

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.260128.

专题: 智算中心光网络算网融合关键技术

王玮,李祖宇,董铠阳,等. 面向AI超节点互连的简化相干光通信技术[J]. 光通信研究, 2026(4):18–28.

Wang W, Li Z Y, Dong K Y, et al. Simplified Coherent Technology for AI Supernode Optical Interconnects[J]. Study on Optical Communications, 2026(4):18–28.

面向 AI 超节点互连的简化相干光通信技术(特邀)

王 玮,李祖宇,董铠阳,李 凡

(中山大学 a. 电子与信息工程学院; b. 光电材料与技术国家重点实验室,广州 510006)

摘要:【目的】相干光通信技术因其多维调制能力,正成为高速智算光互连体系的核心演进方向。然而,高昂的系统成本与功耗,仍是制约其在面向人工智能(AI)超节点短距离互连场景广泛部署的关键瓶颈。为在保持相干技术大容量高性能传输优势的同时,有效降低实施成本与功耗,面向AI超节点互连的简化相干技术已成为当前的研究热点。【方法】针对传统相干在成本和功耗方面面临的挑战,文章将从低成本锁相/锁频技术、低硬件需求的数字信号处理(DSP)算法以及实时实现3个维度,综述文章所提简化相干技术方案。在低成本锁相/锁频技术方面,文章分别提出了一种基于预扫描并结合快速傅里叶变换(FFT)和线性调频Z变换(CZT)的频偏锁定方法,以及一种粗频偏捕获结合细相位跟踪的数字化外差式光锁相环方案,以避免使用昂贵的窄线宽激光器;在低硬件需求DSP算法方面,文章分别提出了一种基于单导频解偏振复用的简化均衡技术与一种基于符号运算的新型单倍波特率定时误差检测(TED)算法3Sign-TED算法,以降低均衡模块与时钟恢复模块的硬件需求;在实时实现方面,文章基于32 Gbaud双偏振正交相移键控(QPSK)信号进行了低复杂度实时相干系统验证。【结果】实验结果表明,文章所提锁相/锁频技术可有效保证锁频精度及频率稳定性,将频率波动抑制在200 kHz以内;在简化均衡方面,文章所提方案不仅有效降低了均衡模块复杂度,并且将偏振追踪速度提升至10 Mrad/s;在时钟恢复方面,文章所提新型单倍波特率3Sign-TED算法可有效避免任何乘法运算,具有极低的硬件复杂度;此外,基于32 Gbaud双偏振QPSK实时相干平台,实现了净速率超100 Gbit/s的低复杂度实时相干系统验证。【结论】上述技术的突破,为未来面向智算中心高速光互连提供了简化相干光通信技术及系统架构的参考。

关键词:智算中心光互连;简化相干光通信技术;锁相/锁频技术;实时相干系统;空芯光纤传输

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Simplified Coherent Technology for AI Supernode Optical Interconnects

WANG Wei, LI Zuyu, DONG Kaiyang, LI Fan

(a. School of Electronics and Information Technology; b. State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: 【Objective】 Due to the multi-dimensional modulation capability, coherent technology is emerging as a core evolutionary direction for high-speed intelligent computing optical interconnects. However, the high cost and power consumption remain key bottlenecks restricting its deployment in short-reach scenarios. To effectively reduce its implementation cost and power consumption while maintaining the advantages of high-capacity and high-performance, simplified coherent technologies for Artificial Intelligence (AI) supernode interconnects have become a hot research topic. 【Methods】 To tackle the cost and power bottlenecks inherent in conventional coherent architectures, this article systematically reviews existing simplified coherent solutions from three perspectives: low-cost phase/frequency-locking techniques, hardware-efficient Digital Signal Processing (DSP) algorithms, and real-time implementations. In terms of low-cost phase/frequency-locking techniques, a frequency offset locking scheme based on pre-scanning combined with Fast Fourier Transform (FFT) and Chirp Z-Transform (CZT), as well as a digital heterodyne optical phase-locked loop scheme combining coarse frequency offset acquisition with fine phase tracking, are proposed to avoid using expensive narrow-linewidth lasers. As for hardware-efficient DSP algorithms, a single-pilot-tone-based polarization demultiplexing method and a novel baud-rate 3Sign-Timing Error Detector (TED) scheme based on sign operations are proposed to reduce the hardware requirements of the equalization and clock recovery modules. Besides, a low-complexity real-time coherent system is verified based on 32 Gbaud dual-polarization Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) signals. 【Results】 Experimental results demonstrate that the proposed phase/frequency-locking techniques can effectively ensure frequency-locking accuracy and frequency stability, with frequency fluctuation suppressed within 200 kHz. In terms of simplified equalization, the proposed scheme not only reduces the complexity of the equalization module but also improves the polarization tracking speed to 10 Mrad/s. As for the clock recovery, the proposed 3Sign-TED scheme can effectively avoid any multiplication operations, exhibiting extremely low hardware complexity. Furthermore, based on the 32 Gbaud dual-polarization QPSK real-time coherent platform, a low-complexity real-time coherent system with a net data rate exceeding 100 Gbit/s is successfully demonstrated.

收稿日期:2026-05-09; 修回日期:2026-06-23; 纸质出版日期:2026-08-10

基金项目:国家科技部重点研发计划青年科学家资助项目(2023YFB2906000);国家自然科学基金联合基金重点资助项目(U25B2011);国家自然科学基金资助项目(62271517, U2001601, 62035018);广东省基础与应用基础研究资助项目(2023B1515020003)

作者简介:王玮(1996–),女,浙江诸暨人。博士,主要研究方向为短距离光互连。

通信作者:李凡,教授。E-mail:lifan39@mail.sysu.edu.cn

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

【Conclusion】The above technical breakthroughs provide a reference for future high-speed optical interconnects in AI data centers.

