

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240217.

专题: 智算中心光网络算网融合关键技术

龚宇涵, 杨超, 周庭伊. 数据中心“三超”光互联技术发展及应用[J]. 光通信研究, 2026(4):83-91.

Gong Y H, Yang C, Zhou T Y. Development and Application of "Three Supers" Optical Interconnection Technology in Data Centers[J]. Study on Optical Communications, 2026(4):83-91.

数据中心“三超”光互联技术发展及应用

龚宇涵, 杨超, 周庭伊

(中国信息通信科技集团有限公司 光通信技术和网络全国重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 随着大数据时代的到来, 全球网络流量爆炸式增长, 数据容量的增长从传统远距离传输逐步向中短距离传输转变, 面向远距离传输的“超大容量, 超低延迟, 超低功耗”方案也应该逐步转变为适用于数据中心光互联的技术方案。文章基于数据中心光互联需求, 对现有数据中心“三超”技术方案及研究成果进行了分析和总结, 明确其目前面临的挑战和技术瓶颈, 也根据技术方案案例阐述其未来发展方向, 证明了“三超”对于数据中心光互联的重要性, 为未来“三超”光互联的实现提供技术支持和指导。

关键词: 数据中心; 光互联; 大容量; 低延迟; 低功耗

中图分类号: TN929

文献标志码: A

Development and Application of "Three Supers" Optical Interconnection Technology in Data Centers

GONG Yuhuan, YANG Chao, ZHOU Tingyi

(National Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, China Information Communication Technologies Group Corporation, Wuhan 430073, China)

Abstract: With the advent of the big data era, global network traffic has experienced explosive growth, leading to a shift in data transmission from traditional long-distance methods to short- and medium-distance approaches. Consequently, the "super large capacity, super low latency, and super low power consumption" solutions aimed at long-distance transmission should gradually transition to technologies suitable for optical interconnection in data centers. This paper analyzes and summarizes the existing technological solutions and research achievements regarding "three super" in data centers based on the demands of optical interconnection. It identifies current challenges and technological bottlenecks faced in this domain. Additionally, through case studies of various technological solutions, the paper provides future development directions, demonstrating the significance of "three super" for optical interconnection in data centers. This provides a technical foundation and guidance for the realization of "three super" optical interconnection in the future.

Key words: data center; optical interconnect; high-capacity; low-latency; low-power consumption

0 引言

随着信息时代的到来, 特别是互联网、云计算和视频流等高带宽网络应用的发展, 导致全球数据流量飞速增长^[1-2]。国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)预测, 全球移动数据流量将呈指数级增长并持续下去, 到 2030 年, 整体移动数据流量会达到惊人的每月 5 ZB^[3]。爆炸性的流量增长对传统电信网络提出了严峻的挑战, 面对带宽和延迟等各方面的需求, 传统“超大容量, 超远距离, 超高速率”的“三超”传输方案难以满足数据中心光互联的应用理念^[4]。因此, 研究和探讨数据中心需要何种光互联方案变得尤为重要。

面向数据中心的光互联方案首先需要应对海量数据传输和存储需求, 随着第五代移动通信技术(5th Generation Mobile Communication, 5G)等技术的普及, 用户和设备产生的数据量激增, 带宽限制愈加明显, 所以“超大容量”的光互联是数据中心的迫切需求^[5]; 其次, 视频流媒体和自动驾驶等新技术的广泛应用要求数据中心具有“超低延迟”的光互联, 这对于提升用户体验和安全性是至关重要的, 快速的响应能力同时也是数据中心的优势之一^[6]; 此外, 随着各种新技术的涌现和发展, 人们对成本问题的关注度日益提高, 如何降低功耗, 保证数据中心的可持续发展也是数据中心光互联需要解决的关键问题^[7]。

针对以上需求, 具有结构简单、高带宽及低功耗

收稿日期: 2024-10-23; 修回日期: 2024-11-06; 纸质出版日期: 2026-08-10

基金项目: “3551 光谷人才计划”创新人才资助项目(HZ2023003)

作者简介: 龚宇涵(2000—), 女, 辽宁辽阳人。硕士, 主要研究方向为光传输系统和数字信号处理。

通信作者: 杨超, 正高级工程师。E-mail: yangchao@cict.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

特性的强度调制/直接检测(Intensity Modulation Direct Detection, IMDD)^[8]成为数据中心光互联的主要实现方式。本文介绍了基于IMDD系统的面向数据中心“三超”光互联技术发展及应用现状,重点分析了不同技术方案的实施成果与应用前景,为未来数据中心“三超”光互联提供了指导和技术支持。

1 数据中心超大容量光互联技术

1.1 WDM 技术

数据中心利用波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术大幅度提升资源利用率,实现超大容量光互联进而满足云计算等技术的带宽需求^[9]。此外,新型光子材料和集成光学技术的发展逐步降低了WDM系统的成本^[10],这也大大促进了其在数据中心的普及^[11-20]。图1所示为部分近年来已经成功实施的应用WDM实现数据中心光互联的案例。

由于高波特率IMDD信号对色散的敏感性,所以数据中心O波段的WDM传输方案占比较大。但在其他波段WDM传输方案也取得了诸多成果,特别是文献^[20]利用中国信息通信科技集团有限公司(China Information Communication Technologies Group Corporation, CICT)生产的超高带宽强度调制器进行优化设计,成功地在C+L波段实现了基于IMDD单芯光纤传输高达4 Tbit/s的新传输容量记录。

