



专题：细颗粒光传送网

fgOTN 应用于智算中心互联研究综述

史庆娜^{1,2}, 王佳雪^{1,2}, 李诗语^{1,2}, 蔡梦茹^{1,2}, 刘晓东^{1,2}, 尹珊^{1,2}, 黄善国^{1,2}

(1. 北京邮电大学信息光子学与光通信全国重点实验室, 北京 100876;

2. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

摘要: 随着智算中心数据流量和业务需求的快速增长, 高效、灵活的网络解决方案成为关键。细颗粒光传送网 (fine grain optical transport network, fgOTN) 作为同步数字体系 (synchronous digital hierarchy, SDH) 技术的接续与光传送网 (optical transport network, OTN) 技术的扩展, 被应用于智算中心互联, 以满足其灵活调度、高效传输、严格安全隔离和低时延等多重需求。首先, 介绍了 fgOTN 的基本概念、技术架构及应用场景, 随后, 阐述了智算中心的相关概念、体系架构、关键技术及应用场景。在此基础上, 重点探讨了 fgOTN 在智算中心互联中的应用, 旨在促进智算中心间数据传输的高效、可靠。最后, 论述了 fgOTN 应用于智算中心互联的研究方向和发展趋势。

关键词: 细颗粒光传送网; 智算中心互联; 应用场景

中图分类号: TN914

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025022

Review of the application of fgOTN in the interconnection of artificial intelligence data centers

SHI Qingna^{1,2}, WANG Jiaxue^{1,2}, LI Shiyu^{1,2}, CAI Mengru^{1,2},

LIU Xiaodong^{1,2}, YIN Shan^{1,2}, HUANG Shanguo^{1,2}

1. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: With the rapid growth of data traffic and service requirements in artificial intelligence data centers, efficient and flexible network solutions have become critical. The fine grain optical transport network (fgOTN), which serves as a continuation of synchronous digital hierarchy (SDH) technology and an extension of optical transport network (OTN) technology, is applied in the interconnection of artificial intelligence data centers to meet their multiple requirements for flexible scheduling, efficient transmission, strict security isolation, and low latency. Firstly, the basic concepts, technical architecture, and application scenarios of fgOTN were introduced. Subsequently, the related concepts,

收稿日期: 2024-11-30; 修回日期: 2024-12-31

通信作者: 尹珊, yinshan@bupt.edu.cn

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (No.62125103); 国家自然科学基金面上项目 (No.62371061); 北京市自然科学基金资助项目 (No.4232008)

Foundation Items: The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No.62125103), The National Natural Science Foundation of China (No.62371061), Beijing Natural Science Foundation of China (No.4232008)

architectures, key technologies, and application scenarios of artificial intelligence data centers were elaborated. Based on these foundations, the application of fgOTN in interconnection of artificial intelligence data centers was discussed in detail, aiming to promote efficient and reliable data transmission between artificial intelligence data centers. Finally, the research directions and development trends were discussed.

Key words: fgOTN, interconnection of artificial intelligence data center, application scenario

0 引言

随着信息技术的快速发展, 通信网络对业务承载能力的需求日益提高^[1]。同步数字体系(synchronous digital hierarchy, SDH)以其高可靠、硬隔离、稳定低时延等特点, 在电力、铁路等行业生产控制类关键业务的承载中得到了广泛应用^[2]。然而, SDH设备逐步退网及业务需求的多样化, 急需新的技术来承接其业务。光传送网(optical transport network, OTN)技术虽然具备大容量、长距离传输等优势, 但在处理1 Gbit/s以下小颗粒业务时存在承载效率问题^[3]。在此背景下, 细颗粒光传送网(fine grain optical transport network, fgOTN)应运而生, 成为SDH技术的接续与OTN技术的扩展。

细颗粒光传送网主要定位于1 Gbit/s以下小颗粒高品质业务的承载。fgOTN与OTN同源, 都采用固定时隙映射、高低阶复用机制以及开销管理等方式。作为SDH的接续, fgOTN在小颗粒业务接入方面具备天然的优势。它继承了OTN和SDH的优势, 采用了以10 Mbit/s带宽为单位的固定时隙分配设计, 沿用并优化了经典的OTN帧结构, 以高效承载小颗粒业务。

智算中心, 全称为人工智能(artificial intelligence, AI)计算中心, 是以人工智能计算任务为主的数据中心, 为人工智能应用提供所需的算力、数据和算法支持^[4]。随着人工智能、大数据、云计算等新兴技术的快速发展, 数据量呈爆炸式增长, 对数据处理能力的需求也日益旺盛^[5]。智算中心作为数据处理的核心枢纽, 其互联性直接影响着数据流通效率和计算资源的利用率^[6]。传

统的网络架构已难以满足智算中心之间海量数据高速传输的需求, 因此, 探索高效、可靠的智算中心互联技术成为推动数字经济发展的重点课题。

fgOTN技术以其灵活、高效、低时延等特点, 为智算中心互联提供了新的解决方案。该技术通过将光网络划分为更小的颗粒度, 实现了对网络资源的精细化管理, 可以根据业务需求动态分配带宽, 从而有效提升网络资源的利用率。在智算中心互联中, fgOTN技术能够提供基于刚性硬管道的安全硬隔离解决方案, 确保数据的安全性和隐私性。同时, fgOTN技术能够满足智算中心之间海量数据高速传输的需求, 并确保数据传输的低时延和高可靠性。此外, fgOTN技术在调度容量、连接数、时钟透传等方面实现了重大升级, 能够满足智算中心对高带宽、低时延和稳定可靠网络连接的需求。随着人工智能技术的不断发展和智算中心建设的不断推进, fgOTN技术有望在智算中心互联领域发挥更加重要的作用, 推动该领域向更高层次迈进。

本文深入分析了fgOTN的基本概念、技术架构及应用场景, 并阐述了智算中心的概念、体系架构、关键技术及应用场景。结合智算中心互联的特定需求, 本文将重点探讨fgOTN如何应用于智算中心互联, 促进智算中心之间实现高效、可靠的数据传输, 为fgOTN技术的进一步研究、推广和应用提供有价值的参考。

1 fgOTN概述

1.1 fgOTN的概念

自1988年国际电信联盟电信标准化部门(International Telecommunications Union Telecom-



munications Standardization Sector, ITU-T) 发布首个SDH标准G.707以来, SDH技术凭借其高可靠性、物理隔离以及稳定低时延等特性, 在过去的三十多年间被广泛应用于多个领域, 且大量SDH设备至今仍在现网中运行。然而, 这些设备当前正面临着退市风险、维护困难以及产业快速迭代等诸多挑战。因此, 业界普遍达成共识, 认为应将SDH网络承载的业务逐步迁移至OTN, 以继续通过提供小颗粒(通常小于1 Gbit/s)的时分多路复用(time division multiplexing, TDM)连接来承载SDH业务。在此背景之下, ITU-T在OTN标准G.709的基础之上, 进一步制定了fgOTN的相关标准。2022年9月至2023年11月期间, 国内外标准专家就fgOTN的技术方案和关键技术达成了全面共识, 形成了系列化的fgOTN标准, 包括fgOTN总体、接口、架构、设备、保护、时钟以及管控等全方位的定义, fgOTN的ITU-T标准集见表1^[7]。2023年11月的ITU-T SG15日内瓦全会上, 成功推动了fgOTN的第一批4个核心标准: G.709.20 (fgOTN概述)^[8], G.709规范性附录M和N (fgOTN接口)^[9], G.709规范性附录O^[10] (fgOTN无损带宽调整^[11]), 以及G.872规范性附录A (fgOTN架构)^[12]。

