

光交换与电交换融合技术在骨干网中的发展与应用

赵远阳 康晓彤

郑州交通发展投资集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 本文系统性地回顾了骨干网交换技术的发展历程,深入剖析了光交换与电交换各自的技术优势与固有限制;在此基础上,重点阐述了二者融合的必要性、核心驱动力及主要技术路径,包括光电混合交叉(O-E-OHybridCross-Connect)、基于软件定义网络(SDN)的协同控制、光电协同的智能调度算法以及面向业务感知的弹性光网络(EON)架构。进一步,本文探讨了该融合技术在实际骨干网中的典型应用场景,并对其面临的标准化、互操作性、成本效益及安全等挑战进行了分析。最后,文章展望了未来全光交换、人工智能深度赋能及量子通信融合等发展趋势,旨在为下一代智能、高效、绿色骨干网的建设提供理论参考与实践指导。

关键词: 骨干网;光交换;电交换;融合技术;软件定义网络;弹性光网络

引言

自互联网兴起,骨干网作为核心基础设施,其性能关乎网络服务质量与用户体验,技术历经多次迭代。当下,大模型训练推理、沉浸式媒体等催生对网络带宽的巨大需求,思科预测到2026年全球IP流量将超5.3ZB,骨干网承载超70%。面对数据洪流,传统基于电子处理的骨干网交换节点遇“电子瓶颈”,表现为信号完整性恶化、功耗散热问题严峻、处理时延难满足低时延场景要求、扩容成本效益比下降。而光交换技术虽有带宽等优势,但纯光交换网络在灵活性等方面存短板,难实现细粒度业务调度、缺乏内容感知能力,故障恢复和网络管理不如电交换成熟。因此,构建光交换与电交换智能融合网络架构成业界共识,本文将围绕此核心思想,探讨二者融合技术在骨干网中的多方面情况。

1 骨干网交换技术演进与现状分析

1.1 电交换技术:成熟与瓶颈

电交换技术是现代互联网的基石。从早期的时分复用(TDM)电路交换,到后来的异步传输模式(ATM),再到如今占据绝对主导地位的基于多协议标签交换(MPLS)和通用多协议标签交换(GMPLS)的分组交换,电交换以其卓越的灵活性、强大的业务处理能力和成熟的运维体系,支撑了互联网数十年的蓬勃发展。在当代骨干网中,核心路由器通过高速SerDes(串行器/解串行器)接口接收光信号,将其转换为电信号后,在电域内完成路由查找、转发决策、QoS(服务质量)策略执行、安全过滤等一系列复杂操作。其优势在于能够支持任意粒度的业务流,并可根据业务类型动态调整资源分配,同时具备深度业务感知能力,可执行复杂的网络功能虚拟化(NFV)服务链,加之拥有完善的协议栈、管理平面和丰富

的运维工具,构成了一个极其成熟的生态系统。然而,随着单端口速率向800G、1.6T乃至更高迈进,电交换的瓶颈愈发凸显。高速电接口和处理芯片的功耗急剧上升,据估算,骨干网中约60%的能耗消耗在光电/电光(O-E/O)转换和电域处理上,形成了难以逾越的功耗墙。此外,即使采用最先进的ASIC(专用集成电路),电域处理仍会引入数十至数百微秒的固定时延,这对于高频交易等场景是不可接受的,构成了时延墙。更严峻的是,高速SerDes和交换芯片的设计、制造成本高昂,且随着速率提升,边际成本递增效应显著,使得单纯依赖电交换进行扩容的经济性越来越差。

1.2 光交换技术:潜力与局限

光交换技术旨在绕过电域处理,直接在光域完成信号的路由与交换。根据交换颗粒度的不同,主要分为光路交换(OCS)、光分组交换(OPS)和光突发交换(OBS)。光路交换(OCS)是目前最成熟、应用最广泛的光交换技术。它通过可重构光分插复用器(ROADM)或光交叉连接器(OXC)建立端到端的光通道(Lightpath)。OCS的优势在于其能够提供超大带宽,单个光通道即可承载数十甚至上百Gbps的流量,且可轻松升级至单波400G/800G;同时,信号在光域直通,仅受光纤传播时延限制,通常为毫秒级,远低于电交换,实现了超低时延;更重要的是,省去了O-E-O转换和电域处理,使其功耗极低,能效比极高。尽管OCS优势明显,但其固有局限也十分突出^[1]。OCS建立的是静态或半静态的连接,一旦建立,带宽即被独占,无法根据业务流量的动态变化进行实时调整,这导致了网络资源利用率低下。此外,光交换节点对承载的业务内容“一无所知”,无法区分优先级,也无法提供差异化的QoS保障,缺乏业务感知能力。在运维层

