



光通信研究
Study on Optical Communications
ISSN 1005-8788,CN 42-1266/TN

《光通信研究》网络首发论文

题目：面向算力互联的快速光交换技术研究
作者：尹林，王富，王小龙，郭文魁，宗一宸
收稿日期：2024-2-9
网络首发日期：2024-05-13
引用格式：尹林，王富，王小龙，郭文魁，宗一宸. 面向算力互联的快速光交换技术研究[J/OL]. 光通信研究. <https://link.cnki.net/urlid/42.1266.TN.20240511.1404.006>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

面向算力互联的快速光交换技术研究

尹林¹, 王富¹, 王小龙^{2,3}, 郭文魁¹, 宗一宸¹

- (1. 北京邮电大学, 电子工程学院(信息光子学与光通信全国重点实验室), 北京 100876;
2. 齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省计算中心(国家超级计算济南中心), 算力互联网与信息安全教育部重点实验室, 济南 250014;
3. 山东省计算机网络重点实验室, 山东省基础科学研究中心(计算机科学), 济南 250014)

摘要: 随着大模型等人工智能技术的发展, 以及“东数西算”等国家重大工程的深入推进, 智算中心和算力网络的内部网络互联成为光网络发展重要目标。相较于传统面向数据的信息互联, 智算中心和算力网络对传输的时延、吞吐量和确定性具有更高的需求。一方面, 智算中心内部需要实现高密度、低时延的数据处理和计算资源调度, 以满足大规模实时训练和推理; 另一方面, 智算中心之间互联要求高带宽、低时延、高可靠性的数据传输和资源共享, 以支持跨中心的数据协同和灾备恢复。因此, 算力互联网络需要光交换技术来支撑智算中心内部传送网络的高效数据传送和智算中心之间的带宽快速调度。构建面向算力互联的光交换技术将服务于算力互联需求, 为算力服务提供高效、确定、安全的数据交互管道。本文从网络架构、数据交换、应用场景等方面对光交换技术进行了分析。

关键词: 算力网络; 算力互联; 光交换

Fast Optical Switching for Computing-Power Interconnects

Lin Yin¹, Fu Wang¹, Xiaolong Wang^{2,3}, Wenkui Guo¹, Yichen Zong¹

- (1. National Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communication, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876;
2. Key Laboratory of Arithmetic Internet and Information Security, Shandong Province Computing Center (National Supercomputing Center in Jinan), Ministry of Education, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250014;
3. Shandong Provincial Key Laboratory of Computer Network, Shandong Provincial Basic Science Research Center (Computer Science), Jinan 250014)

Abstract: With the development of artificial intelligence technologies such as large language models and the promotion of major national projects such as "National Computing Network to Synergize East and West", the internal network interconnection of artificial intelligence data centers (AIDC) and computing-power networks (CPNs) has become an important tendency of optical network development. Compared with the traditional data-oriented interconnection, the AIDC networks and CPNs have a higher demand for transmission delay, throughput and determinism. On the one hand, high density, low-latency processing and computing resource scheduling are required within the data centers to meet large-scale real-time training and reasoning; on the other hand, interconnection between the AIDCs requires high-bandwidth, low-latency,

收稿日期: 2024-2-9

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62206017), 算力互联网与信息安全教育部重点实验室开放课题(2023ZD001)

作者简介: 尹林(2001-), 男, 贵州遵义人。学士, 主要研究方向为光交换技术。

通信作者: 王富, 北京邮电大学副研究员。E-mail: wangfu@bupt.edu.cn

high-reliability data transmission and resource sharing to support multi-data-center collaboration and failure recovery. Therefore, the computing-power interconnection (CPI) needs optical switching technology to support efficient data transmission in the optical transport network within the AIDCs and fast bandwidth scheduling between the AIDCs. Hence, constructing a CPI-oriental optical switching network can accommodate the AIDC network requirements and provide efficient, deterministic, and reliable data services. In this paper, we analyze the optical switching technology for AIDC networks, including CPI architecture, deterministic networks and application scenarios.

