

# 400Gb/s CFP8 LR8 光收发模块的设计与实现

肖刚, 张均, 胡毅, 宋耕, 陈建宇

(武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430205)

**摘要:** 400Gb/s 光收发模块是 400Gb/s 通信网络中物理层的核心部件之一, 其开发与设计也是通信网络从 100Gb/s 向 400Gb/s 演进必须要解决的问题。首先, 介绍了 400Gb/s 光收发模块的相关标准, 按照 CFP8 热插拔光收发模块外形封装多源协议给出了一种 CFP8 LR8 模块的设计方案; 然后, 使用四阶脉冲幅度调制(PAM4)测试设备对该模块的发射端和接收端参数进行了测试, 说明了测试原理和测试方法。测试结果符合 IEEE Std 802.3bs-2017 中的 400GBASE-LR8 规范。

**关键词:** 400Gb/s 以太网; 四阶脉冲幅度调制; 光收发模块; 热插拔光模块外形封装

**中图分类号:** TN915.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)06-0013-04

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.06.004

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Design and implementation of 400Gb/s CFP8 LR8 optical transceiver module

XIAO Gang, ZHANG Di, HU Yi, SONG Geng, CHEN Jianyu

(Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

**Abstract:** 400Gb/s optical transceiver module is one of the core components of the physical layer in 400Gb/s communication network, and its development and design is also a problem that must be solved in the evolution of the communication network from 100Gb/s to 400Gb/s. This paper introduces the relevant standards of 400Gb/s optical transceiver module, and presents a design scheme of CFP8 LR8 module according to multi-source agreement of CFP8 hot-pluggable optical transceiver module form factor. Using four-order pulse amplitude modulation (PAM4) test instruments, the parameters of transmitter and receiver are tested, and the test principle and test method are explained, and the results conform to specification 400GBASE-LR8 in IEEE Std 802.3bs-2017.

**Key words:** 400Gb/s Ethernet; PAM4; optical transceiver module; CFP8

### 0 引言

400Gb/s 国际标准主要由国际电联电信标准化部门(ITU-T)、电气和电子工程师协会(IEEE)和光互联论坛(OIF)等组织制定,按照目前 ITU-T 专注 400GE 映射和长距离传输、IEEE 规范客户侧接口 400GE、OIF 侧重 400Gb/s 模块以及接口等标准化范畴,400Gb/s 标准将在三大标准组织的齐力协作下稳步推进<sup>[1]</sup>。在此基础上,由不同的光模块及其相关厂商组成了 3 个行

业联盟,发布了各自的多源协议(MSA),形成了 3 种不同的 400Gb/s 热插拔光模块封装形式:CFP8<sup>[2]</sup>、OSFP<sup>[3]</sup>和 QSFP-DD<sup>[4]</sup>。

本文介绍的 400Gb/s CFP8 LR8 光模块,按照 CFP8 MSA<sup>[2,6]</sup>来设计和实现,光接口符合 IEEE Std 802.3bs-2017<sup>[5]</sup>中的 400GBASE-LR8 规范,电接口中的高速信号符合 IEEE Std 802.3bs-2017 中的 400G AU1-16 C2M 规范。

### 1 CFP8 LR8 光收发模块的设计与实现

#### 1.1 模块功能框图

CFP8 LR8 光收发模块主要由四阶脉冲幅度调制(PAM4)转换单元、发射单元、接收单元和控制单元组成,功能框图如图 1 所示。PAM4 转换单元实现 16 路 25Gb/s 不归零码(NRZ)电信号和 8 路 50Gb/s PAM4

收稿日期: 2019-01-28。

基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目(2016AAA005)资助。

作者简介: 肖刚(1976-),男,湖北武汉人,硕士,工程师,主要从事光传输设备和高速光收发模块方面的研究与开发。作为资深研发工程师,目前参与多个不同封装的 400Gb/s 光模块开发项目,并进行相关基础特性和 PAM4 光电信号测试技术的研究。



电信号之间的转换;发射单元采用2个四通道驱动芯片和2个四通道光发射组件(TOSA)完成电光转换,通过合波器将8路不同波长的光信号耦合进1根光纤中进行传输;接收单元由分波器将8路不同波长的光信号进行分波,采用2个四通道光接收组件(ROSA)完成光电转换;控制单元采用单片机对内完成各芯片的初始化配置、实时监控和调整,对外实现模块的数字诊断功能。