以上方案的成功实施证明了WDM技术的发展与应用能有效增加数据传输的容量,支持数据中

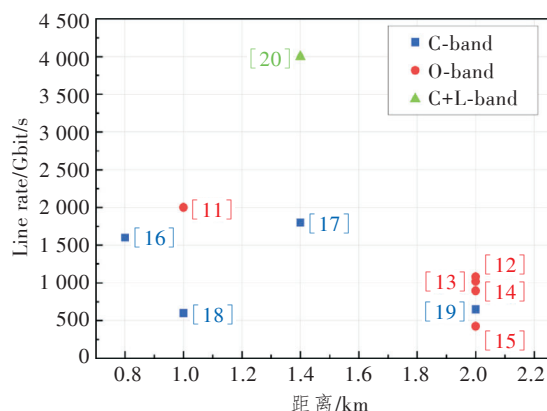


图1 利用WDM实现数据中心光互联案例

Figure 1 The cases of implementing optical interconnects in data centers using WDM

心处理大规模的数据流。但该方案所引入高性能光模块以及相关设备的成本是否已经超过了WDM技术本身节约的成本仍需进一步探讨。同时,未来WDM技术在数据中心的应用将会随着技术的逐步成熟而逐步增加复用波长的数量,那么在高密度WDM的情况下,信号间的串扰则会成为一个不可忽视的问题。为避免信号间串扰导致传输性能下降,未来可能仍需探索更先进的数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)技术以及更成熟的光滤波器设计。

1.2 SDM 技术

除了WDM技术,能够充分有效利用光纤空间维度的空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)技术也是数据中心超大容量光互联的常用技术之一。图2所示为几种多芯光纤截面示意图。

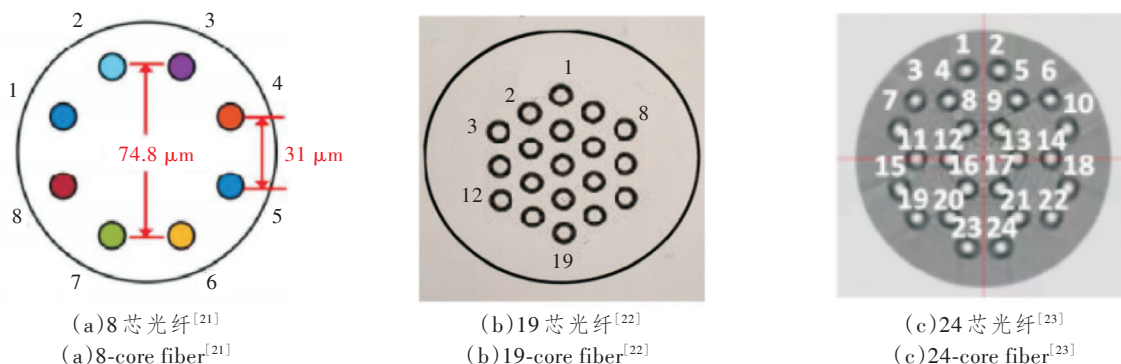


图2 不同多芯光纤截面示意图

Figure 2 The schematic diagrams of different multi-core fiber cross-sections

目前已有多个基于IMDD利用SDM技术成功实现短距离大容量传输的案例^[21-24],这些方案的成功证明了SDM技术在数据中心光互联中的适用性。但是不同纤芯之间的干扰必会限制SDM技术的性能,对此文献^[23]采用双向传输保证相邻两芯

的信号传出方向相反,从而最大限度地减少芯间干扰。同时采用概率整形、线性均衡和半导体光放大器等技术提高了高阶调制系统的接收灵敏度。

在实际应用中,SDM经常与WDM技术相结合以实现更大容量的数据传输。例如,利用高容量

8 芯光纤实现 12.8 Tbit/s(8×8×200 Gbit/s)的 SDM-WDM 传输实验^[25]。该实验结果验证了 SDM 与 WDM 技术结合的巨大优势,可以同时提升空间和频谱两个维度的传输容量,实现对信道的高效利用。二者的结合使光纤的可用资源利用率最大化,极大地满足了数据中心对超大容量光互联的需求。SDM 与 WDM 技术的结合使数据中心可以灵活地扩展容量,在不改变原有设施的前提下,可以通过增加波长或通道来增大容量,这对于未来需要不断扩展的数据中心尤为重要。此外,现在也有利用其他复用方式扩展传输容量的方案,例如模分复用技术^[26]。因此未来数据中心超大容量光互联的实现

应趋向于多种复用技术的结合,从多个维度同时扩展容量,在保证信道资源充分利用的同时,最大程度地确保灵活性。

2 数据中心超低延迟光互联技术

2.1 光交换技术

超低延迟是实现实时应用的关键,光交换技术省去电信号转换为光信号的过程,同时可以更加高效、灵活地实现网络路由,因此被认为是实现数据中心超低延迟光互联的有效方法^[7]。表 1 和表 2 所示分别为目前业界主要光交换技术各方面的特性及成熟度比较^[7]。

表 1 不同光交换技术特性比较^[7]

Table 1 Comparison of different optical switching technologies characteristics^[7]

交换技术	光开关性能要求	收发模块性能要求	其他	交换粒度	控制时效性
OCS	~10 ms	连续模式	支持 WDM	波长	~200 ms,链路端到端预约配置
OPS	~10 ns	突发模式	单波可混合 WDM	光包	标签配合路由表转发,不依赖实时控制
OBS	~1 μs ~10 ns	突发模式	单波可混合 WDM	光突发包	信令预约时隙,实时协议交互
OTDM	~100 ns	突发模式	单波可混合 WDM	光时隙	支持实时按需调整

