

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205926

一种光模块自动化测试系统设计与实现

王豪杰¹ 程伟强¹ 阳进¹ 陈超² 沙慧军² 李顺昌² 陈汉祥²

(1. 中国移动通信有限公司研究院 北京 100053; 2. 唯亚威(VIAVI)通信技术(北京)有限公司 北京 100020)

摘要:可插拔相干光模块软硬件复杂度高导致传统手动测试方式无法进行大规模功能和性能评测,严重制约模块测试效率及产能。本文设计并实现了面向400和800 Gb/s相干光模块的自动化测试系统,利用可编程信号调理元件的自动化操控能力,可以稳定、高效地对相干光模块的固件、状态时序和收发光学指标等功能或性能参数进行测试验证。通过搭建测试系统对多厂商400ZR和400ZR+模块进行测试验证,测试时间相比传统手动测试方式可以降低近一个数量级,大幅提高测试效率。

关键词:相干技术;光模块;自动化;方案;测试系统

中图分类号: TP23; TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Design and implementation of an automatic test system for coherent optical module

Wang Haojie¹ Cheng Weiqiang¹ Yang Jin¹ Chen Chao² Sha Huijun² Li Shunchang² Chen Hanxiang²

(1. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China; 2. VIAVI Solutions, Beijing 100020, China)

Abstract: The internal hardware and software of coherent optical transceivers are relatively complicated, and it is hard to carry out a large-scale test with the conventional manual method. The testing efficiency and productivity of coherent optical modules are also seriously restricted. To this end, an automated test system for 400 and 800 Gb/s coherent optical modules is designed and implemented. This system utilizes the programmable manipulation components to efficiently obtain the firmware, state sequence and optical parameters of coherent transceivers. Moreover, an experimental test setup is built to verify the systemic effectiveness, in which multiple 400ZR and 400ZR+ modules from different vendors are evaluated. The test results show that compared to the manual method, the measuring time can be lowered by nearly an order of magnitude with the proposed method, which significantly improves the testing efficiency.

Keywords: coherent technology; transceiver; automation; solution; test system

0 引言

新型业务流量的日益激增推动网络带宽和数据传输速率不断提高,同时也改变了传统通信网络的设计和构建方式^[1-3]。为了适应网络拓扑的不断变化,相干传输技术从高性能、集成线路侧单板逐步向开放、互操作的插拔光模块系统演变,其应用也从长途干线网络下沉到数据中心互联(data center interconnection, DCI)、城域网等场景^[4]。2016年,光互联论坛(optical internetworking forum, OIF)以及多源协议(multi-source agreement, MSA)组织相继发布400ZR、OpenZR+、OpenROADM等系列标准,以期推动相干光传输技术迈入互操作、长短距离覆盖

的新阶段^[5-6]。由此,以400ZR/ZR+为代表的可插拔相干光模块逐渐成为未来数据中心及城域网高速互联的重要选择,也是业界光模块厂家产品布局的重点。

相比传统直调直检光模块,可插拔相干光模块系统更复杂。以400ZR/ZR+为例,其光收发系统包括集成可调谐激光器组件(integrated tunable laser assembly, ITLA)、IQ调制器和相干接收机等^[2]。ITLA的波长具有可调谐性,用于支持密集波分复用(dense wavelength division multiplexing, DWDM)场景。IQ调制器需要通过自动偏压控制将工作电压偏置在零点。其数字信号处理(digital signal processing, DSP)系统具有更复杂的信号处理功能,包括色散补偿、偏振跟踪、载波相位跟踪、前向纠错(forward error correction, FEC)、成帧和映射等^[7-8]。此

外,为了主机侧能够获得光模块和光纤链路的状态信息,DSP 也需要实时采集和上报各种状态参数,例如光信噪比(optical signal-to-noise ratio, OSNR)、误差向量幅度、纠错前误码率等^[9]。

如上所述,相对复杂的系统功能给相干传输技术带来了探测灵敏度高、通信容量大、链路损伤容限高等优势,但也使其功能和性能测试面临前所未有的挑战。传统误码模式已无法穿透 DSP,需要考虑如何对高速串并转换器和各类业务进行验证,以及如何对 DSP 数据上报功能进行测试。另外,由于 ITLA 具有波长可切换功能,需要验证所有波长的性能指标,以及在相干干扰情况下,是否满足标准规范要求。

相干光模块更倾向于系统性设计,因此对其测试不仅要评估光电器件性能,还需要对固件、时序以及管理接口等整体功能进行评测。已有文献开展了高速光模块测试系统研究^[9-11]。文献[9]介绍了 400 Gb/s 直调直检光模块测试系统,并针对 400G-FR4 模块介绍了其光电接口测试方法。同时,肖刚等^[10]也基于 DSP 芯片的 PRBS 信号诊断功能设计了一种低成本 400 Gb/s 光模块四阶脉冲幅度信号的比特率误码测试方案,并进行了实验测试。上述测试系统均针对 400 Gb/s 直调直检光模块测试需求,无法进行相干光模块测试。张锡芳等^[11]针对相干光模块 OSNR 容限测试需求,提出一种 OSNR 指标自动化测试方法,以指导发射端根升余弦滤波器和接收端载波相位恢复窗口的选择。虽然上述测试方案可以为相干光模块测试提供相关指导,但还存在如下不足:1) 无法支持对光模块整体功能的测试。由于上述测试系统均为分立元件组合而成,功能或测试指标相对单一,例如文献[11]仅支持对 OSNR 测量。对相干光模块而言,业务性能是衡量其性能优劣的重要指标,而上述测试系统无法涵盖完备的业务性能测试,也无法验证频偏、动态和静态偏差等指标。2) 无法支持软件管理接口测试,无法验证相干光模块的软件可靠性及兼容性。且电域和光域性能指标测试分离,缺乏关联性验证。3) 上述测试方法或系统还主要以手动测试模式为主,导致测试时间长、可重复性差,制约了高速相干光模块测试效率的提升,影响模块产量的提高。