## 1.2 PAM4 转换单元

400GBASE-LR8 规范中规定信号调制格式为 PAM4, PAM4 信号每个符号周期可以传输 2 个比特的逻辑信息,如果要实现同样的信号传输能力, PAM4 信号的符号速率只需达到 NRZ 信号的一半即可。采用 PAM4 调制格式可以有效降低光模块对光器件的带宽要求,减少并行通道数量,使光模块在封装尺寸和功耗方面具有优势,也是后续向更高速率演进的有力解决方案。

CFP8 LR8 光模块与主板间的电接口(金手指)中的高速信号采用 16 路 25Gb/s 速率的 NRZ 信号,符合 400GAUI-16 C2M 规范,而光接口规范为 400G-BASE-LR8,采用 8 路 50Gb/s 速率的 PAM4 信号,因此必须对信号的速率、调制格式和通道数进行转换,才能保证数据在光模块金手指和光收发单元之间正常传输,该转换功能通过 PAM4 Gearbox 芯片来实现。在

发射方向上, PAM4 Gearbox 芯片对 16 路 25Gb/s 的 NRZ 信号进行时钟恢复、数据对齐、代码转换、前向纠错(FEC)编码和模式再生等处理后转换为 8 路 50Gb/s 的 PAM4 信号,经驱动芯片后输入 TOSA;在接收方向上, PAM4 Gearbox 芯片将 ROSA 输出的 8 路 50Gb/s 的 PAM4 信号进行时钟恢复、数据对齐、代码转换、FEC 解码、数据分发和模式再生等处理后转换为 16 路 25Gb/s 的 NRZ 信号。

PAM4 Gearbox 芯片需通过控制单元中的单片机进行微码加载和初始化配置后才能进入工作状态,同时还需逐一针对每个通道的 PAM4 相关参数进行调整优化后才能使发射的 PAM4 眼图符合要求。因此, PAM4 Gearbox 芯片的调试是 CFP8 LR8 光模块成功实现的关键。

作为模块中最为核心的芯片,目前业界能够提供完整解决方案并实现量产的 PAM4 Gearbox 芯片厂商只有 Broadcom 和 Inphi, Broadcom 对应的型号为 BCM81188, Inphi 对应的型号为 IN015025, 2 种芯片均可实现上述功能。

## 1.3 发射单元

发射单元由 2 个四通道驱动芯片、2 个四通道 TOSA、2 个半导体热电致冷器(TEC)控制器和 1 个合波器组成。TOSA 中集成了分布反馈(DFB)激光器、电吸收(EA)调制器、光隔离器、背光检测二极管、热敏电

