

武汉理工大学

(申请工学硕士学位论文)

节能型 SFP EPON ONU 模块设计

培 养 单 位：信息工程学院

学 科 专 业：通信与信息系统

研 究 生：郭松松

指 导 教 师：郭金旭 教授

2014 年 4 月

节能型 SFP EPON ONU 模块设计

郭松松

武汉理工大学

分类号_____

密 级 _____ 公开

UDC _____

学校代码 _____ 10497

武汉理工大学

学 位 论 文

题 目 _____ 节能型 SFP EPON ONU 模块设计

英文 _____ Design of Energy Efficient

题目 _____ SFP EPON ONU Module

研究生姓名 _____ 郭松松

指导教师 姓名 _____ 郭金旭 职称 _____ 教授 学位 _____ 博 士

单位名称 _____ 信息工程学院 邮编 _____ 430070

副指导教师 姓名 _____ 职称 _____ 学位 _____

单位名称 _____ 邮编 _____

申请学位级别 _____ 硕 士 学科专业名称 _____ 通信与信息系统

论文提交日期 _____ 2014 年 4 月 论文答辩日期 _____

学位授予单位 _____ 武汉理工大学 学位授予日期 _____

答辩委员会主席 _____ 评阅人 _____

2014 年 4 月

独 创 性 声 明

本人声明,所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得武汉理工大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名: _____ 日 期: _____

学位论文使用授权书

本人完全了解武汉理工大学有关保留、使用学位论文的规定,即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅。本人承诺所提交的学位论文(含电子学位论文)为答辩后经修改的最终定稿学位论文,并授权武汉理工大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存或汇编本学位论文。同时授权经武汉理工大学认可的国家有关机构或论文数据库使用或收录本学位论文,并向社会公众提供信息服务。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

研究生(签名): _____ 导师(签名): _____ 日期 _____

摘 要

EPON 系统是近年来网络改造、实现光纤到户的主要接入方式，在军事、民用、商业等领域都有广泛的应用。众所周知，网络最后一公里的瓶颈一直是影响用户网络体验的关键问题，目前的接入网络还是以 ADSL 为主，随着网络的发展和改造整体向 FTTH 过渡，最终用户接入方式会主要表现为 FTTH、FTTB+LAN、FTTC+DSL、HFC、WLAN 等形式。然而在固网改造、光纤普及的过渡时期，必然有很多固网接入设备将被淘汰。而且随着 PON 设备的普及，PON 系统能耗在通信行业所占的比例也会越来越高，因此如何有效利用固网设备资源减小网络改造成本和降低能耗将成为光纤网络普及所面临的重要问题。

本文着眼于现今网络改造过渡时期和 EPON 终端设备的功能需求，参照 SFP 光模块和 SoC 盒式 ONU 设计，通过合理芯片选型、硬件设计、软件设计，设计出了符合 SFF-8472、SFP-MSA 及中国电信 EPON 设备相关标准的 SFP EPON ONU 模块。该模块可以作为固网设备升级 EPON 网络的过渡设备，用在带有 SFP 接口的通信设备上，使其具有 EPON 接入功能，从而在利用固网接入设备资源的基础上，减小 PON 网络改造成本，而且在大规模应用时，能兼容 CTC 睡眠节能模式和模块电源管理，节能降排。本文主要完成该模块硬件设计和软件部分设计。主要工作如下：

硬件设计主要综合了 SoC 盒式 ONU 和 SFP 突发光模块设计，包括 SFP EPON ONU 设计思路分析和各个模块详细电路设计。软件设计主要包括数字诊断模块设计、电源管理模块设计、CTC 睡眠节能模式设计和以太网性能统计模块设计。数字诊断软件模块主要是通过 I2C 总线对 EEPROM 读写获取相应数字诊断信息；电源管理模块主要实现 ONU 的 UNI、PON、CPU、I2C 控制器等模块电源的命令行管理；睡眠节能模块和以太网性能统计模块主要是针对《中国电信 EPON 设备技术要求 V3.0》标准设计通过扩展 OAM 实现 OLT 控制 ONU 进入睡眠状态以及获取 ONU 端 PON 口性能统计信息的功能。

本文给出了该模块硬件设计电路图和软件模块设计原理和代码实现，然后通过系统测试验证了该模块的基本功能。

论文最后总结了设计的主要工作和不足，同时对该模块的应用进行了展望。

关键字：SFP，EPON，ONU，节能，睡眠模式

Abstract

EPON system is the main access of network transformation to achieve the FTTH goal in recent years; it has been widely used in military, civil, commercial and other field. As we all know, the last hundred miles of the network bottleneck has been a key issue affecting the user's surfing experience, and the ADSL is the main access to network in now days. With the development and improvement of the overall network transition then it will reach the target of FTTH, then the main methods of overall user access network will be FTTH, FTTB + LAN, FTTC + DSL, HFC, WLAN and so on. However, in the transformation of traditional network, fiber universal transition period, there must be a lot of fixed-line access equipment will be eliminated, and with the growing popularity of PON equipment, the proportion of PON system energy consumption in the communications industry will be higher and higher, so how to effectively use resources to reduce the fixed-line network transformation equipment costs and reduce energy consumption will be key issue of fiber-optic network ubiquity.

This article focuses on the special period of network transformation and the basic functions of the EPON terminal equipment, referred the designs of SFP optical module and SoC ONU, choosing the right chip, designing the reasonable hardware and software, then designed the SFP EPON ONU which is in accordance with SFP-MSA SFF-8472 and CTC EPON device standards. On one hand, this module can be used in the device with SFP cage, then the device has the ability to access the PON network, then it will reduce the cost on PON network transformation by using the traditional network device. This module can be used as a transition device for tradition network equipment upgrades EPON networks. On the other hand, it will save energy when the module is widely used. In this paper, the completion of the hardware and software parts of the design and implementation of the module. The main work is as follows:

The hardware is referred to SoC ONU and SFP burst optical module reference design; Hardware design mainly includes SFP EPON ONU design ideas and details of each part. The SFP EPON ONU hardware design include Digital Diagnostics module software design, Energy management module software design, CTC V3.0 power

saving sleep mode and the statistics of Ethernet performance module software design. The digital diagnostic software module is to get the diagnose information by reading and writing the EEPROM through I2C bus; the energy management module is a CLI function that can control the power of ONU interfaces, such as UNI, PON, I2C controller, CPU and so on; The sleep power saving module and Ethernet performance statistics module are mainly for the standard of “China Telecom EPON equipment technical requirements V3.0” which designed to achieve the functions that OLT controls ONU sleep and OLT gets ONU PON port performance statistics through the expansion OAM protocol.

This paper presents the module hardware design schematics and software design principles and code modules, then verify the basic functionality of the module through Systematic test.

Finally, the paper summarizes some of the design process and improvements can be done in the future, and then expanded the application and prospects of the module.

Keywords: SFP, EPON, ONU, Power Saving, Sleep Mode

缩略语

缩略语	英文全名	中文解释
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	非对称数字用户线
AON	Active Optical Network	有源光网络
ATM	Asynchronous Transfer Mode	异步传输模式
CPU	Central Processing Unit	中央处理单元
CTC	China Telecom	中国电信
DA	Destination Address	目的地址
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation	动态带宽分配
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer	数字用户线路接入复用器
EFM	Ethernet in the First Mile	第一英里以太网
EMS	Element Management System	网元管理系统
EPON	Ethernet Passive Optical Network	以太网无源光网络
FCS	Frame Check Sequence	帧校验序列
FEC	Forward Error Correction	前向转发纠错
FTTB	Fiber To The Building	光纤到大楼
FTTC	Fiber To The Curb	光纤到路边
FTTH	Fiber To The Home	光纤到户
FTTx	Fiber To The x	光纤到 XX
GBIC	Gigabit Interface Converter	千兆位接口转换器
GE	Gigabit Ethernet	千兆以太网
GFP	Generic Framing Procedure	通用成帧规程
GMII	Gigabit Media Independent Interface	千兆比特媒体独立接口
GPON	Gigabit-Capable Passive Optical Network	吉比特容量无源光网络
HFC	Hybrid Fiber Coaxial	混合光纤同轴电缆
ICMP	Internet Control Message Protocol	因特网控制消息协议
LAN	Local Area Network	局域网
LLID	Logical Link Identifier	逻辑链路标识
LVDS	Low Voltage Differential Signal	低电压差分信号
MAC	Medium Access Control	介质访问控制
MDI	Media Dependent Interface	媒体相关接口
MPCP	Multiple point control protocol	点到多点控制协议
UDP	User Datagram Protocol	用户数据包协议
UNI	User Network Interface	网络接口单元
OAM	Operation, administration and maintenance	操作、管理、维护
ODN	Optical Distribution Network	光配线网络
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
OLT	Optical Line Terminal	光线路终端

缩略语	英文全名	中文解释
ONU	Optical Network Unit	光网络单元
PCS	Physical Code Sub layer	物理编码子层
PMA	Physical Medium Attachment	物理媒体附加（子层）
PMD	Physical Medium Dependent	物理媒体相关（子层）
PON	Passive optical Network	无源光网络
POS	Passive optical splitter	无源分光器
PPP	Point-to-Point Protocol	点到点协议
QoS	Quality of Service	服务质量
RF	Frame Relay	帧中继
ROSA	Receiver Optical Subassembly	光接收次模块
RTOS	Real Time Operation System	实时操作系统
SA	Source Address	源地址
SCB	Single Copy Broadcast	单拷贝广播
SerDes	Serializer Deserializer	串行器 解串行器
SFP	Small Form-factor Pluggable	小型可拔插
SFP cage	Small Form-factor Pluggable cage	SFP 保护罩
SGMII	Serial Gigabits Media Independent Interface	串比吉比特媒体独立接口
SLA	Service Level Agreement	服务等级协议
SLD	Start of LLID Delimiter	LLID 定界符
SoC	System On Chip	片上系统
TDM	Time Division Multiplex	时分复用
TDMA	Time Division Multiple Access	时分多址接入
TFS	Tiny File System	微型文件系统
TFTP	Trivial File Transfer Protocol	简单文件传输协议
TOSA	Transmitter Optical Subassembly	光发射次模块
TQ	Time Quantum	时间量子（16ns）
VDSL	Very-high-bit-rate Digital Subscriber loop	高速数字用户环路
VLAN	Virtual Local Area Network	虚拟局域网
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波分复用
WLAN	Wireless Local Area Network	无线局域网