注:OCS 为光电交换;OPS 为开放式可插拔规范;OBS 为光突发交换;OTDM 为光时分复用。

表 2 不同光交换技术成熟度比较^[7]

Table 2 Comparison of maturity of different optical switching technologies^[7]

交换技术	光开关	收发模块	交换粒度	控制时效性
OCS	成熟度高	成熟度高	成熟	控制平台与协议成熟
OPS	成熟度低	10 Gbit/s 突发接收技术成熟,高速突发模式亟待研究	依赖光标签处理技术	要求低
OBS	成熟度低		依赖光开关性能	不成熟
OTDM	成熟度中等		依赖光开关性能	相对成熟

本文通过对以上不同光交换技术现状的总结,可知目前不同光交换技术的成熟度不同,固有特性不同导致其应用场景和前景也有所不同。其中,OTDM 系统在控制时效性等方面具有一定优势,混合 WDM 技术可以作为未来实现数据中心超低延迟光互联的一种可行方案。其中 OCS 作为全光交换核心技术被 Google、NVIDIA 等公司大范围应用,国内的光迅科技也在 2024 年推出了 OCS 全光交换机,该产品可大幅降低数据传输时延,助力实现数据中心低延迟光互联。但目前已有的方案大多采用架顶交换机,这并不利于时延的降低,针对此问题,文献^[27]提出了一种新的机架内光互联方案,与传统的电交换相比,端到端延迟平均降低了 90%。

然而全光交换技术目前仍无法全面替代电交换技术细粒度的业务调度能力,所以仍需设计符合数

据中心要求的光电融合方案。文献^[28]中展示的基于阵列波导光栅路由器的 25 Gbit/s 数据中心网络 OCS 系统为数据中心提供了具有 1 个时钟周期精度的时间同步机制,防止分组拥塞的带宽调度方案。此外还有 Lotus 和 Sirius 等方案的成功实施证明了光电融合交换更具灵活性和兼容性^[29]。

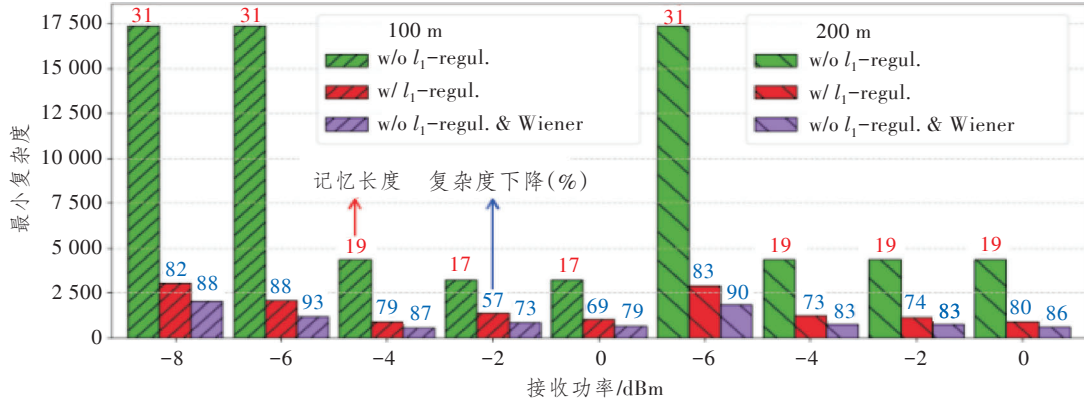
综上所述,结合全光交换与光电混合交换的优缺点,未来更趋向于将二者融合在一个系统中以应对数据中心多样化的需求,而这也将成为数据中心超低延迟光互联的主流技术。

2.2 低复杂度的 DSP 算法

DSP 算法在数据中心光互联中应用广泛。然而由于大多数 DSP 算法复杂度较高,在原有算法基础上降低 DSP 算法复杂度是实现数据中心低延迟光互联的有效方法之一。通过引入正则化进行稀疏

权值估计来降低复杂度是一种比较成熟的优化方案,基于该方法已成功实现对传统 Volterra 非线性均衡器复杂度最大降低 93%^[30]和对深度神经网络 (Deep Neural Network, DNN) 非线性均衡复杂度

降低 71% 的实验^[31]。图 3 所示为 Volterra 复杂度降低程度,图 4 所示为传统 DNN 和稀疏 DNN 结构图。



注:w/o为 without;w/为 with; l_1 -regul为 l_1 -正则化;Wiener为 Wiener算法^[32]。

图 3 不同接收功率下算法复杂度比较^[30]

Figure 3 Comparison of algorithm complexity at different received power levels^[30]

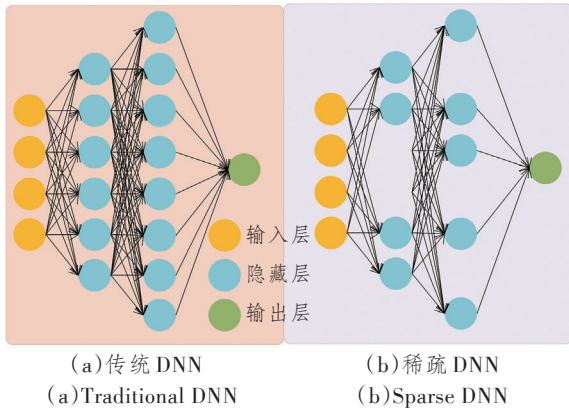


图 4 传统 DNN 与稀疏 DNN 结构对比^[31]

