光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20251120002

1.6 T OSFP-XD 2×DR4光收发模块系统性能分析

李桢民[1,2],罗风光[1,3*],吴春付[2*],李林春[2]

(1. 华中科技大学 光学与电子信息学院,武汉 430074; 2. 东莞立讯技术有限公司 光电产品处,广东 东莞 523651; 3. 湖北光谷实验室,武汉 430074)

摘 要: 在生成式AI、大规模分布式计算推动数据中心流量爆炸式增长的背景下,为满足数据中心向1.6 T网络升级需求,1.6 T OSFP-XD 2×DR4光收发模块的设计与研究至关重要。文章提出一种基于双DSP协同调度架构的创新方案,采用OSFP-XD封装标准与PAM4技术,通过8个差分通道实现1.6 Tbit/s的总传输速率。此外,模块内置前向纠错算法与自适应LMS均衡器,保障高速信号处理性能。测试结果显示,模块在0℃,25℃和70℃三种温度条件下,发射端眼图性能稳定,平均光功率、消光比、TDECQ等指标均符合IEEE 802.3dj协议;在常温下,光谱宽度小于0.12 nm,边模抑制比大于30 dB,接收端各通道灵敏度均低于－4.7 dBm,满足协议要求。该模块可广泛应用于AI训练集群、超大规模云平台等场景,为下一代智能网络构建提供重要技术支撑。

关键词: 1.6 T光收发模块; OSFP-XD; 数据中心; 发射端; 接收端

中图分类号: TN929.11 **文章编号:** 1001－5868(2026)01－0064－10

1.6 T OSFP-XD 2×DR4 Optical Transceiver Module System Performance Analysis

LI Zhenmin[1,2], LUO Fengguang[1,3], WU Chunfu[2], LI Linchun[2]

(1. School of Optics and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, CHN; 2. Photoelectric department, DongGuan Luxshare Technology Co., Ltd., Dongguan 523651, CHN; 3. Hubei Optics Valley Laboratory, Wuhan 430074, CHN)

Abstract: To process the explosively growing data-center traffic driven by generative AI and large-scale distributed computing, the design and analysis of the 1.6 T OSFP-XD 2×DR4 optical transceiver module are essential; notably, systematic investigations are crucial to meet the requirements of data centers for upgrading to 1.6 T networks. This paper presents an innovative solution integrating a dual-DSP collaborative scheduling architecture. It adopts the OSFP-XD packaging standard and PAM4 technology, achieving a total transmission rate of 1.6 Tbit/s, through eight differential channels, and features built-in forward error correction (FEC) algorithms and adaptive LMS equalizers to ensure high-speed signal processing performance. The test results indicate that the module maintains stable transmitter eye diagram characteristics at 0℃, 25℃, and 70℃, and the key metrics, including average optical power, extinction ratio, and TDECQ, comply with the IEEE 802.3dj standard. At room temperature, the spectral width is less than 0.12 nm, and the side-mode suppression ratio (SMSR) exceeds 30 dB; in addition, the sensitivity of each receiver channel is better than －4.7 dBm—these parameters fully meet the protocol specifications. The module can be widely deployed in AI training clusters, hyperscale cloud platforms, and other

收稿日期:2025－11－20.

基金项目:湖北省自然科学基金创新群体项目(2024AFA016).

*通信作者:罗风光,吴春付

scenarios; it provides critical technical support for building next-generation intelligent networks.

Key words: 1.6 T optical transceiver module; OSFP-XD; data centers; transmitter; receiver

0 引言

在全球智能化深入推进的背景下，生成式 AI、大规模分布式计算和沉浸式元宇宙等新兴技术持续重塑数据通信模式。尤其是在 AI 领域，万亿级参数量大模型的分布式训练（集群规模达十万卡级别），直接驱动数据中心流量爆炸式增长。行业报告显示，2025 年全球数据中心光模块市场规模预计超 400 亿美元，高速率、高密度、低功耗可插拔光收发模块将成为技术核心方向[1-4]。

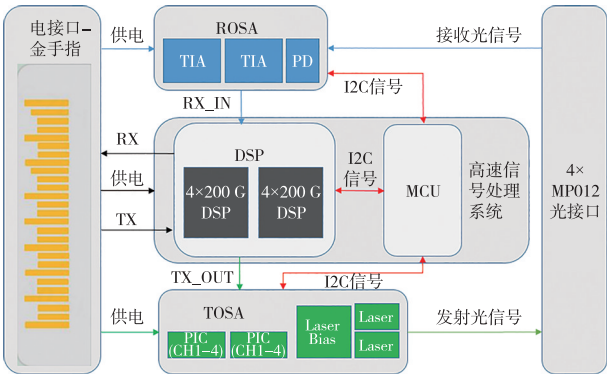
当前 800 G 光收发模块已实现批量部署，但难以满足大模型训练的带宽与能效升级需求，因此 1.6 T 光收发模块成为突破传输瓶颈的关键[5-11]。其中 OSFP-XD 封装的 2×DR4 方案凭借超高密度成为产业主流。在国内企业中，光迅科技已完成 1.6 T 模块研发与小批量量产，华为推出低功耗 DSP 集成方案并验证稳定性能，中际旭创、新易盛等完成样品开发，国内企业核心指标达国际先进水平，且本土化供应链与成本控制优势显著。在国外企业中，Broadcom 依托 DSP 技术推出集成自适应均衡算法的模块，Cisco 和 Arista 聚焦核心层互联场景，其在标准制定与高端芯片领域占优，但定价高、本土化适配周期长。

超密集可插拔小封装模块（Optical Small Form Factor eXtra Dense Pluggable Module，OSFP-XD）是专为超高密度应用优化的新一代封装标准。现有 1.6 T 光模块多聚焦于器件堆叠与参数达标，在多通道协同处理、关键器件集成优化等方面存在提升空间。本文针对这一现状，提出一种双 DSP 协同调度架构的创新设计。使用散热-信号处理协同设计，优化高温环境下的性能一致性。通过这些优化模块可广泛应用于 AI 训练集群互联、超大规模云平台机架间传输等场景，为数据中心算力升级提供关键技术支撑。