目 录

摘 要	I
缩略语	IV
第 1 章 绪论	1
1.1 本课题的研究目的和意义	1
1.2 EPON 技术国内外研究现状	2
1.2.1 国外研究现状	2
1.2.2 国内研究现状	4
1.2.3 SFP EPON ONU 研究现状	5
1.2.4 EPON 节能研究现状	6
1.3 课题来源及论文主要工作	7
第 2 章 SFP EPON ONU 相关技术研究及方案设计	8
2.1 EPON 系统工作原理	8
2.2 SFP EPON ONU 相关标准	9
2.3 SFP 接口及协议规范	9
2.4 节能型 SFP EPON ONU 模块功能需求及设计思路	11
2.4.1 节能型 SFP EPON ONU 模块功能需求	11
2.4.2 节能型 SFP EPON ONU 模块设计思路	11
2.5 SFP EPON ONU 模块设计原理可行性分析	12
2.6 本章小结	13
第 3 章 系统硬件设计	14
3.1 系统硬件总体设计	14
3.2 硬件设计可行性分析	15
3.3 分母板和扣板的硬件设计	18
3.4 母板电路设计	18
3.5 扣板电路设计	22
3.6 PCB 设计要求	23
3.7 本章小结	23
第 4 章 系统软件设计	24
4.1 系统软件总体设计	24
4.2 OAM 协议相关分析	26
4.2.1 OAM 协议结构及实现原理分析	26
4.2.2 本设计主要涉及 OAM 结构分析	29
4.3 数字诊断模块设计	30
4.3.1 数字诊断模块实现原理分析	30
4.3.2 数字诊断模块软件实现	31

4.4 电源管理模块设计	33
4.4.1 电源管理模块实现原理分析	33
4.4.2 电源管理模块软件实现	34
4.5 CTC 睡眠节能模块设计	36
4.5.1 CTC 睡眠节能模块实现原理分析	36
4.5.2 CTC 睡眠节能模块软件实现	38
4.6 CTC 性能统计模块设计	43
4.6.1 CTC 性能统计模块实现原理分析	43
4.6.2 CTC 性能统计模块软件实现	43
4.7 本章小结	45
第 5 章 系统功能测试	46
5.1 整体功能测试	46
5.2 数字诊断模块测试	47
5.2.1 通过 OAM 获取光模块数字诊断信息测试	47
5.2.2 CTC SFP PON ONU 扩展部分测试	47
5.3 电源管理模块测试	49
5.4 睡眠节能模块测试	51
5.5 以太网性能统计模块测试	52
5.6 节能参数及能效测试	53
5.7 本章小结	54
第 6 章 总结与展望	55
致谢	56
参考文献	57

第 1 章 绪论

1.1 本课题的研究目的和意义

据 Point Topic 公司市场调研统计, xDSL 仍是全球宽带接入市场的主导技术, 但整体用户数量保持下滑趋势, 光纤接入保持快速增长趋势^[1-2], 其中 FTTx 光纤用户在 2013 年 Q3 单季增长 5%, 与去年同期相比增长 20% 左右。作为新接入技术的无源光网络, 不仅能提升接入网对业务的承载能力、提高网络带宽、增强运营商核心竞争力, 而且能有效减轻网络改造成本的巨大压力, 并且在技术方面, 无源光网络有着有源电路无法比拟的优越性: 高速、稳定、高带宽、衰耗小、抗电磁干扰等等^[3], 因此 PON 技术自从被引入中国后, 取得了飞速的发展。我国现今正处于传统固网向 FTTH 改造的过渡时期, 大量固网接入设备比如带有 SFP 接口的 DSLAM、以太网交换机、家庭网关、无线路由器 AP 等将面临淘汰, 造成大量资源浪费, 如果能在这些设备上加入合适的模块, 使这些设备具备 EPON 接入功能, 则可以节省大量资源。而且据国际电信联盟与气候变化组织统计数据显示, 通信行业碳排放占全球碳排放总量的 2.5%^[4], 在宽带接入网中, 包括 xDSL 和无源光网络占整个通信行业能耗的 70% 以上, 其中 ONU 占整个 EPON 系统能耗的 25% 以上^[5-7]。因此, ONU 能耗也是网络改造和发展所面临的重要问题。

本设计旨在解决网络改造过渡时期资源浪费、如何实现 ONU 节能等问题, 将 SFP 封装与低功耗 PON MAC 芯片结合, 制作出符合《中国电信 SFP 封装的 PON ONU 设备技术要求》标准^[8]、低功耗, 高带宽, 可热拔插的 SFP EPON ONU 模块。该模块可以应用在带有 SFP Cage 的 DSLAM、以太网交换机、家庭网关、数字摄像头、无线 AP 等设备上, 使其能够在不改变设备硬件的基础上具有 EPON 接入功能, 这样可以为 PON 网络升级节约成本和资源。该设备还支持 CTC 睡眠模式和性能统计功能, 方便运营商对设备进行管理。另外还可以利用 SFP EPON ONU 模块化、低功耗和 PON 网络“一对多”的特点, 替代传统光纤网络“一对一”模式, 应用在电力、石油等特殊通信行业^[9-11], 开启软件节能模式, 既能实现工业现场实时监控和电力抄表系统的集中处理和管理, 又能降低能耗, 节约成本, 具有良好的经济价值。

1.2 EPON 技术国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

光接入网络在技术上可以分为 AON（有源光网络）和 PON（无源光网络）。PON 由于无源光传输方式、点对多点结构、良好的网络支撑等优势深得电信运营商的青睐^[12]。PON 接入技术主要包括 APON、BPON、EPON 和 GPON，它们的主要区别在于采用了不同的 2 层接入技术。EPON 采用了点到多点的拓扑结构和无源传输方式，结合成熟、经济的以太网传输技术，无疑是几种最佳技术和网络结构的组合。由于以太网具有高效的 IP 业务承载效率和相对简单的协议结构，因此 EPON 将成为接入网最终用户一种最有效的通信方法^[13]。随着 10G 以太主干网、城域网，10GEPON 接入技术的出现，EPON 将成为全光网络最佳的最后一公里解决方案^[14]。

2004 年，ITU 发布了 ITU-T G.984 GPON 标准，在 2 层接入技术上定义了通用成帧规程（GFP），GFP 能对以太网、TDM、ATM 等多种业务进行封装映射，提供 1.25Gbps 和 2.5Gbps 下行速率和 155M、622M、1.25Gbps、2.5Gbps 等多种上行速率，并具有较强的 OAM 功能。如果不考虑 10G EPON 技术的发展，当前 GPON 在高速率和支持多业务方面有一定优势，但技术复杂度和成本要高于 EPON，产品成熟性也逊于 EPON^[15]，因此各国对 EPON 和 GPON 技术选择上存在差异。

在芯片解决方案方面，单芯片 EPON 解决方案已经不断成熟^[16]，其中主要芯片供应商包括博通、高通、PMC、Cortina 等公司。其中 PMC、Cortina、博通公司同时支持 EPON 和 GPON 方案，高通公司目前仅提供 EPON 芯片方案。早期 EPON 芯片方案以 1.25G 为主，后来随着集成电路工艺、技术的不断发展和高速率光模块设计技术的出现，芯片公司推出了 10G EPON 芯片方案。

EPON 关键技术主要包括：MPCP 多点控制技术、测距、DBA、QoS、VLAN、组播、ONU 认证、链路保护、EPON 节能等等。其中 MPCP 注册过程中，为防止多个 ONU 同时发送注册消息造成冲突，OLT 采取定时开启时间窗，在时间窗开启时发送 discovery Gate 帧，ONU 在收到 discovery Gate 之后，随机延时后发送 register_req 帧，减小多个 ONU 同时发送注册请求的冲突^[17]；DBA 算法一直是 EPON 关键技术热点，传统 DBA 算法是根据 report 帧内 queue#n 队列情况动态调整各队列阈值算法，现今 DBA 算法在兼容传统算法的基础上做了诸多改

进,例如自适应 DBA 算法^[18]; QoS 实现机制也灵活多样,有基于队列调度算法(SP、WRR、SP+WRR)的 QoS,基于 VLAN 优先级的 QoS,基于 IP Tos 的 QoS,基于 802.1p 的 QoS 等等; EPON 系统根据服务侧(OLT 上联口到接入网服务器)和用户侧(OLT 下联口到 ONU)将 VLAN 分为 SVLAN 和 CVLAN,两种 VLAN 可叠加(外 SVLAN+内 CVLAN)为双层 VLAN。在服务侧可根据业务类型提供不同的隔离、汇聚、转换处理。在用户端可以灵活地配置基于端口、IP 子网和策略的 VLAN; EPON OLT 设备组播业务属于二级组播,第一级为 OLT 到交换板的组播,第二级为交换板到 ONU 用户的组播,实现方式为 SCB(单拷贝广播)+IGMP 方式^[19]; ONU 认证是保证 EPON 系统接入安全的必要,主要认证机制包括:不认证方式、基于 MAC 的认证方式、基于 LOID 的认证方式、混合认证方式等等,原理均为让满足条件的 ONU 认证成功,拒绝非法 ONU 注册; EPON 系统链路保护主要包括光链路保护、PON 口备份、全保护,技术难度在于设备倒换引起的延时或者数据丢失处理方式,一般根据保护类型选择备份设备为热备份或者冷备份方式; EPON 节能技术是近年人们开始重视的技术热点, IEEE 802.3av 中提出了 EPON 节能的机制,目前多适用于 10G EPON,主要实现方式为 OLT 根据 ONU 数据流量等条件控制 ONU 进入睡眠状态或者从睡眠中唤醒^[20]。

PON 技术的研究已经将近 20 年,从早期的基于 ATM 传输方式的 APON 到 BPON,再到 EPON 和 GPON, PON 技术带来了很多便利,例如:低成本、低功耗、服务透明、大容量等等。而且随着未来网络的不断发展和 triple play 服务和高清视频点播业务的出现,其业务特性和巨大的带宽需求正推动着 EPON 技术从 1G 向 10G 发展,从 TDMA 接入技术向 WDM、T+WDM、OFDM 等方向发展^[21]。

