

面向智慧通信的全光网络与光纤技术融合应用

黄 章

润建股份有限公司 广西 南宁 530000

摘 要：随着5G、物联网及云计算等智慧通信业务的爆发式增长，传统光-电-光转换模式已成为骨干网传输速率与能耗瓶颈。全光网络以其在光域内完成信号交换、路由与处理的能力，成为下一代智慧通信基础设施的核心发展方向。本文系统分析了全光网络的架构特征与关键技术，探讨了新型光纤技术与全光系统的融合应用，提出了面向边缘计算与数据中心互联的融合解决方案。空分复用技术可大幅提升单纤传输容量，结合全光交叉连接技术可显著降低节点能耗，为构建超大容量、超低时延、绿色节能的智慧通信网络提供技术支撑。

关键词：全光网络；光纤技术；空分复用；智慧通信；光交换

引言：智慧通信时代对网络带宽、时延和能耗提出了前所未有的要求。传统光传输系统中“光-电-光”转换模式导致节点功耗随端口速率急剧增长，已成为制约网络性能的关键瓶颈。全光网络通过在光域内完成信号的全过程处理，避免了多次光电转换，是实现超大容量传输与亚毫秒级时延的核心路径。本文从全光网络架构出发，深入探讨少模光纤、多芯光纤等空分复用技术与全光交换系统的融合应用，分析其在智慧城域网骨干网与数据中心互联中的部署效益。

1 全光网络技术体系与发展需求

1.1 全光网络的基本架构与核心特征

全光网络指信号从源节点到目的节点的传输过程中始终以光形式存在，仅在用户接入端口进行光电转换。其核心架构包括光传输层、光交换层和光控制层。与传统光网络相比，全光网络具有三个本质特征：透明性，信号格式与速率透明，无需关心协议类型；可重构性，通过可调谐光器件实现动态波长调度；低时延性，光域处理时延为纳秒级，较电域处理大幅降低。这些特征使其天然适配智慧通信对高带宽、低抖动的苛刻要求。全光网络的实现依赖三大技术支柱：高性能光纤、光子集成器件及智能控制平面。

1.2 智慧通信对光网络的新要求

智慧通信涵盖增强移动宽带、超可靠低时延通信和海量机器类通信三大场景。增强移动宽带要求单纤容量达到Tbit/s甚至Pbit/s量级，驱动光网络向空分复用演进。超可靠低时延通信要求端到端时延低于1ms，全光交换可将节点时延压缩至纳秒级。海量机器类通信带来海量小数据包突发流量，要求光网络具备毫秒级的快速波长调度能力^[1]。当前传统分层电交换架构已无法适应数据中心间流量的快速增长，全光背板与光互连技术成为突破方

向。智慧通信还要求光网络具备感知与自动化能力，推动其向“光感知一体化”演进。

1.3 全光网络与光纤技术的协同演进路径

全光网络的发展经历了三个技术代际。第一代以波分复用和点到点光传输为特征，光纤仅作为“管道”，交换仍依赖电域。第二代引入可重构光分插复用器和光交叉连接，实现了波长级光域调度，但单纤容量受限于单模光纤的非线性香农极限。第三代以空分复用和全光信号处理为标志，通过少模光纤、多芯光纤突破非线性极限，同时发展全光再生、全光波长转换等处理技术。当前研究前沿是将人工智能引入光网络控制平面，构建“智能全光网”。新型光纤提供更多空间维度，全光交换系统提供灵活路由能力，二者融合支撑下一代智慧通信基础设施。

2 面向全光网络的新型光纤技术

2.1 空分复用光纤：少模与多芯光纤

空分复用是突破单模光纤容量瓶颈的核心技术，其实现载体主要有两种类型。少模光纤（FMF）支持2-10个独立传输模式，每个模式可承载一路WDM信号，模式复用器与解复用器是实现模分复用的关键器件，典型插损为3-5dB，模式串扰需控制在-20dB以下。多芯光纤（MCF）在单根光纤包层内集成多个独立纤芯（通常为4芯、7芯、12芯、19芯排列），芯间距需在35-50微米之间以平衡串扰与耦合效率。表1对比了两种空分复用光纤的关键性能参数。目前，7芯4模光纤的实验传输容量已达到10.16Pbit/s，是同等长度单模光纤的30倍以上。空分复用光纤面临的挑战包括：模式串扰引起的信号损伤、芯间串扰的非线性效应及高精度对准所需的扇入扇出器件。近年研究表明，采用多输入多输出（MIMO）数字信号处理可有效解耦模式串扰，结合低密度奇偶校验码