Figure 4 Comparison of structure in traditional DNN and sparse DNN^[31]

综上所述,通过降低 DSP 算法的复杂度能够实现快速且高效的信号处理,满足数据中心对低延迟的要求。然而,DSP 算法处理信号的能力通常与其复杂度呈正相关关系(处理能力越强,复杂度越高),因此如何在保证信号处理质量的情况下优化 DSP 算法将是未来实现数据中心低延迟光互联的关键挑战之一。从目前数据中心 DSP 算法的应用现状来看,未来在算法模型方面,机器学习应该会被广泛应用;而随着数据中心光互联朝着光电协同处理的方向发展,DSP 算法也将进一步在光信号处理方面发挥协同作用;此外,高性能的 DSP 需要强大的硬件支持,未来的低延迟 DSP 算法应逐步与硬件更加紧密的联合,如依赖于光计算加速器等硬件进一步减少信号处理时间,实现数据中心超低延迟光互联的目标。

2.3 HCF

信号在物理介质中的传播时间是影响数据中心光互联延迟的主要因素之一。空芯光纤(Hollow-Core Fiber, HCF)不仅能有效降低信号传播的延迟和而且具备比传统光纤更低的非线性效应,这为需要超低延迟的数据中心光互联提供了更高网络设计灵活性,同时还保证了信号传输质量。表 3 所示为 HCF、标准单模光纤(Standard Single-Mode Fiber, SSMF)和多模光纤(Multi-Mode Fiber, MMF)在性能上的比较。

与传统光纤相比,HCF 已经被证实拥有低延迟和低损耗等优点,相关研究也已经在实验室取得成功^[36],文献^[37]验证了在相同的实验环路设置下,与使用 SSMF 和非零色散位移光纤相比,HCF 分别实现了约 5 倍和 2 倍的增益提升。在超高速率下,HCF 降低延迟效果依旧明显,文献^[38]首次实现了基于嵌套抗谐振无节点光纤的 C 波段光子数据中心内具有 837 Gbit/s 创纪录净比特率互联,光纤传输延迟和 DSP 延迟分别降低 31.5% 和 40%。然而对于抗谐振 HCF,其弯曲损耗在实际应用中至关重要,文献^[39]首次提供了嵌套抗谐振 HCF 的近似解析公式,使低紧密弯曲损失嵌套抗谐振 HCF 的设计更加简单,在 1 550 nm 处实现了 0.039 dB/m 的低弯曲损耗,增加了嵌套抗谐振 HCF 的适用性。但目前实际应用于数据中心的方案仍然有限,HCF 的连接和接口技术是限制因素之一,为此文献^[40]成功开发了 HCF 连接器和电缆,使其在真正低延

迟传输线上的应用迈进一大步,若此结果能应用于数据中心将会推进超低延迟光互联技术的发展。

综上所述,在传输方面的各项优点使得 HCF

在数据中心拥有广阔的应用前景,但是大规模的应用必须依赖材料和制造技术的进步,逐步降低 HCF 的生产成本,提升其传输性能,才能推动实现数据中心更低延迟的光互联。

表 3 HCF、SSMF 和 MMF 特性比较^[33]

Table 3 Performance comparison of HCF, SSMF and MMF^[33]

	HCF	SSMF	MMF
衰减	~1 dB/km (1 550 nm); 0.65 dB/km ^[34]	0.18 dB/km* (1 550 nm)	2.3 dB/km* (850 nm); 0.6 dB/km* (1 300 nm)
数值孔径	大(0.2*)	小(0.14*)	大(0.2*)
模式数量	单模/少模	单模	多模
单波带宽	大	大	小
工作窗口	灵活,带宽>500 μm,2 μm 时损耗更低 ^[35]	1 550 nm 波段	850 nm 波段
物理延迟	小(~3.33 μs/km, 接近真空光极限)	大(~4.83 μs/km)	大(~4.94 μs/km)
应用场景	短距离到 km 级长距离	从短距到长距离	<1 km 短距离

注:* 来自 Thorlabs 的典型值。(https://www.thorlabs.com/)

3 数据中心超低功耗光互联技术

3.1 硅光子器件

硅光子器件通常具备小尺寸、高集成度和低功耗的特点,适合大规模应用于数据中心的光互联网络。图 5 所示为硅光在数据中心的应用规模预估。

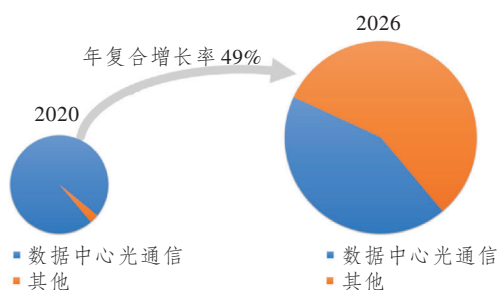


图 5 硅光在数据中心应用市场规模预估^[41]

Figure 5 The market size estimation for silicon photonics in data center applications^[41]

典型的低损耗硅光子器件包括硅光调制器、WDM 器和光耦合器等^[42-44]。其中,硅光调制器目前应用较多,例如 2024 年,北京理工大学提出并设计了一种低损耗的超紧凑硅光子微盘调制器(Micro-disk Modulator, MDM)^[42]。该方案验证了其所提 MDM 具备超紧凑的占地面积、低插入损耗和宽调制带宽,可以作为实现数据中心超低功耗光互联的方案之一。