Key words: Artificial intelligence data centers; computing-power interconnection; optical switching

0 引言

随着人工智能技术的发展和智能应用的不断落地,通过人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 技术解决其他工程领域复杂问题是各个行业发展的重要趋势,导致垂直行业对算力的需求呈爆发式增长^[1]。其中,算力网络作为智算中心 (Artificial Intelligence Data Centers, AIDC) 数据互联的重要支撑,是推进“东数西算”等国家重大工程的关键基础设施^[2]。算力互联网络包含智算中心内部网络和智算中心间互联网络,通过其算力资源分配和调度机制,提升算力资源灵活性。同时,算力网络需要高效地响应算力应用和服务需求,兼顾资源能耗对环境影响。国家在“十四五”规划和 2035 年远景目标中,将“算力网络”等作为国家数字化转型的重要方向,对于推动国家信息化建设和数字经济发展有重要意义^[3]。

为了实现算力高效互联,算力网络需要具备高可靠、高安全、确定性等特征,服务垂直行业算力需求。据 2023 年统计, AI 服务器市场规模同比增长了 82.5%,正在从感知智能转向生成式智能发展^[4]。中国 AI 技术正在加速迈向全面应用的同时,而这也带来了时延、安全、速率等方面的严峻考验。核心使能技术亟需进行突破,包括 AIDC 互联、算力资源分配与管理、网络带宽优化,以及数据处理和存储等。传统数据承载网络在 AIDC 互联方面存在明显不足:一方面,固定网络拓扑结构难以匹配不同 AI 模型的流量模式。另一方面,训练数据、模型规模和计算需求的快速增长导致 AIDC 网络规模不断扩大,互联模式发生了根本性改变。传统的电交换技术缺乏对网络拓扑结构和通信带宽的大尺度调节能力,导致资源浪费严重,扩展成本高;光互联技术以其高带宽、低时延、低功耗和可重构等优点,为解决上述问题带来了新的思路。其中,光电路交换 (Optical Circuit Switching, OCS) 以高带宽和多通道的特点,适用于智算中心之间连接;光突发交换 (Optical Burst Switching, OBS) 和光分组交换 (Optical Packet Switching, OPS) 具备高动态性、低能耗和细粒度等优势,可用于智算中心内部网络^[5]。除现有光交换技术外,数据中心内部各子架之间互联的高速串行

(Peripheral Component Interconnect Express, PCIe)交换技术目前引起研究人员的广泛兴趣,其以超大带宽、超低时延、协议不敏感的特点,逐渐成为算力资源互联的有效技术途径。

为了实现 AIDC 的高效互联,全球研究者近年来进行了全方位研究。其中,来自韩国三星的学者提出了研究了超高速 PCIe 互联系统,构建了 2.5-32Gb/s 的第五代 PCIe 接收器,在 32Gb/s 下奈奎斯特频率下每通道损耗的能量效率达到了 0.07pJ/b/dB^[6]。在国内,来自华为的学者提出了一种用于双向光纤距离数据中心互联方法,能够对 600Gb/s DP-64QAM 进行了成功实时演示,为未来 800G 和 1.6T 数据中心内光互连提供了潜在解决方案^[7]。同时阿里云的学者提到,在数据中心网络传输过程中可以使用延迟低非线性低的空芯光纤,能够降低数据中心网络时延和数据中心选址要求^[8]。同时,工业界积极探索算力光互联系统,中国移动与中兴通讯合作开展的国内首个集中式算力路由方案的现网试点,成功验证了包括算力感知、网络感知、算力路由、资源可视化地图、多策略调度机制和可编程算网策略在内的六大关键技术的可行性^[9]。随着研究者的不断探索,利用光互连和交换技术来实现高效的算力互联将成为未来光网络发展的重要趋势。光交换技术可以为算力资源提供大尺度可调、超低延迟传输的数据管道,实现灵活调度和优化计算资源,支持复杂计算任务。这一趋势将推动光通信和算力网络融合发展,为高性能计算和大数据处理提供新技术思路,提升数据处理效率,实现跨地域、跨云的算力资源共享。

本文深入探讨光交换技术在算力互联中多重作用。首先,通过对未来算力资源互连网络架构进行探讨,提出一种可行的多体制融合交换架构,通过高效光信号传输,实现大规模算力数据快速传递与处理。其次,从算力数据的高时敏需求出发,探讨了算力网络中保障数据确定性转发的核心思路,提升整体系统的性能和效率。最后,从光交换技术与算力应用融合出发,通过对算力网络应用需求与光交换的能力的适配性进行探讨,阐述未来光交换技术在算力网络中的关键作用。

1 算力互联光交换架构

算力网络作为对传统 IP 网络路由机制的衍生和扩展,其流量特点和数据传送需求相较于传统数据中心表现出持续性强、时空尺度大、时敏要求高等特点。在传统数据中心中流量具有随机性,大多数数据流以短数据包为主,而长数据包主要用于镜像复制和数据备份等业务。然而,AIDC 中流量的产生依赖于算力模型的构建,其数据流量呈现突发性以及一定规则性。此外,算力模型要求算力资源具有一定的重构能力,区别于传统的“堆叠式”数据中