针对上述测试方法存在的不足,本文设计并实现了一种面向 400 和 800 Gb/s 相干光模块的自动化测试系统。该测试系统基于可编程信号调理元件的自动化操控能力,可以稳定、可重复地对相干光模块的固件、状态时序、收发光学指标等功能或性能参数进行测试验证。同时,系统性将电域和光域性能测试相结合,通过测试结果可以更全面反映相干光模块的特性。可编程光信号调理元件可以以单独或组合协同方式工作,通过软件编程进行重复控制。本文搭建了测试系统,对多厂商 400ZR 和

400ZR+模块进行测试,验证了该自动化测试系统的高效性。相比传统手动测试方式,测试时间可以降低近一个数量级,大幅提高模块测试效率。

1 400 与 800 Gb/s 相干光模块标准

1.1 400ZR 与 OpenZR+标准

OIF 和 OpenZR+ MSA 分别在 2020 年 3 月和 9 月发布了最新版本的 400ZR 和 OpenZR+标准协议^[6]。这两个标准协议主要对数据帧结构、各物理子层功能和光收发机指标进行了描述和规定。

图 1(a)所示为 400ZR 帧结构,采用 10 280 列×4 096 行的块格式,其中 4 096 行可以由 1×4 096 行或 16×256 行组成。图 1(b)所示为 400ZR 帧开销,包括 16×120 bit 对齐标记、1 920 bit 填充和 4×320 bit 开销,均位于 400ZR 数据帧的第 1 行。此外,在开销和载荷之间存在 20 bit 的附加填充,而有效载荷区域大小为 10 220×257 bit。

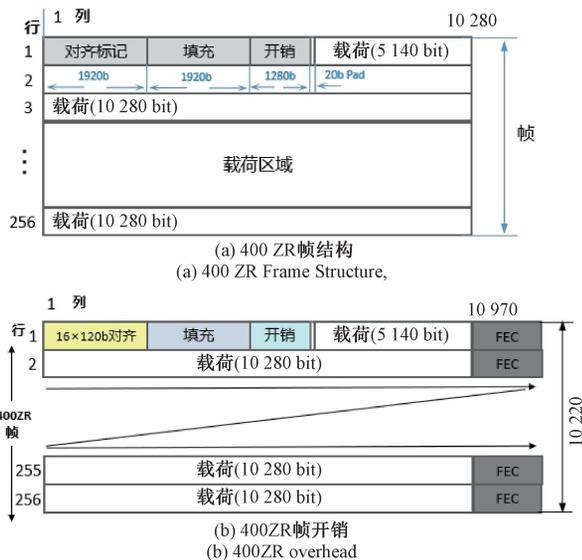


图 1 400ZR 帧结构和 400ZR 帧开销

Fig. 1 400ZR frame structure and 400ZR overhead

OpenZR+继承了 400ZR 的优势,但采用 OFEC(open FEC)并进行相关参数优化,进一步提升系统性能,传输距离可达 480 km^[6,11]。由于采用了 OFEC,有利于实现异厂家光模块互联互通。同时,400ZR+支持降速操作,兼容 300ZR+、200ZR+和 100ZR+。如图 2 所示,OpenZR+可支持 4 个 100GBASE-R、2 个 200GBASE-R 或者 1 个 400GBASE-R 的客户业务,这些业务数据通过通用映射协议重新映射进 OpenZR+帧结构,经分时复用和 OFEC 编码后,利用相应调制方式发送。

除上述数据帧结构和物理子层逻辑功能外,400ZR

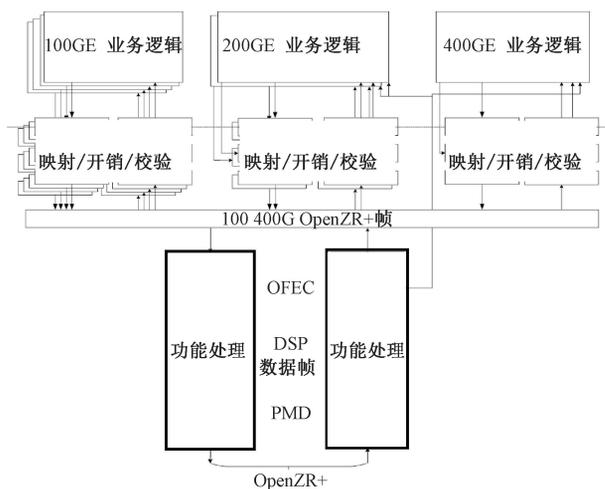


图 2 OpenZR+逻辑架构

Fig. 2 Block diagram of 400G OpenZR+

和 OpenZR+标准也定义了 400ZR 和 400ZR+光收发机指标,如表 1 所示,涵盖发射端和接收端光信号功率、信噪比、噪声容限等关键指标。

表 1 400ZR 和 OpenZR+光收发机关键指标

Table 1 400ZR and OpenZR+ transceiver specifications

光收发机指标		单位
发射端	输出光功率	dBm
	-3 dB 谱宽偏移	GHz
	光信噪比	dB
	波长精度	GHz
	反射	dB
	背反容限	dB
	灵敏度	dBm
接收端	光信噪比容限	dB
	回损	dB
	LOS 点	dBm
	回滞区间	dB
	输入光功率	dBm
	偏振态容限	Krad/s
	CD 容限	ps/nm