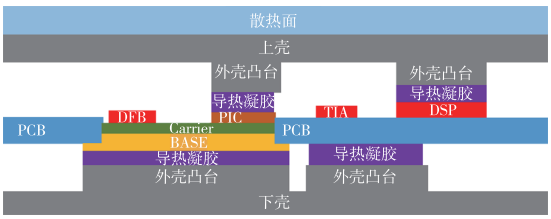
1 光模块系统方案

1.1 总体架构设计方案

1.6 T OSFP-XD 2×DR4 光收发模块（以下简称光模块）采用 OSFP-XD 封装形式，模块整体由光电接口、发射端系统（Transmitting Optical Sub-Assembly，TOSA）、接收端系统（Receiving Optical Sub-Assembly，ROSA）和高速信号处理系统四部分组成，各部分通过高速电气接口与 I2C 协议控制总线实现协同工作。该光模块的内部基本架构与散热模型设计如图 1 所示。



（a）光模块基本架构设计



（b）光模块散热模型设计

图 1　1.6 T 光模块基本架构与散热模型设计

在高速信号处理系统中，采用双 DSP 协同调度架构，以共享时钟与交叉缓冲设计为基础。两片 DSP 通过同步时钟模块实现 8 通道信号的并行处理，交叉数据缓冲器使通道间数据交互延迟极小，从而有效解决了传统多 DSP 架构的同步失配问题。

在结构设计上，使用散热-信号处理协同设计，将嵌入式散热通道与硅光 PIC 和 DSP 的布局协同优化。散热通道紧贴硅光 PIC 光波导与 DSP 区域，使模块在高温（70℃）下的温度梯度控制在 5℃以内，降低温度对光器件性能的影响。

在调制技术层面，1.6 T OSFP-XD 2×DR4 光模块采用四阶电平脉冲幅度调制编码（4-Level Pulse Amplitude Modulation，PAM4）的差分信号编码形式，通过 8 个差分通道的协同运作实现高效频谱利用。其单通道传输速率可达 200 Gbit/s，整体总带宽由此提升至 1.6 Tbit/s。

1.2 发射端系统与接收端系统

1.2.1 发射端系统

发射端系统（Transmitting Optical Sub-Assembly，TOSA）实现电信号到光信号的转换，核心组件包括DFB激光器、MP5491型激光器电流源（Laser Bias，LB）及定制化硅光PIC。

光模块激光器选用中心波长为1 310 nm的高可靠性DFB激光器，采用MP5491型激光器电流源，通过四通道电流合路为激光器提供稳定的驱动电流，从而满足单通道200 Gbit/s的调制需求。

硅光PIC集成马赫-曾德尔调制器（Mach-Zehnder Modulator，MZM）与光波导网络，支持每通道200 Gbps的信号调制。MZM的工作原理基于硅的电光效应，通过施加电信号改变波导折射率，进而调节光信号相位，最终实现相位调制到幅度调制的转换。此外，MZM的调制带宽与驱动电压的匹配直接影响信号质量。

激光器发出的连续光经MZM调制后，通过硅光波导传输至光纤阵列。硅光PIC能通过模数转换器（Analog-to-Digital Converter，ADC）实时监测发射端光功率，反馈至微程序控制单元（Microprogrammed Control Unit，MCU）。MCU采用PID控制算法动态调整LB的驱动电流，以实现对光信号的实时调节，确保光信号稳定性。

1.2.2 接收端系统

接收端系统（Receiving Optical Sub-Assembly，ROSA）负责光信号到电信号的转换与放大，核心组件为跨阻放大器（Transimpedance Amplifier，TIA）芯片。

该设计采用单通道架构，支持226.8 Gbps的数据速率，内置带宽控制、增益调节及信号丢失检测功能的TIA芯片。TIA输入级采用低噪声放大器设计，以确保微弱光信号在光电二极管（PhotoDiode，PD）的有效放大。此外，TIA还能够通过ADC实时采集输出信号的幅度、相位等参数，实现接收信号强度指示功能，由MCU进行动态均衡调节，补偿传输链路中的色散与噪声。

1.3 高速信号处理系统

高性能数字处理核心为数字信号处理芯片（Digital Signal Processing，DSP），主要负责从交换机的输出信号中提取并还原出数字时钟信息，同时消除噪声，在接收到的光信号上实施色散修正及非线性干扰排除，保证数据的准确传输[12-13]。

现有1.6 T光模块设计采用双DSP芯片架构，其功能设计如图2所示。该设计的主要特征为采用双DSP协同机制，单片DSP支持4×200 G PAM4信号处理，两片DSP通过共享时钟模块实现同步，交叉数据缓冲器用于平衡8通道的处理延迟，从而避免通道间信号错位。此外，系统还采用前向纠错（FEC）算法与自适应LMS均衡器技术，兼顾收敛速度与稳定性，能够将单通道工作误码率控制在1×10^{-10}以下。

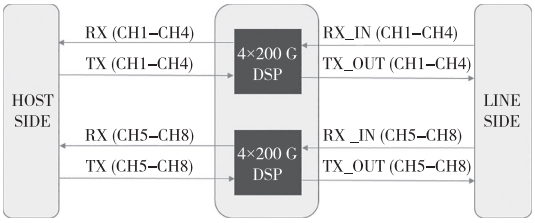


图2 光模块DSP功能架构图

最小均方误差LMS算法，迭代公式为：

$$w(n+1)=w(n)+\mu e(n)x(n) \quad (1)$$

式中，w为均衡系数，μ为步长因子，$e(n)$为误差信号，$x(n)$为输入信号，动态调整系数以补偿码间串扰和非线性失真，步长因子μ设为0.001。DSP通过SPI接口实现固件烧录，通过I2C总线信号与MCU进行状态交互。

MCU作为监控模块核心，外接两片PI5593型12 bit ADC/DAC芯片，扩展16路模拟信号采集与8路数字信号输出通道。MCU通过I2C总线信号控制TIA，DSP，LB，PIC等元件的工作参数，实现各模块的参数监控管理。同时采用晶振为双DSP提供同步时钟信号，时钟抖动低于100 fs，确保高速信号的时序一致性。

1.4 关键技术原理分析

1.4.1 PAM4调制技术原理

PAM4是高速光通信的核心调制技术，其基本原理是通过4个离散电平（0，1，2，3）表征数字信息，每个符号承载2 bit数据（00对应0电平、01对应1电平、10对应2电平、11对应3电平）。因此，在相同符号速率下，PAM4的传输带宽是传统非归零（NRZ）调制（2电平）的两倍[14-17]。