心架构。因此，AIDC 内的光交换网络架构需要满足高带宽、低时延、低能耗和可重构等特征。其次，网络需要在支持大带宽交换的同时具备细粒度的动态配置能力，可以综合利用 OCS/OBS 和 OPS 等多种交换能力，其拓扑应尽可能保持“扁平化”，以支持 AIDC 内大量东西向流量，实现更高的吞吐量和更低的时延^[10]。

在当前以云服务为主的互联网业务迅速发展及 IT 产业趋向绿色低碳的趋势下，全光交换网络技术（以 OBS、OPS 为代表）因其高带宽、低能耗和细粒度动态带宽调度能力而备受瞩目。这种技术在满足现代业务需求方面具有吸引力和优势。同时，通过与软件定义网络（Software Defined Networking, SDN）和网格可编程化的理念相结合，对传统 OBS 技术进行改进，更有利于适应动态重构、虚拟化等业务需求。

在算力网络中，处理的颗粒度已从单纯报文转变为更加宏观应用或服务层面。这种转变导致资源状态同步和映射机制与传统网络相比有显著差异。算力网络的关键目标在于为应用提供全网范围内最优资源匹配和路由，这要求其架构必须随着基础网络路由机制发展而不断进行创新和优化。为了实现多尺度的算力数据高效互联，业界逐渐关注超低时延的 PCIe 交换。当光传送技术与 PCIe 技术结合，由于 PCIe 能够在 AIDC 内部提供高速的设备间连接，可进一步提高整个 AIDC 的数据传输能力。然而，由于 PCIe 传输距离限制，现有光纤通道仅可以用于一个机架内的 PCIe 设备。对于延迟敏感的应用，结合 PCIe 的低延迟特性与光交换技术，可以显著降低数据在传输过程中的延迟。因此，为了提升 AIDC 的数据互联能力，如何突破 PCIe 技术的距离瓶颈，提升传输距离并赋予其基础交换能力，是扩大 AIDC 内部互联以及跨 AIDC 互联的核心技术挑战。长距离远程内存直接访问（Remote Direct Memory Access, RDMA）作为新一代广域高性能算力互联的一种技术，可以结合新型全光网络架构提供超大带宽和确定性体验特性。同时，结合 RDMA 协议层与全光网络物理层的上下感知联动，以实现超长距离下的高吞吐量无损传输^[11]。为了实现大尺度范围的高效数据互联，我们提出了“1+N”分布式算力资源高效互联架构，如图 1 所示，其中“1”代表传统堆叠式算力服务器，“N”表示多维算力资源。多维算力资源与传统数据中心资源可通过多体制融合交换设备实现互联。算力资源重构通过 PCIe、OCS、OPS 等多种协议融合互联，传统数据服务通过以太网协议互联，保障算力资源的高效、协同互联。通过开发新型多体制交换设备，为传统算力服务器提供多维度算力资源。传统“堆叠式”数据中心网络模式虽然能提供全局资源视图并对现有设备及协议影响较小，但其可重构能力差，并且难以满足算力互联过程中对低延迟的需求；完全分布式 AIDC 网络架构能有效克服集中式架构的缺点，但这需

要对现有设备和协议进行开发和扩展，成本高、周期长。因此，一个“1+N”混合式架构在许多应用场景中能够更好地平衡成本与时延的需求^[12]。

在 AIDC 的网络架构中，基于主机的传统计算资源拆分为高度灵活和动态可调度的任务单元，在物理位置上具有无关性，实现了在不同主机和集群之间自由迁移，以及资源占用动态伸缩。通过这种方式，AIDC 内以及跨 AIDC 资源被整合成一个统一资源池，极大增强资源利用的灵活性和效率。为提升带宽并减少资源池内部通信过程中的操作系统开销，AIDC 采用基于高速串行技术的超低延迟智算中心网络系统。在此系统中，位于同一机架的传统服务器与算力资源池可以通过高速串行协议进行直接连接，并支持以太网交换。此外，交换设备作为一个多制式连接模块，扮演了桥接节点的角色，不仅整合服务器间的连接功能，还支持服务器内部的全局寻址。面对智算中心对高效互联的需求，所有的资源池之间可以通过高速串行信号（例如 PCIe 和 RDMA）实现高效光交换。当服务器之间存在异质化算力需求时，可以通过 PCIe 和 RDMA 链路直接调用特定资源池中的算力资源以完成计算任务。