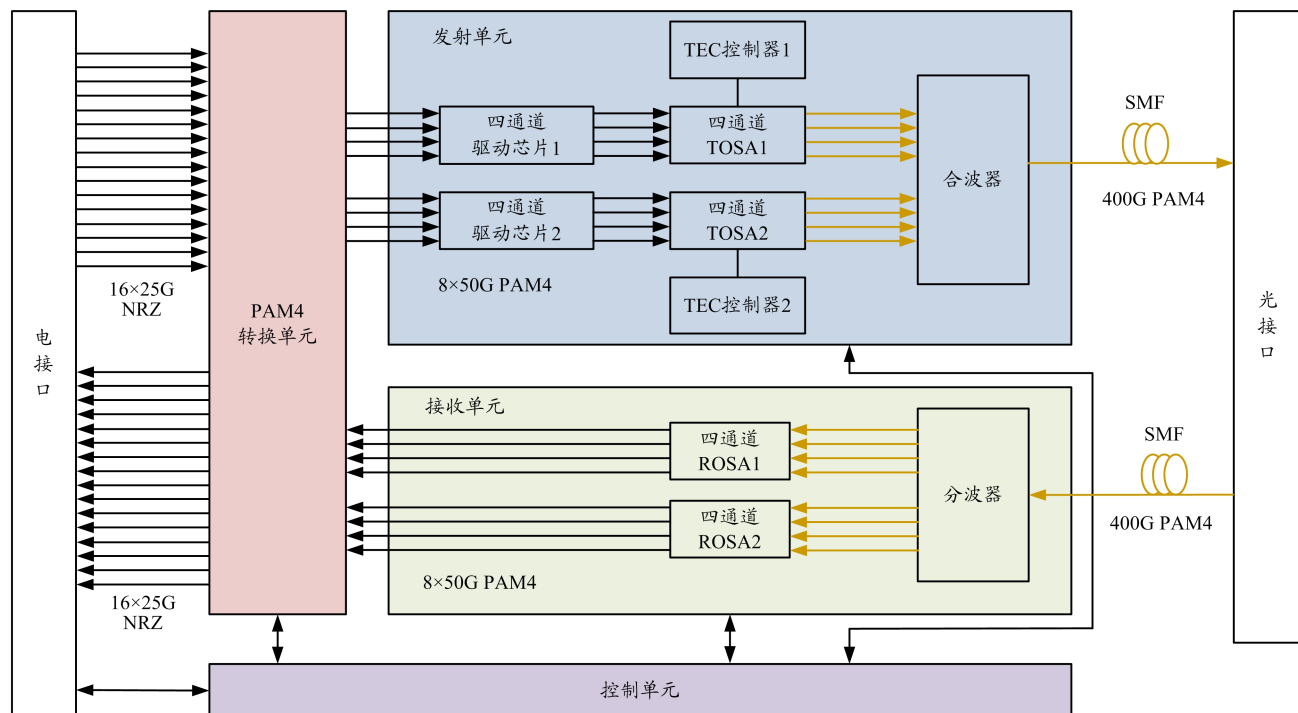


图 1 CFP8 LR8 光模块功能框图

阻和TEC。由于每个TOSA中已经集成了4路电吸收调制激光器(EML),无法再将EML驱动器内置其中,因此驱动芯片需要外置。CFP8 LR8光模块共有8个激光器及其驱动器需要控制,而控制单元中单片机自带的模/数(A/D)和数/模(D/A)转换口数量不足,需采用集成的A/D和D/A转换芯片扩展通道数量,其中的控制关系与信号流向如图2所示(图中只列出了1路激光器)。由于发射单元中的各种控制信号较多,光模块内部各种电压的稳定性和各信号的控制精度将决定光模块工作的稳定性。

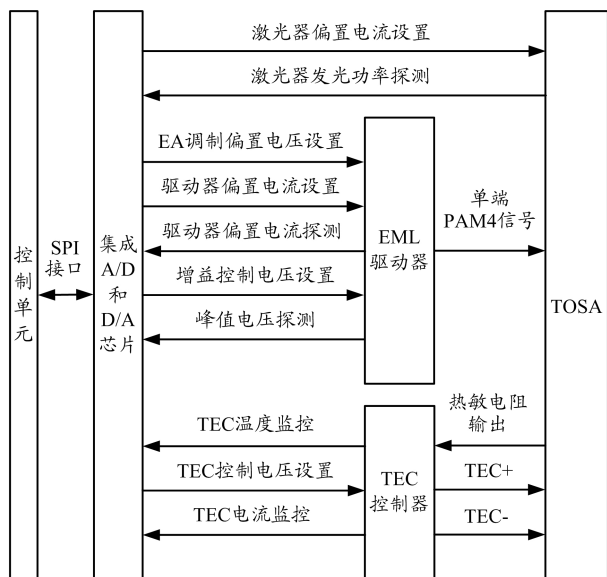


图2 发射单元功能框图

由PAM4 Gearbox芯片输出的高速电信号为差分PAM4信号,摆幅一般小于800mV(峰峰值),经EML驱动器放大后输出为单端PAM4信号,摆幅可以达到2.2V(峰峰值)以上,四通道EML驱动芯片可以选择Inphi、Macom等芯片厂商的对应产品。

该模块中的四通道TOSA采用的是日本住友公司气密Box封装产品,使用柔性电路板(FPC)与模块主印制电路板(PCB)连接,其输入的单端PAM4信号要求小于2.6V(峰峰值),激光器偏置电流最大输入为100mA,探测电流最大输出为2mA。

#### 1.4 接收单元

接收单元由2个四通道ROSA和1个分波器组成,每个ROSA中集成了4个高速光电二极管(PIN)和4个跨阻放大器(TIA)。接收光信号经分波器分为8个不同波长的光信号,由PIN完成光电转换,再由TIA完成电流-电压转换后输出到PAM4 Gearbox芯片。ROSA通过接收信号强度指示(RSSI)引脚,可将接收