表1 fgOTN的ITU-T标准集^[7]

fgOTN标准系列	ITU-T标准	内容
fgOTN总体	G.709.20	应用场景和总体技术要求
fgOTN接口	G.709 Annex	路径层fgODUflex的技术定义
fgOTN架构	G.872 Annex	fgOTN架构定义
fgOTN设备	G.798 Annex	fgOTN设备功能模型的定义
fgOTN保护	G.808.4	fgOTN保护倒换协议的定义
fgOTN同步	G.8251 Annex	fgOTN时钟模型和参数的定义
fgOTN管理	G.874/G.875 Annex	fgOTN信息模型的定义

fgOTN是在OTN体系框架下, 为1 Gbit/s以下小颗粒高品质业务承载提供高可靠性、确定性低时延和高效率的传输通道。fgOTN弥补了小颗

粒业务的短板, 完美继承了SDH和OTN的高可靠、确定性时延等特点。它采用了以10 Mbit/s带宽为单位的固定时隙分配设计, 沿用并优化了经典的OTN帧结构, 以高效承载小颗粒业务, 支持多种可变比特率(variable bit rate, VBR)和恒定比特率(constant bit rate, CBR)业务, 可广泛应用于运营商政企专线以及电力、交通等行业专网。fgOTN是继SDH之后的下一代TDM技术, 它是一种具有完全TDM特性的原生技术, 能够为高质量的连接提供低时延、低时延抖动和零丢包的保障。在企业生产系统高品质接入算力网络, 以及未来智慧家庭扩展现实(extended reality, XR)新业务高品质接入算力网络等需求场景下, fgOTN会发挥更重要的作用。

华为全球光峰会(Global Optical Summit, GOS) 2024期间, 华为技术有限公司发布了《fgOTN(细颗粒光传送网)技术白皮书》^[13]。该白皮书详细阐述了fgOTN的应用场景及需求、标准系列、关键技术以及典型行业应用建议, 提出了基于fgOTN标准的行业目标网架构, 并对未来各行各业光通信应用fgOTN的前景进行了展望。fgOTN不仅支持当前的生产网络业务, 还能灵活扩展以适应未来的数字化和智能化需求。2023年6月13日, 中国移动通信集团有限公司发布的《“九州”算力光网目标网架构白皮书》中简单介绍了fgOTN技术的定义、定位、应用场景和优势等^[14]。作为“九州”算力光网的重要组成部分, fgOTN技术将发挥其在小颗粒业务承载方面的独特优势, 实现更加高效、稳定、安全的业务传输, 为算力光网提供坚实的底层支撑。

随着信息技术的不断发展和业务需求的多样化, fgOTN不仅有望在电力、交通、政企网络等领域发挥更加重要的作用, 而且其低时延、高可靠性和灵活性的特点也使其成为智算中心互联的理想选择, 推动通信网络向更高层次迈进。

1.2 fgOTN的技术架构

(1) fgOTN复用层次结构

在业务复用结构上，fgOTN通过定义细颗粒光数据单元（fine grain optical data unit, fgODU）层网络，实现了高安全可靠性以及基于TDM的传送方式。这种网络结构使得fgOTN能够高效承载E1、VC-n、STM-1等小颗粒业务，满足运营商政企专线以及电力、交通等特定行业专网的需求。fgOTN复用层次结构如图1所示，图1详细展示了fgODUflex中包含的信息间的关系^[9]。fgOTN支持两级fgODUflex串联连接监视，将生成的fgODUflex信号映射到光净荷单元（optical payload unit, OPU）的一个或多个细颗粒支路时隙中。这种信息结构的设计使得fgOTN能够灵活调整带宽，支持从Mbit/s级到Gbit/s级的任意带宽调整。

(2) fgOTN的帧结构

fgOTN的帧结构在传统OTN帧结构的基础上进行了沿用和优化，并与OTN帧结构大小一致。在实际应用中，fgOTN帧结构已经得到了广泛的验证和测试。例如，2023年12月，由国网辽宁省电力有限公司主导的全球首套基于fgOTN标准的通信设备挂网测试成功，测试期间各类业务运

行良好，各项指标均满足电力业务各项标准要求，这充分证明了fgOTN帧结构在实际应用中的可靠性和高效性。

(3) fgOTN业务时钟透传

fgOTN提出了创新的时钟透传机制，该机制采用逐点时钟相位偏差累计的方式，在末端节点进行统一处理。这种设计避免了传统OTN逐跳时钟恢复方案在面对海量业务时所带来的高处理代价问题。通过fgGMP映射以及时钟相位累积机制，fgOTN能够提供针对CBR业务的高性能时钟透传能力。

(4) fgOTN的DPS机制

fgOTN支持设备级保护倒换（device protection switching, DPS）。fgOTN的DPS机制是一种用于在网络出现故障时自动切换至备用路径的技术。它能够在检测到主路径上的故障后，迅速将业务流量切换到备用路径上，从而确保业务的连续性和可靠性。fgOTN通过设备外挂的低阶交叉板，实现从主备两块低阶交叉板上完成收发选收，并借助高阶交叉控制倒换，实现DPS。

(5) fgOTN无损带宽调整

fgOTN技术具备无损带宽调整能力。在调整带宽时，fgOTN能够依据业务的实际大小，灵活地配置容器的大小，进而确保带宽调整过程中业

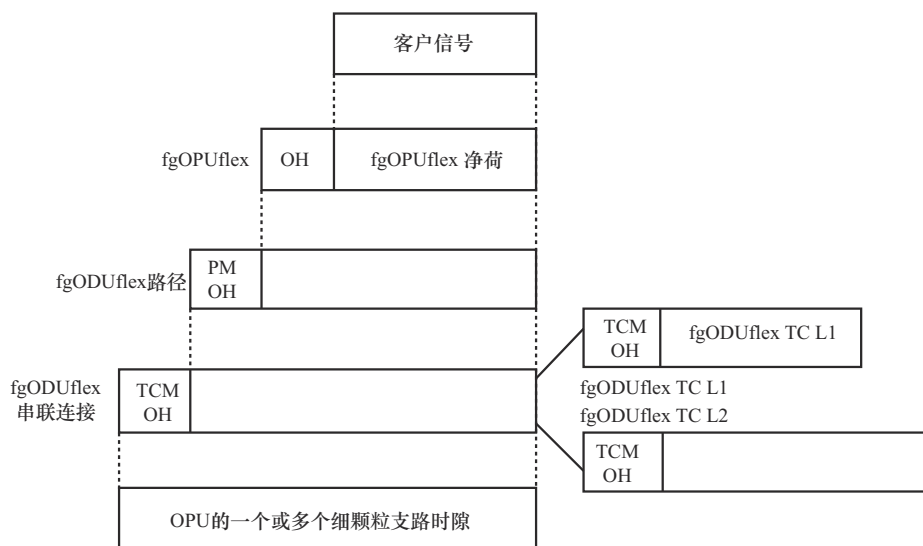


图1 fgOTN复用层次结构



务不中断。若当前带宽不能满足用户需求，用户可以根据实际需求，适当地增加带宽分配，以适应业务的实际规模。当带宽过剩时，用户可以选择将带宽调小，以实现成本的有效节约。该机制由边缘触发，先逐段资源预留，然后所有节点进一步调整带宽，实现通道层 fgODUflex 速率和各段服务层时隙数量的同步完成。