Key words: AI data center interconnects; simplified coherent technology; phase/frequency-locking techniques; real-time coherent system; hollow-core fiber transmission

0 引言

生成式人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术的爆发式发展,正推动全球科技革命与产业变革迈入全新阶段,智能算力逐渐成为驱动当前智能化演进的核心引擎。当前,以 ChatGPT、Gemini 和 DeepSeek 等为代表的 AI 大模型持续向超大规模和多模态方向演进,在自然语言理解与复杂逻辑推理等核心能力上实现了质的飞跃。然而,超大规模 AI 模型的训练与推理对底层算力提出了前所未有的挑战。据 Epoch 统计,当前 AI 模型的算力需求已突破 1 020 FLOPs,远超摩尔定律所预测的增长曲线^[1]。因此,如何实现大规模、可持续且高效调度的算力供给,已成为制约 AI 发展的核心瓶颈,亦是全球科技竞争的焦点。为应对算力需求的指数级扩张,以数据中心为代表的算力设施经历了 3 次关键演化。

纵向扩展(Scale-Up):其核心思路是增强单台服务器的硬件资源以提升系统能力,如集成更多的图形处理器等,使单机柜算力可达数百 PFLOPs 量级,从而支撑大型模型训练。然而,该方案受制于 3 大物理极限:物理空间无法无限容纳更多计算单元、散热能力难以支撑持续攀升的功耗密度以及电互连范围的固有局限。

横向扩展(Scale-Out):为突破单机柜的物理约束,横向扩展将通过增加服务器数量构成计算集群,汇聚庞大算力以提升系统的整体吞吐量。该技术理论上可无限扩展,并具备较强的容错能力,算力可达数十 EFLOPs。然而,其扩展规模受限于单个数据中心的电力、制冷规模以及节点间的通信带宽。

跨域扩展(Scale-Across):为打破单一数据中心的算力极限,跨域扩展则利用高速光通信网络连接地理分散的数据中心,形成统一的巨大算力资源池,从而实现算力资源的协同调度与优化。

面向未来持续增长的算力需求,跨域扩展已成为释放算力以提升大模型训练效率的必然路径,也是本文重点关注的光互连应用场景。我国已从国家层面部署“东数西算”工程,以优化算力资源的时空布局,并在《“十五五”规划建议》明确提出要“强化算力高效供给”,以构建全国一体化算力体系。而实现

这一目标将依赖于高性能光互连技术。在大规模分布式算力协同场景下,海量的样本数据和模型梯度需在节点之间进行频繁、高速地同步。这种密集的数据交互模式将引发智算中心间的数据吞吐量呈现爆发式增长,从而对短距离光互连传输系统的传输能力提出严峻挑战。强度调制直接检测(Intensity Modulation and Direct Detection, IM/DD)技术因其在成本和功耗方面的显著优势,是当前短距离光互连的主要实现路径^[2]。然而,随着光互连接口速率向 800 Gbit/s、1.6 Tbit/s 乃至 3.2 Tbit/s 持续演进,IM/DD 受限于其单一的调制维度和可实现的传输距离,难以支撑跨域扩展(>80 km)对 TB 量级数据传输的需求。相比之下,相干技术凭借其丰富的调制维度以及色散可补偿能力,在大容量和长距离传输方面更具优势,且呈现出明显的下沉趋势,成为高速智算光互连体系的核心演进方向^[3]。然而,其进一步优化的关键在于降低相干技术的系统成本与数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)功耗。

基于上述背景,本文聚焦智算中心间光互连应用场景中传输系统亟需扩容升级这一实际需求,探讨了相干光通信技术下沉至该应用场景的优势,并分析了其在成本和功耗方面所面临的核心挑战。为此,本文从成本和功耗这两大维度出发,系统综述了现有的简化相干技术,进而介绍了本文在降低传统相干系统成本与功耗方面的研究工作。在成本方面,本文聚焦激光器成本问题,提出低成本锁相/锁频技术,以降低传统相干系统对窄线宽激光器的依赖;在功耗方面,本文重点围绕高功耗 DSP 算法模块的简化展开叙述,分别提出基于导频解偏振复用的简化均衡方案与一种新型低复杂度单倍波特率时钟恢复算法。此外,本文基于 32 Gbaud 双偏振正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)信号,完成了低复杂度相干实时系统验证。

1 相干光互连的优势与挑战

相比于传统的 IM/DD 系统,相干光通信技术通过对光场的振幅、相位以及偏振多个维度进行协同调制,可显著提升系统频谱效率与传输容量。同时,得益于接收端能够恢复信号的相位信息,相干系统具备数字域色散补偿能力。此外,由于在接收端,

将由一个高功率的本振(Local Oscillator, LO)激光器与接收信号进行拍频以实现相干探测,使其具有更高的接收灵敏度。然而,在相干光通信技术向智算中心间光互连场景延伸的过程中,仍面临着系统成本与功耗的严峻挑战,具体表现为如下两大核心问题。

激光器成本:在经典相干光通信系统中,接收端需采用独立的 LO 以实现相干探测。由于 LO 与信号光载波之间难以保持频率和相位的锁定,这不仅要求对收发端激光器进行严格的温控,以防止严重的波长漂移,同时也要求采用昂贵的窄线宽激光器以抑制相位噪声。因此,相干系统对激光器的高需求,导致其在成本与复杂度层面均显著高于 IM/DD 系统^[4-5]。

DSP 功耗:虽然相干技术可利用多个维度进行信息的传输,然而多维复用易导致多维损伤的耦合,迫使传统相干接收机必须依赖高复杂度的过采样 DSP 算法来保证系统传输的可靠性。这不但使得模/数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)的功耗倍增,更导致后端 DSP 逻辑资源的计算负载与能耗急剧攀升^[6-8]。然而,随着国家“双碳”战略的深入实施,对数据中心的能效水平提出了更高标准。因此,探索低功耗和低复杂度的简化 DSP 算法成为关键。

2 简化相干光互连技术及系统架构

针对传统相干系统在激光器成本和 DSP 算法功耗方面的挑战,本节对现有的简化相干方案进行了综述,并介绍了本文所提基于锁相/锁频激光器技术的低成本相干方案以及低硬件需求的新型相干 DSP 算法。

2.1 低成本锁相/锁频激光器

在传统相干光通信系统中,收发端通常采用两个相互独立的激光器以实现相干探测,而两个激光器之间将不可避免地存在频率失配。尤其是在采用低成本激光器时,如分布式反馈(Distributed Feedback, DFB)激光器,将存在更明显的频率漂移与波动,由此产生的大频偏将显著影响后续 DSP 中载波恢复的稳定性与复杂度。因此,传统相干系统通常采用昂贵的窄线宽外腔激光器(External Cavity Laser, ECL)以保证波长的稳定性并降低系统相位噪声,从而导致系统的高成本开销。针对这一问题,业界已探索了多种解决方案。近年来,自相干探测技术备受关注,其核心在于 LO 与信号光载波源自于