在200 Gbit/s单通道传输中，PAM4的符号速率为100 GBaud，仅为比特率的一半，这有效降低了对器件带宽的要求。然而，在高速传输过程中，PAM4信号易受码间串扰、非线性失真及噪声影响，导致星座图模糊。为了解决这些问题，本文通过预

加重技术与自适应LMS均衡器组合方案，预加重技术提升信号高频分量，补偿链路高频损耗，LMS均衡器动态抵消码间串扰，从而使信号失真控制在可接受范围。

需要注意的是，PAM4的信噪比（SNR）要求比NRZ高约6 dB，因此需搭配低噪声TIA和高边模抑制比（SMSR）激光器。本文选用的DFB激光器具有超过60 dB的SMSR，为PAM4信号传输提供保障。

1.4.2　硅光集成调制技术原理

硅光集成调制技术基于硅材料的光电特性，将光发射、调制、传输、探测等功能集成于单一芯片，具有体积小、功耗低、兼容性强等优势。

所使用的硅光PIC的光波导设计采用脊形波导结构，在1 310 nm波段的传输损耗小于0.2 dB/cm，确保光信号低损耗传输。此外，硅光PIC集成MZM调制器，该调制器由两个Y分支波导和相位调制臂组成，输入光分为两束后分别进入相位调制臂。基于硅的电光效应，通过施加电信号改变两束光的相位差，再经合束器干涉实现幅度调制[18]。本文使用的PIC的调制带宽大于50 GHz，满足200 Gbit/s信号调制需求。

1.4.3　双DSP协同调度架构原理

采用双DSP协同调度架构，以两片高性能DSP为核心，并配备低抖动晶振时钟来提供同源时钟。同时，借助等时延分发网络与实时校准模块，确保两片DSP在采样与处理过程中的时钟同步误差极小。

在两片DSP之间采用一个8路无阻塞交叉数据缓冲器，以减少通道间的数据交互延迟，避免现行串行传输所导致的延迟误差。MCU依据所监控的各通道信号质量动态分配任务，能够实现一片DSP负责其对应通道信号，并完成信号的预加重处理与色散补偿修正；另一片则负责其对应通道的全局均衡与FEC解码，从而实现DSP芯片计算力的均衡交叉利用。

相较于传统架构，该架构同步精度更高、并行效率更优、环境适应性更强。其不仅能够满足总速率达1.6 Tbit/s的要求，支持灵活的带宽扩展，保障各通道性能的一致性，还能通过动态调度抵消高温导致的模块性能衰减。

2　光模块系统性能测试与分析

光模块的测试内容主要包括发射端测试和接收端测试，1.6 T OSFP-XD 2×DR4光收发模块实物图片如图3，具体测试方法与结果分析如下。



（a）光模块散热面



（b）光模块厂商信息面（正面）

图3　1.6T光模块实物图片

2.1　发射端性能测试

发射端测试涵盖功耗、发射光谱、平均光功率、消光比、线性度以及发射机色散眼图闭合等多个方面。

发射光谱（Emission Spectrum，ES）指光模块发射的光信号波长分布，是评估光信号稳定性的重要参数之一。平均光功率（Average Optical Power）的本质是光模块输出光功率的均值，常用分贝毫瓦（dBm）作为度量单位。这一参数直接反映光信号的强弱程度，是评判光模块性能的核心指标之一。消光比（Extinction Ratio）指的是光模块传输“1”信号与“0”信号时的光功率比值。理论上理想的消光比应为无穷大，这表明两种信号的功率差异足够大，便于接收器精准分辨。若消光比不佳，可能引发数据解调出错的问题。眼图线性度（Rise/Fall Linearity Measurement，RLM）是评估高速数字信号眼图上升沿与下降沿线性特征的关键参数，主要用于判断信号边沿是否存在畸变。PAM4的四个电压电平分别为V_0，V_1，V_2和V_3。使$V_{\min}$对应于0，V_0对应于−1，V_1对应于$-ES1$，V_2对应于$ES2$和V_3对应于1。

$$V_{\min}=\frac{V_0+V_3}{2} \tag{2}$$

$$ES1=\frac{V_1-V_{\min}}{V_0-V_{\min}} \tag{3}$$

$$ES2=\frac{V_2-V_{\min}}{V_3-V_{\min}} \tag{4}$$

$$RLM=\mathrm{MIN}\left[(3\times ES1),(3\times ES2),(2-3\times ES1),(2-3\times ES2)\right] \quad (5)$$

其中，RLM越接近1，表示眼线性度越好。

发射机色散眼图闭合（Transmitter and Dispersion Eye Closure Quaternary，TDECQ）与光信号传输中的色散效应紧密相关，该参数对于衡量PAM4光信号质量非常重要。色散会造成光脉冲在接收端发生展宽，进而削弱信号的清晰度与可识别性。发射机色散眼图闭合用于描述在不同色散条件下，眼图保持张开状态的能力。具备良好的发射机色散眼图闭合性能，能够保障信号在长距离传输时依然维持较高的质量。这些参数是评估光模块性能和质量的关键指标，对于确保可靠、高效的数据传输至关重要。在测试过程中，这些参数的准确测量和评估有助于保证光模块满足设计要求和应用需求[19-20]。

根据现有的IEEE 802.3dj协议的规定[21]，在单通道速率为226.8 Gbit/s的情况下，发射端各通道的光眼图应满足：平均光功率范围为－3.3～4 dBm、消光比大于3.5 dB、RLM大于0.8、TDEC小于3.4 dB；激光光谱要求为光谱范围为1 304.5～1 317.5 nm，常温下20 dB宽度小于0.12 nm，SMSR大于30 dB。在实验中对发射端光信号光谱与各通道光眼图像进行检测，在此过程中的模块基本自环测试框图如图4所示。