1.3 fgOTN的应用场景

fgOTN 技术是在 OTN 框架下，针对 1 Gbit/s 以下小颗粒高品质业务承载需求而设计的。它继承了 OTN 和 SDH 的优势，并采用了以 10 Mbit/s 带宽为单位的固定时隙分配设计，实现了对小颗粒业务的高效承载。该技术可广泛应用于电力、交通等行业的组网专线以及政企网络中，满足这些场景对高品质、小颗粒业务承载的需求。

(1) 电力行业

在电力行业中，fgOTN 能够高效承载电力生产业务，如继电保护、安稳业务和调度业务等，为智能电网的变电站数字化、调度自动化等提供坚实支撑。电力专线的业务类型繁多，带宽需求主要集中在 2 Mbit/s 至 1 Gbit/s 的范围内，各类电力业务之间存在严格的安全分区。fgOTN 主要定位于承载 1 Gbit/s 以下的小颗粒高品质业务，能够满足这些业务的需求，确保可靠性和安全性。华为技术有限公司在 2024 年 10 月发布的《电力 fgOTN 技术白皮书》深入介绍了 fgOTN 技术及其在电力行业的应用，旨在促进电力行业的数字化与智能化转型^[15]。fgOTN 技术以其独特的优势和广泛的应用前景，将成为未来电力行业数字化转型和智能化升级的重要支撑。

(2) 交通行业

在交通行业中，fgOTN 技术主要应用于铁路、公路等交通系统的通信网络中，以满足交通系统对通信网络的高可靠性和实时性要求。铁路系统需要为车站、调度中心、客票中心及列车控制等各子系统提供安全可靠的专线承载。fgOTN

技术以其高可靠性和带宽独占的硬管道特性，成为铁路承载网的重要选择。随着智能交通系统的发展，公路通信系统需要承载越来越多的业务类型，包括视频监控、交通信号控制、车辆调度等，fgOTN 技术可以实现这些业务的快速部署和灵活调整，满足智能交通系统对通信网络的高要求。

(3) 政务行业

政府服务呈现明显的数字化趋势，当前政务业务已经普遍云化。fgOTN 可以提供灵活的小颗粒带宽、业务硬隔离和高可靠性的链路保护，显著提升政务服务的效率和安全性。它能够实现政务数据的统一共享，增强各部门之间的协调与管理能力，同时降低运营成本，满足政企精品专线的需求，为政府数字化转型提供强有力的网络基础。

2 智算中心概述

2.1 智算中心的概念

算力是数字经济时代的关键生产力，已成为推动经济增长的重要动力源泉。随着元宇宙^[16]等新兴应用的蓬勃发展，语言处理、计算机视觉^[17]、自动驾驶^[18]等领域依赖于强大的数据计算能力而取得了显著进展。与传统云计算和超算中心相比，智算中心更为高效地满足了日益增长的人工智能算力需求。预计未来 80% 的算力资源将由智能计算中心提供，以支撑各类应用场景的发展。

智算中心，是面向人工智能应用需求而设计的新型基础设施，它基于先进的人工智能理论和计算架构，整合了算力、数据和算法服务，通过算力的生产、聚合、调度与高效释放，为 AI 模型的训练、推理及数据密集型计算提供支持^[19]。智算中心专注于满足大规模机器学习、自然语言处理、计算机视觉等领域的高性能计算需求，具有超大规模算力、分布式存储及高速网络能力，在推动 AI 产业化、产业智能化和智能治理生态构建方面具有重要作用。

2.2 智算中心的体系架构

2.2.1 技术总体架构

标准化的智算中心全栈技术体系包括4个层次：算力基础设施层、智算协同层、智能系统层和应用层。其中，运营主体负责规划并运营统一的智算运营门户，而运维主体则承担算力管理与运维职责。智算中心技术架构如图2所示^[20]，该架构在初期主要提供基础设施即服务（infrastructure as a service, IaaS）和平台即服务（platform as a service, PaaS），并计划逐步扩展至测试即服务（test as a service, TaaS）和出行即服务（mobility as a service, MaaS）领域，以构建多层次智能计算服务能力体系。

2.2.2 训练与推理的关系

随着算力的不断提升以及大规模模型参数的

扩展，人工智能模型变得日益复杂。智算中心在这一背景下，承担着模型训练和推理的核心职责。尽管训练和推理可能采用不同的硬件和AI平台，但这种差异并不影响模型的协同作业。为了优化系统性能，在可能的情况下，需要尽量保持训练框架与推理框架的一致性。

(1) 训练与推理硬件的关系

在确保硬件与框架适配的条件下，训练与推理可以使用来自不同厂商的底层硬件^[21]，如中央处理器（central processing unit, CPU）、图形处理器（graphics processing unit, GPU）、数据处理器（data processing unit, DPU），这一点并不会影响模型的协同作业。硬件的异构性不会导致训练和推理过程中的兼容性问题，从而确保了不同场景下算力的高效协同。

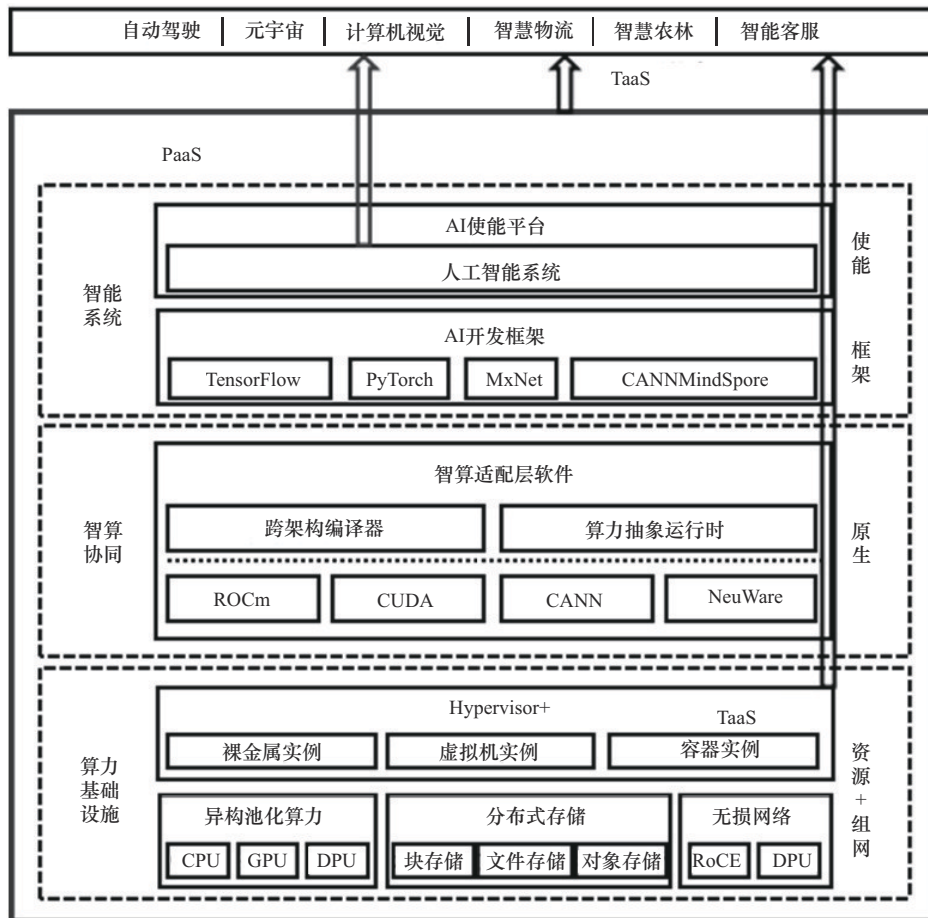


图2 智算中心技术架构



(2) 训练与推理框架的关系

框架为训练和推理提供必要的预编译环境及运行时支持。例如，开放神经网络交换（open neural network exchange, ONNX）^[22]可以实现不同训练框架（如TensorFlow、PyTorch）与推理框架之间的转换。此外，各种推理硬件厂商推出了优化的推理框架，如英伟达（NVIDIA）的TensorRT^[23]和商汤科技的OpenPPL等，这些框架可以兼容主流的开源训练框架，确保推理性能的最优化。