400ZR 应用目标是 80~120 km 场景,而 OpenZR+的传输距离可以由式(1)进行估算^[6,11]:

$$OSNR = 58 + P_{ch} - NF - L_{span} - 10 \lg N - OSNR_p \quad (1)$$

其中, P_{ch} 为单通道入纤功率, NF 为 EDFA 噪声系数, L_{span} 为每个跨段光功率衰减, $OSNR_p$ 为传输代价, N 为跨段的数量。按照 G652 光纤损耗为 0.24 dB/km, 单跨段 EDFA 传输距离为 80 km, 以及接收端 OSNR 容限为 24 dB, 并假定 $P_{ch} = 0$ dBm, $NF = 6$ dB, $OSNR_p = 1$ dB。由式(1)可以得到 $N \approx 6$, 则传输距离大约为 480 km。

1.2 800 G 相干标准

目前, OIF 和国际电气电子工程师协会 (Institute of

Electrical and Electronic Engineers, IEEE) 都在开展 800 G 相干标准项目研究^[12]。OIF 主要面向园区和 DCI 场景制定 800LR 和 800ZR 可互操作标准。800LR 标准支持无光放、固定波长模式, 聚焦 10 km 应用场景。800ZR 标准将支持光放、DWDM 模式, 聚焦 40~120 km 应用场景。

IEEE 已启动 800GE 标准项目, 相关标准正在制定中。IEEE 主要考虑针对 10 和 40 km 目标场景制定 800G 相干标准, 以应对直调直检方案在该目标场景所面临的技术挑战^[12]。此外, IEEE 已基于两个 400GE 物理编码子层 (physical coding sublayer, PCS) 完成 8×100 Gb/s 通道速率的 800GE 标准草案。每个 100 Gb/s 数据通道由 4 个 PCS 通道驱动。图 3 所示为 800GE 发送端 PCS 功能框图。其中, 除 64/66b 编码器产生 800 Gb/s 数据流, 其余功能模块均对 400 Gb/s 的数据流进行处理。两个 16 通道 PCS 由两个 PCS 栈产生, 经物理媒介适配子层 (physical medium attachment, PMA) 进行 4:1 比特复用, 以产生 8×106 Gb/s 的物理媒介相关子层通道。

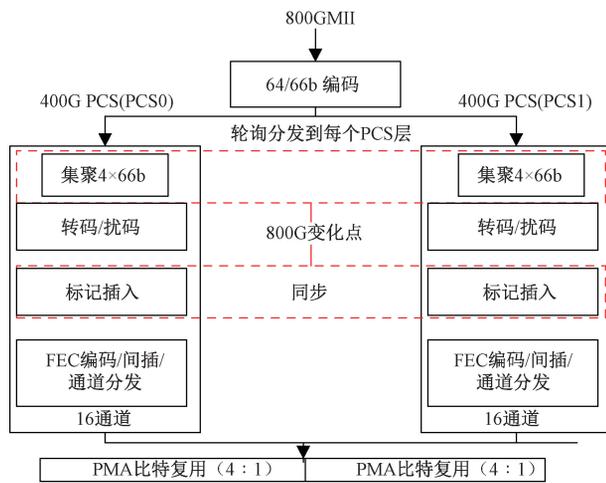


图 3 800G 发送端 PCS 功能框图

Fig. 3 Function of 800G Tx PCS

2 自动化测试设计

2.1 系统设计的影响因素

本文着重基于前述 OIF、MSA 和 IEEE 标准规定的相干光模块规格参数进行全自动化测试系统的设计, 系统设计的复杂性和难点体现在如何兼顾测试功能的完备性、测试步骤和测试项的调用顺序。相干光模块测试涉及多波长、OSNR、接收功率、传输距离等, 相互之间具有矩阵式的关联关系。自动化测试系统的特性和测量精度直接影响了被测光模块的性能评估准确度, 因此需要首先考虑影响测试系统性能的关键因素^[13-16]。表 2 所示为影响测试系统性能的关键因素, 主要包括: 单参数控制、

超低损耗、低噪声、波长无关性、长期稳定性、可重复性、调谐速度和系统模块化。其中,前 6 项会直接影响测试系统性能,后两项主要影响测试系统的测试效率。

表 2 测试系统的影响因素

Table 2 Key factors for design of optical test system

因素	对测试系统影响
单参数控制	不影响任何其他参数的情况下控制一个参数的能力
超低损耗	低损耗元件通过避免额外放大将成本降至最低
低噪声	尽可能低的噪声指数可确保有限的额外 OSNR 损伤
波长无关性	在发生调谐范围内改变波长不会对性能造成影响
长期稳定性	需要将随时间和温度漂移降至最低
可重复性	许多测试将都多次周期返回,可重复测试能力至关重要
调谐速度	在多个测试状态中,单个元件的速度至关重要
系统模块化	能够快速高效地添加删减测试组合

另外,自动化测试系统需要支持最新的公共管理接口协议,以验证双密度四通道小型可插拔封装(quad small form-factor pluggable-double density, QSFP-DD)和 CFP2 等主流封装的相干光模块的上报告警、时序、压力容限等是否符合固件要求^[11]。自动化测试系统也需要满足 400ZR 和 OpenZR+相干光模块的功耗、频偏、动态和静态偏差、扇出模式等业务要求^[6,11]。