(LDPC) 编码, 可将传输距离延长至3000km以上。

表1 少模光纤与多芯光纤关键性能参数对比

参数指标	少模光纤 (FMF)	多芯光纤 (MCF)
空间通道数	3-10个模式	4-19个纤芯
典型芯径	18-25 μm	125 μm (包层)
空间信道串扰	-15至-25dB	-35至-45dB
复用/解复用器件	模式选择耦合器、相位板	扇入扇出器件
放大器兼容性	需模式控制掺杂光纤	可兼容EDFA阵列
主要应用场景	长距离骨干传输	数据中心短距互连

2.2 超低损耗与大有有效面积光纤

超低损耗光纤是延长全光网络无电再生中继距离的关键。传统单模光纤在1550nm窗口的衰减系数约为0.20dB/km, 通过优化纤芯掺杂工艺和改进波导结构, 商用超低损耗光纤已将衰减系数显著降低, 实验室条件下已接近石英光纤的理论极限。大有有效面积光纤将有效面积大幅扩展, 可有效抑制四波混频等非线性效应, 入纤功率提升, 进而增加无中继传输距离约30%。在跨洋海缆与陆地干线中, 超低损耗光纤可显著延长高速信号的传输距离, 减少电中继站数量, 全生命周期成本大幅降低。该技术面临的挑战是弯曲损耗增大, 需配合优化的光缆结构设计^[2]。

2.3 特种光纤在全光处理中的应用

特种光纤在全光信号处理中扮演重要角色。高非线性光纤通过设计微结构将非线性系数大幅提升, 可在较短长度内实现四波混频、自相位调制等效应, 用于全光波长转换、全光再生和参量放大。掺铒光纤放大器是WDM系统的核心, 增益带宽覆盖C+L波段, 单级增益可达较高水平, 噪声系数较低。保偏光纤用于维持光信号的偏振态, 在全光相干接收和偏振复用系统中不可或缺。特种光纤的共性是定制化程度高、制备工艺复杂、成本较高, 但其在全光信号处理中的独特优势使其成为高端全光系统的关键组件。

2.4 光纤传感与通信融合技术

光纤传感与通信融合技术利用同一根光纤同时承载通信信号和传感信号, 使光网络从“透明管道”升级为“感知网络”。典型技术路线包括在通信波段传输信号的同时, 在其他波段叠加传感探测信号, 通过波分复用实现共纤传输; 或利用通信信号的偏振态、相位等参数变化反演外界扰动。分布式声波传感可实现沿光纤的高空间分辨率, 用于识别光缆周边的挖掘、车辆等事件。在智慧光网络试点中, 利用现网光缆中的少量纤芯部署传感系统, 成功预警多次外力破坏事件, 避免了潜在经济损失。光传感与通信的深度融合将支撑自感知、自愈

合金光网络。

3 全光网络关键技术与系统融合

3.1 全光交换技术与节点架构

全光交换按粒度可分为光纤级、波长级、子波长级和分组级。波长级交换以波长选择开关为核心器件, 可实现任意波长到任意端口的独立切换。多维ROADM节点通过WSS阵列实现无色、无向、无阻塞的灵活调度。当前商用全光交叉连接设备以波长级交换为主, 典型节点吞吐量可达较高水平, 整机功耗远低于同等容量的电交换设备, 节能效率达到60%-80%。全光节点架构的演进方向是引入SDN控制与光性能监测, 实现频谱资源的精细化调度。

3.2 边缘计算场景的光-电协同组网

边缘计算对光网络提出了动态波长调度和敏捷服务开通的新要求。在边缘-核心两级架构中, 核心层采用全光波长交换承载大颗粒汇聚流量, 边缘层采用光电混合交换处理突发小流量。边缘节点配备可调谐光收发器, 利用SDN控制器快速完成波长路径建立与拆除, 可将平均传输时延大幅降低。针对边缘计算中的东西向流量, 全光组播技术基于WSS的分光功能实现光域复制, 相比电域复制可节省大量功耗。

3.3 数据中心全光互连解决方案

数据中心流量增长驱动全光技术应用。随着交换芯片速率提升, 电互联的功耗与散热问题日益突出。光互连方案将光引擎与交换芯片共封装, 采用硅光技术实现光电转换。当互连距离超过一定范围时, 光互连的能耗低于电互联, 且误码率更优^[3]。在数据中心之间, 全光波长交换可显著简化IP层路由跳数。全光互连与电互连在不同场景下的能耗与成本差异明显, 光互连在长距离、高速率场景中优势突出。表2给出了不同场景下全光互连与电互连的能耗与成本对比。