当今主流的接入技术为 EPON 和 GPON,日韩运营商倾向于 EPON 技术,而欧美国家则倾向于 GPON 技术。其中日本 2004 年开始 EPON 技术研究,早在 2007 年宽带覆盖率就达到了 95.8%,其中 FTTH 覆盖率上升到了 85.3%,其光纤覆盖率已经远远超过了 ADSL; 韩国电信在韩国政府的支持下在 2005 年建立了世界首个 WDM-PON FTTH 试点; 欧美国家则倾向于 GPON 的研究, EPON 相关技术研究相对较少。

1.2.2 国内研究现状

我国 PON 技术研究相对于国外较晚,但是在国家 863 计划的激励下,现阶段正在大力研究和推广 EPON 接入技术。中国电信在 EPON 标准制定和工程试点起到了带头作用。2006 年,中国电信在针对我国通信设备特殊环境和功能需要制订了《中国电信 EPON 设备技术要求 V1.0》标准后,陆续发布了 1.3、2.0、2.1 和 3.0 版本。中国移动和中国联通随后根据各自运营条件也分别发布了相应的技术标准。在这些标准和规范的指引下,国内设备供应商均积极参与 EPON 设备的研发,例如华为、中兴、烽火、上海贝尔、爱立信等公司。随着我国 EPON 自主研发能力的不断增强和芯片方案的不断成熟,1G EPON 技术已经比较成熟,开始发展 FTTx 的建设和 10G EPON 研究和开发。其中 1G EPON 又称为第一代 EPON,10G EPON 成为第二代 EPON。

我国第一代 EPON 发展主要在 2004 年到 2009 年之间,它通过单纤双向结构能为用户提供 1G 速率的通信链路,主要应用于 FTTx 建设,以 FTTB、FTTC、FTTH 为主,适用于非商业、对通信带宽无特别限制的区域和场景。第二代 EPON 发展主要在 2009 年之后,主要应用于 FTTO、以太主干网、以太城域网等场景。由于 10G EPON 的技术复杂度、成本、功耗等相对第一代 EPON 较高,产品成熟度相对于一代 EPON 较低,因此在很多场景还不能替代第一代 EPON 设备^[22]。

跟据我国工业和信息化部统计数据显示:2004 年 1 月,我国互联网拨号用户为 5538 万,宽带接入用户为 1186.3 万,基本无 FTTH/O 用户;2008 年 12 月,我国互联网拨号用户为 1437.7 万,宽带接入用户为 8342.5 万,FTTH/O 用户为 1650.1 万;2013 年 10 月,我国互联网拨号用户为 559.6 万,宽带接入用户 18709.5 为万,FTTH/O 用户为 3697.7 万。分析可得,我国互联网拨号用户数量在 2004 到 2008 年之间,下降了 74.03%,在 2008 到 2013 年之间,下降了 61.03%,整体数量快速下降且有放缓趋势;宽带接入用户总数在 2004 年到 2008 年之间,上升了 603.21%,在 2008 到 2013 年之间,上升了 124.27%,整体数量上升且有放缓趋势;FTTH/O 用户总数在 2004 到 2008 年之间,急速上升,在 2008 到 2013 年,上升了 124.01%,整体数量保持上升趋势。由此可见,在国家“三网融合”战略的推动下,我国固网改造成效显著,FTTx 建设则已经形成了比较完善的部署规范^[23-25]。

1.2.3 SFP EPON ONU 研究现状

SFP 封装的 EPON ONU 技术起源于 SFP-MSA、SFF-8472 与 IEEE802.3ah 等标准的融合。早在 2000 年 9 月, Agilent、Blaze Network Products 等著名公司联合发布 SFP-MSA 标准; 2001 年 4 月 SFF 委员会发布 SFF-8472 第一个版本; 2004 年 6 月 IEEE 颁布了 EPON 设备技术标准 IEEE 802.3ah。随着 EPON 技术的不断发展, 特别是单芯片 EPON 解决方案的不断成熟, 人们开始考虑将 PON MAC 集成到 SFP 模块中, 2010 年 6 月 Jaroslaw Wojtowicz, Santa Rosa 两人发布了 SMALL FORM FACTOR, PLUGGABLE ONU 的发明专利^[26], 向我们详细介绍了 SFP 封装和 GBIC 封装的 ONU 的实现原理以及 SFP 封装 ONU 和盒式 ONU 原理区别和应用区别; 2010 年 11 月, 中国电信也针对 SFP ONU 发布了《中国电信 SFP 封装的 PON ONU 模块技术要求》的标准^[27], 该标准在参照了 IEEE 802.3ah、SFP-MSA、SFF-8472、《中国电信 EPON 设备技术要求》等标准的基础上对中国电信 SFP 封装的 PON 设备的功能、PON 接口要求、电接口特性、机械尺寸、功耗要求、工作条件进行了详细的规定; 2011 年 1 月, Thomas Anschutz, Conyers 两人发布了 PON ONU CONFIGURED IN THE FORM OF A GIGABIT INTERFACE CONVERTER 相关应用型专利^[28], 该专利向我们详细介绍了 SFP ONU 或者 GBIC ONU 与 DSLAM、ROUTE 甚至用户直连等方式灵活配置网络减小网络冗余的方法; 2012 年 1 月, 青岛海信宽带多媒体有限公司的赵其圣、何鹏、杨思更、张强、薛登山等人发布了《一种采用 SFP ONU 光模块的无源光网络》的实用新型专利^[29], 该实用新型专利则是详细介绍了 EPON 系统与环形器、分光计、种子光源的配合使用, 实现了组网灵活、网络管理复杂度低、成本低的 EPON 网络。这些发明、应用专利、技术标准不仅向我们介绍了 SFP ONU 实现原理、技术要求, 也揭示了 SFP ONU 应用场景和其不可替代的优点。

在理论研究的同时, 人们也逐渐意识到 SFP ONU 的商业价值。据光纤在线网络报道, 2013 年 3 月, 索尔斯光电发布了两款集成 PON MAC 的 SFP ONU, 其中一款为支持 DPoE 的 EPON 终端设备。该模块不仅支持 IEEE 802.3ah 标准, 还支持 DPoE 标准, 支持 DOCSIS 协议应用, 将 CATV 系统升级为 EPON 系统。几乎同时 Finisar、同维等公司也有相应产品出现, 其中大多为 Tk 方案。

1.2.4 EPON 节能研究现状

在 EPON 接入技术发展基本成熟、相关设备被大规模应用到各种场景后，人们开始意识到 EPON 设备能耗也是光纤接入技术发展必须面临的一个重要问题。于是就出现了一些对 EPON 节能技术研究的理论。2010 年，Ying Yan, Shing-Wa Wong, Luca Valcarengi, She-Hwa Yen, Divanilson R. Campelo, Shinji Yamashita, Leonid Kazovsky, Dittmann 等人在 IEEE 会议上发表了《Energy Management Mechanism for Ethernet Passive Optical Networks》的论文^[30]，该文献主要阐述了 IEEE802.3ah 的 EMM（电源管理机制）控制方案；2011 年，北京邮电大学 Zhen Wang, Wenchang Yu, Liqian Wang 等人在 EMEIT 上发布了《Energy Saving Mechanism Based On Double-way Polling DBA Algorithm and ONU Sleep Mode for EPON》的论文^[31]，主要向我们介绍了基于双向轮询 DBA 的睡眠节能算法；2012 年，北京邮电大学的肖巧生，寿国础，胡怡红，郭志刚等人在光通信研究上发表了《无源光网络睡眠节能方式研究》的论文^[4]，则在阐述了 EMM 的基础上，针对 EPON 系统详细介绍了 EPON 节能的 4 种方式。其中主要包括 ONU 减负、假寐、快速睡眠、深度睡眠等 4 种节能原理；其中减负方式通过 PME（电源管理实体）实现，假寐则是 ONU 自发控制方式，在无数据发送时，关闭相应模块，快速睡眠和深度睡眠则是 ONU 在 OLT 的控制下进入睡眠状态，只是对应睡眠深度，即保留运行的机制更少，睡眠程度更深一些。综合上述文献可知 EPON 节能的基本思路为：

- 1) 以不影响正常使用为前提。
- 2) 关闭未使用的模块。
- 3) 在空闲时使设备在进入睡眠状态，在需要使用时唤醒设备。

针对于电信级别的 ONU 设备，在不改变 DBA 算法、MPCP 时隙控制的基础上只能通过设计 PME 来管理模块电源，针对《中国电信 EPON 设备技术要求 V3.0》来设计睡眠节能模式来达到节能的目的。这两种控制方式主要包括手动控制方式和自动控制方式，手动控制方式为用户根据使用情况通过命令行或者 WEB 等方式手动关闭未使用的模块；自动控制方式为微处理器根据各个模块发送接收的数据流量进行统计，设定特定的条件来自动控制各模块的电源状态。两种控制方式与硬件接口息息相关，跟据具体硬件条件，合理设计电源控制方式，才能做到在不影响正常使用的前提下实现最大限度节能。

1.3 课题来源及论文主要工作

本课题来源于深圳亚光通信有限公司 ONU 研发项目，本人在公司 8829 类型 ONU 项目中主要负责软件研发，主要从事 CTC 扩展 OAM 协议研究及私有 OAM 协议研发，解决 ONU 与不同厂家 OLT 之间的互通问题；后来在公司硬件工程师启发和帮助下，开发 SFP EPON ONU 模块；本文在原厂所给的 HDK 和 SDK 基础上，基本独立完成了该模块硬件设计和软件模块设计，目的是将 SFP 封装与超低功耗 PON MAC 芯片结合，制作出低功耗、高带宽、可热拔插、符合《中国电信 SFP 封装的 PON ONU 设备技术要求》标准的 SFP EPON ONU 模块。围绕上述要求，在阅读大量相关的资料基础上，主要做了以下工作：

1) 了解 SFP EPON ONU 相关技术标准及实现原理

SFP EPON ONU 设计需要符合 SFF-8472、SFP-MSA、《中国电信 EPON 设备技术要求》及《中国电信 SFP 封装的 PON ONU 设备技术要求》，本设计在了解了相关标准基础上进行了实现原理分析，通过合理芯片选型、电路设计、软件设计，确保设计符合相应标准。

2) 设计 SFP EPON ONU 硬件电路

SFP-MSA 对 SFP 模块的封装、接口功能、电器特性等做了详细规定，因此 SFP EPON ONU 电路设计需要考虑器件封装、功能、功耗、高速信号线处理、热拔插保护、接口兼容性问题，本设计在考虑到这些问题的基础上选择低功耗 SoC 芯片，采用母板和扣板结构设计，合理规划高速信号线、合理设计电源滤波电路等途径完成了 SFP EPON ONU 模块电路设计。