(3) 训练与推理AI平台的关系

AI平台为开发者提供了一站式的集成环境，支持从数据处理、算法开发、模型训练到模型部署的全流程服务。当前市场上，九天、浪潮的AI Station、华为的ModelArts^[24]等都是典型的AI平台解决方案。训练和推理平台可以来自同一厂商，也可以选用不同厂商的产品，确保平台的灵活性和多样性。

2.2.3 系统设计

智算中心的系统设计包括多个关键模块，涵盖域划分、智能算力池、共享存储池和内外网络，并且需要兼顾系统的高效性、容错性、可扩展性与安全性。

(1) 域划分

智算中心划分为管理域和业务域。管理域负责智算资源和任务的调度、监控与管理，确保算力资源的高效利用；业务域则提供基于需求的算力和存储能力，按需部署通用计算资源，为用户提供登录、数据预处理和模型部署等服务。

(2) 智能算力池

智能算力池划分为训练池和推理池。智能算力池的设计不仅要关注算力的充足，还要兼顾算力的高效调度与动态分配，以确保不同任务和负载之间的平衡^[25]。

(3) 共享存储池

共享存储池包含高性能文件存储、普通文件存储、对象存储和块存储等资源，通过分层存储

机制对数据进行管理，以满足不同场景下的访问性能和存储效率需求。

(4) 内外网络

内部网络细分为业务网络、存储网络、管理网络、参数面网络和数据面网络，各自承担不同的数据流动和管理任务，以确保不同数据流的隔离与优化。外部网络则提供高效的外网出口，保障与外部系统的安全通信，同时采用云专网、IP专网等技术确保数据传输的安全性与稳定性。

智算中心的设计需要考虑系统的高可用性与容错能力。例如，存储池应采用分布式冗余备份机制，防止单点故障带来的数据丢失；算力池则应配置自动容错和故障转移机制，确保在硬件出现故障时计算任务能够自动切换到备用资源，避免计算任务中断。

通过高效、灵活、可扩展的架构设计，智算中心能够满足日益增长的AI计算需求，并推动人工智能技术在各行业的深入应用。同时，其优化和容错机制保障了系统的高可靠性和稳定性，确保能够支撑大规模的AI应用场景和复杂任务的处理。

2.3 智算中心的关键技术

2.3.1 AI芯片

智算中心需要根据需求引入适配的智算资源，具体包括训练资源、推理资源和通用计算资源。首先，智算训练集群主要用于支持业务域中的AI模型训练。其次，推理场景的部署一般采用PCIe机型。此外，通用计算资源主要由传统CPU服务器构成，承担智算业务域中的登录、数据预处理等功能，以及管理域的运营和维护工作。

2.3.2 存储

智算中心的存储池包含文件存储、对象存储和块存储，各自承担不同的数据存储需求。智算中心需要支持高性能文件存储，且方案应支持基于融合以太网的远程内存直接访问协议（RDMA over converged Ethernet, RoCE）的升级。为提高存储访问效率和系统可扩展性，建议使用专属存

储池，避免跨业务域访问外部存储带来的性能和安全问题。

2.3.3 网络

无损网络技术要求具备三大关键特性：零丢包、低时延和高吞吐量。远程直接内存访问（remote direct memory access, RDMA）^[26]技术允许数据直接从网络传输至服务器的存储区，避免了外部存储复制和上下文切换的额外开销，减少了对CPU的依赖，从而释放了内存带宽和CPU资源，显著提升了应用系统的整体性能。

2.3.4 平台

智算平台是承上启下的关键设备，实现了异构硬件资源的全局整合及细颗粒分配，同时还负责网络管理、存储管理，以及智算任务的生命周期管理。

(1) 硬件资源纳管

智算平台支持对CPU、GPU等异构硬件资源的集中管理，涵盖分布式存储、网络设备及安全设施等的监控。平台能够实时追踪资源的使用情况、性能指标、警报与日志等关键信息，并将这些数据汇总至集中管理系统，确保高效的资源管理和故障预警。

(2) 异构资源纳管、池化、调度、分配

平台能够对异构计算资源进行汇聚、切割与动态调配，尤其是对GPU的细颗粒管理，支持GPU的远程挂载及分散资源的整合。此外，平台还提供了GPU服务质量（quality of service, QoS）支持，确保资源的按需分配、动态调度及回收，从而提升资源的利用效率。

(3) 网络管理

平台兼容传统网络协议以及RoCE/Infiniband等高速无损网络协议。同时，针对加密需求，平台通过增强密码复杂度（如结合数字、大小写字母及符号）、引入手机验证和定期更换密码等措施，有效提高了安全性，降低了密码被破解和数据泄露的风险。

2.4 智算中心的应用场景

智算中心，作为现代信息技术和人工智能发展的产物，提供了强大的计算力、存储能力和智能服务。目前，智算中心的主要应用场景包括智慧物流、智慧农林和智能客服。

2.4.1 智慧物流

智慧物流产业的发展依赖于先进的人工智能算法、软硬一体化的机器人技术以及集成的仓储管理系统。这些技术的融合应用，使得各类产品能够高效协同工作，确保物流体系的全天候不间断运作。AI技术通过处理图像和视频数据，能够智能区分人和物，即使在场景变化显著的情况下，也能维持安全和高效的操作水平。

2.4.2 智慧农林

人工智能技术已成为推动我国农业和林业生态防护智慧化转型的核心动力。在农业种植方面，基于深度学习的图像分析系统能够以低成本、高效率的方式进行病虫害的识别与监控预警，大幅提升精准农业的管理水平。在林业生态防护方面，结合无人机与智能图像识别的技术，能够实现对环境风险的实时监控和分析，提高生态保护效率。在养殖业方面，AI通过高清监控与图像识别技术，实时监测畜禽情绪、健康状况和进食行为，为养殖户提供数据反馈和优化建议。AI在农业种植、林业生态防护与养殖业等领域的应用将持续深化，助力农业产业的智能化升级。

2.4.3 智能客服

智算中心为智能客服系统提供了强大的计算支持，尤其是在自然语言理解（natural language understanding, NLU）^[27]、自动语音识别（automatic speech recognition, ASR）^[28]和文本-语音转换（text to speech, TTS）^[29]等核心技术的算力需求上，发挥了关键作用。这些技术的实现需要巨大的算力支持，智算中心通过提供高效的计算资源，帮助系统在处理大量数据的过程中实现



快速学习与自我优化，从而为用户提供更加智能、个性化的服务体验。

3 fgOTN 应用于智算中心互联

3.1 智算中心光互联研究现状

随着大模型规模的不断扩大，单体数据中心的训练能力已逐渐逼近极限，未来，多数据中心训练已成为趋势。OpenAI、谷歌（Google）和 Anthropic 大模型领域的三巨头均在布局多数据中心训练，旨在将大型模型的训练从单个站点扩展至多个数据中心园区。其中，Google 凭借其全球领先的计算系统，拥有两个核心的多数据中心区域。微软和 OpenAI 也在加速建设超密集液冷数据中心园区，并与多家企业合作，致力于实现更强的 AI 训练和推理能力。