面,光层故障定位困难,保护倒换机制相对电层更为复杂,且缺乏统一的、精细化的管理视图,给大规模网络的运维带来了挑战。

2 光电融合的必要性 with 核心驱动力

推动光交换与电交换走向深度融合的核心驱动力源于未来网络的四大关键需求:第一,超大容量与超高能效的双重压力。数据流量的持续增长要求网络容量不断提升,而“双碳”目标又对网络能耗提出了严苛限制。光电融合架构允许将稳定、大颗粒的背景流量(如数据中心间备份、视频流媒体)卸载到光通道上,实现“光速直达”,从而释放宝贵的电域处理资源,大幅降低单位比特的传输能耗。第二,超低时延与确定性体验的需求。对于金融、工业控制、远程手术等关键业务,网络时延必须可控、可预测。通过在骨干网中为这类业务预置或按需建立光通道,可以规避所有电域处理时延,提供接近物理极限的确定性低时延服务。第三,网络智能化与自动化运维的诉求。随着网络规模和复杂度的激增,传统的人工运维模式已不堪重负。融合网络需要一个统一的、抽象的控制平面,能够同时理解光层和电层的拓扑、资源和状态,并基于全局视图做出最优的调度决策,实现“自动驾驶网络”。第四,业务多样性与网络弹性的要求。未来的网络需要同时承载从海量物联网小包到超高清视频流等差异巨大的业务。融合架构可以根据业务特征,智能地为其分配光通道或电通道,甚至在同一业务流中,将控制信令走电通道、数据面走光通道,从而实现网络资源的弹性供给和业务体验的最优化。

3 光电融合的关键技术路径

3.1 光电混合交叉设备

这是融合架构的物理基础。新一代的骨干网核心节点不再是单纯的路由器或ROADM,而是集成了光交叉矩阵和电交叉矩阵的混合设备。其典型架构包含一个大容量的光交叉矩阵(如基于MEMS或LCOS技术)和一个高性能的电交叉矩阵(基于CMOSASIC),二者通过高速接口互联。设备的核心在于智能疏导(Grooming)单元,它负责将输入的业务流进行分类,将小颗粒、高价值、需要深度处理的业务(如企业专线、云网协同业务)导向电交叉矩阵进行精细处理,而将大颗粒、稳定的业务汇聚成一个或多个波长,直接送入光交叉矩阵进行直通^[2]。为了缩短电域处理单元与光引擎之间的物理距离,降低互连功耗和时延,共封装光学(CPO)与硅光技术被广泛应用于此类设备中,实现了光电芯片的紧密协同。

3.2 基于SDN的协同控制架构

如果说混合交叉设备是“手脚”,那么统一的控制平

面就是“大脑”。软件定义网络(SDN)为此提供了理想的框架。SDN控制器被扩展为一个多层协同控制器,它同时维护着一张IP/MPLS拓扑(电层)和一张WDM光路拓扑(光层)。通过北向接口接收来自上层业务编排器的意图(Intent),并通过南向接口(如OpenFlow,NETCONF/YANG)分别下发指令给电层设备和光层设备。这种架构的关键在于跨层抽象能力,它能够将底层复杂的光电资源抽象为统一的虚拟网络切片,向上层应用提供简单、一致的服务接口。例如,一个“低时延切片”可能由部分光通道和部分电通道共同构成。凭借其集中式的全局网络视图,控制器能够基于实时流量矩阵、链路状态、业务SLA(服务等级协议)等信息,做出最优的光电资源联合分配决策。

3.3 光电协同的智能调度算法

在SDN控制器的指挥下,高效的调度算法是实现融合价值的关键。这些算法需要解决的核心问题是:何时、何地、以何种方式(光或电)建立连接?算法首先会对业务流进行特征提取和分类,对于具有高带宽、低时延抖动、长期稳定等特征的流,会优先考虑建立光通道。在此基础上,结合机器学习技术,算法可以预测未来一段时间内的流量趋势,当预测到某条路径上的聚合流量将长期超过某个阈值时,控制器可以提前触发光通道的建立(Provisioning),实现从电通道到光通道的平滑切换(Migration)^[3]。在弹性光网络(EON)的环境下,光通道的带宽不再是固定的50GHz或100GHz,而是可以根据需求动态调整,调度算法可以为一个业务分配一个可变带宽的光通道,从而实现比传统固定栅格网络更精细的资源利用。

4 融合技术在骨干网中的典型应用场景

4.1 数据中心互联(DCI)