3) 软件平台研究

本设计软件平台为高通公司 QCA8829 SDK，为 MIPS 32 架构嵌入式软件开发环境。本设计软件模块在充分了解该软件平台基础上进行新的软件模块开发。

4) 针对节能型 SFP EPON ONU 功能需求设计软件模块

针对《中国电信 SFP 封装的 PON ONU 模块技术要求》标准，本设计加入了数字诊断模块；针对 ONU 设备节能特性，本设计加入了 ONU 电源管理模块和 CTC 睡眠节能模式支持；针对《中国电信 EPON 设备技术要求 V3.0》加入了基于 OAM 的性能统计模块，并在代码上做了 OAM3.0 向下兼容设计。

5) 了解中国电信 EPON 设备相关测试规范^[32-33]

在完成 SFP EPON ONU 模块之后，本设计 SFP EPON ONU 针对中国电信 EPON 设备测试规范和新加入功能进行了测试。

第 2 章 SFP EPON ONU 相关技术研究及方案设计

2.1 EPON 系统工作原理

PON 网络系统一般由 OLT、ODN、ONU 组成，可采用星形、树形、总线形、环形等拓扑连接^[34-35]。OLT 放置在局端，负责提供业务汇聚和网络管理功能，可实现基于设备的网元管理和基于业务的安全管理和配置管理。ONU 放置在用户端，负责用户数据存储转发和处理，ONU 与 OLT 通过 ODN 连接。EPON 系统采用波分复用技术，1G 速率 EPON 上行波长为 1310nm，下行波长为 1490nm。EPON 下行数据通道模型如图 2-1 所示。

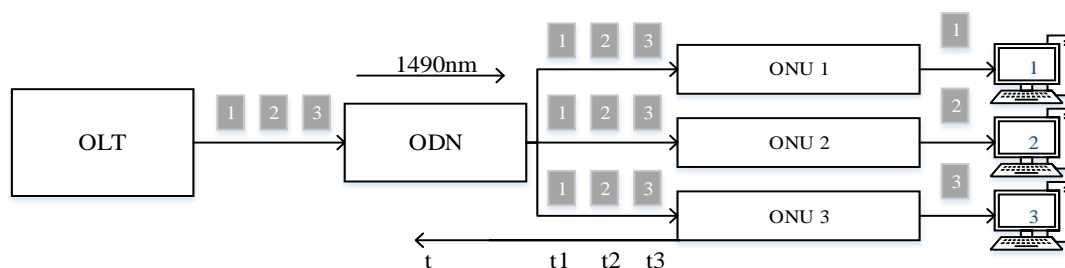


图 2-1 EPON 下行数据通道模型

在图 2-1 中，OLT 通过广播发送数据包 1、2、3，分别对应时隙 t1、t2、t3，ODN 直接拷贝数据发送到各 ONU，ONU 根据 LLID 和 MAC 地址提取对应的数据包，然后将对应数据包转发给用户。在 EPON 上行链路，EPON 系统采用 TDMA 技术，将上行信道划分为若干时隙。上行数据通道模型如图 2-2 所示。

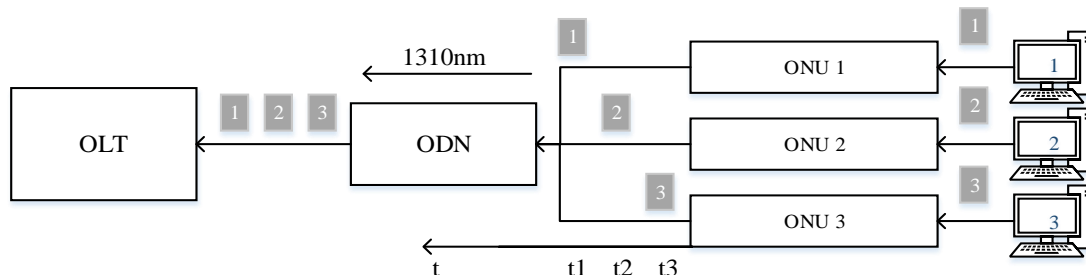


图 2-2 EPON 上行数据通道模型

在图 2-2 中，OLT 通过 MPCPDU GATE 帧给合法注册的 ONU1、ONU2、ONU3 分配固定的时隙 t1、t2、t3，用户上行数据被对应 ONU 分别按时隙在 t1、t2、t3 发送，在 ODN 上进行合路，避免了同时多个 ONU 发送数据的冲突。

2.2 SFP EPON ONU 相关标准

SFP EPON ONU 属于 ONU 中的一种，因此必须符合 IEEE 802.3ah 标准，中国电信针对我国通信设备特殊环境和功能需要发布了《中国电信 EPON 设备技术要求》标准，目前最新标准为 3.0 版本。而且针对 SFP PON ONU 设备，还发布了《中国电信 SFP 封装的 PON ONU 设备技术要求》标准。

《中国电信 EPON 设备技术要求 V3.0》是中国电信 2011 年 6 月发布的关于我国 EPON 设备企业标准的最新要求，对我国 EPON 系统局端设备 OLT 和终端设备 ONU 的关键技术进行了详细规范的说明。主要包括设备类型、协议要求、用户侧和网络侧接口、二层以太网功能、动态带宽分配、多业务 QoS 机制、EPON 系统安全技术、组播、系统保护、链路诊断和测量、ONU 软件升级、告警、性能统计、节能、各种业务承载、操作管理维护、物理硬件及其他要求。3.0 版本在 2.1 基础上合并了 2.1 版本修订 1 和修订 2 的内容，增加了 10G-EPON 的功能要求定义、ONU 性能统计和 ONU PON 口节能等功能要求。

《中国电信 SFP 封装的 PON_ONU 模块技术要求》标准是中国电信上海研究院参考了 SFF-8472、SFP-MSA、《中国电信 EPON 设备技术要求》等标准编制。该标准主要规定了我国电信级 SFP 封装的 PON ONU 设备的基本功能、电接口特性、PON 接口要求、功耗要求、机械尺寸、工作环境等相关内容。

2.3 SFP 接口及协议规范

SFP (Small Form-Factor Pluggable) 即小型可拔插封装。SFP 不仅继承了 GBIC 的优点，而且比 GBIC 具有更高的集成度，可以简单理解为 GBIC 的升级版。另外 SFP 光模块还支持数字诊断、热拔插等功能，因此被广泛用于现代光通讯产品中^[36]。SFP 接口支持 SONET、吉比特以太网、光纤通道等通信标准。SFP 模块遵循 SFP-MSA、SFF-8472 规范。SFP 模块外观如图 2-3 所示。

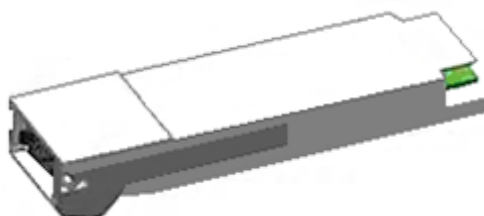


图 2-3 SFP 光模块外观

SFP 金手指接口有 20 管脚,每个管脚均有相应地定义。详见 SFP-MSA(Small Form-factor Pluggable (SFP) Transceiver Multisource Agreement (MSA))。SFP 金手指外观如图 2-4 所示。

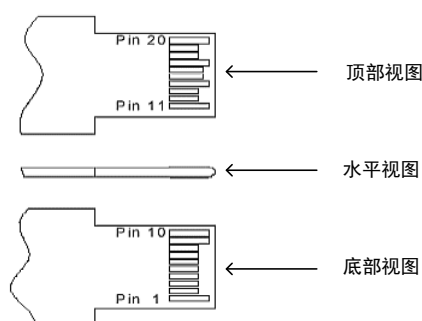


图 2-4 SFP 金手指外观视图

SFP-MSA 附录 B2 详细定义了金手指各引脚定义。具体内容如表 2-1 所示。

表 2-1 SFP 接口管脚定义及描述

管脚	定义	描述
1	VeeT	发射端地
2	TX Fault	发送故障告警
3	TX Disable	发送关断
4	MOD-DEF2	模块定义 2
5	MOD-DEF1	模块定义 1
6	MOD-DEF0	模块在位标识
7	Dying Gasp	Dying Gasp 指示
8	LOS	接收信号丢失
9	VeeR	接收地
10	VeeR	接收地
11	VeeR	接收地
12	RD-	接收端反向数据
13	RD+	接收端数据
14	VeeR	接收地
15	VccR	接收端电源
16	VccT	发送端电源
17	VeeT	发送端地
18	TD+	发送端数据
19	TD-	发送端反向数据
20	VeeT	发送端地

2.4 节能型 SFP EPON ONU 模块功能需求及设计思路

2.4.1 节能型 SFP EPON ONU 模块功能需求

节能型 SFP EPON ONU 模块必须同时满足 3 个主要功能需求：SFP 模块功能需求、EPON ONU 功能需求、节能特性功能需求。分别如下所示：

1) SFP 模块功能需求

首先，模块为 SFP 封装，则需要满足 SFP 封装相关标准。其次，突发式 SFP 光模块主要实现突发光信号与电信号之间的转换，能够支持发射机的突发发射和快速关闭^[37]（发射机快速回暖和冷却），以实现 OLT 与 ONU 之间的高速通信，避免自发散射噪声影响光模块判决门限。

2) EPON ONU 功能需求

ONU 为 EPON 系统终端设备，必须支持 IEEE 802.3ah 标准，即支持多点控制协议和 OAM 协议等相关功能，同时电信级 ONU 还需符合《中国电信 EPON 设备技术要求》标准相关功能需求。

3) 节能特性功能需求

SFP-MSA 标准中规定了 SFP 模块整体功耗小于 2.5W，为实现最大限度节能，应该从硬件和软件设计上都考虑功耗的问题。

2.4.2 节能型 SFP EPON ONU 模块设计思路

为满足 2.4.1 章节相关功能需要及总体设计规范，需从 3 各方面着手：

1) 主要芯片及器件选型

芯片选型时，首先需要根据 SFP 封装选择尺寸合适的芯片，其次是功能，比如光模块驱动芯片和 PON MAC 芯片最好为 SoC 芯片，这样的芯片集成度高，所占空间小，能实现和扩展功能更多，最后是功耗，功能不减，功耗越低越好。