虽然硅光调制器有可能满足数据中心对器件低功耗的要求,但是由于硅材料本身特性导致其带宽受限,与传统铌酸锂调制器相比虽然成本更低,但是其性能也会相对较弱。此外由于光学器件对精度要

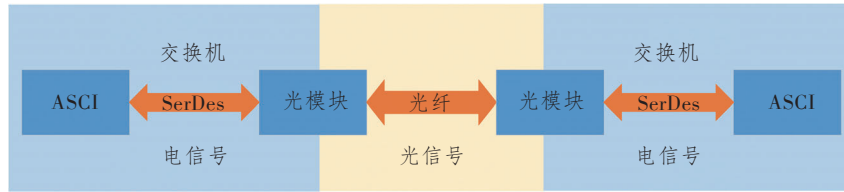
求比电子器件高,硅光子器件对制造工艺精度要求也随之提高,因此在实际量产中如何保证器件质量也是需要讨论和解决的问题^[45]。这些问题导致设计完全适用于数据中心光互联的硅光子器件极具挑战性。

综上所述,成本问题是数据中心光互联的关键问题之一,而实现低功耗数据中心光互联的方式主要是通过降低器件成本或精简器件数量。而随着技术的发展,纳米光子学、石墨烯和氮化硅等新材料的应用为超低功耗光互联提供了新的技术路径。新材料技术将推动光子器件的小型化和高效化,并为实现数据中心超低功耗光互联提供了解决方案。

3.2 CPO 与 LPO 技术

随着光模块的升级,其功耗也随之上涨,占整机功耗的 40% 以上。光模块能耗的飞速增长给数据中心功耗与成本造成了巨大压力,因此需要新的技术解决传统可插拔光模块的功耗问题。共封装光学(Co-Packaged Optics, CPO)技术是一种新型的数据中心光互联方案,其原理如图 6 所示。

CPO 的核心思想是将光芯片与交换芯片或处理器等集成电路封装在一起,缩短光信号在光和电器件之间传输距离进而降低功耗。目前英特尔、博通等企业已推出基于 CPO 的多款产品,预计在 2026~2027 年 CPO 技术将实现大规模生产。Lightcounting 数据显示,CPO 出货量主要用于超大规模数据中心的短距离连接,全球 CPO 端口出货量预计会从 2023 年的 5 万个增长至 2027 年的 450 万个。CPO 技术的应用为数据中心提供了低功耗、高可靠



注:ASCI为专用集成电路;SerDes为串行器/解串器。

图 6 CPO 技术原理图

Figure 6 The principle structure of CPO technology

性的通信服务,但是其生产工艺复杂,内部散热等问题会限制其在数据中心的大规模应用。因此,CPO 技术下一步需要依赖开发更紧凑、更先进的集成技术和封装方案以及更高效的散热技术,才能进一步保证数据中心超低功耗光互联的质量。

线性驱动可插拔光模块(Linear Drive Pluggable Optics, LPO)也是一种数据中心光互联技术,通过线性直驱技术将传统的 DSP 替换掉进而降低系统功耗,其主要运用在高速光模块领域。LPO 方案与传统 DSP 方案的对比如图 7 所示。

LPO 技术是为了降低 DSP 的功耗而产生的,LPO 将 DSP 芯片功能集成在交换芯片中,从而省

去 DSP 芯片,只留下跨阻放大器(Transimpedance Amplifier, TIA)和驱动(Driver),组件数量的减少使系统更加简便。而通过牺牲 DSP 实现功耗的降低必然会影响系统的误码率,同时限制传输距离,所以 LPO 技术的应用场景具有针对性,目前各个厂商发展 LPO 技术时也在探索同时降低功耗并维持误码率不变的优化创新方案。其中线性接收光学(Linear Receive Optics, LRO)技术在发射端保留 DSP 而在接收端采用无 DSP 的线性输出,可以弥补 LPO 方案的缺陷,在 2024 年美国光纤通信展览会(Optical Fiber Communication Conference, OFC)上也对适用于 1.6 Tbit/s 的 LRO 进行了重点讨论。

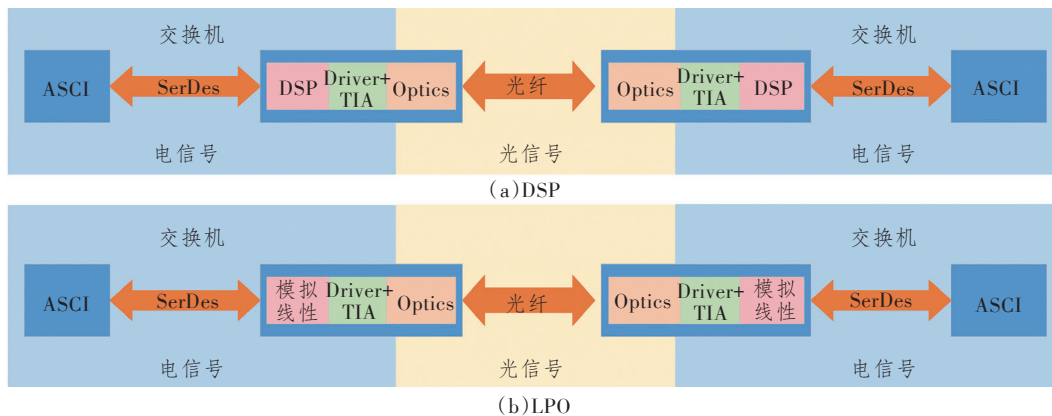


图 7 LPO 与 DSP 方案对比

Figure 7 Comparison between DSP and LPO schemes

CPO 和 LPO 技术都正成为解决数据中心超低功耗光互联的主流方案,但是二者的发展都要依靠封装和散热技术的进步,从而进一步降低成本。针对两种技术各自的优缺点,未来哪种技术将会成为数据中心的主流仍然需要进一步讨论和观察。