2.2 自动化测试功能设计

本文提出的自动化测试系统利用了可编程信号调理元件的自动化控制能力,通过 Python 脚本语言编程控制各元件模块,经光开关实现不同测试功能的按需切换,并由 SQLite 数据库存储测量数据,从而实现 400ZR、OpenZR+以及 800 G 相干光模块从软件控制、硬件连接到数据存储的一体化测试解决方案。图 4 所示为该系统的测试功能流程图,主要包括 5 项测试功能:B2B 指标测试、固件测试、时间时序测试、发端光学指标测试和收端光学指标测试。仪表完成初始化后,对光路进行预测试,确保系统光路连通、被测光模块正常工作。然后,按图 4 所示流程对光模块功能和性能进行评测。首先进行相干光模块的 B2B 性能测试,测试电压、电流和功耗等基础指标。然后对频偏、FEC、动态和静态偏差等进行压力测试,并通过 FEC 统计计算光模块电接口链路裕量。同时,测试 B2B 整体业务传输性能以及固件相关功能可靠性和完整性。完成上述测试后,可以启动时间时序测试,对相干光模块的管理接口时间、模块上下电时间等指标进行测试验证。随后通过控制光开关将光模块的光路切换到光信号调理元件中,进行发送端和接收端的各项光学指标的测试,包括光功率、光谱、发射和接收 OSNR、灵敏度 and 色散、偏振参数等测试^[9,11]。并测试发送端背反、发射端和接收端回损等。

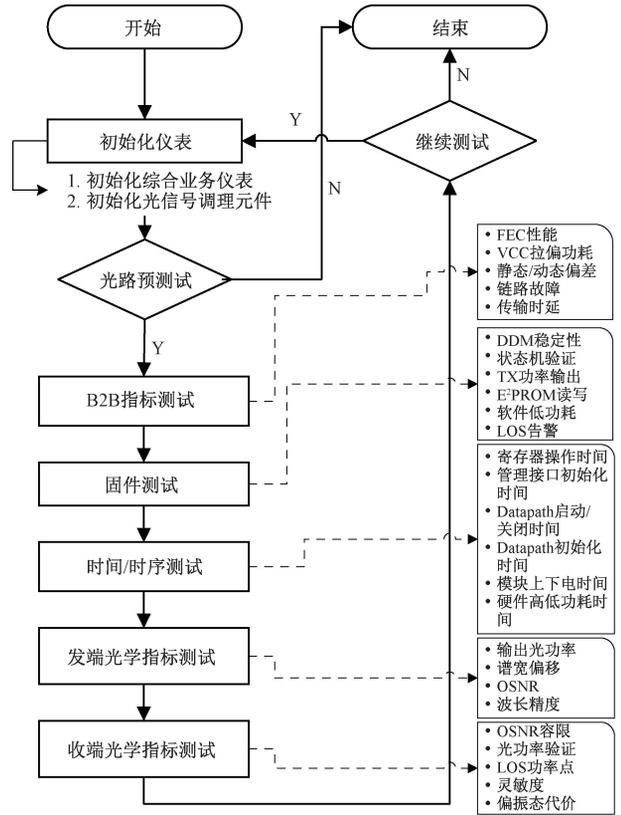


图 4 自动化测试功能流程

Fig. 4 Flow chart of the proposed automated test functions

2.3 自动化软件设计

自动化软件脚本运行流程如图 5 所示。本文基于 Python 设计了自动化系统的软件控制脚本。整个软件设计包括前端界面设计、测试项目管理、模块分类、仪表控制、数据库管理、测试执行以及报告生成等一系列功能。如图 5 所示,通过前端界面登录并获取管理权限后,可以启动测试流程。选择模块类型、输入序列号,对仪表和元件进行初始化之后,按照测试步骤选择运行对应测试模块进行测试。测试完成后可以保存数据到数据库中,并选择继续或结束测试。在测试过程中,可以通过软件界面查看实时状态,跟踪测试进度和调整测试用例。

3 自动化测试系统实现

根据上述设计原理,本文构建了如图 6 所示的自动化测试系统。该测试系统由可编程信号调理元件组成,通过软件编程控制这些元件实现对相干光模块标准参数的自动化测量。同时,该系统的设计综合考虑了信号功率、光谱、光信噪比容限等基础测试要求,以及电域压力测试和光域干扰测试要求,也兼顾复杂的光模块固件验证要求。如图 6 所示,待测光模块发射端产生的光信号