2) 硬件电路设计

硬件电路设计时，考虑到 SFP 模块内部空间有限，为提高其空间利用率，可采用母板和扣板设计。而且 SFP 模块外壳为金属，可以在电路设计时将主要发热芯片贴近金属外壳，封装时可酌情考虑在对应位置涂上硅胶，利于散热。

3) 软件模块设计

根据硬件和软件环境，设计相应的电源管理模块和睡眠节能模块。

2.5 SFP EPON ONU 模块设计原理可行性分析

一般 EPON ONU 设备主要包含 PON MAC 和交换 MAC, 早期的 EPON ONU 设备通常就是 PON MAC 芯片和外扩 PHY 芯片的组合, 通过外围接口连接光模块和外围通信设备来实现 FTTx 接入、数据交换和相应的管理功能。EPON ONU 协议层结构如图 2-5 所示。

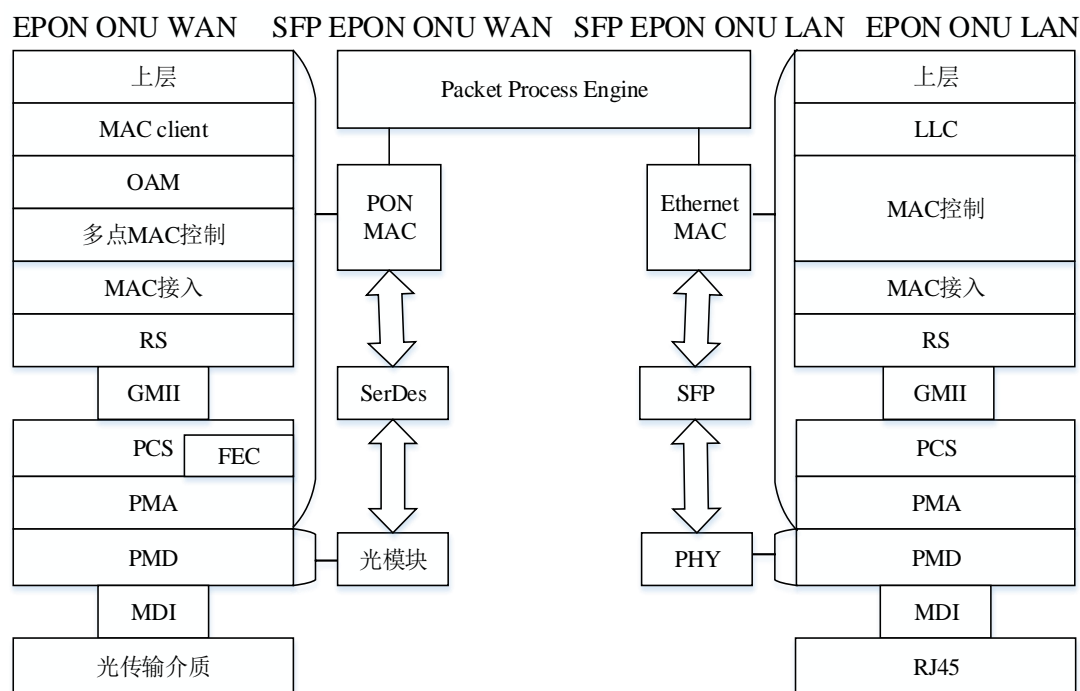


图 2-5 EPON ONU 协议层次结构

由图 2-5 可以看到, 在 PON 接入端, PON MAC 芯片主要实现 EPON 数据链路层、PCS 子层、FEC 子层和 PMA 子层功能, 例如多点控制、操作、管理、维护、FEC、8B/10B 编码、串并转换、时钟提取、斜率恢复等功能; 光模块主要实现 PMD 子层功能, 即实现光电信号之间的转换。PON MAC 芯片与光模块之间兼容 LVDS (低电压差分数字信号), 因此 GMII 接口的 8 位并行同步数据通过 SerDes 转换为 4 线差分串行数据信号, 兼容 SFP 接口数据信号标准^[38]。在以太网 MAC 端, Ethernet MAC 主要实现 2 层数据存储转发功能, 包括 MAC 学习、过滤、老化、STP、VLAN 处理等; PHY 芯片主要实现物理层功能; Ethernet MAC 与 PHY 之间使用 GMII 或者 SerDes 相连, SerDes 可以将 GMII 接口数据信号转换为 LVDS 信号, 兼容 Ethernet MAC 与 PHY 之间数据信号和 SFP 接口数据信号标准。

以上是 SFP EPON ONU 设备的两大部分,其中 PON MAC 与 Ethernet MAC 之间由 CPU 连接,负责 LAN 口与 WAN 口之间数据处理和转发。由此可见,假如设计的 EPON ONU 设备符合以上协议层结构,则在数据交换原理上就是可行的。对于 MAC 和 PHY 芯片,现在既有集成芯片也有独立芯片,因此模块化设计还是比较灵活的。

SFP EPON ONU 是将 ONU 的功能集成到 SFP 模块中,因此 SFP EPON ONU 需要包含光信号处理功能和 PON 接入的功能。考虑到 SFP 接口信号为高速 LVDS,因此 PON MAC 及 Ethernet MAC 需要支持 SerDes 接口。图 2-6 为本设计原理框图。

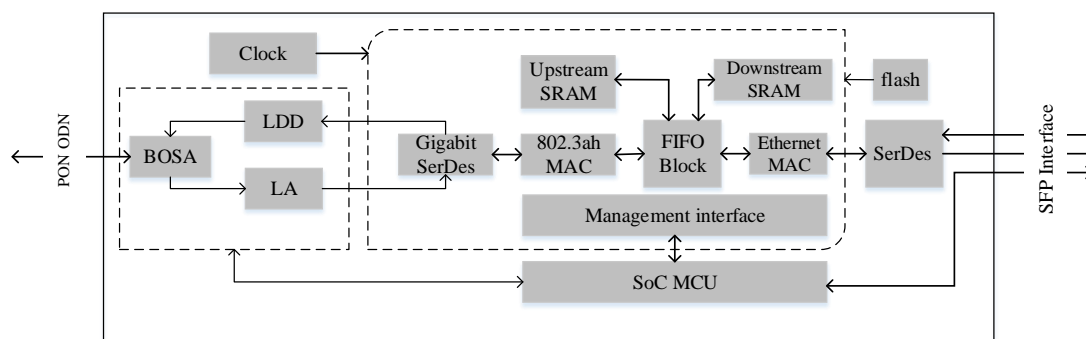


图 2-6 系统设计原理图

如图 2-6 所示, BOSA 在 SoC MCU 的控制下, 实现光电信号的转换和处理, 整体相当于实现光模块的功能, 在本文中称之为光信号处理模块; 图 2-6 中部包含 802.3ah MAC 和 Ethernet MAC 的虚线方框部分主要实现 EPON 接入功能以及 PON MAC 到 Ethernet MAC 数据处理和转发, 这部分在本文中统称为 PON MAC 模块。Ethernet MAC 支持 SerDes 接口, 将 GMII 数据转换为串行高速 LVDS, 使模块可以支持 PHY 芯片扩展。整体既能实现光模块的功能, 又能实现 EPON ONU 的功能, 符合 EPON ONU 设备设计原理。

2.6 本章小结

本章从 EPON 系统的基本工作原理出发, 简要介绍了 SFP EPON ONU 相关标准和协议, 分析了 SFP EPON ONU 模块设计的功能需求, 给出了相应的解决思路。最后对比分析了 EPON ONU 与 SFP EPON ONU 协议层结构, 简要说明了各层之间的通信关系, 证明了本设计原理上的可行性。

第 3 章 系统硬件设计

3.1 系统硬件总体设计

根据 2.4 章节 SFP EPON ONU 相关功能需求，本设计选用 QCA8829 芯片作为 SoC PON MAC 芯片，该系统充分利用了 QCA8829 低功耗、小尺寸、丰富外围接口的特性，使得该芯片能嵌入到 SFP 模块中，而且有效降低了系统的功耗。该系统主要分为两个部分：光信号处理模块和 PON_MAC 控制模块，光信号处理模块重要包括 BOSA、MAX24003 驱动芯片、EEPROM 等；PON_MAC 控制模块主要由 QCA8829、flash 芯片及相应外围电路。光信号处理模块负责光信号的收发、放大、转换等处理；PON_MAC 芯片负责 PON 系统数据链路层包括其子层的各种功能的实现，例如：MPCP(多点控制协议)、OAM（操作管理维护）的实现以及寻址、检错、校验、数据流控制等链路层的功能。PON_MAC 控制模块与 SFP 接口之间连接采用 SerDes 连接。图 3-1 为系统整体设计框图。

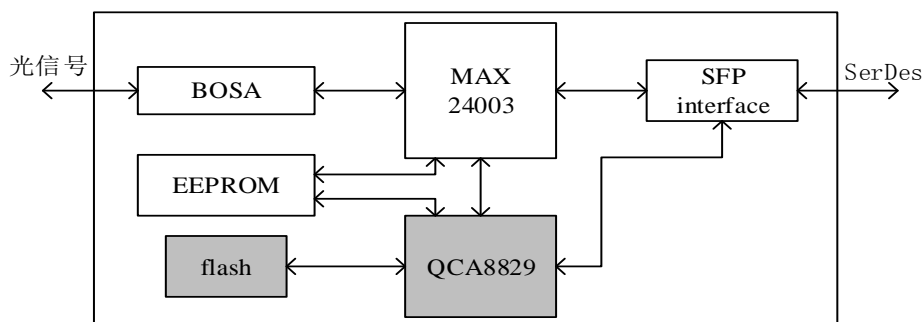


图 3-1 系统整体设计框图

在图 3-1 中，QCA8829 芯片是整个设计的核心，其内部集成高速 IRAM 和 DRAM，有效节省了外扩 SDRAM 所占用的空间和费用，它还有丰富的外围接口，方便扩展外部设备来实现更多的功能；flash 存储器主要用来存储 boot-loader、驱动程序、嵌入式实时操作系统、应用程序、配置文件等内容，通过 SPI 总线与 QCA8829 通信；EEPROM 用于存储光模块配置以及数字诊断、中国电信对 SFP 封装的 PON ONU 模块要求相关的状态信息；TOSA 和 ROSA 合称为 BOSA，用于实现光信号与电信号之间的相互转换；MAX24003 是 MAXIM 公司开发的一款用于 FTTx 光模块的驱动芯片，主要完成光电信号转换和数字诊断信息采集。整个模块使用 SFP 接口与外部相连，通过 SFP 插座标准供电。