同一激光器,从而节省了接收端的独立激光器。该技术可分为两类:一类是基于非线性受激布里渊散射的光载波恢复技术^[9],另一类是通过额外光纤链路传输载波的同源自相干技术^[10]。前者利用非线性受激布里渊散射,从输入信号本身重构 LO,但需构建包含增益介质、环行器、移频器及放大器的布里渊散射光载波恢复环路,且放大后的载波频率与泵浦光频率存在较大的频偏;而后者通过直接传输发射端的光载波至接收端作为 LO,可从根本上避免频偏问题。然而,光载波在光纤传输过程中会经历随机的偏振态变化,需要在光载波传输链路中加入自动偏振控制器以避免偏振衰落问题。同时,光载波在经过传输之后,其功率会存在衰减,因此需在接收端进行功率放大。虽然上述两种方案均可节省接收端的激光器,但同时也引入了新的成本开销。除此之外,采用激光器频率锁定技术亦可缓解相干系统对激光器的严苛需求,并在系统层面解决了频偏问题,近年来也引起了广泛的关注。现有技术主要包括光注入锁定技术和基于光锁相环的激光器锁相/锁频技术。注入锁定技术的基本原理为:接收端将较弱的主激光器光源注入到从激光器中,使输出光的频率和相位与输入光一致。然而,其稳定性极易受到随机偏振旋转的影响^[11-12]。而基于光锁相环的锁频技术将依赖于光电协同的闭环反馈结构,通过鉴频/鉴相模块获取误差信号以实时调节可调激光器频率,从而实现 LO 与信号光频率的锁定,并且可采用低成本 DFB 激光器替代窄线宽 ECL,降低激光器成本开销^[13-17]。表 1 所示为上述几种方案的优缺点。

表 1 简化相干方案对比

Table 1 The comparison of simplified coherent technologies

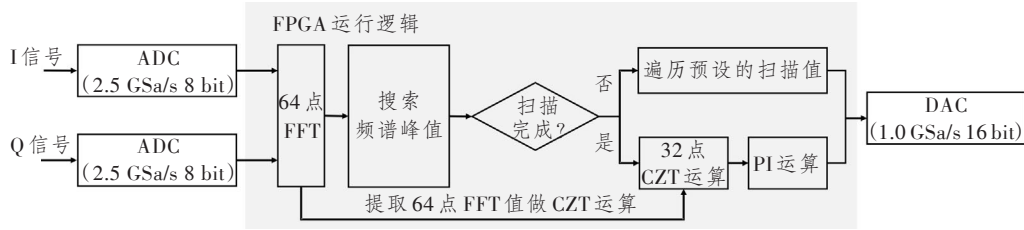
方案	独立 LO	线宽需求	光放大器	自动偏振控制器
光载波恢复技术	否	低	是	否
同源自相干技术	否	低	是	是
锁相/锁频技术	是	低	否	否

激光器的频率调节通常通过改变激光器谐振腔的物理特性来实现。对于常见的 DFB 激光器或 ECL,主要存在温度调频与电流调频两种手段^[13]。前者具有结构简单和调节范围大的优点,但其响应速度通常较慢;而通过注入电流调节可改变载流子密度和有源区折射率,从而实现更快的频率控制,适合小范围和快速频率调控,但易引入功率变化。然而,实现高效锁频的核心前提是如何精准地从接收

信号中提取出收发端激光器之间的频率或相位偏差,现有方案主要可分为两种:基于频谱峰值搜索的开环频偏估计^[14-15]与基于闭环的光锁相环^[16-17]。基于此,在本文的前期工作中,分别提出了两种锁频方案。

第 1 种是基于预扫描并结合快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)和线性调频 Z 变换(Chirp-Z Transform, CZT)的频偏锁定方法^[18]。相较于直接基于频谱峰值搜索而言,该方案锁定范围不受 ADC 采样带宽的限制,且频偏估计精度更高。图 1 所示为具体的数字控制结构:由 ADC 分别采集同相(In-phase, I)和正交(Quadrature, Q)信号,并采用双级估计策略平衡捕获带宽与分辨率,即先利用 64 点 FFT 进行频谱峰值粗搜索,再在峰值邻域

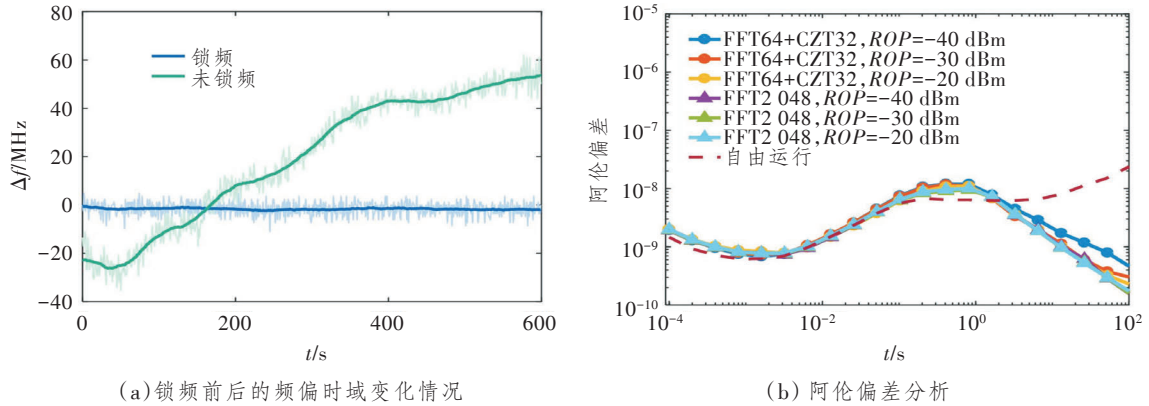
内通过 32 点 CZT 进行高分辨率精细估计。最终,频偏结果经数字比例积分(Proportional Integral, PI)模块处理,并由数/模转换器(Digital-to-Analog Converter, DAC)驱动激光器调谐。图 2(a)对比了锁定前后的频偏时域变化情况,结果表明,自由运行状态下频偏随时间呈现显著漂移,而引入反馈控制后,频偏被精密压制在 0 附近,残余波动峰值优于 10 MHz。图 2(b)所示为不同接收光功率(Received Optical Power, ROP)下的阿伦偏差分析,如图所示,该方案在中长周期内有效改善了频率稳定性,且基于“64 点 FFT+32 点 CZT”的低复杂度方案与 2 048 点 FFT 的长序列算法性能相近,证明了该方法可实现硬件资源开销与稳频精度之间的平衡。



注:FPGA 为现场可编程门阵列。

图 1 基于预扫描并结合 FFT 和 CZT 的频偏锁定方法实现架构

Figure 1 Implementation architecture of a frequency offset locking method based on pre-scanning combined with FFT and CZT



(a) Time-domain variation of frequency offset with and without frequency locking

(b) Analysis of Allan deviation

注: Δf 为频偏; t 为时刻。

图 2 锁频方案的时域稳定性与阿伦偏差分析

Figure 2 Time-domain stability and Allan variance analysis of the proposed scheme

