Gbit/s HIC-OTN 实现双集群互联，互联带宽为 2×800 Gbit/s。为测试跨智算集群对训练效率的影响，本试验部署了工业界开源的大模型 Llama2-70B，研究并验证了不同传输距离、单次迭代中用于训练的样本数等参数下模型算效劣化情况。其中，在相同训练目标下，跨智算集群训练用时为 T_1 ，单节点训练用时为 T_0 ，

则训练效率为 T_0/T_1 ，跨智算集群训练效率劣化率为 $(100\% - \text{训练效率})$ 。算效测试结果如图 5 (b) 所示，在 104 km 传输距离场景下，均实现了等同单节点训练效率 98% 以上的高效协同训练。



(a) 试验组网图

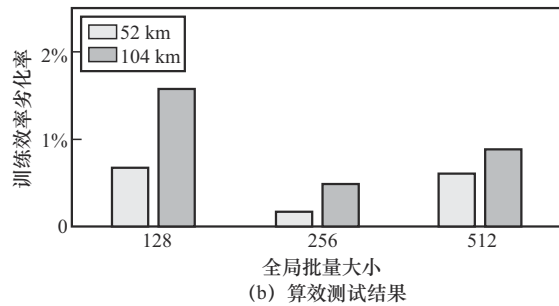


图5 百公里级PP跨智算集群现网试验

在 OTN 可靠性对算效影响方面，通过在网络侧构造网络断纤、链路误码等故障，研究并验证了不同故障情况对模型训练的影响。传统保护倒换如图 6 (a) 所示，在基于传统 OTN 互联的跨智算集群场景下，当出现网络断纤导致的 50 ms 保护切换时，观测到 3 个连续迭代训练周期受到影响，由原始的 7s 左右，分别加长为 17.72 s、12.47 s、10.10 s，即在多个迭代周期内，训练效率均下降了 45% 以上。当网络倒换时间变得更长时，甚至会出现模型训练中断的现象。在模拟链路误码测试中发现，OTN 线路测出现 10^{-10} 量级左右误码时，会导致模型训练的算效产生较大波动，而当误码增大到 10^{-8} 量级时，模型训练会概率性出现中断。

在此基础上，完成 800 Gbit/s HIC-OTN 无损保护原型系统现网试验，以达到单次保护倒换无丢包、训练对故障无感知的效果。HIC-OTN 无损保护对训练效率的影响测试如图 6 (b) 所示，在工作路径从主路径倒换到备用路径、从备用路径

倒换到主用路径情况下, 单次迭代用时均仅在自然范围内波动, 即故障没有影响到模型训练。

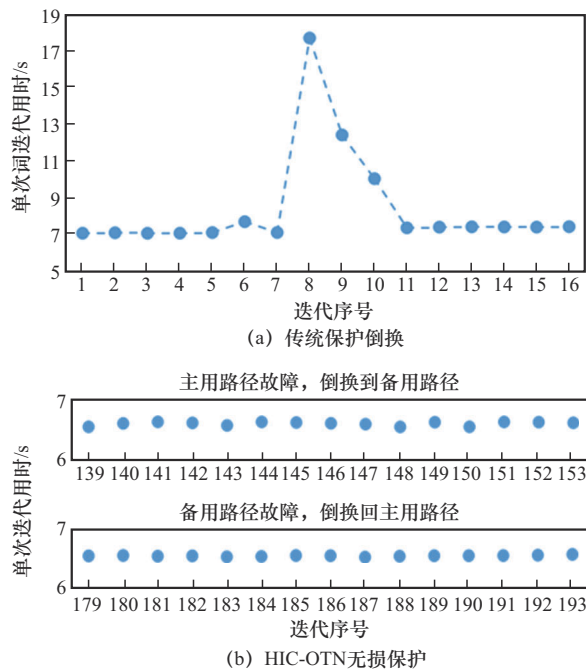


图6 OTN保护倒换对训练效率的影响测试结果

4 结束语

面向构建超十万卡智算集群, 跨智算集群训练对光网络在带宽、时延、可靠性等方面提出了更高要求。对此, 本文提出了具备超大带宽、超低时延、超高可靠的HIC-OTN技术架构及关键技术, 并完成了百公里级PP跨集群智算训练现网试验。基于800 Gbit/s HIC-OTN无损保护原型系统, 首次完成了104 km跨智算集群PP训练现网技术试验, 实现了等同单节点训练效率98%以上的高效协同训练, 并验证了HIC-OTN无损倒换技术方案。该系统可实现传输链路断纤、误码触发光层保护倒换时训练效率的无损和无感知。

参考文献:

[1] DISKIN M, BUKHTIYAROV A, RYABININ M, et al. Distributed deep learning in open collaborations[C]//Proceedings of the 35th International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: Curran Associates Inc., 2021:

7879-7897.
 [2] 中国软件评测中心. 人工智能大语言模型技术发展研究报告(2024年)[R]. 2024.
 China Software Evaluation Center. Research report on the development of artificial intelligence large language model technology (2024) [R]. 2024.
 [3] 丁宏庆, 张鹏飞, 牛红韦华, 等. 云化的智算中心万卡集群创新与实践[J]. 电信科学, 2024, 40(12): 125-135.
 DING H Q, ZHANG P F, NIU H W H, et al. Cloud-based intelligent computing center ten-thousand card cluster innovation and practice[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(12): 125-135.
 [4] YUAN B H, HE Y J, DAVIS J, et al. Decentralized training of foundation models in heterogeneous environments[C]//Proceedings of the 36th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2022), New York: Curran Associates, 2024: 25464 - 25477.
 [5] SUN J, WANG D, QI B, et al. Decentralized training over 100 km based on optical transport network for artificial intelligence[C]//Proceedings of the ECOC 2024; 50th European Conference on Optical Communication. Piscataway: IEEE Press, 2024: 1459-1462.
 [6] CAMERA M, OLSSON B E, BRUNO G. Beyond 100 Gbit/s: system implications towards 400G and 1T[C]//Proceedings of the 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-15.
 [7] WANG D, LI Y B, ZHANG D C, et al. Ultra-low-loss and large-effective-area fiber for 100 Gbit/s and beyond 100 Gbit/s coherent long-haul terrestrial transmission systems[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 17162.
 [8] LORENCES-RIESGO A, BENDIMERAD D, LE-TRUNG K, et al. PCS-16QAM vs QPSK: what is the best choice for next-generation long-haul 400G? [C]//Proceedings of the 2021 European Conference on Optical Communication (ECOC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-4.
 [9] ZUO M Q, YAN B L, GE D W, et al. 32-λ × 400 Gb/s single-carrier 120-GBaud QPSK coherent transmission over 3075-km G. 652. D fiber link using OE-MCM prototype under field-deployed configuration[C]//Proceedings of the 2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-3.
 [10] ZUO M, WANG D, GE D, et al. Field trial of 40-λ×400-Gb/s single-carrier 138-GBd DP-QPSK real-time 6028 km transmission for computility network[C]//Opto-Electronics and Communications Conference. Piscataway: IEEE press, 2024: 1-3.
 [11] GE D W, ZUO M Q, LIU H B, et al. Fully-loaded 80× 400 Gb/s DP-QPSK transmission with commercial 12-THz C6T L6T ED-FAs over record distance of 7000 km[C]//Proceedings of the 2023 Asia Communications and Photonics Conference/2023 International Photonics and Optoelectronics Meetings (ACP/



- POEM). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-4.
- [12] ZUO M Q, ZHANG D C, GE D W, et al. Experimental demonstration of real-time fully-loaded 80×80 Gb/s transmission over 1253-km G.652.D fiber with commercial 12-THz C-L-band EDFA and integrated WSS[C]//Proceedings of the 2024 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-3.
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部. 城域 $N \times 400$ Gbit/s 光波分复用: YD/T 3964-2021[S]. 2021.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Technical requirements for metro $N \times 400$ Gbit/s optical wavelength division multiplexing (WDM) system: YD/T 3964-2021[S]. 2021.
- [14] PUTTNAM B J, LUIS R S, PHILLIPS I, et al. 402 Tb/s GMI data-rate OESCLU-band transmission[C]//Proceedings of the 2024 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-3.
- [15] ZUO M, ZHANG D, WANG D, et al. First field demonstration of real-time sub-100-Tb/s transmission with net 1.2-Tb/s channels over 12-THz-wide super C+L band along 305-km G.652.D fiber[C]// Proceedings of the 2025 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-3.
- [16] ZHANG Y, ZUO M, QIU Q, et al. 214-Tb/s transmission over 2×75 -km in the S+C+L band with >1 -Tb/s/ λ signals using only doped fiber amplifiers [C]//Proceedings of the 2025 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-3.
- [17] ZHANG A X, LIU Y Y, YAN B L, et al. Record real-time 128.7 Tbit/s DWDM transmission over 75km G.654.D fiber using S+C+L 17THz bandwidth lumped doped fiber amplifiers[C]// Proceedings of the 2024 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-4.
- [18] LI Y B, ZHANG D C, WANG Z W, et al. Field trial of concurrent co-cable and co-trench optical fiber online identification based on ensemble learning[J]. Optics Express, 2023, 31(26): 42850-42865.
- [19] LIU Y, WANG D, LI Y, et al. Highly-precise fiber co-route segment location with multi-modal vibration analysis and field demonstration for intelligent optical network[C]//Proceedings of the 2025 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-3.
- [20] 连阳. OTN 中保护倒换机制的研究[J]. 光通信技术, 2009, 33(1): 16-18.
LIAN Y. Research on protect switching of OTN[J]. Optical Communication Technology, 2009, 33(1): 16-18.

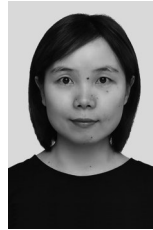
[作者简介]



张德朝 (1979-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院基础网络技术研究所副所长、正高级工程师, 主要从事 SPN/PTN、OTN/WDM、前传 open-WDM、PON 和同步等光传输与接入网领域的技术研究和标准化工作。



孙将 (1987-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院工程师, 主要从事 OTN/WDM、前传 open-WDM 的研究工作。



曹珊 (1990-), 女, 博士, 中国移动通信有限公司研究院项目经理, 主要从事高速大容量光通信技术及 BIT 电层技术的研究工作。



左铭青 (1995-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院工程师, 主要从事高速大容量光通信技术研究工作。



王东 (1986-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院技术经理、主任研究员、高级工程师, 主要从事 400 Gbit/s/超 400 Gbit/s OTN/WDM、智算无损 OTN、前传 open-WDM 领域研究和标准化工作。



李晗 (1975-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院基础网络技术研究所所长、教授级高级工程师, 主要从事 SPN/PTN、前传 open-WDM、OTN/WDM、PON 和同步等光通信领域研究工作。