的光功率信息输出到控制单元。

该模块中的四通道ROSA同样采用日本住友公司气密Box封装产品,使用FPC与模块主PCB连接,其响应度为0.7A/W(典型值),输出的高速差分PAM4电信号摆幅可达600mV(峰峰值),满足PAM4 Gearbox芯片输入信号摆幅大于400mV(峰峰值)的要求。

#### 1.5 控制单元

控制单元通过单片机实现光模块内部各部件的配置、调整和实时监控。模块上电时,单片机对各芯片进行微码加载和初始化配置,模块正常工作后,单片机对各部件的工作状态进行实时监控和调整。

根据CFP8 MSA管理接口规范<sup>[6]</sup>中定义的寄存器地址,单片机开辟存储空间并分别保存相应的信息。单片机上的管理数据输入输出(MDIO)接口直接与光模块金手指相连,上位机通过光模块金手指与单片机进行通信,可读写相关寄存器,实现模块的数字诊断功能。

此外,CFP8 MSA硬件规范<sup>[2]</sup>中定义的硬件控制引脚(TX\_DIS、MOD\_LOPWR、MOD\_RSTn、MOD\_SELn)和硬件告警引脚(RX\_LOS、GLB\_ALRMn)都由单片机的IO口连接光模块金手指实现。

CFP行业联盟对CFP系列光模块定义的管理接口均为MDIO,因此CFP8中可以沿用在CFP、CFP2和CFP4中广泛采用的ADI公司ADuCM320单片机,它能够提供一个MDIO从设备接口,为单片机的固件开发提供了便利。

## 2 测试实例

CFP8 LR8光模块的测试主要包括发射端的眼图测试和接收端的灵敏度测试,测试框图分别如图3和图4所示。按IEEE Std 802.3bs-2017中的400G-BASE-LR8规范,CFP8 LR8光模块在发射方向和接收方向上分别有8个不同波长的通道,可逐一选取其中的通道进行发射和接收测试,本文仅列出了通道0

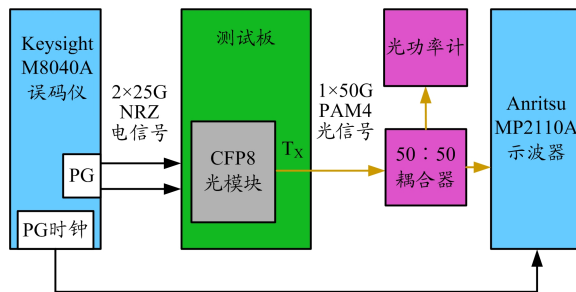


图3 发射端眼图测试框图

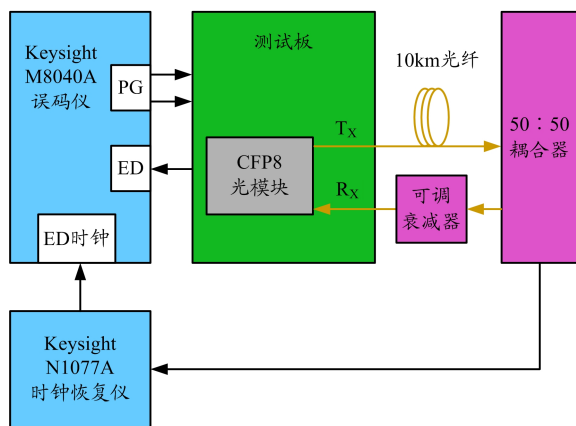


图4 接收端灵敏度测试框图

(1273.54nm)和通道1(1277.89nm)的主要测试结果。由于该模块光接口信号为PAM4信号,因此测试仪器和测试参数都不同于NRZ信号。主要测试仪器包括Keysight M8040A 误码仪、带有PAM4分析功能的Anritsu MP2110A 示波器和Keysight N1077A 光/电时钟恢复仪。

在53.125Gb/s速率、short stress pattern random quaternary (SSPRQ)码型的测试条件下,该模块通道0(1273.54nm)和通道1(1277.89nm)在环境温度为0℃、25℃和70℃时的发射光眼图主要参数经过换算后的结果如表1所示。