然而,上述方案受限于 FFT 长度,即使利用 CZT 做了频谱细化,依旧存在频率精度不足的问题。为此,本文进一步提出了一种粗频偏捕获结合细相位跟踪的数字化外差式光锁相环方案,其实现架构如图 3 所示。该方案的核心在于,首先利用 FFT 对拍频频率进行粗捕获,并将频差牵引进捕获范围;随后,利用相位误差反馈实现精细锁定,最终

将拍频稳定在预设的目标频率上。图 4(a)所示为激光器的频率噪声特性,其频率噪声功率谱密度曲线表明,该光学锁相环在 10 kHz 偏置范围内提供了显著的抑制效果,其中,1 kHz 处的抑制比可达 22 dB。随着偏置频率的增加,锁相与自由运行曲线趋于重合,表明高频残余噪声主要受限于激光器固有线宽。在时域稳定性方面,图 4(b)所示为 1 000 s 内的频

补偿大色散与 IQ 时延的情况下,均衡器复杂度降低约 80%^[24]。在均衡器架构方面,考虑到短距离场景中偏振模色散影响较小,已有工作提出将传统多抽头蝶形 MIMO 均衡器简化为一个单抽头 MIMO 结合两个偏振独立的多抽头单输入单输出(Single-Input Single-Output, SISO)均衡器结构^[25]。然而此时均衡器仍需承担偏振解复用的任务。为进一步降低均衡器的复杂度,哈尔滨工业大学的研究团队提出了基于两个导频的偏振解复用方案,将偏振解复用功能从均衡器中剥离,从而将均衡器进一步简化为仅包含两个多抽头 SISO 均衡器的架构,显著降低了均衡器复杂度^[26]。

鉴于琼斯矩阵的酉矩阵特性,本文进一步提出利用单个频域导频(Single Pilot Tone, SPT)实现对反映偏振变化的琼斯矩阵的估计,以进一步降低导频解偏振复用的实现复杂度^[27]。该方案的核心思路为,通过仅在 X 偏振的信号中插入 1 个 SPT,以实现琼斯矩阵的估计。为便于 SPT 的插入,本文将采用数字子载波复用(Digital Subcarrier Multiplexing, DSCM)信号以评估所提方案的有效性。在该架构下,导频可置于相邻子载波之间而不影响各个子载波信号。值得注意的是,该方案并不局限于在 DSCM 系统中的应用,其在单载波系统同样具有适用性。然而,为避免导频对单载波信号造成影响,需将其插入到信号的有效频带外。图 5 所示为插入导频后 DSCM 信号频谱的示意图。

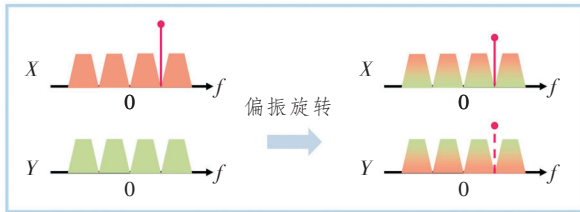


图 5 信号频谱示意图

Figure 5 Schematic diagram of signal spectrum

接收到的信号可表示为

$$\begin{bmatrix} R_X(t) \\ R_Y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{XX}(t) & J_{XY}(t) \\ J_{YX}(t) & J_{YY}(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} (S_X(t) + A \cdot \exp(j2\pi f_1 t))e^{j(2\pi\Delta f t + \varphi)} \\ S_Y(t)e^{j(2\pi\Delta f t + \varphi)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_X(t) \\ n_Y(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $R_X(t)$ 和 $R_Y(t)$ 分别为 X 和 Y 偏振的接收信号; $J_{pp}(t)(p \in [X, Y])$ 为琼斯矩阵的参数; $S_X(t)$ 和 $S_Y(t)$ 分别为 X 和 Y 偏振的发射信号; j 为虚数单位; φ 为相位噪声; f_1 和 A 分别为导频的频率与幅

值; $n_p(t)$ 为加性高斯白噪声。在消除频偏后,提取到的导频信号 $\begin{bmatrix} P_{Xf_1}(t) \\ P_{Yf_1}(t) \end{bmatrix}$ 可表示为

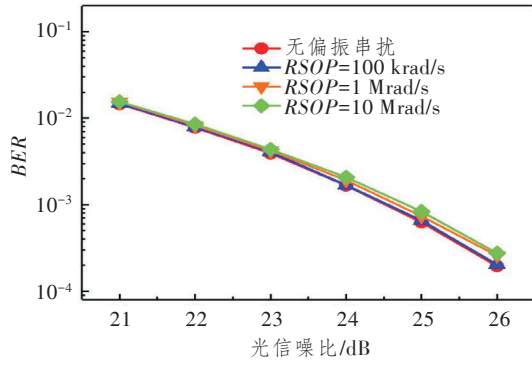
$$\begin{bmatrix} P_{Xf_1}(t) \\ P_{Yf_1}(t) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} J_{XX}(t) \\ J_{YX}(t) \end{bmatrix} e^{j\hat{\varphi}} + \begin{bmatrix} H\{n_X(t)\} \\ H\{n_Y(t)\} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $P_{Xf_1}(t)$ 和 $P_{Yf_1}(t)$ 分别为从 X 和 Y 偏振上接收到的导频信号; $\hat{\varphi}$ 为导频信号中的相位噪声; $H\{\cdot\}$ 为低通滤波操作。由式(2)可知,提取的导频信号中携带了琼斯矩阵的参数以及 $\hat{\varphi}$ 。由于琼斯矩阵具有酉矩阵特性,其参数之间满足 $J_{XX}(t) = J_{YY}^*(t)$, $J_{XY}(t) = -J_{YX}^*(t)$,其中, $*$ 为共轭运算。因此,可利用估计得到的琼斯矩阵参数 $\hat{J}_{XX}(t)$ 和 $\hat{J}_{YX}(t)$ 恢复出完整的琼斯矩阵。在得到琼斯矩阵后,即可实现偏振解复用。由于此时已利用估计所得的琼斯矩阵实现偏振解复用,因此,后续均衡器可简化为仅包含两个 SISO 均衡器的架构,从而显著降低了均衡模块的复杂度。