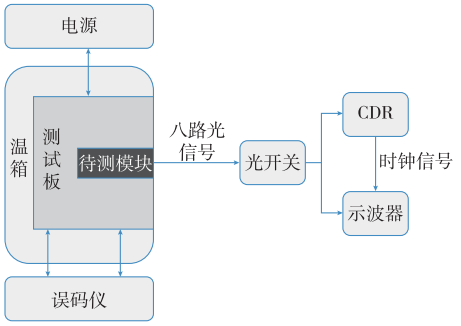
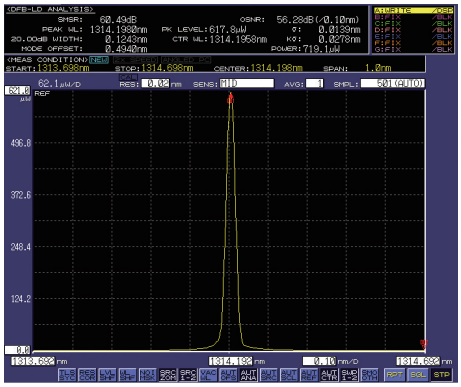


图4 光模块发射端测试框图

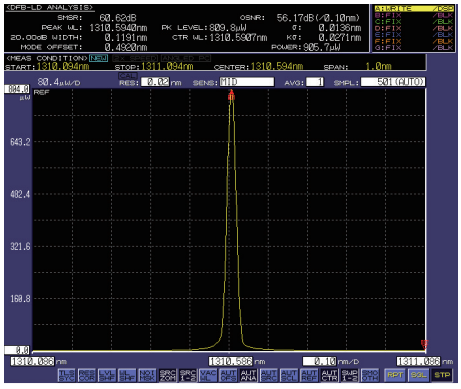
在保持模块温度分别为0℃，25℃及70℃下的状态进行功耗、光谱与光眼图测试。功耗测试结果见表1，光谱测试结果见图5和表2。

表1 光模块工作功耗不同温度下测试数据

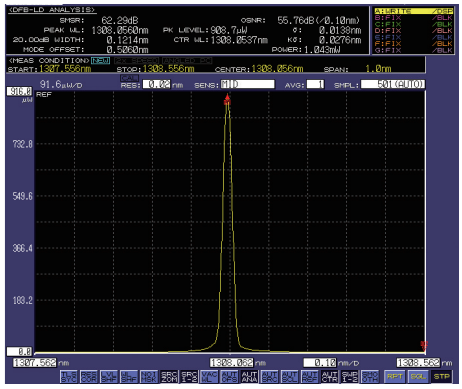
测试数据	温度		
	0℃	25℃	70℃
工作电压/V	3.28	3.31	3.34
工作电流/A	6.97	7.23	7.64
功耗/W	22.86	23.93	25.52



（a）0℃



（b）25℃



（c）70℃

图5 不同温度下光模块的发射光光谱

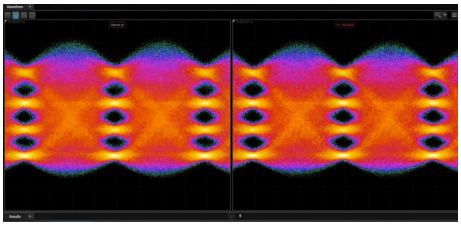
表2 发射光光谱测试数据

温度	*SMSR*/dB	波峰波长/nm	20 dB宽度/nm
0℃	60.49	1 314.198	0.124 3
25℃	60.62	1 310.594	0.119 1
70℃	62.29	1 308.056	0.121 4

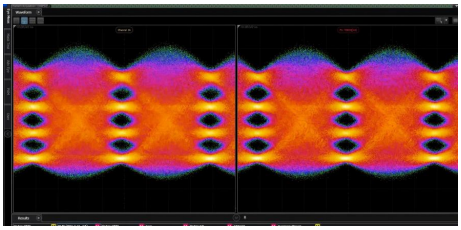
由测试结果可知，在测试要求温度范围内，光模块功耗控制在25 W左右，发射端的激光光谱范围为1 307～1 315 nm，常温下20 dB宽度小于0.12 nm，SMSR接近60 dB。DFB激光器的1 310 nm单模输出特性与MP5491电流源的稳定驱动，保障了激光

光谱窄化（20 dB 宽度小于 0.12 nm）与高 SMSR，符合设计要求。

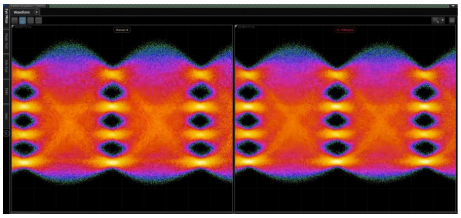
如图 6 所示为在四进制短强度随机序列（Short Stress Pattern Random Quaternary，SSPRQ）码型的测试条件下，单个通道分别在模块温度为 0℃，25℃和 70℃时的发射光眼图，其中右图为经 TDECQ 均衡后的眼图。各通道发射光功率（TX Power）、消光比 ER、眼线性 RLM、TDECQ 的测试数据详见表 3～5，图 7 所示为各测试数据分析曲线。



（a）0℃



（b）25℃



（c）70℃

图 6　不同温度下光模块的单通道眼图

表 3　光模块温度为 0℃ 时发射端的测试数据

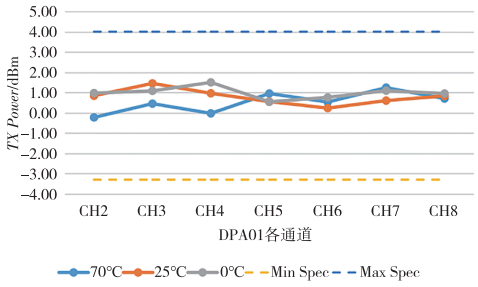
测试参数	协议要求	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
TX Power/dBm	−3.3～4	0.67	0.97	1.08	1.50	0.54	0.76	1.09	0.95
ER/dB	＞3.5	4.61	4.45	4.26	4.19	4.94	4.22	3.93	4.79
RLM	＞0.8	0.843	0.868	0.850	0.838	0.887	0.882	0.897	0.926
TDECQ/dB	＜3.4	1.78	1.99	1.80	1.69	1.73	1.73	2.05	1.70

表 4　光模块温度为 25℃ 发射端的测试数据

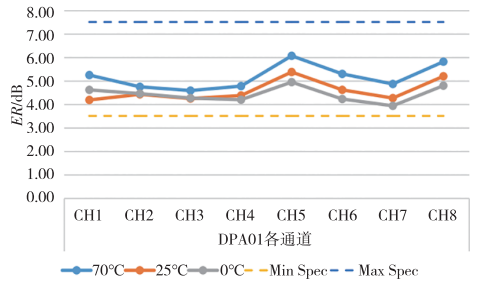
测试参数	协议要求	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
TX Power/dBm	−3.3～4	1.21	0.84	1.45	0.96	0.55	0.23	0.60	0.83
ER/dB	＞3.5	4.18	4.42	4.24	4.37	5.37	4.61	4.26	5.19
RLM	＞0.8	0.929	0.919	0.915	0.915	0.962	0.988	0.970	0.970
TDECQ/dB	＜3.4	2.15	2.07	1.36	1.60	1.95	1.77	1.92	2.05