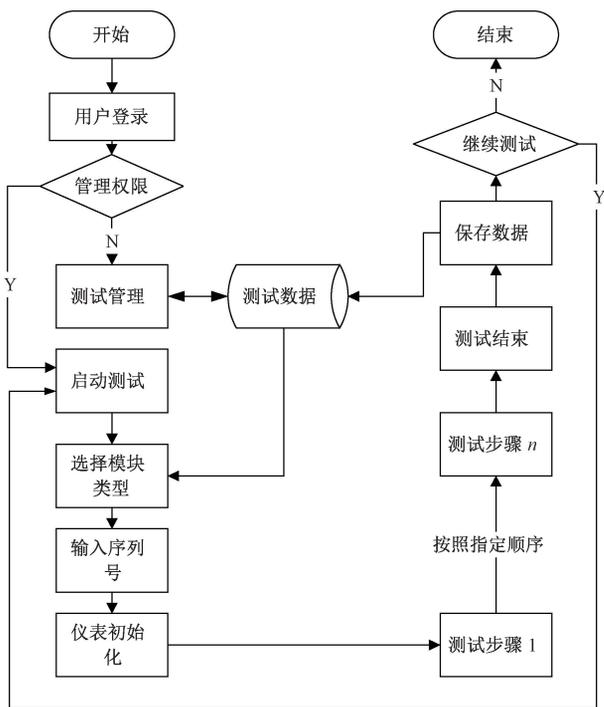


图 5 软件脚本运行流程

Fig. 5 Flow chart of the Python script execution

经衰减后与自发辐射噪声 (amplified spontaneous emission, ASE)光源产生的 ASE 噪声信号进行耦合,然后通过光纤信道传输后,经光放大、光滤波和光衰减后返回接收端^[16-18]。ASE 光源可以利用宽谱光源实现,用于产生高斯白噪声。光开关可以将光信号切换到由不同元件组成的光路上,实现 B2B 测试或光纤信道测试。光纤信道可以对相干光模块的色散或偏振模色散容限、相干干扰容限和多路径干扰容限等参数进行评估测试。控制系统通过功率监控和光谱测量获得状态参数和测量数据。光衰减、光放大、光滤波和光开关等功能模块均可编程光信号调理元件实现,可以由控制系统通过软件编程操控。

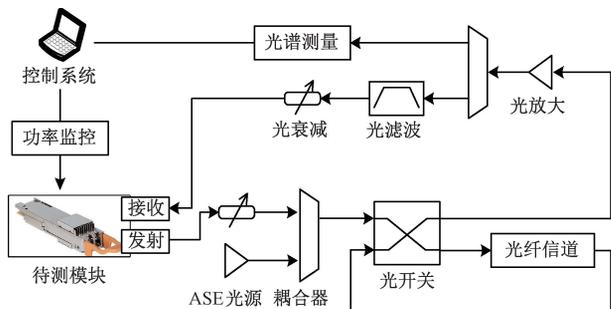


图 6 自动化测试系统原理

Fig. 6 Schematic of the proposed automated test system

元件。另外,通过 ASE 光源、光衰减器、偏振控制器、可调节背反镜和合光器可以实现 OSNR 容限、相干干扰和多路径干扰容限测试。

表 3 光学测试功能模块

Table 3 Optical test functions

功能模块	实现元件
光衰减	光衰减器
光放大	EDFA
偏振控制	扰偏控制器
光滤波	光滤波器
光纤信道	光纤盘
光谱测量	光谱仪

4 400 G 相干光模块测试

4.1 实验测试系统

本文基于图 6 所示原理系统搭建了图 7 所示的实验测试系统,利用该实验系统对 400ZR 和 400ZR+相干光模块进行测试。通过相干光模块的规格参数测试结果验证该自动化测试系统的软硬件是否正常工作、测试效率以及测试结果的一致性。实验系统利用综合业务仪表 (VIAVI, ONT804) 提供标准的相干光模块适配接口,不需要额外的专用测试控制板,并能提供业务收发功能。被测光模块的收发光接口与一个 2×2 光开关相连,通过控制光开关切换发射或接收光路。发射光信号与 ASE 噪声信号由分光器 3 耦合后注入光纤盘中,然后经可调滤波器、光衰减器 2 后返回接收端。通过光功率计 1 和 2 检测光信号经光纤盘前后的功率变化,通过光谱仪测量发端光信号的光谱。其中,光开关、光衰减器、光放大器、偏振控制器、可调光滤波器、光谱仪和光功率计等均为可编程元件,通过热插拔方式放置在集成光测试平台 (VIAVI, MAP380) 中,由主机通过软件编程进行调控。

实验测试时,获取了测试时间、模块功耗、模块时延、发送 OSNR、接收 OSNR 容限等关键指标的测试结果,进行对比分析。在测试模块功耗时,设置 FEC 裕量参数 < 3,测量链路无丢包误码时的最大功耗。在测试模块时延时,设置帧长 64 bytes 的 400GE 流量,通过自环统计平均时延。对于测试样品,选择了 4 个相干光模块厂商的 15 个 400ZR 以及 4 个 400ZR+光模块样品进行测试,以验证本文所设计的自动化测试系统的功能和性能。其中厂商 1 和厂商 2 的 6 个样品均为 400ZR 模块,厂商 3 的 3 个样品为 400ZR 模块,厂商 4 的 4 个样品为 400ZR+模块。

4.2 测试结果与分析

图 8 所示为自动化测试系统与传统手动测试的测试时间对比结果。测试时选用了厂商 1 的 6 个 400ZR 模块。从对比结果来看,自动化测试系统的平均测试时间

表 3 所示为自动化测试系统中功能模块对应的实现

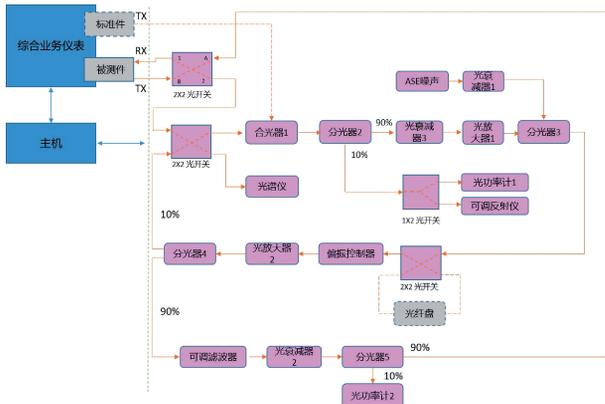


图 7 自动化测试实验系统

Fig. 7 Experimental setup of the proposed automated test system

约为 3.13 h, 远低于传统测试方式的 26.54 h, 约为其 1/10, 测试效率提升显著。同时, 传统手动测试时间波动较大, 标准差约为 1.77 h, 而自动化测试时间标准差约为 0.35 h。