大型云服务商拥有遍布全球的多个数据中心,它们之间需要进行海量的数据同步、备份和负载均衡。这些流量通常具有大带宽、高稳定性、可预测性强的特点,是光电融合技术的最佳用武之地。通过在DCI骨干网上部署混合交叉节点,可以将大部分东西向流量疏导至光通道,极大地降低了传输成本和时延,提升了数据中心集群的整体性能,为云服务的敏捷性和可靠性提供了坚实的网络底座。

4.2 5G/6G前传与回传网络

5G网络的CU(集中单元)/DU(分布单元)分离架构以及未来的6G太赫兹通信,对回传网络提出了超低时延(<100μs)和超高可靠性的要求。光电融合骨干网可以为核心网与边缘数据中心之间提供确定性的低时延光

通道,确保关键控制信令和用户面数据的快速、可靠传输,从而满足5G URLLC(超可靠低时延通信)和未来6G极致性能场景的严苛需求。

4.3 高性能计算(HPC)与科学大装置

在国家级超算中心、粒子对撞机、射电望远镜阵列等场景中,计算节点间需要交换PB级的科学数据。这些任务对网络带宽和时延极其敏感,任何微小的延迟都可能导致计算效率的显著下降。通过构建专用的光电融合网络,可以为HPC任务提供近乎无损、超低时延的通信环境,显著加速科研进程,使得科学家们能够更快地处理和海量实验数据。

4.4 金融交易网络

高频交易(HFT)领域是“时间就是金钱”的极致体现。交易指令每快一微秒到达交易所,都可能带来巨大的经济利益。光电融合骨干网可以通过建立点对点的直连光通道,为金融机构提供市场上最低的、可承诺的端到端时延,这种确定性的性能优势已成为其在激烈市场竞争中的核心竞争力之一。

5 面临的挑战与未来展望

5.1 挑战

尽管光电融合技术前景广阔,但在大规模商用过程中仍面临诸多挑战。不同厂商的混合设备、控制器之间的接口和协议尚未完全统一,标准化与互操作性的缺失阻碍了多厂商环境下的无缝集成。初期部署混合交叉设备的CAPEX(资本支出)较高,运营商需要找到清晰的商业模式来证明其长期OPEX(运营支出)节省的价值,以实现良好的成本效益平衡。此外,跨层的网络架构带来了新的攻击面,如何保障光层和电层协同下的端到端安全是一个新课题,同时光通道的故障恢复机制也需要与电层的快速重路由(FRR)等技术有效协同,以确保整体网络的高可靠性。

5.2 展望

展望未来,光电融合技术将沿着以下方向持续演

进。随着光缓存、光逻辑等关键技术的突破,OPS/OBS有望在未来十年内取得实质性进展,使得骨干网的交换颗粒度从波长级向分组级演进,最终实现更彻底的全光化。人工智能将深度融入网络的规划、建设、维护、优化(PBOO)全生命周期,AI驱动预测性疏导、自愈性保护和自优化资源分配将成为标准能力,打造出真正的AI原生融合网络^[4]。更长远地看,未来的骨干网不仅是经典信息的高速公路,也将是量子密钥分发(QKD)等量子信息的载体,光电融合架构需要前瞻性地考虑如何在同一光纤基础设施上,安全、高效地共传经典光信号和脆弱的量子信号,为下一代信息基础设施奠定基础。

6 结语

光交换与电交换的融合,绝非两种技术的简单拼凑,而是面向未来网络需求的一场深刻变革。它通过在架构层面实现优势互补,在控制层面实现智能协同,在应用层面实现价值最大化,为构建下一代超宽、极简、智慧、绿色的骨干网提供了切实可行的技术路径。尽管前路仍有挑战,但随着技术的不断成熟、标准的逐步完善和商业价值的日益凸显,光电深度融合的骨干网必将成为支撑数字经济发展和智能化社会运转的核心基石。持续投入研发,推动产业链协同创新,将是把握这一历史性机遇的关键。

参考文献

- [1]邓献策,刘沛龙,刘凯,等.基于扩展与合并的星载光电混合交换设计方法[J/OL].清华大学学报(自然科学版),1-9[2026-01-08].
- [2]任会林,黄善国,郭秉礼,等.大容量星载光电混合交换技术研究(特邀)[J].光学学报,2025,45(13):469-483.
- [3]郭元之.智算中心光交换网络架构及调度控制系统研究[D].北京邮电大学,2025.
- [4]杨慧.面向数据中心光交换网络的资源调度方法研究[D].北京邮电大学,2025.