3.3 低功耗 FEC 设计

作为数据中心 DSP 功耗的主要部分,设计低功耗的前向纠错(Forward Error Correction, FEC)码是数据中心实现超低功耗光互联的研究重点之一。表 4 所示为 3 种不同 FEC 方案的比较。

表 4 不同 FEC 方案比较

Table 4 Performance comparison of different FEC schemes

	复杂度	性能	开销	延迟
SFECL	低	低	高	低
CFEC	低	低	低	高
OFEC	高	高	低	高

注:SFECL 为软判决前向纠错逻辑;CFEC 为级联前向纠错;OFEC 为开放式前向纠错。

其中,SFECL 采用内部软判决码与外部硬判决码结合的级联码,实现了性能与功耗间的良好平衡。但是在 3 者比较中,基于迭代编织码的 OFEC 方案性能最优。然而其伴随着高复杂度进而会导致

整体功耗升高,将其解码算法分为多个阶段进行可有效缓解此问题,有利于保持高性能的同时降低总功耗^[46]。此外,随着 4 电平脉冲幅度调制(4-Level Pulse Amplitude Modulation, PAM4)等高阶调制格式在高速系统中应用,低功耗的 FEC 正被优化以支持这些格式,文献[47]就提出并验证了采用低密度奇偶校验码(Low-Density Parity-Check, LDPC)编码概率整形 PAM4 的 IMDD 传输。然而虽然 LDPC 的性能可接近香农极限,但其较高复杂度是影响实现数据中心低功耗光互联的因素之一,为权衡功耗与性能,文献[48]提出了一种轻量级的 Reed-Solomon(RS)码与 LDPC 级联方法,仿真结果表明,与传统 FEC 方案相比,在误码率为 10^{-3} 量级时,其性能大约可提高 1.7 dB。

综上所述,在不影响纠错效果的前提下尽可能降低功耗,是低功耗 FEC 设计的核心理念。在软件方面,应不断开发更高效的算法,未来还应逐步与机器学习等技术融合,以实现动态优化性能。在硬件方面, FEC 应与光模块中的硬件加速器集成,依靠硬件实现高效、实时的编码与解码,这会减少处理延迟并进一步降低功耗。

4 结束语

在大数据时代,流量的增长逐渐向中短距离城域网网络传输转移,传统针对远距离传输的“三超”方案在短距离传输中已难以完全适用,面向数据中心的光互联需要专用的“三超”方案。本文从“超大容量,超低延迟,超低功耗”3 个方面介绍了现有技术方案取得的成果,探讨了这些技术目前的局限、应用前景以及对数据中心光互联的必要性。

数据中心“三超”光互联内部是相互联系、相互促进的。超大容量的实现需要解决信号间串扰和传输中损耗的问题,而解决这类问题一般需采用先进的 DSP 算法,但传统的 DSP 算法复杂度较高,所以需要新的技术方案降低其复杂度以满足数据中心光互联低延迟的要求,同时又不能损害 DSP 算法处理信号的能力。然而,高性能的 DSP 算法往往需要专用硬件,这会增加系统硬件成本,所以更低损耗的器件被研制,用以实现数据中心低功耗的光互联。

综上所述,“超大容量,超低延迟,超低功耗”是未来数据中心光互联的技术目标,提升性能的同时控制成本,并实现各种技术相互协同是其基本思想,而数据中心技术的实现依赖于器件材料的更新以及智能化的普及。新型材料的引入和智能化网络架构的

提出是突破数据中心“三超”光互联技术瓶颈的关键。

参考文献:

- [1] Wettlin T, Calabrò S, Rahman T, et al. DSP for High-Speed Short-Reach IM/DD Systems Using PAM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(24): 6771–6778.
- [2] Tu Y, Xiang M, Cheng W, et al. Simplified Look-up Table (LUT) based Digital Pre-Distortion for 100 GBaud/λ PAM-4 Transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(1): 158–165.
- [3] Tariq F, Khandaker M R A, Wong K K, et al. A Speculative Study on 6G[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(4): 118–125.
- [4] 张帆, 朱逸萧. 面向数据中心光互连的高速光传输技术[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(5): 17–24.
Zhang F, Zhu Y X. High-Speed Transmission Technologies for Data Center Optical Interconnection[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(5): 17–24.
- [5] 王力. 面向数据中心光互连的简化相干技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
Wang L. Research on Coherent-Lite Technology for Optical Interconnection of Data Center[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [6] 刘璐, 吴冰冰. 片间光互连发展态势分析[J]. 光通信研究, 2024(5): 240029.
Liu L, Wu B B. Analysis of the Development Trend of Inter-Chip Optical Interconnection[J]. Study on Optical Communications, 2024(5): 240029.
- [7] 郭秉礼, 黄善国. 数据中心中光交换技术研究的现状与挑战[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(5): 25–30.
Guo B L, Huang S G. Optical Switching for Data Center: Current Status and Challenging[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(5): 25–30.
- [8] Xiang M, Fu S, Xu O, et al. Advanced DSP Enabled C-Band 112 Gbit/s/λ PAM-4 Transmissions with Severe Bandwidth-Constraint[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(4): 987–996.
- [9] El-Nahal F, Hanik N. Technologies for Future Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Networks[J]. IET Optoelectronics, 2020, 14(2): 53–57.
- [10] Khonina S N, Kazanskiy N L, Ali Butt M, et al. Optical Multiplexing Techniques and Their Marriage for On-Chip and Optical Fiber Communication: a Review[J]. Opto-Electronic Advances, 2022, 5(8): 210127.
- [11] Xia P, Li Z, Ning N, et al. 8×250 Gbit/s PAM4 Transmission over 1 km Single Mode Fiber with an All-