2024 年 5 月 23 日，中国国际光电博览会（China International Optoelectronic Exposition, CIOE）与 C114 通信网联合举办的“AI 时代：数据中心光互联技术新趋势”研讨会上，中国信息通信研究院赵文玉作了“面向智算中心的光互联技术及发展展望”的主题演讲。他指出，智算与光互联双向赋能，具有高速率、低时延、低能耗、高集成等特点的光互联技术成为支撑智能算力发展的重要基石。2024 年 6 月，中国光网络研讨会上，中国移动通信有限公司研究院数据中心网络技术经理王瑞雪指出，AI 大模型以 GPU 集群分布式训练为基础，带来大量节点间的通信消耗，网络因此成为 AI 算力发展的“瓶颈”。中国移动原创的全球调度以太网（global scheduling Ethernet, GSE）技术体系革新了以太网转发机制，提升了网络性能。同时，面对智算中心网络规模提升带来的高成本、高功耗问题，光电混合组网已成为技术趋势。此外，800 Gbit/s 以太网作为智算中心网络互联的重要方向，正在加速推进商用部署。为满足跨智算中心的互联需求，IP+光融合技术已成为业界的主流技术路线，该技术

可简化互联设备的形态，降低转发时延，更好地匹配智算互联的需求。

智算中心光互联的技术架构正朝着高带宽、低时延、低功耗、高可靠性和智能化的方向发展。海思光电推出的星云系列光模块，从五大维度（大带宽、低时延、低功耗、高可靠性、智能化）适配 AI 智算需求，提升计算网络效率。海思光电依托基于垂直腔表面发射激光器（vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL）的多模光芯片和基于薄膜铌酸锂（thin-film lithium niobate, TFLN）、外腔激光器（external cavity laser, EML）及硅光的单模光芯片，打造了 400 Gbit/s、800 Gbit/s 短距光互联产品，以满足智算中心日益增长的带宽需求，匹配 AI 智算中心的互联需求。

文献[30]主要对数据中心光互联技术进行了全面调研，综述了光互联技术的多种方案，分析了它们在数据中心网络中的应用潜力，并讨论了光互联技术在成本、功耗及性能方面的优势。文献[31]是一篇关于数据中心和光数据中心网络（optical data center network, ODCN）的综述性文章，对光传送网和可重构光网络（reconfigurable optical network, RON）在数据中心互联中的应用进行了深入探讨，并讨论了 IP-over-OTN 和混合电光 ODCN 架构，强调了数据中心采用可重构光网络的必要性，以应对不断变化的流量需求，并指出尽管 RON 技术仍处于发展阶段，但其在提高数据中心网络性能和效率方面的潜力巨大。

随着智能计算和超级计算数据中心对带宽、时延、能耗和成本要求的日益严苛，传统的三层全互联电交换架构已难以满足这些高标准。因此，业界正在寻求更高效、可扩展的电光混合交换或全光交换解决方案，以逐步取代仅依赖电路包交换的传统方法^[32]。在数据中心网络中，光电融合交换技术主要应用于基于 Spine-Leaf 拓扑结构的场景。Spine 层交换机以其高吞吐量、低时

延和高端口密度而著称，与每个 Leaf 层交换机建立了直接的高速连接。光电融合交换方案主要包括光电路交换（optical circuit switching, OCS）方案、基于自由空间光学（free space optics, FSO）的网络构建方案，以及动态可重构的光电融合交换方案。不同光电融合交换技术方案的综合性横向对比见表 2，比较维度包括交换连接方式、控制方式、核心光设备、模拟水平、关键特性以及性能提升。表 2 的对比分析，可以揭示每种方案的独特优势和潜在局限性。

OTN 作为一种高速、高容量的光纤通信技术，近年来在智算中心互联领域展现出了巨大的应用潜力。自 ITU-T 于 1998 年开始制定相关标准，如 G.709 逻辑接口和 G.959.1 物理接口，OTN 技术已逐步完善。智算中心互联要求高带宽、低时延和高可靠性的数据传输通道，以支持算力资源的共享和调度。OTN 技术以其高速率和高容量

的特性，满足了智算中心大规模数据传输的需求^[41]。OTN 的异步传输模式、灵活的网络结构以及多级连接支持，使其能够适应网络需求的变化，提供高度灵活性和可扩展性^[42]，满足智算中心互联场景的复杂性和多变性。OTN 支持的复杂网络拓扑结构，为智算中心间的连接提供了更高的灵活性和可靠性，确保了模型训练、模型推理和数据分析等大量数据交换任务的高效、低时延传输，提高了数据处理效率，降低了数据丢失和延迟的风险。

在实际应用中，OTN 技术已被广泛应用于智算中心互联。一些大型企业和运营商已经部署了基于 OTN 技术的网络架构，来支撑智算中心间的高效互联。例如，中国移动在 2024 年 3 月 8 日宣布，旗下自主研发的 400 Gbit/s OTN 省际骨干网正式商用。该网络采用 400 Gbit/s QPSK、百 T 平台、光交叉连接（optical cross-connect, OXC）

表 2 不同光电融合交换技术方案的综合性横向对比

模型	交换连接方式	控制方式	核心光设备	模拟水平	关键特性	性能提升
Helios ^[33]	电气分组交换（electrical packet switching, EPS）/OCS 光纤连接	分布式	光波分复用器（wavelength division multiplexer, WDM）、微机电系统（micro electro mechanical system, MEMS）	商用	混合电光交换架构	成本、功耗显著降低
RotorNet ^[34]	OCS 光纤连接	分布式	MEMS	实验	电路交换、独立循环、固定配置	吞吐量提升，吞吐量优于 Fat Tree ^[35] 拓扑
X-NEST ^[36]	OCS 光纤连接	分布式	MEMS	实验	集群间全光互连、集群内光电混合互连	高性能计算（high performance computing, HPC）、机器学习（machine learning, ML）应用完成时间缩短 8%~36%
ProjecToR ^[37]	OCS 空间光	分布式	数字微镜器件（digital micromirror device, DMD）	实验	基于 FSO、敏捷性、快速重配置	吞吐量与光纤电缆相当，快速重配置，降低成本和时延
超表面 FSO ^[38]	FSO 空间光	分布式	超表面 FSO 交换器	实验	智能超表面 FSO 交换	提升网络带宽和资源利用率
Lotus ^[39]	OCS/光分组交换（optical packet switching, OPS）光纤连接	分布式	阵列波导光栅路由器（arrayed waveguide grating router, AWGR）	仿真	组内完全二分图、组间光链路连接、AWGR 增强路径多样性	网络性能优于 Dragonfly 和 3D-Torus，低时延、高吞吐量
ReSAW ^[40]	OPS/光突发交换（optical burst switching, OBS）光纤连接	分布式	AWGR	实验	机架顶部（top of rack, ToR）交换机配合 AWGR	实现光链路零丢包，提高数据中心内交互流量交换效率



等新技术，实现了传输带宽提升4倍、枢纽间时延均低于20 ms、关键主用链路时延降幅达20%、单比特能耗降低65%，展现了OTN技术在智算中心互联中的卓越效能。

然而，OTN技术在实际应用中也存在一些局限性，如端口规模有限、光带宽利用率低等问题。因此，研究者们正在探索更高效、灵活的光互联解决方案，以期实现更高性能的智算中心光网络架构，为智算中心的未来发展拓展新的方向和可能性。