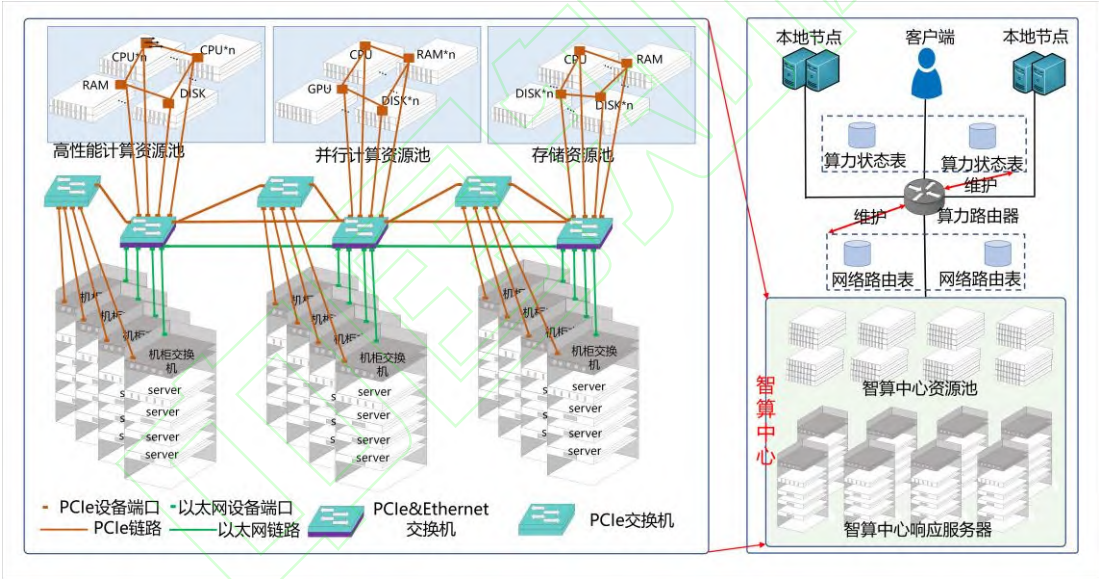


图 1 “1+N” AIDC 光交换架构

Figure 1 “1+N” AIDC optical switching architecture

2 面向算力互联的时敏路由技术

算力互联在追求与传统网络兼容的同时，还要考虑到算力应用的特殊时敏特性。算力应用往往在多维算力资源之间需要保持不同算力资源的差异化时敏特征。算力业务的时敏需求强调网络资源的最优配置和利用，以便在网络中不同位置提供必要的计算能力。算力互联对

于处理大数据、实现高性能计算和支持复杂的云计算应用至关重要。因此，如何为算力网络提供确定性保证能力至关重要。

在传统以太网中，时间敏感网络（Time-Sensitive Network, TSN）是 IEEE 802.1 开发的一套确保端口之间实现时钟同步的协议标准，为以太网协议数据链路层提供一套通用时间敏感机制，为标准以太网改进确定性和可靠性，以确保数据实时、确定和可靠地传输，提高数据传输效率。TSN 对于需要严格时间同步和低延迟的应用非常重要，TSN 的关键特性包括时间同步、流量调度、流量整形等。TSN 利用时钟同步、流量整形与调度、网络与用户配置，保证网络的低时延、高可靠性等^[13, 14]。在算力网络中实现确定性传输，需要综合考虑门控、调度以及路由路径等多方面决策，合理安排能够降低任务从传输到处理完成的整体时延。算力网络将业务需求映射为网络和计算需求，通过资源预留、队列调度、实时操作系统等技术扩展，实现确定的转发和计算，满足用户体验。因此，实现算力网络的确定性传输问题需要将数据链路层的 TSN 技术和网络层的算力网络技术融合起来^[15]。

在算力互联的环境下，关键信息流对传输的时延和抖动有极高要求，需要有特定的调度机制来保证在可预测的确定时间内到达。一方面，我们可以将以太网体制的 TSN 等技术进行改进，用于提升时敏传送能力。例如，在 TSN 标准中^[16]，IEEE 802.1Qbv 标准定义了 TAS 机制，每个端口都定义 8 个优先级队列用于转发流量，其中到达交换机的每条流根据流量类的不同分配到不同队列中。TAS 通过控制队列门的开启时间和时长，流量按照预设的时间点传输，使流量在每一跳的传输时延可控，从而实现端到端的确定性时延^[17]。该机制可迁移到 PCIe 或 RDMA 等协议队列调度中，满足差异化时敏需求。然而，如何针对非以太网的帧格式进行优化，并满足差异化算力资源需求，将是未来研究的重要方向。