表2 数据中心全光互连与电互连对比 (以400G端口计)

对比指标	电互连方案	光互连方案 (共封装)
端口功耗	25-30W	12-15W
能耗效率	30pJ/bit	15pJ/bit
信号时延	200-300ns	50-80ns
传输距离	$\leq 2\text{m}$ (背板) / $\leq 3\text{m}$ (铜缆)	$\leq 2\text{km}$
误码率 (BER)	10^{-12}	10^{-15}
每端口成本	80-120美元	150-200美元

3.4 光纤-全光系统匹配优化设计

实现光纤与全光系统的高效融合需要多维度的匹配优化。色散管理方面, 标准单模光纤配合色散补偿光纤

或数字电域色散均衡算法,可显著延长高速信号的色散受限距离。对于少模光纤,模间色散成为主要限制因素,需采用MIMO均衡技术。非线性管理方面,大有效面积光纤可降低非线性系数,提升入纤功率;而空分复用光纤的非线性效应更为复杂,包括芯内非线性、芯间交叉相位调制和模间非线性耦合。机器学习方法(如神经网络非线性均衡器)可有效抑制非线性损伤。优化设计的目标是在光纤性能、系统成本和实现复杂度之间取得平衡,针对骨干网、城域网、数据中心等不同应用场景,选取最适合的光纤与系统组合。

4 面向智慧通信的全光网络应用案例

4.1 智慧城域网骨干网全光化改造

东部沿海地区一座城市的智慧城市项目对其城域网骨干网进行全光化改造,原有OTN+IP承载网存在多层电交换、时延大、能耗高等问题。改造方案采用ROADM全光波长交换架构,在核心节点部署20维WSS,边缘节点部署可调谐光模块。全网波长资源由SDN控制器统一调度,根据业务等级动态分配波长路径。改造后,核心节点间的时延从改造前的850 μ s降至240 μ s,能耗从45kW降至18kW。波道利用率从42%提升至73%,可新增承载120Gbit/s的业务流量。在可靠性方面,光层1+1保护可实现50ms内的故障倒换,较电层保护的200ms恢复时间提升四倍。该项目投资回收期为2.3年,年运维成本降低约210万元。该案例表明,全光化改造可显著提升智慧城域网的承载能力与服务质量,具有较高的经济与运营效益^[4]。

4.2 算力网络中的光-计算协同

算力网络要求将计算任务调度与光路资源调配进行联合优化。在长三角地区的算力枢纽节点,部署了基于波长级调度的光-算协同实验平台。平台采用少模光纤连接三个数据中心节点(相距约80km),每个节点的光

交换设备支持波长级粒度计算任务分配。当算力调度系统预测到某节点计算资源紧张时,通过控制平面发送波长重配置请求,在200ms内将部分任务光路切换至空闲节点。相比于电域调度,光层协同将任务平均迁移时间从15s压缩至0.8s。实验测量了三种典型AI训练任务的数据迁移效果,采用光-算协同后,整体训练完成时间缩短24%-31%。该平台同时采集了光纤传输质量的实时数据,利用机器学习预测光路性能劣化,提前发起算力迁移,实现了高可靠的任务完成保障。

结束语

全光网络与新型光纤技术的融合是支撑智慧通信发展的核心路径。本文系统分析了全光网络的架构特征与演进需求,探讨了少模光纤、多芯光纤等空分复用技术与全光交换系统的协同应用。智慧城域网与数据中心全光互连的应用案例验证了光-电协同组网的可行性与效益。未来研究方向包括:人工智能驱动的光网络智能运维、通感一体化光纤技术、面向空天地海一体化全光接入架构,以及量子通信与经典光通信的融合。

参考文献

- [1]古春海.基于全光网络的光纤通信传送网性能监测技术[J].通信电源技术,2024,41(16):158-160.
- [2]习志君,谢润荣,杨虎,等.基于光纤技术的信息网络系统建设策略与应用案例分析[J].智能建筑与智慧城市,2025(z1):137-142.
- [3]黄鑫,曹康怡,柴明渊,等.基于阈值系数拟合的高精度拉曼分布式光纤传感技术[J].物理学报,2026,75(4):274-285.
- [4]常彦彪,沈世奎,张贺,等.反谐振空芯光纤技术研究进展[J].光通信研究,2026(1):101-109.