3.2 fgOTN应用于智算中心互联的核心竞争力

随着信息技术的飞速发展，智算中心作为数据处理和计算的核心，其互联需求日益增加。一方面，智算中心需要处理的数据量巨大，对网络的带宽和吞吐量有极高的要求；另一方面，智算中心之间的数据传输需要保证低时延^[43]、高可靠性和高安全性^[44]。此外，随着技术的不断发展，智算中心互联网络还需要具备灵活性和可扩展性^[45]，以适应未来技术的发展和变化。

在这一背景下，OTN技术虽然在智算中心互联中展现出了显著的优势，但其在实际应用中也存在一些不足。OTN的刚性架构在面对智算中心动态变化的业务需求时，可扩展性和灵活性明显不足。特别是在需要快速调整网络资源以适应不同规模和复杂度的计算任务时，OTN的固定带宽分配和较大的颗粒度限制了其在细粒度业务调度

上的能力，导致了带宽浪费和资源利用率不高。这些问题在智算中心的光互联研究中被广泛讨论，研究者们正在积极寻求解决方案，以提高网络的灵活性和效率。

fgOTN继承了OTN的核心优势，并实现了对1 Gbit/s以下小颗粒高品质业务的承载。它保留了OTN的固定时隙映射、高低阶复用机制、开销管理等方式，同时引入了fgODUflex和fgOPU，从而提高了网络的灵活性和效率。fgOTN的应用概览见表3，包括应用场景、主要贡献以及性能检测。文献[46]提出了一种基于最大带宽分段共享保护（maximum bandwidth segmented shared protection, MBSSP）的F5G网络保护方案，旨在解决传统OTN保护方法带宽浪费的问题。MBSSP利用fgOTN的优势，通过优化网络资源规划和带宽调整策略，在确保业务恢复成功率的同时，有效降低了带宽调整率和资源利用率。文献[47]提出了一种基于fgOTN的面向业务的光网络（service-oriented optical network, SOON）架构，旨在满足F5G时代灵活连接调度、快速连接响应和高效资源调度等需求。文献[48]介绍了fgOTN和边缘云协同的智能业务导向光网络，提出了一种新型的光网络架构，结合了fgOTN与边缘云技术，旨在提升云服务的质量和效率，并通过多层多域的管理和控制，实现了对云业务的高效支持和动态调整。文献[49]提出了一种创新的细颗粒

表3 fgOTN的应用概览

文献	应用场景	主要贡献	性能检测
文献[46]	F5G网络保护方案	利用fgOTN实现无损耗带宽调整，优化网络保护资源利用	评估了在不同网络拓扑下的保护方案性能
文献[47]	业务导向型光网络的多层资源调度	提出了基于fgOTN的SOON架构，实现多层协作资源调度	验证了多层协作调度算法在降低阻塞率上的效果
文献[48]	智能业务导向光网络	基于新兴的fgOTN和边缘云协同的SOON	通过实地试验验证了SOON架构在提升服务质量方面的有效性
文献[49]	基于OSU的OTN中多粒度计算能力请求的场景	提出了一种基于图表示的高效细颗粒梳理方案，以满足多粒度计算能力的要求	该方案在多种场景下均表现出显著的性能提升
文献[50]	冗余光传输网络	提出创新的冗余光传输网络映射方法，提高网络可靠性和传输效率	该方法在不同条件下性能稳定可靠

整合方法,通过图神经网络建模路由表连接关系,优化了基于光业务单元(optical service unit, OSU)的OTN中的资源分配。文献[50]研究了基于SDH和OTN的冗余光传输网络映射方法,并提出了一种适用于fgOTN的灵活服务承载方案,通过详细分析SDH和OTN的技术特点,结合实际应用场景,创新性地提出了一系列映射策略和优化方法,实验结果表明,所提方法能够有效降低光传输网络映射的冗余度,提高通信效率,降低误码率,为冗余光传输网络的建设和优化提供了理论支持和技术指导。

fgOTN凭借其低时延、高灵活性和高安全性的特点,在智算中心互联中展现出显著的核心竞争力。

首先,智算中心互联对时延极为敏感,特别是在进行大规模数据处理和实时分析时,低时延对于保障数据处理的实时性和效率至关重要。智算中心通常需要处理大规模实时数据,如来自物联网设备、用户行为分析和在线交易的数据。这些数据如果不能及时处理,会导致决策延迟,从而影响业务运营效率和用户体验。fgOTN技术能够提供稳定低时延的数据传输,这对于需要快速响应的实时分析系统至关重要。通过采用fgOTN,智算中心能够实现对实时数据流的高效处理,确保在极短时间内完成数据分析和决策,显著降低业务时延,从而满足智算中心对高速、低时延传输的需求。

其次,智算中心的算力需求和业务类型多样,业务传输需求大小不一,这就要求网络必须具备高度的灵活性,能够适应不同规模的数据传输^[51]。fgOTN采用以10 Mbit/s带宽为单位的固定时隙分配机制,沿用并优化了经典OTN帧结构,能够高效承载小颗粒业务,这一特性使得fgOTN能够充分满足智算中心间大量小颗粒业务的传输需求,提高网络的适应性和灵活性。fgOTN还支持多种VBR和CBR业务,为智算中心提供了丰

富的业务承载选项。这种广泛的业务支持能力,使得fgOTN不仅能够满足当前的业务需求,还能够适应未来业务的发展和变化。fgOTN技术通过支持更小颗粒度的业务承载,提供了细粒度的业务调度能力,这不仅提高了资源利用率,还使得网络能够快速适应业务需求的变化^[46]。例如,中国移动近年来在光网络方面持续推进技术创新,通过构建OXC+ODU+fgOTN三级灵活调度机制,实现了波长级、通道级、业务级的智能协同调度,以满足智算中心对算力资源的灵活调度需求。

此外,在智算中心互联中,数据安全性至关重要。随着大数据和云计算的迅猛发展,智算中心承载着越来越多的敏感信息,包括个人数据、金融交易记录和企业机密等。这些数据的安全性和可靠性对于保障组织的业务连续性及维护客户信任至关重要。因此,确保数据在传输过程中的安全性,防止数据泄露或被篡改,成为构建安全智算中心的重要任务。fgOTN技术凭借其高性能时钟透传和快速无损带宽调整技术,显著提升了数据传输的安全性和可靠性^[50]。其中,fgOTN的时钟透传机制提供了高性能的时钟透传能力,不仅降低了数据包的传输时延,还增强了网络的抗干扰能力,从而提高了数据传输的整体稳定性,这对于需要实时处理和传输的大规模数据至关重要。fgOTN技术的快速无损带宽调整能力则使网络能够迅速适应不同业务需求的变化。在数据流量激增的情况下,fgOTN能够动态调整带宽分配,确保重要数据的持续高效传输。fgOTN的这些特性对于保护智算中心中传输的敏感数据至关重要,确保了业务的连续性和数据的完整性。

fgOTN技术以其低时延、高灵活性和高安全性等特点,为智算中心互联提供了一种更为高效、灵活和安全的光传送解决方案。它不仅解决了OTN技术在智算中心互联应用中存在的可



扩展性和灵活性不足的问题，还为智算中心的高效运行和数据安全提供了强有力的支持。随着智算中心互联对网络性能要求的不断提高，fgOTN技术的应用将越来越广泛，这为数据中心的未来发展打下了坚实的基础并指出了清晰的方向。