AIDC 中的流量种类很多，存在较低时延要求的突发性短数据包和其他非周期性的长数据包，因此要实现所有数据包的混合传输需要对流量进行规划调度。基于 TSN 的全网互传组网方案，需要 AIDC 根据实时流量情况，制定流量策略，求解不同数据包传输的配置参数，分配不同的传输策略，数据包经过交换机。其中，面向 PCIe 交换的 TSN 保障技术如图 2 所示，通过对 PCIe 数据分组进行多队列调度，是保障业务时敏特性的重要技术之一。

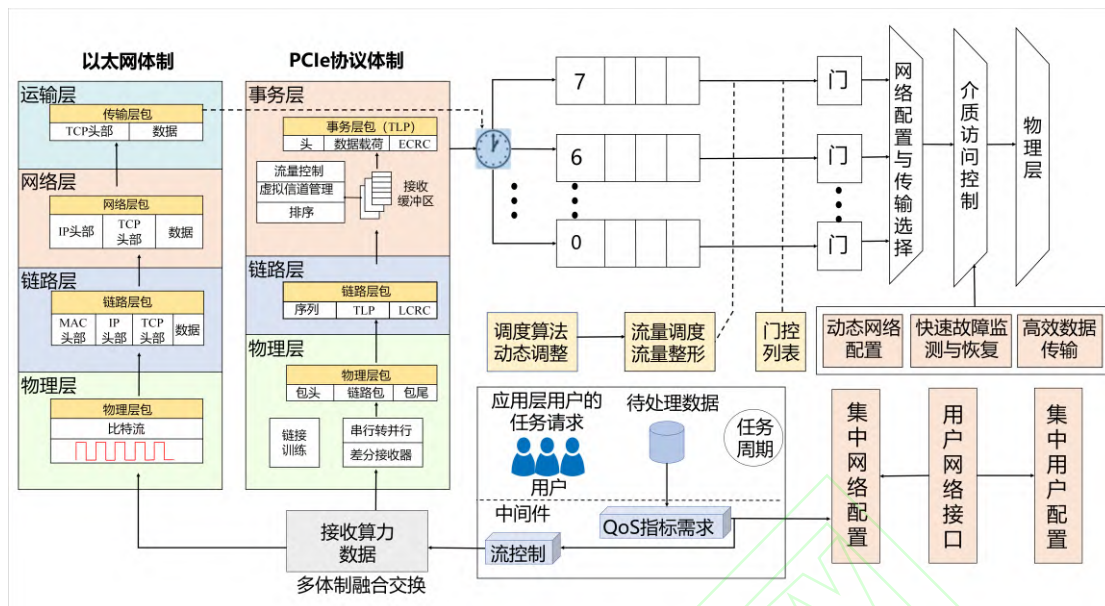


图 2 AIDC 时间敏感传送机制

Figure 2 AIDC time sensitive transmission mechanism

随着网络技术的发展，一系列对时间敏感的业务不断出现，例如智能交通管理、紧急响应系统、虚拟现实、增强现实和远程医疗等。这些应用对网络传输路径的带宽、延迟和延迟波动有着极高要求。然而，传统网络的“尽力而为”式的路由和数据包转发机制在处理确定性的时间要求和超低延迟波动时面临重大挑战。特别是，为了确保业务的可靠性，传统网络往往采用超时重传机制，这会带来大量额外延迟，从而严重影响传输性能。最新的研究进展表明，通过依赖时变图理论，已经提出了一种时间确定性的多路径算法和协议。这种方法能够在大规模 IP 网络中为时敏业务提供确保的延时保障，同时实现端到端服务的保护^[18]。在需要高性能计算和实时数据处理的场景下，计算资源必须满足能够处理大量数据并支持复杂计算任务的需求，系统需要快速响应，以处理实时数据和任务，这要求算力资源能够及时地完成计算并反馈结果。由于计算需求不断增加，系统需要具有一定的灵活性。同时面对数量级增长的计算任务时，需要高效率的计算处理和策略分配。TSN 为算力互联提供一个可靠、高效且可预测的网络环境，从而使其能够更好地满足现代数据密集型和时间敏感的应用需求。通过整合算力网络的 TSN 特性，算力互联可以实现资源利用更高效，数据处理速度更快，系统更加稳定可靠。