3.2 硬件设计可行性分析

通过 2.4 和 2.5 章节对 SFP EPON ONU 功能需求和设计原理分析, 结合 SFP-MSA 对 SFP 模块尺寸、电器特性、模块硬件接口兼容特性分析可知, 本设计所选器件必须满足以下条件:

BOSA 驱动芯片:

- 1) 必须适配于 FTTx 网络, 光模块为突发式发光模块。
- 2) 驱动芯片尺寸: width < D-2R (D-2R=12mm 参见 SFP-MSA A1.SFP Transceiver Package Dimensions D=13.4mm R=0.7mm)。
- 3) 支持 SFF-8472 数字诊断功能。
- 4) 支持激光发送接收可控。

PON MAC 芯片:

- 1) 必须兼容《中国电信 EPON 设备技术要求》标准。
- 2) 必须兼容 SFP 接口作为供电电源, 电压要求 $3.3 \pm 5\%$, 整体功耗 < 2.5W
- 3) PON MAC 芯片尺寸: width < D-2R (D-2R=12mm 参见 SFP-MSA A1.SFP Transceiver Package Dimensions D=13.4mm R=0.7mm)。
- 4) 支持 SerDes 接口, 兼容 SFP 数据信号。
- 5) 最好内部集成 RAM, 避免外部扩展芯片占用有限空间, 减小整体散热。

本设计选用的 BOSA 驱动芯片 MAX24003, PON MAC 芯片 QCA8829 完全满足上述条件, 具体参数如表 3-1 所示。

表 3-1 主要元器件参数列表

器件型号	描述	厂家
CPU:QCA8829	100M 主频、兼容 IEEE802.3 兼容 CTC OAM 2.1 集成 IRAM DRAM QFN 76 封装 9.0mm*9.0mm 功耗<600mW 支持 SerDes 接口等	qualcomm
光模块驱动芯片: MAX24003	1.25Gbp 速率 温度补偿控制 40TQFN 封装 5mm*5mm 发送接收可控 睡眠控制 典型功耗 448.8mW	maxim
EEPROM:24LC02	2K EEPROM	holtek
flash:MX25L3205D	4M SPI flash	macronix

在表 3-1 所示的器件中 QCA8829 芯片是高通公司开发的一款适用于 EPON 系统的 SoC 网络芯片,它针对 CTC OAM、板级管理和应用集成了 32 位 Tensilica 高性能 CPU,完全兼容 IEEE 802.3ah 标准和《中国电信 EPON 设备技术要求 V2.1》标准。图 3-2 为 QCA8829 的芯片结构图。

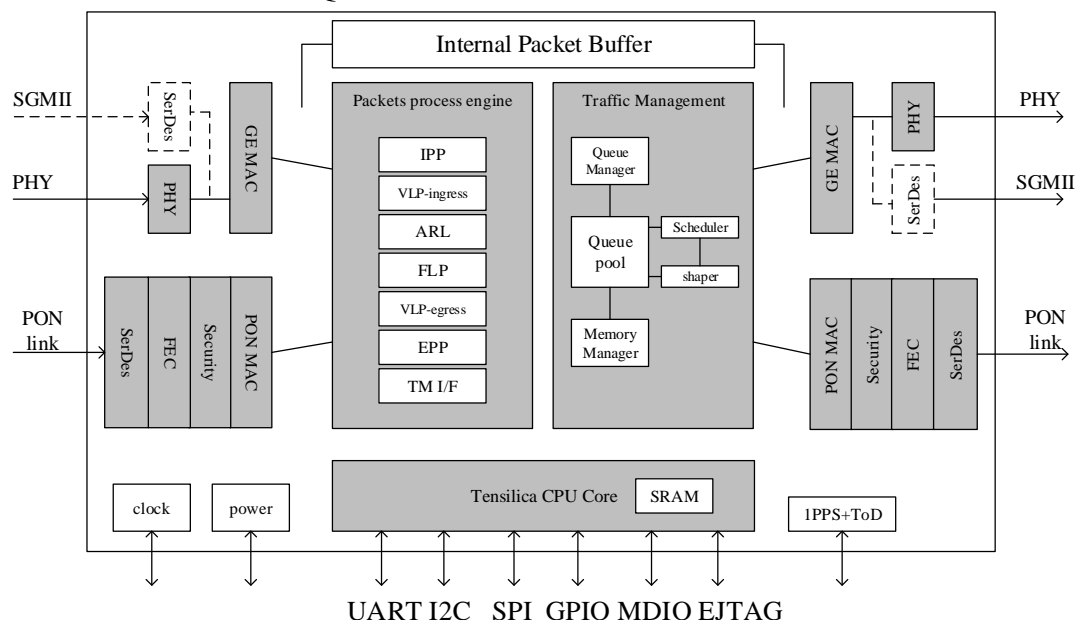


图 3-2 QCA8829 芯片结构图

QCA8829 主要包含以下功能模块：

1) PON MAC (PMAC 模块)

PON 模块的功能主要是为了兼容 EPON MAC 提供的 MPCP 功能要求，包括 MPCP 发现过程、通过 RTT（链路往返时间）测距、队列状态上报等等，同时它还支持 FEC、支持下行数据流 AES 加密和三重搅动功能。

2) Gigabit Ethernet MAC (GMAC 模块)

吉比特以太网模块能为用户提供内部 PHY 或者 SGMII 外扩 PHY 方式。SGMII/SERDES 兼容 1000BASE-X SERDES 接口。吉比特以太网 PHY 可以提供 10/100/1000bps 速率，并且支持 1Gbps 全双工工作模式。

3) PPE (包处理引擎模块)

包处理模块包含多个子模块，分别对应不同的包处理服务。例如 MAC 地址学习、老化、过滤；VLAN 数据包过滤、转发、Tag/Untag；复杂包解析等等。

4) HOST 模块

HOST 模块集成了高性能 Tensilica CPU，包含丰富的外围扩展电路。例如本地主机总线、I2C 总线、SPI 总线、GPIO 接口、UART 接口、MDIO 接口等。

另外 MAX24003 是 MAXIM 公司的一款典型光发射和接收模块驱动处理芯片，被广泛应用于 FTTx 光模块的场合。配合使用 2K EEPROM 它能完全兼容 GEAPON 模块所必须的数字诊断功能，它内部包含温度传感器，能通过查表方式对模块进行实时温度补偿。并且 MAX24003 支持发射机电源开启和关闭循环偏置可控，使发射机能快速冷却和回暖，有利于 ONU 的快速注册和快速关闭，减小自散射噪声。另外，它还支持睡眠模式，即在 PON MAC 芯片控制下，可以使光处理模块进入节能状态。图 3-3 为 MAX24003 管脚定义图。

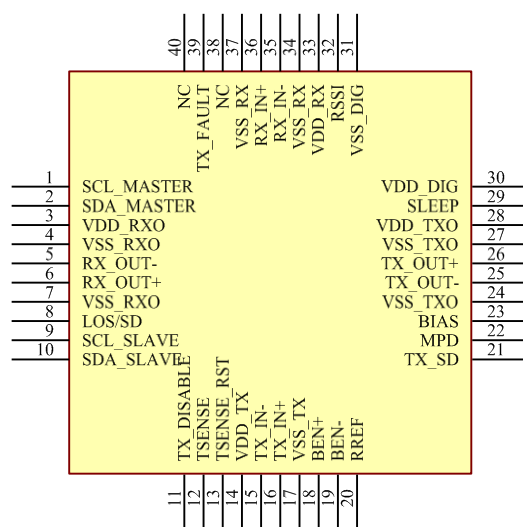


图 3-3 MAX24003 管脚定义图

本设计中的主要芯片 QCA8829 和 MAX24003 的典型功耗分别为 0.6W 和 0.45W，其中 QCA8829 在低功耗模式（关闭各个外围设备电源）功耗可以达到 <300mW，加上 SPI flash、EEPROM、其他贴片容阻件，模块整体功耗完全满足 SFP-MSA 规定的 <2.5W 的标准。

在尺寸方面，QCA8829 为 QFN76 9.0mm*9.0mm 封装，MAX24003 为 5mm*5mm TQFN 封装，满足 SFP-MSA 规定的模块尺寸 <12mm*12mm 的要求。

在功能方面，QCA8829 和 MAX24003 均满足硬件设计条件。需要注意的是：QCA8829 在设计时需要选择 SGMII 接口，这样就能与 SFP 接口数据信号兼容了。当然，在软件模块，也需要选择 SGMII 接口。由于 SFP 接口不支持 MDIO 和 MDC 的扩展，因此，在 PHY 管理上，只能将 SFP 下端设备看做一个整体，不能对其进行管理。用户也可以通过交换设备的管理接口（如 WEB 或者 Console）对其进行管理。

3.3 分母板和扣板的硬件设计

基于突发光模块硬件设计，考虑到 SFP 模块内部空间有限且工作在高频高速的环境，为减小趋肤效应、串扰、反射、同步切换噪声，提高空间利用率和信号的完整性，将模块分为母板和扣板两层面板，两层面板之间用排线连接。扣板主要包括 QCA8829、EEPROM、flash，母板主要包括 MAX24003、BOSA、SFP PLUG 接口。为兼容 SFP 规格，电路设计接口为 SFP 标准接口，长度可适当比 SFP 光收发模块长 10mm-20mm。图 3-4 为母板扣板设计图。