表 5　光模块温度为 70℃ 发射端的测试数据

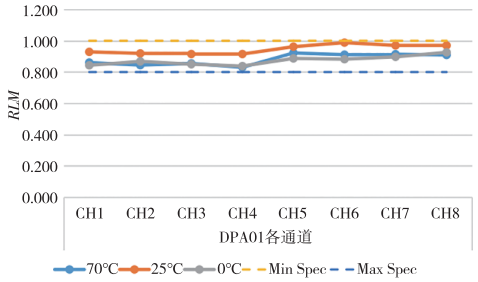
测试参数	协议要求	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
TX Power/dBm	−3.3～4	0.11	−0.23	0.45	−0.03	0.95	0.53	1.34	0.70
ER/dB	＞3.5	5.24	4.74	4.58	4.77	6.06	5.29	4.86	5.81
RLM	＞0.8	0.861	0.844	0.855	0.830	0.922	0.911	0.914	0.909
TDECQ/dB	＜3.4	2.21	2.27	1.80	2.32	2.43	2.21	2.32	2.33



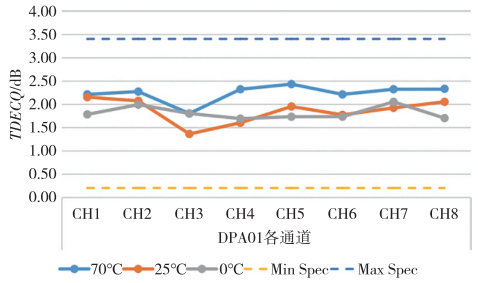
（a）TX Power 数据曲线



（b）ER 数据曲线



（c）RLM 数据曲线



（d）TDECQ 数据分析曲线

图 7　光模块发射端眼图各测试数据分析曲线

根据测试结果，在规定测试温度范围内，四项关键光眼图指标均严格满足 IEEE 802.3dj 协议要求，且多数指标存在显著性能冗余，通道间性能

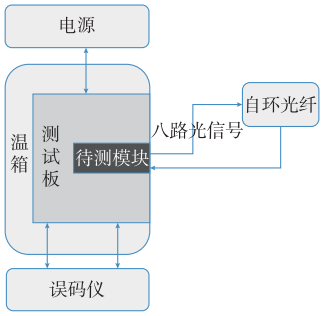
一致性较好。现有的8个发射通道间指标离散度低，全温度范围内各通道TX Power漂移量不超过0.95 dBm。硅光PIC中MZM调制器的电光响应稳定性及MCU通过ADC反馈动态调节驱动电流，抑制了温度变化对各通道光功率的影响。在三种温度范围内，TDECQ均值波动仅0.42 dB（范围为1.82～2.24 dB），且最高值2.43 dB仍比协议上限低28.5%。双DSP协调技术与自适应均衡器抵消了高温下电路参数漂移引发的色散，确保了在三种温度条件下的良好性能。

在1.6 T OSFP-XD 2×DR4光模块设计中，光口采用2×MPO12结构。在25℃时，CH5～CH8通道的平均发射光功率显著低于CH1～CH4通道，二者差异较大。经分析，发现原因在于CH5～CH8通道的光纤阵列（Fiber Array，FA）与硅光PIC的光波导进行耦合对准过程中，因工艺问题导致该通道的耦合损耗高于其他通道，从而影响了输出光功率。针对此通道因FA与硅光PIC耦合工艺偏差而导致发射光功率偏低的问题，可采用高精度视觉对准与实时光功率反馈锁定最优位置的方案。在此基础上，使用折射率匹配紫外固化胶固定，并进行热循环老化测试，再通过MCU调节LB驱动电流逐通道校准，将功率偏差控制在可控范围内。

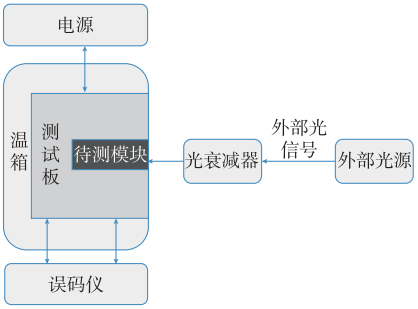
在高温环境下，ER呈轻微上升趋势，但未出现性能衰减问题，波动幅度处于合理区间。这表明该产品发射端具备优异的性能稳定性与环境适应性，可以满足高密度密集服务器机架的布置设计及应用要求。

2.2 接收端性能测试

根据IEEE 802.3dj协议的规定，在单通道速率为226.8 Gbit/s的情况下，接收端各通道的灵敏度应小于－4.7 dBm。光模块接收端的基本测试框图如图8所示，模块通过使用不同长度的自环光纤检测不同传输距离下的自环误码率，同时外部光信号来进行检测模块灵敏度，可通过调节光衰减器来测试接收端的灵敏度。



（a）自环误码率测试框图



（b）灵敏度测试框图

图8 光模块接收端测试框图

在模块温度分别保持在0℃，25℃及70℃的状态下，采用伪随机序列（Pseudo-Random Binary Sequence 31Q，PRBS31Q）码型进行测试。通过使用0.1 m，500 m和2 km长度的自环光纤，测试不同传输距离下的模块的自环误码率，测试结果见表6。