3 应用服务场景

面向算力互联的快速光交换技术是实现高效算力数据处理和传输的关键技术,通过使用光纤网络在不同计算资源之间传输数据,从而提高数据处理速度和效率,在多个应用场景中都彰显出巨大潜力。智算中心针对新媒体业务场景,通过实现云、边、端算力资源的感知与统一管理,进行算力需求分解、预设计以及算力解构和调度,有效应对网络时延敏感、带宽高需求的挑战。通过编排云边端资源、入云专线和第三方服务,算网大脑优化资源分配,提高服务响应速度,特别是通过边缘云部署形象渲染服务,结合光交换技术大带宽、低时延的特性,为算力网络应用场景提供强大的数据基础设施^[19]。

在大型机器学习模型和深度学习应用中,算力互联光交换技术能够减少数据在处理节点之间的传输延迟,使数据高速传输,减少训练和推理时间,使得深度学习模型可以更快地进行迭代优化,从而加速学习过程,提高算法效率和响应速度。这对于需要实时分析和决策的应用也尤为重要,比如自动驾驶汽车。自动驾驶汽车不仅需要与周围的传感器进行通信,还需与其他汽车进行通信,在车对车通信过程中提供高带宽低延迟的连接,使汽车能够实时了解路况,提高道路安全和减少堵塞情况。因此,在灵活性较强的数据互联系统中,利用 OPS 技术与电交换系统相结合,一方面保障算力数据传输的实时性;另一方面保证业务和带宽可以灵活调配。现有 OPS 技术可实现微秒级的数据分组传输和交换,可适用于时延、带宽要求严苛的算力应用场景。

AIDC 为生成式大模型提供了一站式解决方案,通过算力封装、业务意图匹配、算力解耦和调度以及智能选路,针对生成式大模型对高算力、低延迟和高带宽的需求,优化资源分配和网络接入。这一过程包括从业务受理到算力和网络资源的智能调度、自动开通,以及自助服务与智能运维,确保大模型能快速、高效、低成本部署和运维。生成式大模型要求在远程服务器上运行,而用户通过网络实时接收视频流和发送控制指令。OCS 在光传送网具有高带宽、支持多通道的特点,可以同时满足大量在线用户同时交互^[20]。此外,云游戏等集中式部署的网络应用对交换技术的实时性、可靠性、安全性有些极高需求,利用 PCIe 光互联,结合 OCS 等交换技术将为大模型和云游戏等应用构建更加高效的全光底座。

AIDC 需要处理和管理大量的数据,需要高带宽、低延迟的网络以支持大量数据的快速处理和分析,网络结构应该设计为能够支持高吞吐量和低时延的通信网络架构,如叶脊型(Leaf-Spine)、胖树型(Fat-Tree)或 OPSquare 型。同时,光网络资源需要更加灵活,能够实现动态带宽分配,以及基于光纤直接连接技术减少节点之间的跳数和延迟。面对数据流的多样化,OCS 支持光纤中任意速率,任意调整格式,任意通信波长光信号的交换,大幅提升传输和处理数据效率。同时利用 OPS 单向预约机制,对不同类型的数据使用不同的传输

信道，提高 AIDC 内部不同服务器和存储设备之间的通信效率^[21]。光交换技术在算力互联下的应用服务场景如图 3 所示。

算力网络管控不仅是围绕网络设备进行调度和配置，需要结合算力应用对进程进行优化调度。因此，算力网络控制器将是一个高度复杂且动态的系统，能够实现资源的最优化配置和使用。其中包括算力网络动态感知、资源搜索、智能编排和灵活调度。算力网络动态感知负责实时监测网络状态，包括算力资源的可用性、网络带宽、延迟等关键指标，依赖于数据分析和智能技术，以预测资源需求。算力网络资源搜索主要负责搜索可用的算力资源，资源动态感知和网络配置紧密结合，收集和传递资源需求信息，确保资源分配的效率和精确性，为智能编排提供决策支持。智能编排负责根据动态感知的信息和雷达搜索结果，制定资源调度计划，根据算力云管理平台的数据提供策略和规则。灵活调度功能负责将智能编排的决策转化为具体资源分配和任务调度，能够快速响应网络状态变化，调整资源分配，以保证服务质量和用户体验。