- Silicon LAN WDM Transmitter[C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023: 10116514.
- [12] Hossain M S, Rahman T, Stojanović N, et al. Feasibility of Transmitting 270 Gbit/s with PAM-8 in O-Band CWDM4 with IM/DD System [C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021. Washington, DC, USA: Optica Publishing Group, 2021: W7F. 3.
- [13] Masuda A, Yamamoto S, Taniguchi H, et al. 255-Gbps PAM-8 Transmission under 20-GHz Bandwidth Limitation Using NL-MLSE based on Volterra Filter[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019. San Diego, California, USA: OSA, 2019: W4I. 6.
- [14] Taniguchi H, Yamamoto S, Kisaka Y, et al. 800-Gbps PAM-4 O-Band Transmission through 2-km SMF Using 4 λ LAN-WDM TOSA with MLSE based on Non-linear Channel Estimation and Decision Feedback[C]//2021 European Conference on Optical Communication (ECOC). Bordeaux, France: IEEE, 2021: 9606080.
- [15] Zhong K, Mo J, Grzybowski R, et al. 400 Gbps PAM-4 Signal Transmission Using a Monolithic Laser Integrated Silicon Photonics Transmitter[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019. San Diego, California, USA: OSA, 2019: Tu2I. 4.
- [16] Grillanda S, Che D, Bolle C, et al. 8 λ ×200 Gb/s WDM Transmission Enabled by a Hybrid-Integrated Comb Source without Optical Amplification[J]. IET Conference Proceedings, 2023(34): 1023–1026.
- [17] Li C, Liu Z, Sun Y, et al. C-Band Net 1.8 Tb/s (240 Gb/s/ λ ×8 λ) DWDM IM/DD Transmission over 1.4 km AR-HCF with Linear FFE Only[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024. San Diego California, USA: Optica Publishing Group, 2024: Tu3H. 6.
- [18] Reza A G, Venkatasubramani L N, Gautam A R, et al. 4×130 Gbit/s PS-PAM-16 Transmissions Using an Integrated SOA-PIN Design for Intra-DCIs Enabled by Machine Learning [J]. IET Conference Proceedings, 2023(34): 373–376.
- [19] Xing Z, Xiang M, El-Fiky E, et al. 600 G PAM4 Transmission Using a 4-Lambda CWDM TOSA based on Controlled-ISI Pulse Shaping and Tomlinson-Harashima Precoding [C]//45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019). Dublin, Ireland: IET, 2019: 0867.
- [20] Yang C, Li C, Gong Y, et al. 4 Tb/s (500 Gb/s×8) PAM-16 WDM Transmission over 1.4-km Anti-Resonant Hollow-Core Fiber based on Ultra-High Bandwidth Modulator at C+L Band [C]//50th European Conference on Optical Communications (ECOC 2024). Frankfurt, Germany: IET, 2024: Th1B. 2.
- [21] Yang Y, Xu Z, Ji H, et al. Net 8×250 Gbit/s/λ PAM6/8 Optical Interconnect over High-Density Eight-Core Fiber and Low-Crosstalk Laser Direct Writing FI/FO Devices[C]//2023 Asia Communications and Photonics Conference/2023 International Photonics and Optoelectronics Meetings (ACP/POEM). Wuhan, China: IEEE, 2023: 10369710.
- [22] Fan R, Yang C, Luo M. 3.078 Tb/s (162-Gb/s×19) PAM-8 Transmission based on 1-km 19-Core Fiber Using Liquid Time-Constant Networks[C]//2023 Asia Communications and Photonics Conference/2023 International Photonics and Optoelectronics Meetings (ACP/POEM). Wuhan, China: IEEE, 2023: 10369606.
- [23] Yang C, Fan R, Yu H, et al. 4.8 Tb/s PS-PAM-8 Bidirectional Transmission over 10-km 24-Core Fiber Using Linear Equalization at O-Band[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2023. San Diego California, USA: Optica Publishing Group, 2023: Th1E. 6.
- [24] Yang Y, Xu Z, Ji H, et al. Single-λ 3-Tb/s (8 SDM×120 GBd) Probabilistically-Shaped-PAM16 Optical Interconnections over Standard 125 μm-Cladding MCF Using Linear Equalizer Only[C]//2023 Asia Communications and Photonics Conference/2023 International Photonics and Optoelectronics Meetings (ACP/POEM). Wuhan, China: IEEE, 2023: 10368755.
- [25] Luis R S, Puttnam B J, Rademacher G, et al. Multi-core Fiber Interconnects for Multi-Terabit Spine-Leaf Datacenter Network Topologies[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(7): C41–C47.
- [26] Benyahya K, Simonneau C, Ghazisaeidi A, et al. High-Speed Bi-Directional Transmission over Multimode Fiber Link in IM/DD Systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(18): 4174–4180.
- [27] 王金涛, 刘逢清. 光互连数据中心网络架构与业务路由技术研究[J]. 光通信研究, 2024(5): 230117.
- Wang J T, Liu F Q. Research on Intra-Rack Architecture and Routing Technology of Optical Interconnection Networks for Data Centers[J]. Study on Optical Communications, 2024(5): 230117.
- [28] Dang D, Guo B, Li W, et al. AWGR-based 25 Gb/s Optical-Electrical Switching System Featuring Dynamic Bandwidth Allocating [J]. IET Conference Proceedings, 2023, 2023(34): 1745–1748.