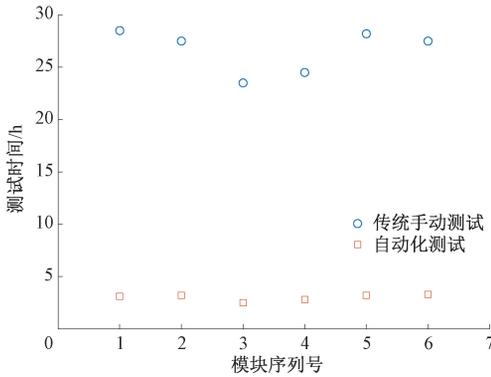
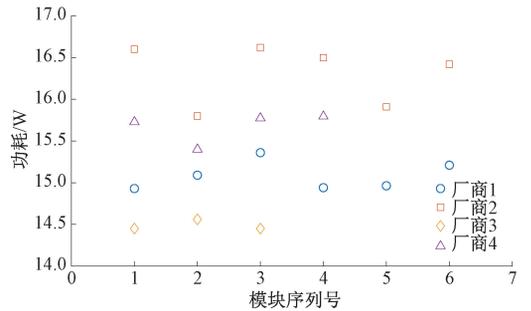


图 8 自动化测试系统与传统方式的测试时间对比

Fig. 8 Comparison of test time between the proposed automatic test system and conventional manual

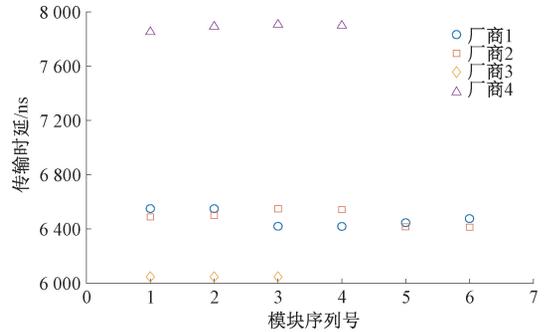
图 9 所示为 4 个厂商的 19 个相干光模块的功耗、传输时延、发端 OSNR 和收端 OSNR 测试结果。表 4 为 4 个厂商光模块样品的统计测试结果。从图 9(a) 的功耗测试结果来看, 不同厂商的 400ZR 或 400ZR+模块功耗相差较大。厂商 1 模块的平均功耗约为 15.1 W, 厂商 2 模块的平均功耗约为 16.3 W, 厂商 3 模块的平均功耗约为 14.5 W, 厂商 4 模块的平均功耗约为 15.7 W。其中, 厂商 2 的各模块功耗偏差较大, 约为 0.8 W; 厂商 3 的各模块功耗偏差较小, 约为 0.1 W。由于不同厂商模块内部的光芯片以及 DSP 芯片差异较大, 导致模块整体功耗相差较大。这部分偏差可以为光模块性能优化设计提供指引。但所有模块的功耗都在 20 W 以内, 均满足 QSFP-DD 模块封装规范要求。

图 9(b) 为模块传输时延测试结果。由于相干 DSP



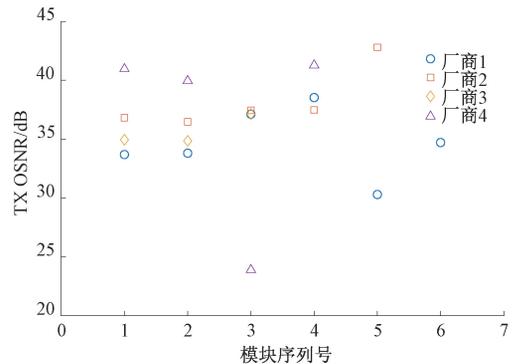
(a) 功耗测试结果

(a) Measured results of power consumption



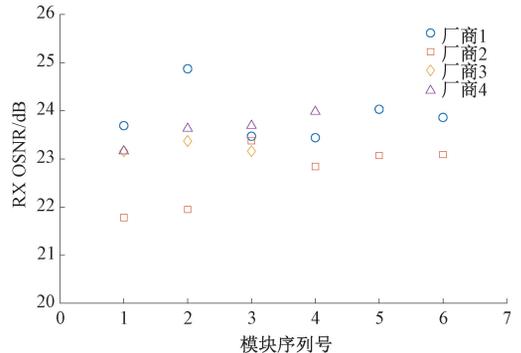
(b) 传输时延测试结果

(b) Measured results of power consumption



(c) 发端 OSNR 测试结果

(c) Measured results of Tx OSNR



(d) 收端 OSNR 容限测试结果

(d) Measured results of Rx OSNR tolerance

图 9 不同厂商光模块性能指标测试结果

Fig. 9 Measurement results of different vendor modules

内部集成了业务映射、节点再生功能和各种性能补偿算法, 所以传输时延是衡量不同 DSP 性能的重要参考指

标。可以看到,厂商1和厂商2模块的传输时延基本保持一致,大约为6.48 μs 。厂商3模块的平均传输时延大约为6.05 μs ,在所有厂商模块中是最低的。考虑到厂商4模块为400ZR+模块,DSP内部有更复杂的帧处理和FEC功能,传输时延较大,平均约为7.89 μs 。