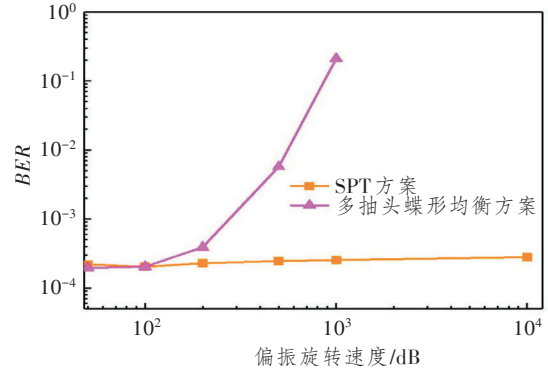
基于 50 Gbaud 偏振复用的 4 子载波 16 进制正交幅度调制(4-Subcarrier 16-ary Quadrature Amplitude Modulation, 4SC-16QAM)DSCM 相干仿真平台,对本文所提 SPT 方案在解偏振复用方面的有效性进行评估。图 6(a)所示为不同偏振状态旋转(Rotation of State of Polarization, RSOP)速率条件下的误码率(Bit Error Rate, BER)曲线。如图所示,即使 RSOP 速率高达 10 Mrad/s,与无偏振串扰的情况相比,几乎未产生光信噪比损失。表明本文所提 SPT 方案在偏振状态快速变化的条件下,依然能够有效消除偏振串扰。图 6(b)进一步对比了在不同 RSOP 速率条件下,本文所提 SPT 方案与传统多抽头蝶形 CMMA 均衡方案的 BER 性能。如图所示,随着 RSOP 速率的增加, SPT 方案的 BER 曲线始终保持平坦。而对于传统均衡方案,当 RSOP 速率达到 100 krad/s 时,其 BER 性能将会急速恶化。上述结果表明,本文所提方案不仅有助于降低均衡模块的复杂度,并且可以有效提升偏振追踪能力。

2.2.2 低复杂度时钟恢复技术

作为相干 DSP 中的关键模块之一,时钟恢复主要用于应对收发端时钟异步问题,其核心在于利用定时误差检测器(Timing Error Detector, TED)实现定时误差提取,并通过环路反馈至数字插值滤波器以重构出最佳采样时刻的信号。然而,经典的 TED 算法,如时域 Gardner 算法和频域 Godard 相位检测(Godard Phase Detector, GPD)算法等,均需至少两



(a) 不同 RSOP 速率下 SPT 方案的 BER 曲线
(a) BER curves of the SPT method under different RSOP speeds



(b) 不同偏振解复用方案的 BER 性能对比
(b) BER comparison of different polarization demultiplexing methods

图 6 SPT 方案在解偏振复用方面的有效性评估

Figure 6 Effectiveness assessment of the SPT scheme in depolarization multiplexing

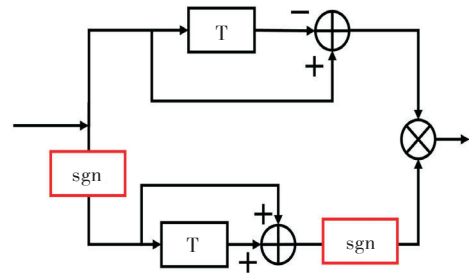
倍 OSR^[28-29]。为此,近年来已有研究尝试针对经典 TED 算法进行改进,以降低其对高 OSR 的依赖。暨南大学的研究团队通过调整 GPD 算法中频谱分量的索引区间,实现了可工作在 9/8 倍 OSR 条件下的时钟恢复^[30]。尽管如此,该方案并未彻底消除对 OSR 的根本性依赖。因此,探索单倍波特率下的定时误差提取方案成为了进一步降低时钟恢复模块功耗的关键。穆勒 & 米勒 (Mueller & Müller, MM) 算法作为经典的波特率 TED 算法,已在 IM/DD 系统中得到了广泛应用,但鉴于其对频偏、相位噪声以及色散等损伤极为敏感,需在时钟恢复环路中嵌入相应的补偿模块,从而引入过大的环路时延^[31]。针对这一问题,文献[32]中提出了一种基于符号运算的改进 MM 算法,可提升算法对频偏和相位噪声的鲁棒性,并且通过在时钟恢复环路中嵌套均衡模块,显著提升了定时误差提取性能。然而,这种基于符号运算的 MM 算法对偏振串扰损伤较为敏感。为此,文献[33]通过引入简单的非线性函数,有效提升了基于符号运算的 MM 算法对偏振变化的鲁棒性。此外,文献[34]中提出了一种适用于相干系统的波特率 TED 算法,被称为绝对值相位检测器 (Absolute Phase Detector, ABSPD),该算法同样对频偏和相位噪声表现出较好的鲁棒性。然而,其在提取定时误差的过程中涉及大量数值乘法运算,具有较高的实现复杂度。为降低其实现复杂度,文献[35]中对 ABSPD 算法进行了改进,通过引入符号运算,可有效消除乘法运算。

为实现低复杂度的单倍波特率时钟恢复,本文提出了一种基于符号运算的新型单倍波特率 TED 算法,被称为 3Sign-TED 算法^[36]。图 7 所示为

3Sign-TED 算法的实现原理,定时误差 $\epsilon_{3\text{Sign-TED}}$ 可表示为

$$\epsilon_{3\text{Sign-TED}} = \sum_{n=1}^N \text{sgn}(\text{sgn}(x_1(n)) + \text{sgn}(x_1(n-1)))(x_1(n) - x_1(n-1)) + \sum_{n=1}^N \text{sgn}(\text{sgn}(x_Q(n)) + \text{sgn}(x_Q(n-1)))(x_Q(n) - x_Q(n-1)), \quad (3)$$

式中: x_1 和 x_Q 分别为接收信号的实部和虚部; n 为时间索引; N 为每次计算定时误差所使用的数据块长度; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号运算。由于本文所提算法中引入了符号运算,因此有效避免了定时误差计算过程中的数值乘法运算,提供了一种硬件友好的 TED 方案。



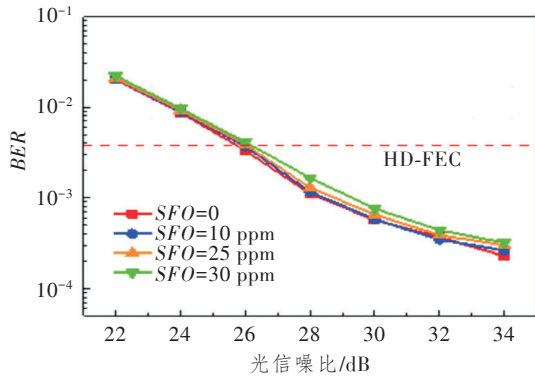
注: T 为延迟 1 个符号。

图 7 3Sign-TED 实现原理

Figure 7 Principle of 3Sign-TED

基于 50 Gbaud 单载波 16QAM 相干实验平台,对本文所提算法的有效性进行评估。图 8(a)所示为在不同采样频偏 (Sampling Frequency Offset, SFO) 条件下,采用本文所提 3Sign-TED 算法进行时钟恢复后的 BER 曲线。图中同时给出了无定时