表6 光模块不同自环传输距离下的误码率测试数据

测试参数	温度/℃	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
自环误码率	0	1.73×10^{-11}	7.34×10^{-11}	4.53×10^{-10}	1.80×10^{-10}	4.35×10^{-10}	2.54×10^{-10}	9.64×10^{-11}	9.78×10^{-12}
	25	4.30×10^{-12}	8.82×10^{-12}	2.74×10^{-11}	2.10×10^{-10}	2.20×10^{-10}	4.40×10^{-10}	1.46×10^{-11}	5.43×10^{-12}
	70	1.51×10^{-11}	1.58×10^{-10}	7.64×10^{-10}	1.28×10^{-9}	6.97×10^{-10}	1.36×10^{-9}	2.57×10^{-10}	9.34×10^{-11}
500 m光纤误码率	0	4.87×10^{-12}	1.23×10^{-11}	7.89×10^{-12}	1.76×10^{-10}	1.54×10^{-9}	3.98×10^{-10}	1.36×10^{-11}	2.73×10^{-12}
	25	1.90×10^{-12}	3.34×10^{-12}	9.44×10^{-12}	8.45×10^{-11}	1.23×10^{-10}	1.78×10^{-10}	7.76×10^{-12}	3.55×10^{-12}
	70	3.12×10^{-12}	3.69×10^{-12}	1.47×10^{-11}	1.03×10^{-10}	1.68×10^{-10}	5.31×10^{-10}	5.52×10^{-12}	4.98×10^{-12}
2 km光纤误码率	0	2.37×10^{-11}	1.56×10^{-11}	1.92×10^{-11}	1.78×10^{-10}	5.83×10^{-10}	2.14×10^{-9}	4.39×10^{-11}	7.92×10^{-12}
	25	6.54×10^{-12}	7.65×10^{-12}	2.44×10^{-11}	1.94×10^{-10}	3.45×10^{-10}	8.23×10^{-10}	2.20×10^{-11}	4.30×10^{-12}
	70	5.89×10^{-12}	8.72×10^{-12}	3.18×10^{-11}	2.35×10^{-10}	4.12×10^{-9}	3.97×10^{-9}	2.86×10^{-11}	5.17×10^{-12}

使用外部光源测试不同温度测试条件下接收端的灵敏度，同时在25℃条件下测试接收端不同接收光功率下的误码率。相关测试结果见表7与表8，图9为接受端各测试数据分析曲线。

表7　光模块接收端灵敏度测试数据

测试参数	温度/℃	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
灵敏度/dBm	0	−6.98	−8.23	−7.65	−7.54	−7.95	−8.55	−8.12	−7.86
	25	−7.22	−8.35	−7.95	−8.56	−8.62	−8.89	−8.34	−8.44
	70	−6.54	−7.86	−7.67	−7.84	−7.86	−7.96	−7.45	−7.66

表8　不同接收光功率下的误码率测试数据

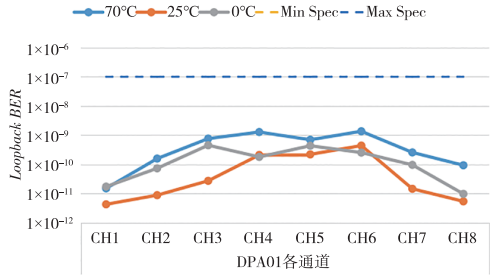
RX Power/dBm	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
2.5	5.50×10^{-12}	2.80×10^{-12}	6.23×10^{-12}	2.60×10^{-11}	4.00×10^{-11}	2.57×10^{-11}	1.07×10^{-11}	4.83×10^{-12}
2	6.00×10^{-12}	5.21×10^{-11}	5.50×10^{-11}	2.89×10^{-10}	2.70×10^{-10}	4.30×10^{-11}	1.42×10^{-11}	1.57×10^{-11}
1.5	3.37×10^{-12}	2.70×10^{-11}	8.48×10^{-11}	2.26×10^{-10}	2.21×10^{-10}	1.72×10^{-10}	1.50×10^{-11}	5.46×10^{-12}
1	4.60×10^{-12}	2.82×10^{-11}	5.88×10^{-11}	2.16×10^{-10}	3.91×10^{-10}	4.41×10^{-10}	1.45×10^{-11}	7.91×10^{-12}
0.5	3.50×10^{-12}	3.51×10^{-11}	6.00×10^{-11}	2.84×10^{-10}	1.82×10^{-10}	3.00×10^{-10}	1.68×10^{-11}	8.33×10^{-12}
0	2.53×10^{-12}	2.83×10^{-11}	6.25×10^{-11}	2.69×10^{-10}	2.76×10^{-10}	2.50×10^{-10}	1.73×10^{-11}	7.90×10^{-12}
−0.5	2.60×10^{-12}	2.50×10^{-11}	6.77×10^{-11}	2.12×10^{-10}	2.67×10^{-10}	2.34×10^{-10}	1.93×10^{-11}	1.60×10^{-11}
−1	3.80×10^{-12}	3.40×10^{-11}	6.40×10^{-11}	1.63×10^{-10}	6.00×10^{-10}	2.72×10^{-10}	1.70×10^{-11}	1.60×10^{-11}
−1.5	7.00×10^{-12}	4.00×10^{-11}	8.80×10^{-11}	2.00×10^{-10}	3.70×10^{-10}	2.97×10^{-10}	1.80×10^{-11}	2.19×10^{-11}
−2	1.00×10^{-11}	4.25×10^{-11}	1.00×10^{-10}	2.29×10^{-10}	2.82×10^{-10}	2.55×10^{-10}	2.20×10^{-11}	2.21×10^{-11}
−2.5	1.90×10^{-11}	2.63×10^{-11}	9.00×10^{-11}	2.30×10^{-10}	2.39×10^{-10}	3.20×10^{-10}	1.29×10^{-11}	3.80×10^{-11}
−3	7.00×10^{-11}	4.00×10^{-11}	1.30×10^{-10}	2.26×10^{-10}	2.92×10^{-10}	2.74×10^{-10}	1.87×10^{-11}	7.14×10^{-11}
−3.5	2.40×10^{-10}	5.50×10^{-11}	2.50×10^{-10}	2.43×10^{-10}	2.75×10^{-10}	3.15×10^{-10}	1.06×10^{-10}	1.70×10^{-10}
−4	8.24×10^{-10}	1.40×10^{-10}	5.66×10^{-10}	3.17×10^{-10}	3.39×10^{-10}	2.53×10^{-10}	1.57×10^{-10}	4.43×10^{-10}
−4.5	3.63×10^{-9}	2.81×10^{-10}	1.78×10^{-9}	5.04×10^{-10}	5.00×10^{-10}	3.74×10^{-10}	1.45×10^{-10}	1.26×10^{-9}
−5	1.51×10^{-8}	1.00×10^{-9}	6.24×10^{-9}	1.08×10^{-9}	1.11×10^{-9}	5.53×10^{-10}	2.14×10^{-9}	3.88×10^{-9}
−5.5	7.44×10^{-8}	3.71×10^{-9}	2.30×10^{-8}	3.30×10^{-9}	3.11×10^{-9}	1.17×10^{-9}	3.77×10^{-9}	1.21×10^{-8}
−6	3.62×10^{-7}	1.60×10^{-8}	9.11×10^{-8}	1.21×10^{-8}	1.07×10^{-8}	4.17×10^{-9}	8.65×10^{-9}	4.25×10^{-8}
−6.5	1.70×10^{-6}	7.20×10^{-8}	4.30×10^{-7}	4.92×10^{-8}	4.00×10^{-8}	1.60×10^{-8}	3.50×10^{-8}	1.33×10^{-7}
−7	7.22×10^{-6}	3.30×10^{-7}	1.83×10^{-6}	2.15×10^{-7}	1.80×10^{-7}	6.84×10^{-8}	1.01×10^{-7}	4.55×10^{-7}
−7.5	3.05×10^{-5}	1.50×10^{-6}	7.78×10^{-6}	1.03×10^{-6}	8.33×10^{-7}	2.83×10^{-7}	1.00×10^{-6}	1.90×10^{-6}
−8	1.11×10^{-4}	6.38×10^{-6}	3.00×10^{-5}	4.36×10^{-6}	3.83×10^{-6}	1.28×10^{-6}	3.51×10^{-6}	7.86×10^{-6}
−8.5	3.66×10^{-4}	2.65×10^{-5}	1.00×10^{-4}	1.40×10^{-5}	1.70×10^{-5}	5.60×10^{-6}	1.52×10^{-4}	2.44×10^{-5}