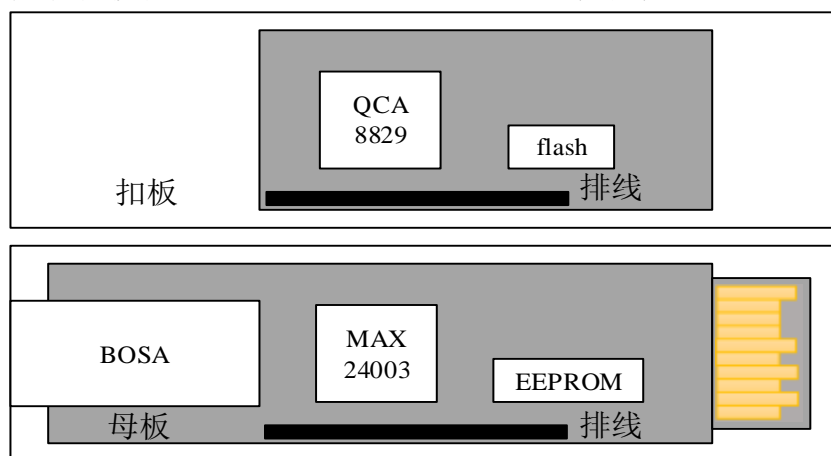


图 3-4 母板扣板硬件设计图

在图 3-4 中，存在 3 处高速差分数据信号线路：BOSA 与 MAX24003 前端通信线路、MAX24003 后端与 QCA8829 PMAC 通信线路、QCA8829 GMAC 与母板 SFP 通信线路。为了减小这些高速信号线之间的串扰，需要合理排列这 3 组信号线：其中 BOSA 与 MAX24003 前端通信线走母板水平线，排线两边分别走 MAX24003 后端与 QCA8829 PMAC 通信线路和 QCA8829 GMAC 与母板 SFP 通信线路，这样还能方便部署平行线路，减小高速差分信号线的长度，使得每组差分信号线长度一致。为减小每组信号线内部 4 条信号线之间的串扰，应根据 PCB 面板面积，适当靠近地线，适当增加每对差分信号线对的间距^[39-40]。

3.4 母板电路设计

根据本文 2.4 章节对母板扣板硬件结构的设计分析可知，SFP EPON ONU 模块母板主要包含 BOSA 与 MAX24003 之间的连接、MAX24003 与 SFP PLUG 之间的连接、母板与扣板之间的排线接口设计和 MAX24003 与 EEPROM 之间的连接。其中，BOSA 与 MAX24003 之间的电路连接如下图 3-5 所示：

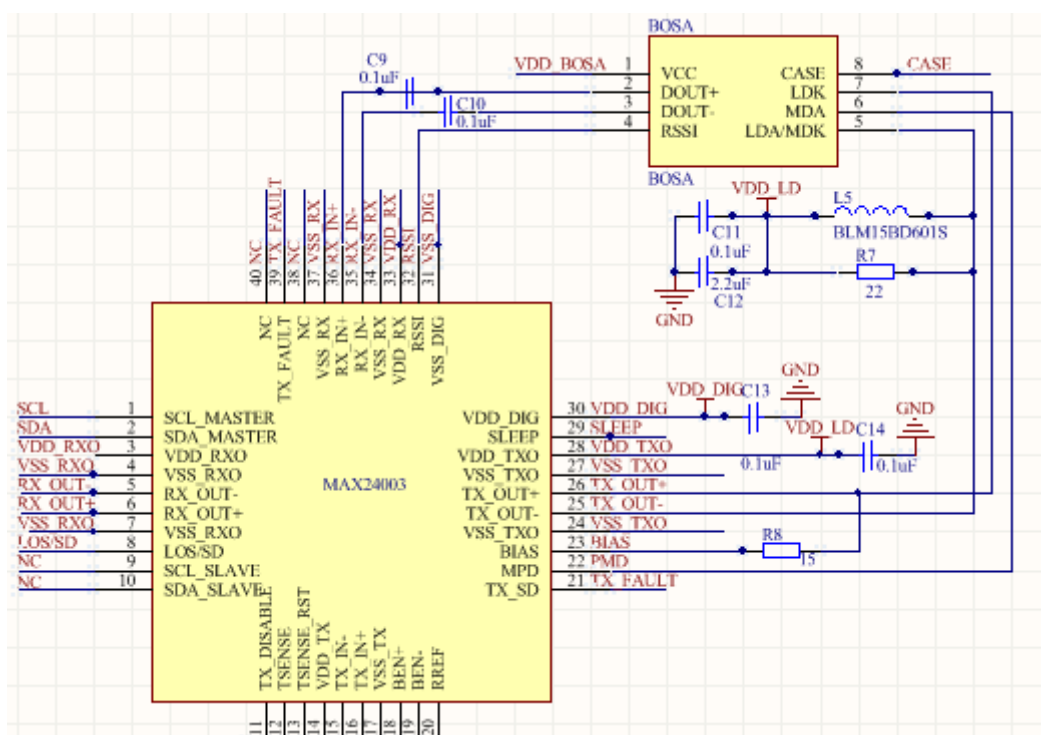


图 3-5 BOSA 与 MAX24003 之间的电路连接图

图 3-5 中部分引脚之间采用网络标号连接。BOSA 与 MAX24003 之间主要包含两对差分信号：RX_IN+/RX_IN-分别连接 DOUT+/DOUT-引脚，负责数据接收；TX_OUT+/TX_OUT-分别连接 LDK/LDA 引脚，负责数据发送。数据接收链路加入了 C9 和 C10 滤波电容，过滤直流信号；发送链路 TX_OUT+与 MPD 之间添加 R8 电阻，用于提供 BOSA 发射机偏置电流。TX_OUT-与 LDA 之间添加了 VDD_LD 上拉电阻和高频信号过滤电感，C11 与 C12 为电源 VDD_LD 滤波电容。RSSI 为接收信号强度指示，用来判断链路信号质量。母板上另一主要电路为 MAX24003 与 SFP_PLUG 连接电路，图 3-6 为 SFP PLUG 引脚图。

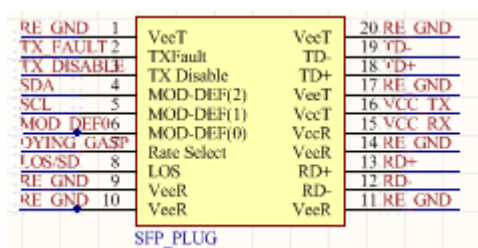


图 3-6 SFP PLUG 管脚图

其中SFP PLUG的TX Fault与MAX24003的TX_FAULT相连，使得光模块发送故障告警能通过SFP接口让下连设备检测到；SFP PLUG的TX Disable与

MAX24003的TX_ DISABLE相连,用来关断模块激光器的输出信号; SFP PLUG的MOD-DEF1与MAX24003的SCL_MASTER相连, SFP PLUG的MOD-DEF2与MAX24003的SDA_ MASTER相连,《中国电信SFP封装的PON ONU模块技术要求》6.1.2章节注3中将MOD-DEF1和MOD-DEF2分别定义为IIC总线的时钟线SCL和数据线SDA,在该设计中MAX24003工作在主机模式, 故连接MAX24003的SCL_MASTER和SDA_MASTER引脚; SFP PLUG的LOS与MAX24003的LOS/SD相连, 用来标识信号是否丢失。

母板之间和扣板之间采用排线连接, 主要用来实现MAX24003和QCA8829以及QCA8829与SFP PLUG之间的通信。图3-7为排线主要引脚连接图。

VCC_TX	Vcc TX		
VCC_RX	Vcc RX	SDA MASTER	SDA
RE_GND	GND	SCL MASTER	SCL
RD+	DL_RXP	RX_OUT+	UL_PON_RXP
RD-	DL_RXN	RX_OUT-	UL_PON_RXN
TX+	DL_TXP	TX_IN+	UL_PON_TXP
TX-	DL_TXN	TX_IN-	UL_PON_TXN
DYING_GASP	DYING_GASP	BEN-	TXCTL

图3-7 排线引脚连接图

其中左边图片为SFP_PLUG与QCA8829之间的引脚连接图, 右边为MAX24003与QCA8829之间的引脚连接图。VCC_TX和VCC_RX为SFP_PLUG提供的发送端电源和接收端电源, RE_GND为地线; RD+/RD-和TX+/TX-为SFP_PLUG收发差分信号线, 连接QCA8829下行链路差分信号线DL_RX+/DL_RX-和DL_TX+/DL_TX-相连, 负责UNI端口数据收发; DYING GASP主要用于掉电告警, 在ONU掉电时候, 发送DYING GASP信号告知OLT; SCL、SDA为IIC总线时钟信号线和数据信号线; MAX24003上的差分收发数据线RX_OUT+/RX_OUT-和TX_IN+/TX_IN-与QCA8829的PON LINK差分收发数据线UL_PON_RXP/UL_PON_RXN和UL_PON_TXP/UL_PON_TXN相连, 负责PON端口数据的收发, 差分信号线之间为交流耦合方式, 需加入100欧姆阻抗匹配和0.1uF滤直电容; BEN-与TXCTL相连, 用于控制PON端口数据的收发;

MAX24003与EEPROM之间使用IIC总线连接。本设计中, MAX24003为主机, EEPROM为从机, 故将MAX24003的SCL_MASTER、SDA_MASTER分别与EEPROM的SCL和SDA引脚相连。图3-8为EEPROM芯片24LC02的电路连接图。

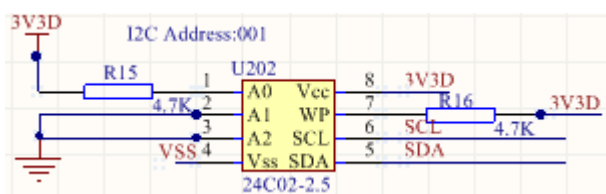


图3-8 24LC02电路连接图

由于SFP-MSA和中国电信SFP封装的PON ONU设备要求将数字诊断信息和相关参数存储在EEPROM的0xA2区域，根据EEPROM设备地址设置方法可知EEPROM设备地址分别对应10100010，最后一位为读写位，所以图3-8中EEPROM地址管脚A2、A1、A0分别对应001逻辑电平。

SFP 模块通过SFP_PLUG供电，包括发送端电源和接收端电源，图3-9为电源模块电路图。

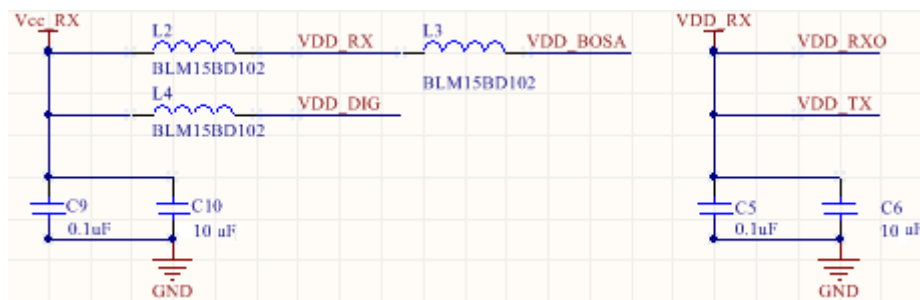


图3-9 电源模块电路

图3-9中电源滤波网络由电感和电容组成，保证模块热拔插电流浪涌小于30mA。Vcc_TX和Vcc_RX为SFP_PLUG发送端和接收端电源；3V3D为3.3V电源，主要为QCA8829供电和为信号线提供上拉电平；VDD_LD为BOSA发射机驱动电源；VDD_RX、VDD_TX、VDD_DIG分别为MAX24003接收电源、发送电源、数字供电电源；VDD_BOSA为BOSA供电电源。地线与各芯片逻辑地、数字地、外壳连接。MAX24003睡眠控制引脚SLEEP也连接地线（需要写EEPROM实现，延时较大，未使用该引脚，使用TXCTL控制模式）。