同理,在53.125Gb/s速率、PRBS31Q码型和 $2.4 \times 10^{-4}$ 误码率的测试条件下,分别在环境温度为0℃、25℃和70℃时对该模块通道0(1273.54nm)和通道1(1277.89nm)进行10km传纤接收测试,测得的单通道最小平均接收光功率均可达到400GBASE-LR8规范中规定的-9.1dBm。需要说明的是,400GBASE-LR8规范中对于接收端参数将最小平均光功率和接收灵敏度(OMA<sub>outer</sub>)定义为参考性(informative),将压力接收灵敏度定义为强制性(normative),但由于目前

PAM4信号压力接收灵敏度(OMA<sub>outer</sub>)的测试设备和测试方法并不成熟,因此,大部分模块厂商在现阶段仍然采用最小平均光功率来进行接收灵敏度测试。

### 3 结束语

在CFP8 MSA所规定的多种模块实现方案中,由于电接口为16×25Gb/s NRZ信号、光接口为8×50Gb/s PAM4信号的方案(简称16:8)能够较大限度地利用现有资源,在产业链中能够最先采购到相应的光器件和芯片,因此大部分模块厂商对于400Gb/s光模块的开发都是从CFP8开始入手。在3种400Gb/s热插拔光模块封装形式中,谁能占据主导地位,最终取决于产业链的成熟度和市场的接纳程度。本文给出的一种CFP8 LR8光模块设计方案已经成功实现,该模块的收发性能测试结果符合CFP8 MSA和IEEE Std 802.3bs-2017相关要求的要求,可以通过单模光纤实现10km 400Gb/s的数据传输。随着集成光器件和PAM4芯片的技术成熟与成本降低,CFP8光模块有可能在市场中占有一席之地。

### 参考文献:

- [1] 赵文玉,张海懿. 400Gbit/s 技术及应用探讨[J]. 现代电信科技, 2014 (9): 64-68.
- [2] DAVID L. CFP MSA CFP8 Hardware Specification Revision 1.0 [EB/OL]. [2018-12-12]. [http://www.cfp-msa.org/Documents/CFP-MSA\\_CFP8\\_HW-Spec-rev1p0.pdf](http://www.cfp-msa.org/Documents/CFP-MSA_CFP8_HW-Spec-rev1p0.pdf).
- [3] BRIAN P. OSFP MSA Specification for OSFP Octal Small Form Factor Pluggable Pluggable Module Rev 1.12 [EB/OL]. [2018-12-12]. [http://www.osfpmsa.org/asassets/pdf/OSFP\\_Module\\_Specification\\_Rev1.12.pdf](http://www.osfpmsa.org/asassets/pdf/OSFP_Module_Specification_Rev1.12.pdf).
- [4] TOM P. QSFP-DD MSA QSFP-DD Hardware Specification for QSFP Double Density 8X Pluggable Transceiver Rev 3.0 [EB/OL]. [2018-12-12]. <http://www.qsfp-dd.com/wp-content/uploads/2017/09/QSFP-DD-Hardware-rev3p0.pdf>.
- [5] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. IEEE Standard for Ethernet Amendment 10: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for 200 Gb/s and 400Gb/s Operation, IEEE Std 802.3bs-2017 [S]. New York: IEEE-SA Standards Board, 2017.
- [6] CHEN Jiashu. CFP MSA Management Interface Specification Revision 2.6 r06a [EB/OL]. [2018-12-12]. [http://www.cfp-msa.org/Documents/CFP\\_MSA\\_MIS\\_V2p6r-06a.pdf](http://www.cfp-msa.org/Documents/CFP_MSA_MIS_V2p6r-06a.pdf).

表1 PAM4 光眼图参数

| 参数             | IEEE Std 802.3bs-2017 标准要求 | 通道0 实测值 |      |      | 通道1 实测值 |      |      |
|----------------|----------------------------|---------|------|------|---------|------|------|
|                |                            | 0℃      | 25℃  | 70℃  | 0℃      | 25℃  | 70℃  |
| 平均光功率(dBm)     | -2.8~5.3                   | 0.34    | 0.64 | 0.28 | 0.48    | 0.85 | 0.55 |
| 外光调制幅度(dBm)    | 0.2~5.7                    | 1.73    | 1.99 | 1.69 | 1.83    | 2.45 | 1.93 |
| 消光比(dB)        | >3.5                       | 6.88    | 6.79 | 6.9  | 6.93    | 7.32 | 6.95 |
| 发射色散眼图闭合四相(dB) | <3.3                       | 1.1     | 0.98 | 1.32 | 1.9     | 1.84 | 2.29 |