根据测试结果，在0℃，25℃，70℃全温度范围内，模块在自环、500 m及2 km传输距离下的误码率均处于10^{-12}～10^{-9}量级，完全满足协议对高速传输的低误码要求。在不同接收光功率（−8.5～2.5 dBm）下，误码率整体保持稳定，仅在接收光功率低于−7 dBm时有一定上升，但未超出协议阈值。接收端灵敏度测试显示，各通道灵敏度范围为−6.54～−8.89 dBm，远优于预设的−4.7 dBm协议标准，具备充足的接收性能冗余。

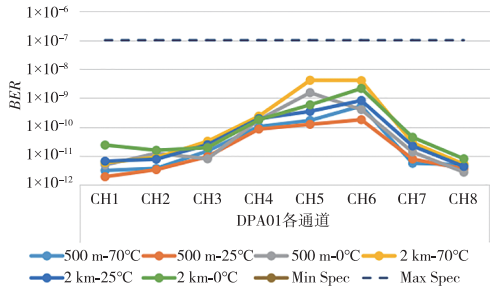
测试结果呈现明显规律性，随传输距离增加或温度升高，自环误码率略有上升。当传输距离增加时，光信号在光纤中因吸收和散射产生的损耗不断累积，致使接收光功率呈指数衰减，SNR也随之同步下降。同时，色度色散和偏振模色散所引发的光脉冲展宽，以及自相位调制和交叉相位调制造成的信号畸变，会随着传输距离的增加而不断叠加，进而导致光信号的误码率上升。当温度升高时，PD的暗电流会因热激发而显著增大，TIA的热噪声功率则与温度成正比上升。在这双重因素的作用下，SNR进一步降低。此外，硅光PIC会因硅材料的折射率漂移，导致光链路损耗增加、耦合效率下降，从而削弱均衡器的补偿效果和采样精度，加剧信号失真，最终使自环误码率出现轻微上升。

CH4～CH6通道的误码率表现稍逊于其他通道，存在轻微的性能衰减。主要原因可能如下：首先，在对准PD探测器时，CH4～CH6通道的FA存在工艺偏差，使得硅光波导的插入损耗高于其他通道，从而降低了接收端的信噪比；其次，CH4～CH6通道TIA的输入阻抗匹配误差较大，导致信号反射损耗增加，噪声系数上升。基于以上分析，提出以下优化方向：提高接收端FA对准PD探测器的工艺精度，调整TIA的匹配网络参数，以进一步提升各通道性能的一致性。

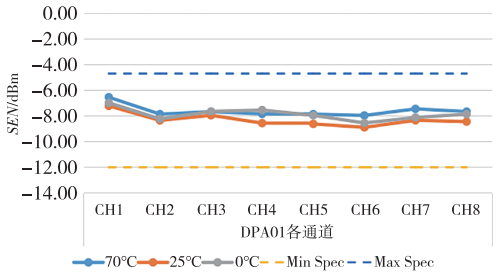
整体来看，模块接收端在不同工况下均展现出



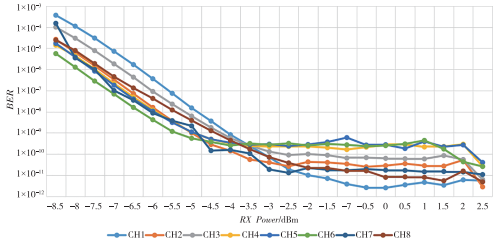
（a）自环误码率数据曲线



（b）500 m与2 km光纤自环误码率数据曲线



（c）灵敏度数据曲线



（d）25℃条件下不同接收光功率下的误码率数据曲线

图9 光模块接受端各测试数据分析曲线

稳定的信号解调能力与抗干扰性能，其优异的灵敏度与低误码特性能够适配数据中心不同传输距离的互联需求，完全满足1.6 T高速传输的设计预期。

3 结束语

本研究提出一种1.6 T OSFP-XD 2×DR4光收发模块，采用双DSP协同调度架构的方案，分析了PAM4调制的失真机制与补偿方案、双DSP协同的同步机制、硅光PIC的MZM工作原理。针对测试中各通道的性能差异，从光路耦合损耗、器件性能匹配进行了机理分析，并提出针对性优化方向。通过OSFP-XD封装优化、PAM4调制技术应用及多系统协同设计，成功实现1.6 Tbit/s的高速数据传输，在三种温度下的测试平均功耗控制在24 W左右，模块在不同温度下的发射端光谱、光眼图及接收端误码率与灵敏度等指标均符合IEEE 802.3dj协议标准，满足高密度机架部署要求。作为数据中心从400 G/800 G向1.6 T升级的核心器件，该光收发模块为突破数据传输瓶颈、优化算力基础设施能效及推动规模扩展开辟了新的技术路径，为构建下一代智能网络提供了高性能光器件支持。

参考文献：

[1] 殷高峰. AI浪潮推动数据中心互联应用愈发广泛[N]. 证券日报，2025-05-21(B02).
Yin Gaofeng. The AI Wave Drives Increasingly Widespread Interconnection Applications in Data Centers[N]. Securities Daily, 2025-05-21(B02).