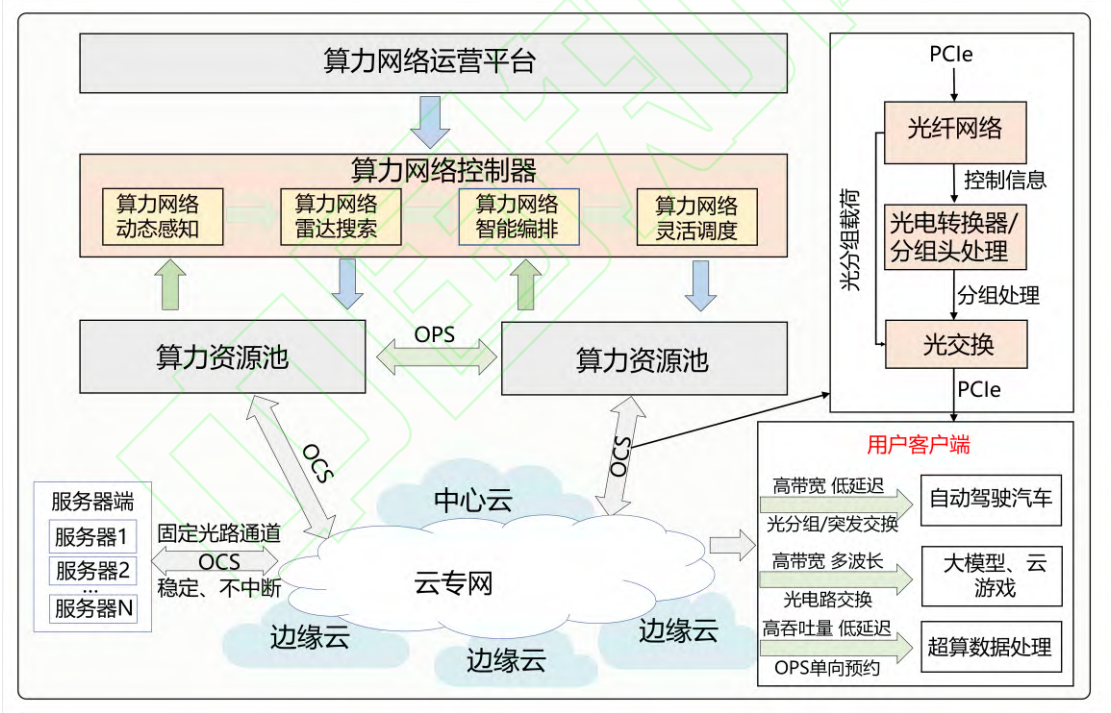


图 3 算力互联光交换技术应用服务场景

Figure 3 Service scenarios for the application of computing-power interconnect optical switching technology

由于 OCS 使用固定光路通道，具有稳定、透明的优点，可以用于云网络与服务器端，满足汇聚侧传输。而 OPS 则更加灵活，用于应用模型之间的互联，满足云管理与应用数据互联。随着算力应用的不断发展和光交换技术的进步，需要利用人工智能和大数据分析，进一步提

高对网络状态和资源需求的感知和预测能力,同时开发更高效的算法,实现跨域资源快速搜索和匹配,同时增强智能编排策略优化方法,使其具有高度灵活的编排机制,同时具备自适应调整能力。

4 结论

本文面向快速光交换研究算力互联,从算力互联光交换架构、面向算力互联的时敏传送、算力互联光交换技术的应用场景应用三个方面进行阐述。算力互联对光交换技术的需求表现在对高带宽、低延迟和高能效等方面。这些要求与光交换技术的特点,如提供大容量数据传输和低功耗运行相吻合,使得光交换技术可以有效满足算力互联的需求。随着快速光交换技术的发展,未来将构建一个更高效、更具可扩展性和更加节能的算力互联网。

参考文献:

- [1]张逸然,耿慧拯,粟粟等.算力网络业务安全技术研究[J].移动通信,2022,46(11):90-96.
ZHANG Yiran, GENG Huizheng, SU Li et al. Research on security technology of computing-power network service[J]. Mobile Communications, 2022, 46(11): 90-96.
- [2]马思聪, 孙吉斌, 孙一豪.东数西算场景下的算力网关研发及应用[J].中兴通讯技术, 2023, 29(4): 2-7. DOI: 10.12142/ZTETJ.202304002
MA SiCong, SUN JiBin, SUN YiHao. Research and application of computing power gateway in east-data-west-computing project [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(4): 2-7. DOI:10.12142/ZTETJ.202304002
- [3]新华社.中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[R].2021.
Xinhua. Outline of the Fourteenth Five-Year Plan for the National Economic and Social Development of the People's Republic of China and Vision 2035[R].2021.
- [4]浪潮信息.2023 - 2024 年中国人工智能算力发展评估报告[R].2023.
Wave Information.2023-2024 China Artificial Intelligence Computing Power Development Assessment Report [R].2023.
- [5]张东旭.面向云服务的光互联网络技术研究[D].北京邮电大学,2018.
Zhang Dongxu. Research on optical interconnection network technology for cloud services [D]. Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [6]M. -C. Choi et al. A 2.5–32 Gb/s Gen 5-PCIe Receiver With Multi-Rate CDR Engine and Hybrid DFE. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs.2022,69(6):2677-2681.
DOI:10.1109/TCSII.2022.3153396.
- [7]T. Gui, X. Wang, M. Tang, Y. Yu, Y. Lu and L. Li. Real-Time Demonstration of Homodyne Coherent Bidirectional Transmission for Next-Generation Data Center Interconnects. Journal of Lightwave Technology.2021.39(4):1231-1238. DOI: 10.1109/JLT.2021.3052826.
- [8]C. Xie and B. Zhang. Scaling Optical Interconnects for Hyperscale Data Center Networks. Proceedings of the IEEE.2022,110(11):1699-1713. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3178977.
- [9]中兴通讯.中国移动携手中兴通讯完成国内首个集中式算力路由方案试点[R].2022.
ZTE. China Mobile and ZTE complete China's first centralized computing-power routing scheme pilot [R].2022.
- [10]张东旭. 面向云服务的光互联网络技术研究 [D]. 北京邮电大学, 2018.
Zhang Dongxu. Research on optical interconnection network technology for cloud services [D]. Beijing University