图9(c)和(d)分别为不同厂商光模块发送端和接收端OSNR容限测量结果。除厂商4的序列号3模块外,其他模块的发端OSNR均超过30 dB。厂商2和厂商3所有模块的发端OSNR性能均超过34 dB,满足400ZR标准要求^[6]。对于接收端OSNR容限性能,厂商1、厂商2和厂商3所有被测模块均小于26 dB,满足400ZR标准要求;厂商4所有模块均小于24 dB,满足OpenZR+标准要求^[11]。接收端OSNR容限是相干光模块连接波分系统后,决定链路性能的重要指标^[19-20]。尽管标准协议规定了其参考范围,但从实际测试结果来看,模块厂家都会优化和提高该指标性能,以提高自身产品的竞争力。

表4 不同厂商光模块性能指标平均结果统计

Table 4 Statistical results of different vendor modules

厂商	功耗/W	时延/ μs	发送 OSNR/dB	接收 OSNR 容限/dB
厂商1	15.1	6.48	33	24
厂商2	16.3	6.48	38	23
厂商3	14.5	6.05	36	23.5
厂商4	15.7	7.89	37	23.8

5 结论

相干可插拔光模块系统复杂度高、性能一致性要求高,导致其功能和性能测试的多样性。高效的自动化测试平台可以助力研发生产,成为推动相干光模块商用化的重要引擎之一。面对研发和生产过程环节的苛刻要求,如何提高相干光模块的测试效率和产能至关重要。为此,本文设计并实现了一种面向400和800 Gb/s相干光模块的自动化测试系统。该测试系统可以稳定、高效地对相干光模块的固件、状态时序、发射和接收端光学指标等功能或性能参数进行测试验证。利用可编程信号调理元件的自动化操控能力,以单独或组合协同方式工作,通过软件编程实现各测试功能的自动化运行。同时,本文搭建了测试系统,对不同厂商的400ZR和400ZR+模块进行测试验证。结果表明,相比传统手动测试方式,测试时间可以大幅降低,显著地提高模块测试效率。并且能够将测试数据存储在数据库中,将测试结果以报告的形式快速呈现出来。

该测试系统在传统测试方法的基础上提出将电域和光域特性相结合,以系统的概念进行相干光模块整体性测试,并设计和实现了针对开放性软件管理接口的测试

功能。由于800 Gb/s可插拔相干模块还未产品化,本文并未进行相关测试验证,后续可进一步测试评估800 Gb/s相干光模块产品。此外,该系统的设计和实现方法对1.6 Tb/s甚至后续更高速率的相干光模块测试也具有参考意义。

参考文献

- [1] WU X, VAN DEN BORNE D, MAKI J J, et al. Interoperable coherent pluggables beyond 400ZR [C]. Asia Communications and Photonics Conference. Optica Publishing Group, 2019: T2C. 4.
- [2] XIE C, CHENG J. Coherent optics for data center networks [C]. 2020 IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series (SUM). IEEE, 2020: 1-2.
- [3] MELLE S, ZAMI T, BERTRAN-PARDO O, et al. Comparing IP-optical architectures & WDM transport technologies in metro, regional and long-haul networks [C]. 2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2021: 1-3.
- [4] JIA Z, CAMPOS L A. Coherent optics ready for prime time in short-haul networks [J]. IEEE Network, 2021, 35(2): 8-14.
- [5] CHENG J, XIE C, TANG M, et al. A low-complexity adaptive equalizer for digital coherent short-reach optical transmission systems [C]. 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2019: 1-3.
- [6] SRIVASTAVA A. Interoperable coherent optics for extended reach-assisting data center evolution [C]. Optical Fiber Communication Conference. Optica Publishing Group, 2021: M5G. 2.
- [7] 吴冰冰,赵文玉,张海懿. 高速光模块关键技术方案及标准化进展 [J]. 电信科学, 2022, 38(9): 105-115.
WU B B, ZHAO W Y, ZHANG H Y. Key technical solutions and standardization progress of high-speed optical modules [J]. Telecommunications Science, 2022, 38(9): 105-115.
- [8] 袁学光,张阳安,张明伦,等. 高速光通信系统中的偏振模色散监测和补偿 [J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(3): 113-117.
YUAN X G, ZHANG Y AN, ZHANG M L, et al. PMD monitoring and compensation in high speed optical communication systems [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011, 34(3): 113-117.
- [9] 肖刚,胡毅,杨俊麒,等. 400 Gb/s热插拔光收发模块测试系统研究 [J]. 自动化仪表, 2021, 42(2): 56-62, 67.
XIAO G, HU Y, YANG J Q, et al. Research on test