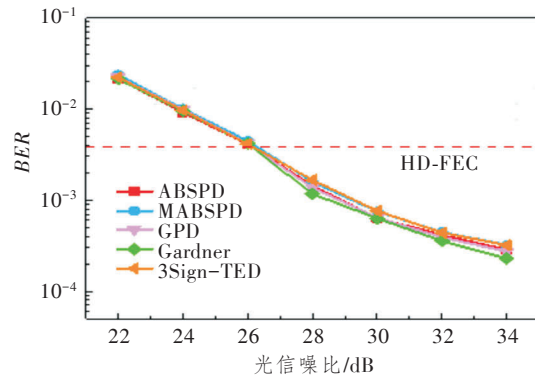
误差时的 BER 曲线作为参考。实验结果表明,尽管存在 30 ppm 的 SFO,采用本文所提 3Sign-TED 算法进行时钟恢复后,信号的 BER 曲线将逼近无定时误差时的 BER 曲线,表明本文所提算法可有效解决时钟异步问题。图 8(b)进一步将本文所提 3Sign-TED 算法的性能与经典 TED 算法以及现有的单倍波特率 TED 算法进行了对比,包括 Gardner、GPD、ABSPD 以及改进的 ABSPD (Modified ABSPD, MABSPD) 算法。此时,系统 SFO 为 30 ppm。由图 8(b)可知,3Sign-TED 算法可获得与经典 TED 算法以及其他两种单倍波特率 TED 算法相同的性能,而 Gardner 与 GPD 算法需工作在两倍 OSR 条件下。表 2 所示为上述 3 种单倍波特率 TED 算法的复杂度情况。相比于传统 ABSPD 算法, MABSPD 和 3Sign-TED 算法均显著降低了计算复杂度,且本文所提 3Sign-TED 算法具有最低的实现复杂度。



注:HD-FEC为硬判决前向纠错。

(a)不同 SFO 条件下的 BER 曲线

(a) BER curves under different SFO conditions



(b)不同 TED 算法的 BER 性能对比

(b) Comparison of BER performance among different TED algorithms

图 8 3Sign-TED 性能评估

Figure 8 Performance evaluation of 3Sign-TED

表 2 计算复杂度对比

Table 2 Comparison of the computational complexity

方案	实数乘法	实数加法	绝对值运算	符号运算
3Sign-TED	0	$6N-1$	0	$6N$
ABSPD	$2N$	$6N-1$	$6N$	0
MABSPD	0	$6N-1$	$6N$	$6N$

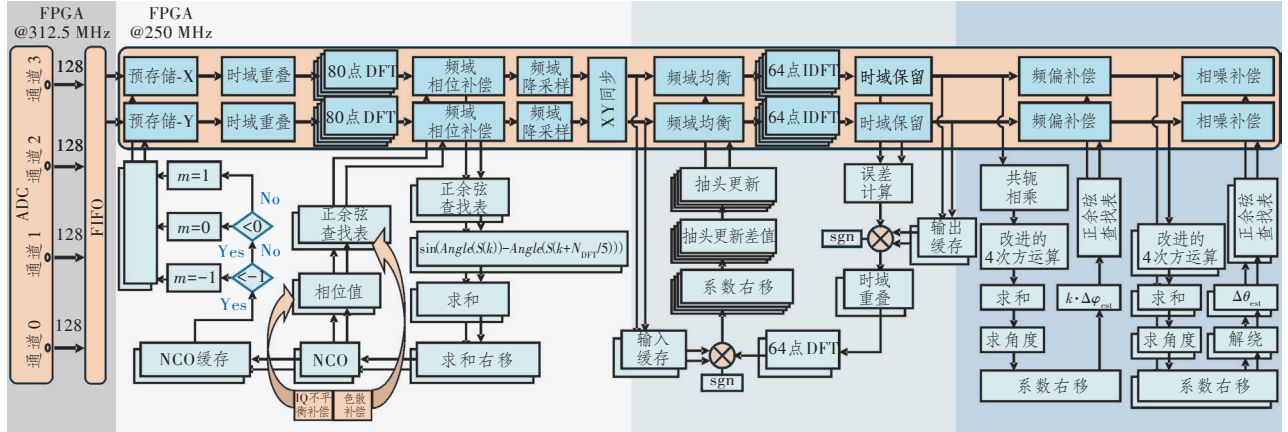
2.3 实时相干系统实现

为降低相干光模块的功耗,业界已提出多种降低相干 DSP 复杂度的工作。然而,目前大部分工作仍停留在离线验证阶段,针对实时专用集成电路或 FPGA 硬件算法优化与部署的研究仍较少。在本文前期工作中,基于 32 Gbaud 双偏振 QPSK 信号,对相干 DSP 算法进行了 FPGA 实时化部署。为避免过高的 OSR 而导致硬件资源的大幅消耗,该工作采用改进的 GPD 算法,降低了时钟恢复模块对高 OSR 的依赖,并且实现了单倍波特率下的频域均衡^[37]。该架构由 5/4 非整数倍过采样频域 GPD 时钟恢复、单倍波特率频域 CMA 盲均衡以及时域载波恢复 3 大核心模块构成,运行于单片 XCU13P FPGA 之上,显著降低了算法复杂度与硬件资源开销。

在实时处理流程中,偏振与相位正交的 4 路并行信号首先由 128 路转换为 160 路并行结构,以适配后续 5/4 倍过采样时钟恢复所需的数据排列,同时将 FPGA 内部时钟降低至 250 MHz,便于布局布线与时序收敛。转换后的数据依次进入频域时钟恢复模块、频域 CMA 均衡模块与时域载波恢复模块,完成全链路的数字解调,实时 DSP 流程如图 9 所示。

在该实时架构中,时钟恢复模块基于改进的 GPD 算法,利用离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 后频点间的相位差,以实现定时误差的提取^[33]。为处理 SFO,在设计中引入基于先进先出 (First-In First-Out, FIFO) 的重叠保留结构,将 160 路并行数据划分为若干 Block 执行 80 点 DFT。定时误差经环路滤波器与数控振荡器 (Numerically Controlled Oscillator, NCO) 累积后,一方面通过控制输入 FIFO 存储器的移位操作以补偿整数时钟误差,另一方面利用分数倍定时误差在频域进行相位补偿。该模块在频域完成相位旋转后,降采样至单倍波特率,并输出重叠保留后的 4 路频域数据,为后续均衡提供了合适的速率接口。