of Posts and Telecommunications,2018.

[11]王光全. 邮电设计技术. 确定性光传输支撑广域长距算力互联[R]. 2024.

Wang Guangquan. Post and telecommunications design technology. Deterministic optical transmission supports wide area long range computing power interconnection [R].2024.

[12]黄光平, 罗鉴, 周建锋. 算力网络架构与场景分析[J]. 信息通信技术, 2020, 14 (04) : 16-22.

Huang Guangping,Luo Jian,Zhou Jianfeng. Computing-power network architecture and scenario analysis[J]. Information and Communication Technology,2020,14(04):16-22.

[13]IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks--bridges and bridged networks -- amendment 31: stream reservation protocol (SRP) enhancements and performance improvements: IEEE802.1Qcc-2018[S]. 2018.

[14]中国电子技术标准化研究院.时间敏感网络白皮书[R]. 2020.

China Electronics Standardization Institute. Time sensitive network white paper[R]. 2020.

[15]孙国玮. 确定性算力网络中的资源调度和路由问题研究[D].北京邮电大学, 2023.

DOI:10.26969/d.cnki.gbydu.2023.001971.

Sun Guowei. Research on resource scheduling and routing problems in deterministic computing-power networks [D]. Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023. doi:10.26969/d.cnki.gbydu.2023.001971.

[16] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks - bridges and bridged networks - amendment 25: enhancements for scheduled traffic: IEEE Std 802.1Qbv-2015 (Amendment to IEEE Std 802.1Q-2014 as amended by IEEE Std 802.1Qca-2015, IEEE Std 802.1Qcd-2015, and IEEE Std 802.1Q-2014/Cor 1-2015)[S]. 2015.

[17]池颖英,朱海龙,李庆等.基于 TSN 的智能变电站流量确定性传输[J/OL].北京邮电大学学报:1-7

[2024-02-07].<https://doi.org/10.13190/j.jbupt.2023-049>.

Chi Yingying, Zhu Hailong, Li Qing et al.Deterministic transmission of intelligent substation traffic based on TSN[J/OL]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications:1-7[2024-02-05].

<https://doi.org/10.13190/j.jbupt.2023-049>.

[18]曾鹏程. 时间确定性网络多路径路由算法与协议研究[D]. 西安电子科技大学, 2022.

DOI: 10. 27389/d. cnki. gxadu. 2021. 000923.

Zeng Pengcheng. Research on multipath routing algorithms and protocols for time-deterministic networks [D]. Xi'an University of Electronic Science and Technology,2022. DOI:10.27389/d.cnki.gxadu.2021.000923.

[19]叶沁丹,范贵生,黄衡阳.算力网络一体化支撑方案及应用场景探索[J].数据与计算发展前沿,2022,4(06):55-66.

YE Qindan,FAN Guisheng,HUANG Hengyang. Computing-power network integration support scheme and application scenario exploration[J]. Frontiers of Data and Computing Development,2022,4(06):55-66.

[20]W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li and L. Xu,.Edge Computing: Vision and Challenges[J].IEEE Internet of Things Journal, vol. 3, no. 5, pp. 637-646, Oct. 2016, doi: 10.1109/JIOT.2016.2579198.

[21]C. Xie.Optical interconnects for data centers[J]. 2016 IEEE Photonics Conference (IPC), Waikoloa, HI, USA, 2016, pp. 59-60, doi: 10.1109/IPCon.2016.7830977.