4 研究方向

智算中心作为算力网络的核心节点，其互联网的发展正面临着新的挑战 and 机遇。随着大数据、人工智能等技术的快速发展，智算中心对于网络传输的效率、调度灵活性、安全性隔离以及低时延等方面的需求日益增长。fgOTN技术以其独特的优势，为满足这些需求提供了新的解决方案。

在智算中心互联场景中，不同计算节点和存储设备之间需要高效、稳定的数据传输。传统的网络带宽调整机制往往存在损耗大、调整速度慢等问题，难以满足智算中心对高效传输的需求。fgOTN创新性引入了无损带宽调整机制，能够实现 10 Mbit/s 到 1 Gbit/s 的快速无损带宽调整，调整速度仅百毫秒级别。这一机制使得网络能够根据业务需求动态调整带宽资源，进而优化网络效率和资源利用率，成为当前研究的重要方向。

智算中心需要支持多样化的业务和应用场景，这要求网络能够灵活调度资源，以适应不同的计算需求。fgOTN的灵活性使其能够迅速响应资源调整需求，动态重新配置网络资源，确保数据传输的高效性和稳定性。通过fgOTN技术，研究人员正探索如何根据实际需求动态分配带宽和传输路径，并实现资源的快速重组和优化，从而提升整体计算效率和资源利用率。

智算中心互联需要确保不同用户或业务之间的数据严格隔离，以保障数据的安全性和隐私性。fgOTN技术采用TDM时隙隔离机制，能够

提供硬隔离的传输能力，确保不同用户或业务之间的数据在传输过程中不会相互干扰，满足智算中心对安全隔离的需求。这一特性也是当前研究中的关键焦点。

智算中心之间的数据传输对时延要求极高，特别是对于远程实时渲染、在线游戏等实时性要求较高的应用场景。fgOTN技术可以实现低时延和确定性时延的传输服务，确保数据在传输过程中的时延稳定且可控。这一优势有助于提升智算中心的整体性能和用户体验，也是未来研究的重要方向。

fgOTN技术在智算中心互联中具有广泛的应用前景和潜在价值。随着研究的深入和技术的不断创新，fgOTN有望在智算中心互联领域发挥更加重要的作用，为大数据、人工智能等前沿技术的发展提供有力的支撑和保障。

5 结束语

本文对fgOTN应用于智算中心互联进行了深入研究，全面综述了这一领域的技术进展、应用场景及未来发展趋势。本文介绍了fgOTN的基本概念、技术架构及其在不同场景下的应用优势，并详细阐述了智算中心的基本概念、体系架构、关键技术及应用场景。在此基础上，本文分析了fgOTN应用于智算中心互联的可行性和优势。随着人工智能和大数据技术的不断发展，智算中心互联的需求将更加复杂和多样化。fgOTN作为新一代光传送网技术，其细颗粒的资源调度能力和灵活的组网方式将为实现高效、可靠、低成本的智算中心互联提供有力支持。

参考文献：

- [1] AGIWAL M, ROY A, SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.
- [2] SERIZAWA Y, KITAMURA K, MYOUJIN M, et al. SDH-based time synchronous system for power system commu-

- tions[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, 13(1): 59-65.
- [3] XIA T J, GRINGERI S, TOMIZAWA M. High-capacity optical transport networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(11): 170-178.
- [4] WANG T, XIA Y, MUPPALA J, et al. Achieving energy efficiency in data centers using an artificial intelligence abstraction model[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2018, 6(3): 612-624.
- [5] ZHANG Y X, REN J, LIU J G, et al. A survey on emerging computing paradigms for big data[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2017, 26(1): 1-12.
- [6] CHENG Q X, BAHADORI M, GLICK M, et al. Recent advances in optical technologies for data centers: a review[J]. *Optica*, 2018, 5(11): 1354.
- [7] MALCOLM B, TOM H. Proposed structure of recommendations for Sub-1G application[C]//Geneva: T22-SG15-TD180/WP3, ITU-T SG15 Plenary Meeting, 2023.
- [8] ITU-T. Overview of fine grain OTN: ITU-T G.709.20[S]. 2023.
- [9] ITU-T. Fine grain flexible ODU (fgODUflex) path layer network: ITU-T G.709 Annex M (Mapping fgODUflex signals into the fgODTU signal and the fgODTU into the OPU fine grain tributary slots)[S]. 2023.
- [10] ITU-T. Hitless bandwidth adjustment of fgODUflex: ITU-T G.709 Annex O[S]. 2023.
- [11] WEI S, HAN L, WINSTON M, et al. Text enhancements of fgOTN resizing[C]//Geneva: T22-SG15-C-0817, ITU-T SG15 Plenary Meeting, 2023.
- [12] ITU-T. Fine grain flexible ODU (fgODUflex) path layer network: ITU-T G.872 Annex A[S]. 2023.
- [13] 华为技术有限公司. fgOTN(细颗粒光传送网)技术白皮书[R]. 2024.
Huawei Technologies Co., Ltd.. fgOTN (fine-grain optical transport network) technical white paper[R]. 2024.
- [14] 中国移动. “九州”算力光网目标网架构白皮书[R]. 2023.
China Mobile. “Jiuzhou” computing power optical network target architecture white paper[R]. 2023.
- [15] 华为技术有限公司. 电力fgOTN技术白皮书[R]. 2024.
Huawei Technologies Co., Ltd.. fgOTN white paper for electric power[R]. 2024.
- [16] WANG H, NING H S, LIN Y J, et al. A survey on the meta-verse: the state-of-the-art, technologies, applications, and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(16): 14671-14688.
- [17] ROSARIO, UCEDA-SOSA. Computer vision: a reference guide[J]. *Computing Reviews*, 2016, 57(4): 238-239.
- [18] 杨震. 自动驾驶技术进展与运营商未来信息服务架构演进[J]. *电信科学*, 2016, 32(8): 16-20.
YANG Z. Progress of automatic driving technology and future information service architecture evolution of telecom operators[J]. *Telecommunications Science*, 2016, 32(8): 16-20.
- [19] RICHINS D, DOSHI D, BLACKMORE M, et al. Missing the forest for the trees: end-to-end AI application performance in edge data centers[C]//Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA). Piscataway: IEEE Press, 2020: 515-528.
- [20] 孙长秋, 杜长斌, 李欣宇, 等. 智算中心关键技术研究[J]. *通信管理与技术*, 2024(2): 33-37, 52.
SUN C Q, DU C B, LI X Y, et al. Research on key technologies of intelligent computing centers[J]. *Communications Management and Technology*, 2024(2): 33-37, 52.
- [21] SHUVO M M H, ISLAM S K, CHENG J L, et al. Efficient acceleration of deep learning inference on resource-constrained edge devices: a review[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2023, 111(1): 42-91.
- [22] CERIOLI A, MICCINI R, LAROCHE C, et al. NeuralCasting: a front-end compilation infrastructure for neural networks[C]//Proceedings of the 2024 11th International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS). Piscataway: IEEE Press, 2024: 161-168.
- [23] GOPIKTRISHNA P B, MARION LINCY G R, RISHEKESHAN A, et al. Accelerating native inference model performance in edge devices using TensorRT[C]//Proceedings of the 2024 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-7.
- [24] HU L, ZHU J C, ZHOU Z R, et al. An optimal resource allocator of elastic training for deep learning jobs on cloud[J]. *arXiv preprint*, 2021: 2109.03389.
- [25] 尹林, 王富, 王小龙, 等. 面向算力互联的快速光交换技术研究(特邀)[J]. *光通信研究*, 2024(5): 50-57.
YIN L, WANG F, WANG X L, et al. Fast optical switching for computing-power interconnects[J]. *Study on Optical Communications*, 2024(5): 50-57.
- [26] 赵俊峰, 李芳, 叶晓峰, 等. 面向广域RDMA的确定性网络需求与技术[J]. *电信科学*, 2023, 39(11): 39-51.
ZHAO J F, LI F, YE X F, et al. Research on deterministic networking requirements and technologies for RDMA-WAN[J]. *Telecommunications Science*, 2023, 39(11): 39-51.
- [27] ABDELLATIF A, BADRAN K, COSTA D E, et al. A comparison of natural language understanding platforms for chatbots in