- system for 400 Gb/s hot-pluggable optical transceiver module[J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(2): 56-62, 67.
- [10] 肖刚, 马洪勇, 胡毅, 等. 一种用于 400 Gb/s 光模块测试的低成本 PAM4 信号 BERT[J]. 光通信技术, 2021, 45(10): 19-23.
XIAO G, MA H Y, HU Y, et al. Low-cost PAM4 signal BERT for 400 Gb/s optical module test [J]. Optical Communication Technology, 2021, 45(10): 19-23.
- [11] 张锡芳, 郑优斌. 线路侧光模块 CFP2-DCO 的 OSNR 参数测量方法[J]. 光学与光电技术, 2019, 17(4): 57-63.
ZHANG X F, ZHEN Y B. OSNR measurement method of the line side CFP2-DCO [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2019, 17(4): 57-63.
- [12] 王会涛, 张平化, 苏展. 800 Gbit/s 光模块技术及应用[J]. 中兴通信技术, 2021, 27(6): 40-46.
WANG H T, ZHANG P H, SU ZH. Technologies and applications of 800 Gbit/s optical module [J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(6): 40-46.
- [13] XING R, WANG H, HU Y, et al. Digital predistortion and measurement method [J]. Instrumentation, 2020, 7(2): 60-66.
- [14] 孔英秀, 柯熙政, 杨媛. 激光器线宽对空间相干光通信系统性能的影响[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1668-1674.
KONG Y X, KE X ZH, YANG Y. Influence of laser linewidth on the performance of space coherent optical communication system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1668-1674.
- [15] 许学彬, 陈博恒, 赵楠楠, 等. 基于 GA-BP 的改进高斯均值区域去噪技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 107-113.
XU X B, CHEN B H, ZHAO N N, et al. Improved Gaussian mean region denoising technology based on GA-BP [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 107-113.
- [16] 曾维棋, 马上, 黄秋, 等. 提高测量分辨率的改进 Dither 方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 40-45.
ZENG W Q, MA SH, HUANG Q, et al. Measurement resolution enhancement by improved Dither method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 40-45.
- [17] 吴江, 许克锋, 李允博. Open ROADM 标准 OFEC 码在 300 Gbit/s FPGA 系统中的验证[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(4): 135-140.
WU J, XU K F, LI Y B. Verification of OFEC code under open ROADM standard in 300 Gbit/s FPGA

system [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(4): 135-140.

- [18] 陈祥敬, 王健, 吴重庆. DWDM 系统中 EDFA 串扰引起的误码率恶化研究[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 50-56.
CHEN X J, WANG J, WU CH Q. Study on bit error rate degradation caused by EDFA crosstalk in DWDM system [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 50-56.
- [19] REN Y, WU X, TAO F, et al. Effect of peak power and pulse width on coherent doppler wind lidar's SNR[J]. Instrumentation, 2022, 9(2): 26-32.
- [20] 尹康, 王宇, 李沛峰, 等. 基于随机数编码的相位敏感光时域反射仪[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 35(4): 1-7.
YIN K, WANG Y, LI P F, et al. Phase-sensitive OTDR based on random number coding [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 35(4): 1-7.

作者简介



王豪杰 (通信作者), 2015 年于吉林大学获得学士学位, 2020 年于清华大学获得博士学位, 现为中国移动研究院研究员, 主要研究方向为 400G 和 800G 高速光模块。

E-mail: wanghaojie@chinamobile.com

Wang Haojie (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jilin University in 2015, and Ph. D. degree from Tsinghua University in 2020, respectively. Now he is a researcher in China Mobile Research Institute. His main research interests include 400G and 800 optical modules.



程伟强, 2006 年于北京邮电大学获得硕士学位, 现为中国移动研究院基础网络所主任研究员、教授级高工, 主要研究方向为新型 IP 网、数据中心网络、传输网等。

E-mail: chengweiqiang@chinamobile.com

Cheng Weiqiang received his M. Sc. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2006. Now he is a chief researcher and professor senior engineer in China Mobile Research Institute. His main research interests include IP network, data center network and transport network.



阳进, 2006 年于华中师范大学获得学士学位, 2009 年于北京理工大学获得硕士学位, 现为中国移动研究院研究员, 主要研究方向为 SD-WAN。

E-mail: yangjinwl@chinamobile.com

Yang Jin received his B. Sc. degree from Central China Normal University in 2006, and M. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2009. Now he is a researcher in China Mobile Research Institute. His main research

interest includes SD-WAN.



陈超, 2006 年于云南师范大学获得学士学位, 2009 年于武汉轻工大学获得硕士学位, 现为 VIAVI 公司 FAE, 主要研究方向为光网络及传输测试。

E-mail: Robert.Chen@viavisolutions.com

Chen Chao received his B. Sc. degree from Yunnan Normal University in 2006, M. Sc. degree from Wuhan Polytechnic University in 2009, respectively. Now he is a solution engineer in VIAVI. His main research interests include testing of optical network and transport technology.



沙慧军, 2002 年于上海理工大学获得学士学位, 2005 年于上海理工大学获得硕士学位, 现为 VIAVI 公司工程总监, 主要研究方向为超高带宽网络及传输测试。

E-mail: Huijun.Sha@viavisolutions.com

Sha Huijun received his B. Sc. degree from University of Shanghai Science and Technology in 2002, M. Sc. degree from University of Shanghai Science and Technology in 2005, respectively. Now he is a solution engineer director in VIAVI. His main research interests include testing of

high-speed optical network and transport technology.



李顺昌, 2003 年于大连交通大学获得学士学位, 2010 年于复旦大学获得硕士学位, 现为 VIAVI 公司 FAE, 主要研究方向为光通信测试技术及自动化开发。

E-mail: Sean.Li@viavisolutions.com

Li Shunchang received his B. Sc. degree from Dalian Jiao tong University in 2003, M. Sc. degree from Fudan University in 2010, respectively. Now he is a FAE in VIAVI. His main research interests include optical communication test and automation development.



陈汉祥, 1988 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 1996 年于清华大学获得硕士学位, 现为 VIAVI 公司技术专家, 主要研究方向为光传输技术。

E-mail: Hanxiang.Chen@viavisolutions.com

Chen Hanxiang received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1988, M. Sc. degree from Tsinghua University in 1996, respectively. Now he is a technical specialist in VIAVI. His main research interest includes optical transport technology.