[2] 姚钦文. 5G通信传输承载网络框架结构技术要点研究[J]. 通讯世界，2025，32(10)：20-22.
Yao Qinwen. Research on the Key Technologies of the Framework Structure of 5G Communication Transmission Bearer Network[J]. Telecom World, 2025, 32(10): 20-22.

[3] Pedro J, Costa N, Pato S. Optical transport network design beyond 100 Gbaud[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(2): A123-A134.

[4] Pettit C J, Zarpelon Leao S, Lock O, et al. Big data: the engine to future cities—a reflective case study in urban transport[J]. Sustainability, 2022, 14(3): 1727.

[5] 王会涛，张平化，苏 展. 800Gbit/s光模块技术及应用[J]. 中兴通讯技术，2021，27(6)：40-46.
Wang Huitao, Zhang Pinghua, Su Zhan. Technologies and applications of 800 gbit/s optical module[J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(6): 40-46.

[6] 高立昭，吴春付，李林春，等. 800 Gbit/s OSFP 2×DR4光收发模块的研究与设计[J]. 激光与光电子学进展，2025，62(1)：156-161.
Gao Lizhao, Wu Chunfu, Li Linchun, et al. Design and performance evaluation of 800 gbit/s OSFP 2 × DR4 optical transceiver module for high-bandwidth data centers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(1): 156-161.

[7] 张博文，孙莉萍. 基于COB的CWDM4光模块设计[J]. 电子设计工程，2020，28(23)：53-56，62.
Zhang Bowen, Sun Liping. Design of CWDM4 optical module based on COB technology[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(23): 53-56, 62.

[8] 夏鹏辉. 高速硅光调制器及其集成芯片研究[D]. 杭州：浙江大学，2023.
Xia Penghui. Research on high-speed silicon photonic modulators and integrated chips[D]. Hangzhou: Zhejiang

University, 2023.

[9] 吴冰冰，刘　璐，谢俊杰，等. 800 Gb/s及Tb/s光收发模块关键技术与标准化研究[J/OL]. 光通信研究，1-14[2025-06-16].
Wu Bingbing, Liu Lu, Xie Junjie, et al. Research on Key Technologies and Standardization of 800 Gb/s and Tb/s Optical Transceiver Modules[J/OL]. Optical Communication Research, 1-14[2025-06-16].

[10] Kim J W, Kim D S, Kim S H, et al. Design and implementation of QSFP28 optical transceiver for long-rich transmission using PAM4 modulation [J]. The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, 2019, 44(12): 2292-2302.

[11] 高　超. 1.6T时代加速到来[N]. 通信产业报，2024-09-16(8).

[12] 刘兴平，左　静，陈　惠，等. 连接器信号串扰优化浅析[J]. 机电元件，2022，42(2)：58-62.
Liu Xingping, Zuo Jing, Chen Hui, et al. Optimization analysis of signal crosstalk for connector [J]. Electromechanical Components, 2022, 42(2): 58-62.

[13] 曾福林，安　维，李冀星，等. 高速PCB的寿命评价方法[J]. 电子工艺技术，2022，43(3)：182-186.
Zeng Fulin, An Wei, Li Jixing, et al. Life evaluation methods of high speed PCB [J]. Electronics Process Technology, 2022, 43(3): 182-186.

[14] 朱梅冬，陆建鑫. PAM4技术在光通信应用中的系统分析[J]. 中兴通讯技术，2018，24(4)：33-37.
Zhu Meidong, Lu Jianxin. System analysis of PAM4 technology in optical communication applications [J]. ZTE Technology Journal, 2018, 24(4): 33-37.

[15] 周本军，胡　伟，胡俊豪. 200 Gbit/s PAM4光发射组件封装技术研究[J]. 半导体光电，2023，44(1)：49-52.
Zhou Benjun, Hu Wei, Hu Junhao. Research on 200 gbit/s PAM4 optical transmitter packaging technology [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(1): 49-52.

[16] 邓　琨，高万超，陈　意，等. 400Gbit/s FR4光收发模块的研究[J]. 光通信研究，2021(3)：43-47.
Deng Kun, Gao Wanchao, Chen Yi, et al. Research on 400 gbit/s FR4 optical transceiver module[J]. Study on Optical Communications, 2021(3): 43-47.

[17] Wu T, Song K, Chen Z, et al. A software PAM4 clock data recovery algorithm for high-speed serial communication[J]. IET Communications, 2022, 16(4): 335-347.

[18] Breyne L, Ramon H, Van Gasse K, et al. 50 GBd PAM4 transmitter with a 55nm SiGe BiCMOS driver and silicon photonic segmented MZM[J]. Optics Express, 2020, 28(16): 23950-23960.

[19] 许朝蓬. QSFP28光模块应用的标准分析与测试技术研究[J]. 自动化仪表，2017，38(8)：45-49，54.
Xu Zhaopeng. Research on the standard analysis and testing technology for application of QSFP28 optical module [J]. Process Automation Instrumentation, 2017, 38(8): 45-49, 54.

[20] 王豪杰，程伟强，阳　进，等. 一种光模块自动化测试系统设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报，2023，37(2)：211-219.
Wang Haojie, Cheng Weiqiang, Yang Jin, et al. Design and implementation of an automatic test system for coherent optical module [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(2): 211-219.

[21] IEEE P802.3dj/D1.5 Draft Standard for Ethernet Amendment: Media Access Control Parameters for 1.6 Tb/s and Physical Layers and Management Parameters for 200 Gb/s, 400 Gb/s, 800 Gb/s, and 1.6 Tb/s Operation [EB/OL]. LAN/MAN Standards Committee, [2025-05-27].

作者简介：

李桢民(2001—)，男，湖北省仙桃市人，硕士研究生，主要研究方向为光通信、光模块；

罗风光(1963—)，男，湖南省衡东县人，博士，教授，主要研究方向为光电子、光通信；

吴春付(1980—)，男，黑龙江省哈尔滨市人，硕士，主要研究方向为光模块。