- software engineering[J]. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2022, 48(8): 3087-3102.
- [28] STRIK H, CUCCHIARINI C. Modeling pronunciation variation for ASR: a survey of the literature[J]. *Speech Communication*, 1999, 29(2/3/4): 225-246.
- [29] FAN Y C, QIAN Y, XIE F L, et al. TTS synthesis with bidirectional LSTM based recurrent neural networks[C]//*Proceedings of the Interspeech 2014*. ISCA: ISCA, 2014: 1964-1968.
- [30] KACHRIS C, TOMKOS I. A survey on optical interconnects for data centers[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012, 14(4): 1021-1036.
- [31] ALI ABDULMAHDI ABDUL MAHDI E, AL-ASKERY A, ALI A H, et al. A survey of datacenter and optical data center networks[J]. *Journal of Techniques*, 2024, 6(3): 66-75.
- [32] 唐雄燕, 魏步征, 沈世奎, 等. 智算数据中心光电交换技术综述(特邀)[J]. *光通信研究*, 2024(5): 5-17.
TANG X Y, WEIB Z, SHENS K, et al. Overview of optoelectronic switching technology in artificial intelligent data centers[J]. *Study on Optical Communications*, 2024(5): 5-17.
- [33] FARRINGTON N, PORTER G, RADHAKRISHNAN S, et al. Helios: a hybrid electrical/optical switch architecture for modular data centers[C]//*Proceedings of the ACM SIGCOMM 2010 conference*. New York: ACM, 2010: 339-350.
- [34] MELLETTE W M, MCGUINNESS R, ROY A, et al. RotorNet: a scalable, low-complexity, optical datacenter network[C]//*Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication*. New York: ACM, 2017: 267-280.
- [35] LEISERSON C E. Fat-trees: Universal networks for hardware-efficient supercomputing[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1985, C-34(10): 892-901.
- [36] GU H X, YU X S, LU Y F, et al. X-NEST+: a high bandwidth and reconfigurable optical interconnects for distributed machine learning and high-performance computing[C]//*Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2023*. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2023: 1-3.
- [37] GHOBADI M, MAHAJAN R, PHANISHAYEE A, et al. ProjecToR: agile reconfigurable data center interconnect[C]//*Proceedings of the 2016 ACM SIGCOMM Conference*. New York: ACM, 2016: 216-229.
- [38] 尹欣, 侯维刚, 郭磊. 一种自由空间光数据中心网络架构、拓扑重构系统和方法: CN114745618A[P]. 2022-07-12.
YIN X, HOU W G, GUO L. Free space optical data center network architecture, topology reconstruction system and method: CN114745618A[P]. 2022-07-12.
- [39] LU Y F, GU H X, YU X S, et al. Lotus: a new topology for large-scale distributed machine learning[J]. *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems (JETC)*, New York: ACM, 2020, 17(1): 1-21.
- [40] ZHAO Z Q, XUE X W, GUO B L, et al. ReSAW: a reconfigurable and picosecond-synchronized optical data center network based on an AWGR and the WR protocol[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2022, 14(9): 702-712.
- [41] 马伟成. 基于数字孪生的OTN精品算网数智化运营方案[J]. *通信世界*, 2024(2): 23-24.
MA W C. Intelligent operation scheme for OTN boutique computing network based on digital twin[J]. *Communications World*, 2024(2): 23-24.
- [42] ALEKSIC S. The future of optical interconnects for data centers: a review of technology trends[C]//*Proceedings of the 2017 14th International Conference on Telecommunications (CONTEL)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 41-46.
- [43] YIN S, LIU L H, CAI M R, et al. DNN distributed inference offloading scheme based on transfer reinforcement learning in metro optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2024, 16(9): 852-867.
- [44] KANT K. Data center evolution: a tutorial on state of the art, issues, and challenges[J]. *Computer Networks*, 2009, 53(17): 2939-2965.
- [45] LU W, LIANG L P, KONG B X, et al. AI-assisted knowledge-defined network orchestration for energy-efficient data center networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 86-92.
- [46] LIU W H, ZHAO Y L, LI Y J, et al. Segmented protection scheme based on maximum bandwidth sharing in F5G[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2024, 16(11): 1145-1158.
- [47] ZHAO Y, LIN Y, LI Y B, et al. Multi-layer resource scheduling architecture and algorithm for a service-oriented optical network based on a fine grain OTN[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2024, 16(10): F13-F25.
- [48] ZHAO Y, LIN Y, LI Y B, et al. Intelligent service-oriented optical network based on fine-grain OTN and edge-cloud coordination[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE Future Networks World Forum (FNWF)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-5.
- [49] YU T K, YANG H, YAO Q Y, et al. Intelligent service-oriented graph representation-assisted high-efficiency fine grain grooming for OSU-based OTN[C]//*Proceedings of the 2024 22nd International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-3.

- [50] LIANG D, BAI Y W, ZHANG P, et al. Research method for redundant optical transmission network mapping based on SDH/OTN[C]//Proceedings of the 2024 6th International Conference on Internet of Things, Automation and Artificial Intelligence (IoTAAI). Piscataway: IEEE Press, 2024: 407-410.
- [51] YIN S, JIAO Y R, YOU C Y, et al. Reliable adaptive edge-cloud collaborative DNN inference acceleration scheme combining computing and communication resources in optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(10): 750-764.

[作者简介]



史庆娜 (2002-), 女, 北京邮电大学电子工程学院硕士生, 主要研究方向为光网络的路由与资源分配、光网络资源优化。



王佳雪 (2001-), 女, 北京邮电大学电子工程学院硕士生, 主要研究方向为光网络智能资源优化与机器学习。



李诗语 (2002-), 女, 北京邮电大学电子工程学院硕士生, 主要研究方向为光网络与机器学习。

蔡梦茹 (2000-), 女, 北京邮电大学电子工程学院硕士生, 主要研究方向为边缘计算任务卸载、光网络资源优化和预测等。

刘晓东 (1999-), 男, 北京邮电大学电子工程学院博士生, 主要研究方向为光网络的路由与资源分配、边缘计算网络的卸载以及机器学习。

尹珊 (1987-), 女, 北京邮电大学信息光子学与光通信全国重点实验室副教授, 主要研究方向为光网络智能资源优化、机器学习和优化方法等。

黄善国 (1978-), 男, 北京邮电大学教授、博士生导师, 北京邮电大学信息光子学与光通信全国重点实验室主任, 北京邮电大学副校长, 国家杰出青年科学基金、优秀青年科学基金获得者, 中国电子学会常务理事, 中国光学工程学会光通信与信息网络专委会副主任委员, 目前主要研究方向为多维光交换与光网络理论与技术, 包括大规模智能光交换与数据光网络、传输网规划与优化、地空天空间光交换与组网等。