对于均衡模块,采用基于 CMA 的频域单倍波特率均衡,以实现偏振解复用以及信道均衡。针对



注: m 为 NCO 的边界值; $\sin(\cdot)$ 和 $\text{Angle}(\cdot)$ 分别为正弦函数和取角运算; $S(k)$ 为频域信号; N_{DFT} 为 DFT 长度; $k \cdot \Delta\varphi_{\text{est}}$ 和 $\Delta\theta_{\text{est}}$ 分别为频偏和相位噪声所需的补偿角度; IDFT 为离散傅里叶逆变换。

图 9 实时相干 DSP 流程

Figure 9 Real-time coherent DSP flow

QPSK 信号的恒模特性,均衡器抽头系数更新中的复数乘法将采用符号位运算以替代全精度乘法;此外,误差计算则通过实部和虚部分别与参考幅值作差并求和以获得,有效避免平方运算与开方运算。蝶形均衡器结构中的主乘法器保留必要精度,并采用 DSP 资源复用机制与单块 Block 误差共享机制,有效减少了输入输出缓冲及复数乘法器消耗,在保证收敛性能的前提下大幅降低了硬件规模。

载波恢复部分主要由频偏估计和相位噪声补偿两个环节组成。为消除调制相位信息的影响,传统方案需执行 4 次方运算,对硬件资源具有较高需求。本架构则采用实数的加法和绝对值运算以近似得到 2 倍频和 4 倍频的正余弦分量,从而代替高阶幂运算。在相位补偿阶段,利用查找表直接输出所需角度的正余弦值,从而实现对信号的相位旋转,避免调用 Cordic IP 核带来的巨大延迟与查找表开销。该处理方式既保证了载波恢复的精度,同时又适应了实时处理对低时延和逻辑占用的约束。

本文基于 32 Gbaud 双偏振 QPSK 实时相干平台,进行了完整 DSP 算法模块的实实验证。接收端由采样率为 40 GSa/s 的 ADC 对信号进行采集后,由实时 DSP 模块进行处理,最终通过集成逻辑分析仪抓取解调数据进行 BER 统计。图 10(a)所示为在 5 km 单模光纤传输条件下,BER 随 ROP 变化的曲线。如图所示,在光背靠背和 5 km 光纤传输两种情况下,当 ROP 高于 -30.8 dBm 时,BER 均可低于 HD-FEC 门限,此时 NCO 系数 $C_{\text{NCO}}=10$ 。NCO 系数的选择通过影响步长进而影响相位补偿平滑性,其取值较小时步长较大,此时系统抗噪声能力增强但补偿波动加剧;相反,则补偿平滑但对抗大

噪声或色散能力下降,如图 10(b)所示,在蓝色区域处出现 BER 的突变。图 10(c)进一步给出了在 5 km 光纤传输以及 ROP 为 -16 dBm 的条件下,连续运行 1 小时的 BER 波动情况。实验结果显示,其 BER 基本在 1.04×10^{-4} 至 3.65×10^{-4} 范围内波动,验证了本文所设计架构的长期稳定性。

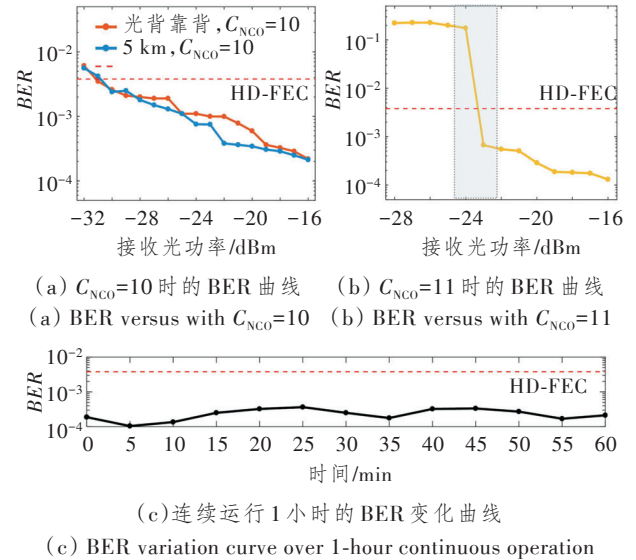


图 10 32 Gbaud 双偏振 QPSK 比特率 BER 性能

Figure 10 BER performance of the 32 Gbaud dual-polarization QPSK signal

3 结束语

相干技术相较于 IM/DD 系统具有更高的频谱效率,在大容量传输方面优势显著,目前已向中短距场景下沉。然而,将相干技术应用于 AI 集群跨域互连,仍需突破成本和功耗这两大瓶颈。本文围绕上述瓶颈,对现有技术进行了简要综述,并介绍了本

文在降低相干系统成本与功耗方面的相关研究。在成本方面,本文提出了激光器锁相/锁频技术,以避免使用昂贵的窄线宽激光器;在功耗方面,围绕均衡与时钟恢复两大高功耗 DSP 模块进行算法简化,以降低接收端 DSP 功耗;此外,本文基于 32 Gbaud 双偏振 QPSK 信号,实现了净速率超 100 Gbit/s 的低复杂度实时相干系统验证。上述技术的突破,有望推动相干技术在 AI 集群的产业化落地。

参考文献:

- [1] Epoch AI. Training Compute (FLOP) for Key AI Models (1950-2025) [EB/OL]. (2026-02-05) [2026-05-06]. <https://epoch.ai/trends#training-compute>.
- [2] Zou D, Wang W, Sui Q, et al. Evaluation of Capacity-Achieving Distributions for Memoryless IM-DD Fiber-Optic Channels[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(7): 3118–3130.
- [3] Zhou X, Urata R, Liu H. Beyond 1 Tb/s Intra-Data Center Interconnect Technology: IM-DD OR Coherent?[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2): 475–484.
- [4] Wang W, Zou D, Wu Z, et al. Alamouti Coding Enabled Polarization Insensitive Simplified Self-Homodyne Coherent System for Short-Reach Optical Interconnects[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 182: 112164.
- [5] Fang X, Zhu Y, Cai X, et al. Overcoming Laser Phase Noise for Low-Cost Coherent Optical Communication[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 6339.
- [6] Faruk M S, Savory S J. Digital Signal Processing for Coherent Transceivers Employing Multilevel Formats[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(5): 1125–1141.
- [7] 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.
- [8] Zhang H. Power Efficient Coherent Detection for Short-Reach System[C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023: 10117276.
- [9] Giacomidis E, Choudhary A, Magi E, et al. Chip-based Brillouin Processing for Carrier Recovery in Self-Coherent Optical Communications [J]. *Optica*, 2018, 5(10): 1191.
- [10] Gui T, Wang X, Tang M, et al. Real-Time Demonstration of Homodyne Coherent Bidirectional Transmission for Next-Generation Data Center Interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(4): 1231–1238.
- [11] Li W, Chen L, Li Y, et al. Unlocking DSCM-based Self-Homodyne Coherent Multiple Access through Comb Distribution and Optical Injection Locking [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(6): 2492–2502.
- [12] Chen J, Hu Z, Yang Z, et al. PDM-SHD NFDM Transmission with Envelope-Detection Feedback Polarization Tracking and Optical Injection Locking[J]. *Optics Express*, 2023, 31(20): 32044.
- [13] Fukuda M, Mishima T, Nakayama N, et al. Temperature and Current Coefficients of Lasing Wavelength Intunable Diode Laser Spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2010, 100(2): 377–382.
- [14] Ren W, Zhang Y, Hou P, et al. Arbitrary Frequency Difference Locking Method for Carrier in Intersatellite Coherent Laser Communication [J]. *Optics Express*, 2025, 33(21): 45171.
- [15] Cao Z, Xie H, Zhou X, et al. High-Precision and Flexible Laser Frequency Stabilization based on a Self-Referencing Phase-Lock Module [J]. *Optics Express*, 2025, 33(6): 14354–14365.
- [16] Larsson R, Vijayan K, Andrekson P A. Zero-Offset Frequency Locking of Lasers at Low Optical Powers with an Optical Phase Locked Loop [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(3): 1183–1190.
- [17] Liu J, Wissing A, Movaghar G, et al. Dual-Polarization Optical Costas Loop for DSP-Free Homodyne Short-Reach Links[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(9): 4016–4025.
- [18] Xing H, Li Z, Liu Y, et al. Opto-Electronic Collaborative Real-Time Frequency Offset Compensation Scheme for Low-Cost Coherent Optical Communication Systems[C]//2025 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Suzhou, China: IEEE, 2026: 11350039.
- [19] Feng Y, Li L, Lin J, et al. Joint Tracking and Equalization Scheme for Multi-Polarization Effects in Coherent Optical Communication Systems [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25491–25501.
- [20] Zhang J, Yu J, Chi N, et al. Multi-Modulus Blind Equalizations for Coherent Quadrature Duobinary Spectrum Shaped PM-QPSK Digital Signal Processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(7): 1073–1078.

- [21] Arikawa M, University K, Hayashi K. Frequency-Domain Adaptive MIMO Filter with Fractional Oversampling Using Stochastic Gradient Descent for Long-Haul Transmission over Coupled 4-Core Fibers [J]. *Optics Express*, 2023, 31(8): 13104–13124.
- [22] Xiang Q, Yang Y, Zuo T, et al. Hardware Efficient and Chromatic Dispersion Tolerant Symbol-Rate Equalization Scheme for Short-Reach Coherent Transmission System [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(16): 5450–5456.
- [23] Xu M, Cui S, Liu J, et al. All-Digital Baud-Rate Joint Clock Recovery and Adaptive Equalization for 400 G/800 G-ZR Transmission [J]. *Optics Express*, 2026, 34(10): 19284–19297.
- [24] Shen K, Liu J, Cui S, et al. Hybrid Low-Complexity Baud-Rate Sampling and Adaptive Equalization Technique for 400 G/800 G Coherent Metropolitan Area Networks [J]. *Optics Express*, 2025, 33(3): 4846–4860.
- [25] Matsuda K, Matsumoto R, Suzuki N. Hardware-Efficient Adaptive Equalization and Carrier Phase Recovery for 100-Gb/s/ λ -based Coherent WDM-PON Systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(8): 1492–1497.
- [26] Fan L, Yang Y, Gong S, et al. Hardware-Efficient and Robust DSP Scheme for Coherent DSCM System in Presence of Transmitter IQ Impairments [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(19): 6187–6198.
- [27] Wang W, Chen L, Zou D, et al. Hardware-Efficient and Reliable Coherent DSCM Systems Enabled by Single-Pilot-Tone-based Polarization Demultiplexing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(3): 1150–1161.
- [28] Zhou X, Chen X, Zhou W, et al. All-Digital Timing Recovery and Adaptive Equalization for 112 Gbit/s POLMUX-NRZ-DQPSK Optical Coherent Receivers [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2010, 2(11): 984–990.
- [29] Godard D. Passband Timing Recovery in an All-Digital Modem Receiver [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1978, 26(5): 517–523.
- [30] Wang H, Zhou J, Yang J, et al. Non-Integer-Oversampling Digital Signal Processing for Coherent Passive Optical Networks [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2024, 16(1): 4–11.
- [31] Zhang S, Dai X, Chen Z, et al. Demonstration of Real-Time Receiver for 30-GBaud PAM-6 Signal in IM/DD System [C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA; IEEE, 2023: 10117017.
- [32] Liu J P, Li C B, Cui S, et al. Low Complexity Joint Clock Recovery and Adaptive Equalization based on a Baud-Rate Timing Phase Error Detector for Short-Reach Digital Coherent Transmission [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(16): 4384–4387.
- [33] Gong S, Yang Y, Xiang Q, et al. A Robust Baud-Rate Timing Recovery for Short-Reach Coherent Optical Interconnections [C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2025. San Francisco, California, USA; Optica Publishing Group, 2025: Th3K. 7.
- [34] Stojanovic N, Rahman T, Calabrò S, et al. Baud-Rate Timing Phase Detector for Systems with Severe Bandwidth Limitations [C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA; IEEE, 2020: 9083013.
- [35] Gong S, Yang Y, Xiang Q, et al. Receiver In-Phase and Quadrature Skew Tolerant Baud-Rate Timing Recovery Scheme for Short-Reach Coherent Optical Interconnection [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(10): 2845–2848.
- [36] Wang W, Zou B, Li F. A Novel Multiplication-Free Baud-Rate Timing Error Detector for Coherent Systems [C]//2025 30th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2025 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC). Sapporo, Japan; IEEE, 2025: 1–3.
- [37] Dong K, Gan H, Zou X, et al. First Real-Time Implementation of Low-Complexity DP-QPSK Coherent Reception with a Net Data Rate beyond 100 Gbit/s on a Single FPGA [C]//2025 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Jiangsu, China; IEEE, 2026: 11350918.