- [29] 唐雄燕, 魏步征, 沈世奎, 等. 智算数据中心光电交换技术综述[J]. 光通信研究, 2024(5): 240062.
Tang X Y, Wei B Z, Shen S K, et al. Overview of Optoelectronic Switching Technology in Artificial Intelligent Data Centers[J]. Study on Optical Communications, 2024(5): 240062.
- [30] Huang W J, Chang W F, Wei C C, et al. 93% Complexity Reduction of Volterra Nonlinear Equalizer by ℓ_1 -Regularization for 112-Gbps PAM-4 850-nm VCSEL Optical Interconnect[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC). San Diego, California, USA: IEEE, 2018: 1–3.
- [31] Yadav G S, Chuang C Y, Feng K M, et al. Computation Efficient Sparse DNN Nonlinear Equalization for IM/DD 112 Gbps PAM4 Inter-Data Center Optical Interconnects[J]. Optics Letters, 2021, 46(9): 1999–2002.
- [32] Simoncelli E P, Adelson E H. Noise Removal via Bayesian Wavelet Coring [C]//Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing. Lausanne, Switzerland: IEEE, 1996: 559512.
- [33] Shen W, Du J, Sun L, et al. Low-Latency and High-Speed Hollow-Core Fiber Optical Interconnection at 2-Micron Waveband[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(15): 3874–3882.
- [34] Bradley T D, Jasion G T, Hayes J R, et al. Antiresonant Hollow Core Fibre with 0.65 dB/km Attenuation across the C and L Telecommunication Bands [C]//45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019). Dublin, Ireland: Institution of Engineering and Technology, 2019: PD3. 1.
- [35] Sakr H, Bradley T D, Hong Y, et al. Ultrawide Bandwidth Hollow Core Fiber for Interband Short Reach Data Transmission [C]//Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers 2019. San Diego, California, USA: OSA, 2019: Th4A. 1.
- [36] 李泳成, 杨昊, 郭宁宁, 等. 超低损耗光纤技术的研究现状[J]. 光通信研究, 2021(6): 45–51.
Li Y C, Yang H, Guo N N, et al. A Survey on Ultra-Low Loss Fiber Technology [J]. Study on Optical Communications, 2021(6): 45–51.
- [37] Hong Y, Bottrill K R H, Bradley T D, et al. Low-Latency WDM Intensity-Modulation and Direct-Detection Transmission over >100 km Distances in a Hollow Core Fiber[J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(9): 2100102.
- [38] Yang H, Xiang M, Cheng W, et al. 800 G Low-Latency Photonic Data-Center Interconnections over 5 km Hollow-Core Fiber[J]. IEEE Communications Magazine, 2025, 63(3): 122–128.
- [39] Zhu J, Wang C, Qin Y, et al. Theoretical Analysis and Fabrication of a Nested Antiresonant Hollow-Core Fiber with Low Tight Bend Loss[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(14): 4972–4979.
- [40] Mukasa K, Takagi T. Hollow Core Fiber Cable Technologies [J]. Optical Fiber Technology, 2023, 80: 103447.
- [41] 李德钊, 许鹏飞, 朱科健, 等. 硅基光电子在通信中的应用和挑战[J]. 电信科学, 2021, 37(10): 1–11.
Li D Z, Xu P F, Zhu K J, et al. Applications and Challenges of Silicon-based Optoelectronics in Communication[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(10): 1–11.
- [42] Zhang W, Yang S, Zheng S, et al. Low-Loss Ultra-Compact Silicon Photonic Integrated Micro-Disk Modulator for Large-Scale WDM Optical Interconnection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(9): 3306–3313.
- [43] Dourado D M, de Farias G B, Moreira M M A C, et al. Silicon Modulator Design Using a System-Oriented Methodology for High-Speed Data Center Interconnect PAM-4 Applications [J]. Optics Communications, 2021, 492: 126977.
- [44] Calabretta N, Prifti K, Xue X, et al. Nanoseconds Photonic Integrated Switches for Optical Data Center Interconnect Systems [C]//Optical Interconnects XX. San Francisco, USA: SPIE, 2020: 4.
- [45] Dourado D M, de Farias G B, Gounella R H, et al. Challenges in Silicon Photonics Modulators for Data Center Interconnect Applications [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144: 107376.
- [46] Nagarajan R, Martino A, Morero D A, et al. Recent Advances in Low-Power Digital Signal Processing Technologies for Data Center Applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(12): 4222–4232.
- [47] Li H, Cheng C, Li Y. LDPC-Coded 50-Gbaud IM/DD PAM-4 Transmission Employing Probabilistic Amplitude Shaping based on Prefix-Free Code Distribution Matching [J]. Optical Fiber Technology, 2021, 66: 102670.
- [48] Ma X, Ma X, Shan Y. Improved Forward Error Correction Technology of RS-LDPC Cascade Code in Optical Transport Network [J]. Optoelectronics Letters, 2023, 19(10): 593–598.