为提高电路驱动能力，保证数据正确传输，在SPI总线和I2C总线数据线上还需加上4.7K电阻上拉至VCC，TX_FAULT、LOS/SD在MAX24003中为漏极开路，需要加上4.7K电阻上拉至VCC，TX_DISABLE在MAX24003中已通过内部7.5K电阻上拉至VDD_TX。

3.5 扣板电路设计

根据本文 2.4 章节对母板扣板硬件结构的设计分析可知, SFP EPON ONU 模块扣板主要由 QCA8829 和 flash 芯片构成, 扣板与母板之间使用排线连接。QCA8829 与 flash 芯片之间使用 SPI 接口连接, 本设计选择的 SPI flash 芯片为 MX25L3205D, 图 3-10 为 QCA8829 与 MX25L3205D 的电路连接图。

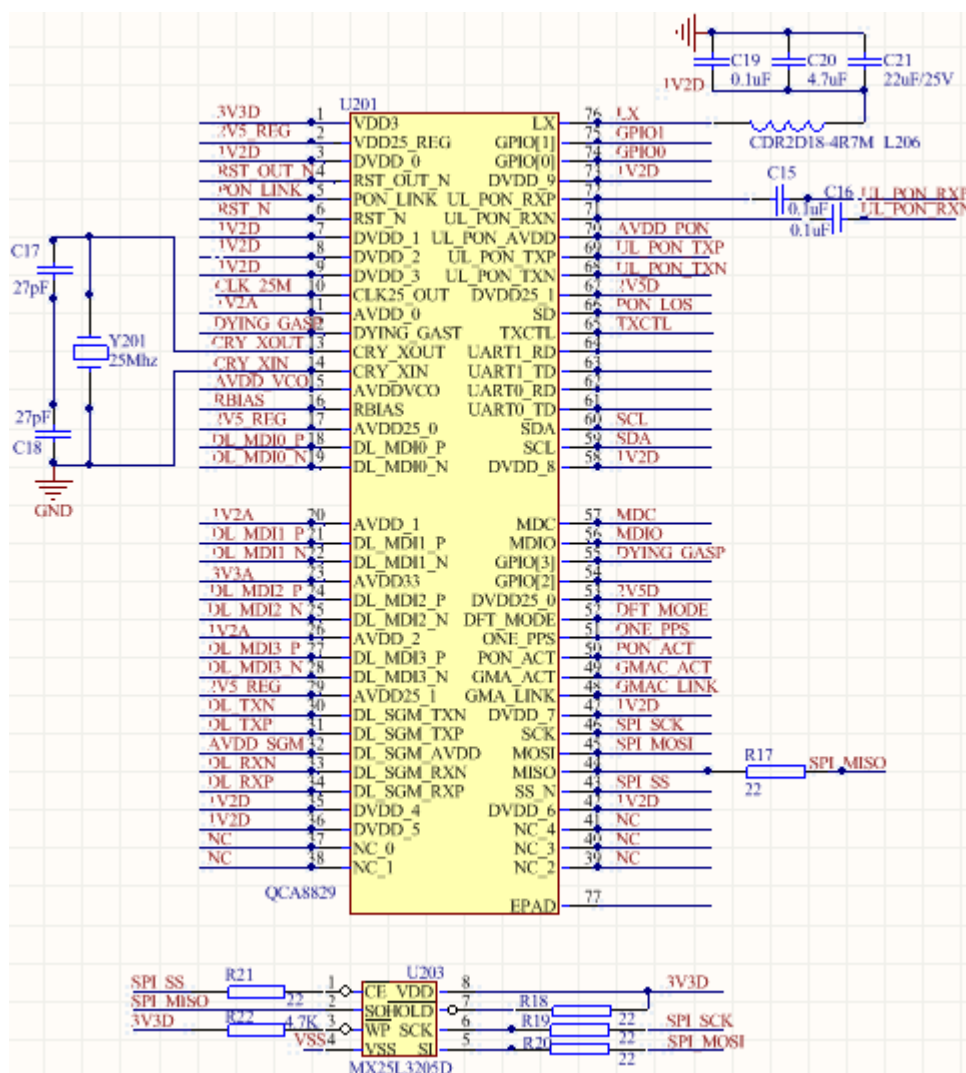


图 3-10 QCA8829 与 MX25L3205D 电路连接图

其中 SPI_MISO 为 SPI 数据传输引脚, 当其为主机时, 则该引脚为发送引脚, 当其为从机时, 该引脚为接收引脚; SPI_MOSI 则与 SPI_MISO 正好相反; SPI_SCK 为从机时钟; SPI_SS 为 SPI 设备片选信号, 低电平有效。WP 为写保护引脚, 低电平有效。

3.6 PCB 设计要求

由 3.3 章节相关分析可知，SFP EPON ONU 模块内部包含 3 处高速差分信号，而且 SFP 模块内部空间有限，为保证信号完整性，降低信号之间的反射和干扰，因此对 PCB 设计有如下要求：

- 1) 采用 4 层板。顶层为信号层，第二层为 GND 层，第三层为 VCC 层，第四层为信号层，这样将两层信号层分开，从而减小信号之间的串扰和噪声。
- 2) 高速差分信号线走线长度尽量一致，在信号线之间插入匹配电阻，减小交流耦合效应对周围电路阻抗影响。差分线之间尽量靠近，差分线对之间的间距保持 3 到 5 倍于差分线之间的间距，这样差分信号的相反感应磁场能相互抵消，且能减小 LVDS 信号对单端信号的干扰。
- 3) 电源滤波部分应考虑热拔插操作造成的电流浪涌现象，需要加入多级滤波电路。
- 4) 元器件尽量选择最小封装，在对元器件进行布局时，需要以主要元器件为中心，合理安排各个器件的位置，尽量减小模块之间连线长度，尽量保持信号线的传输方向一致、平行和等长。

3.7 本章小结

本章内容为总分结构，首先介绍了系统硬件的总体设计方案，并针对每个主要器件参数进行分析，证明了硬件设计的可行性。然后按照分母版和扣板设计的空间结构详细介绍了母板和扣板的电路设计，指出了 PCB 设计要求。

第 4 章 系统软件设计

4.1 系统软件总体设计

由于本设计 PON MAC 芯片为高通公司的 QCA8829 芯片，所以软件设计是在 QCA8829 SDK 基础之上进行开发的。该 SDK 整体结构参考了开源嵌入式启动平台 MicroMonitor，主要包括 umon_apps、umon_main、umon_ports 等三部分，umon_apps 主要包含应用模块，例如 OAM Client、ODM、驱动程序等内容；umon_main 主要包含 Host 和 Target 两部分，Host 为基于不同操作系统 umon 编译所需工具，Target 为目标开发板 CPU、flash、串口、网口初始化代码等；umon_port 为不同类型参考板 umon 镜像编译工具。SDK 结构分层如图 4-1 所示。

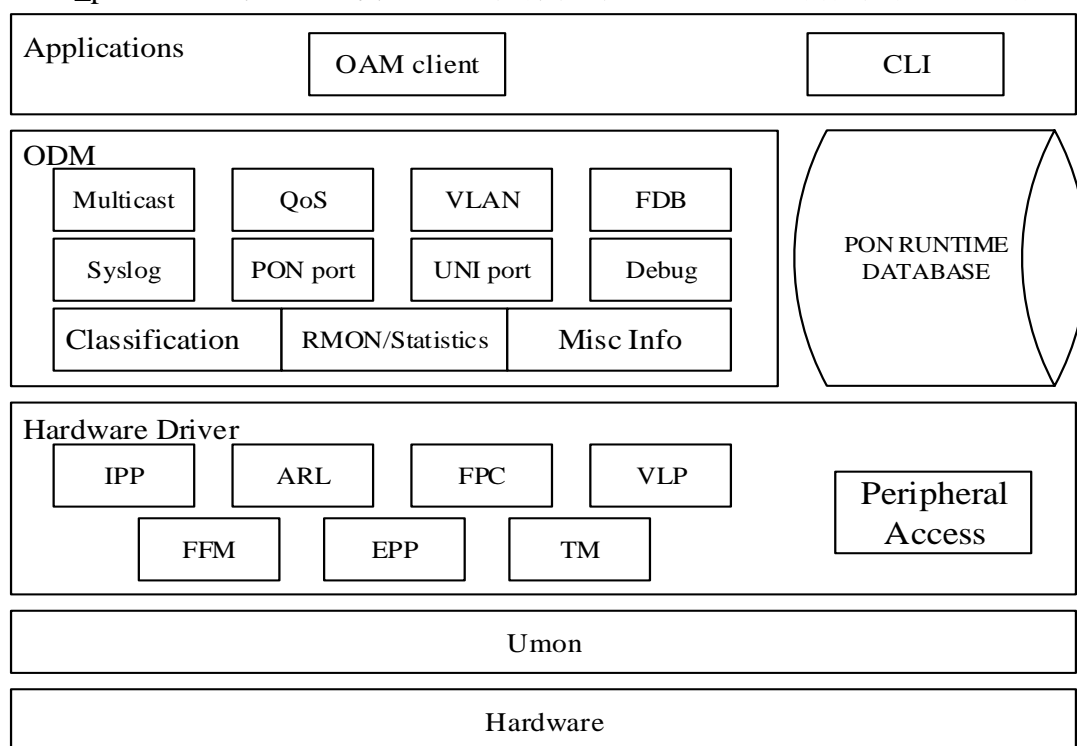


图 4-1 SDK 软件结构分层图

由图 4-1 可见，整个软件模块主要分为：应用层、ODM 层、驱动层、Umon 等四个部分。其中应用层主要包含 OAM 协议模块和 CLI 管理模块；ODM 层主要为应用程序提供接口；驱动层主要实现包处理和外围设备管理功能。Umon 为启动平台，负责引导 RTOS，并提供 TFS，可通过 xmodem 或 TFTP 固件升级。

本设计软件模块主要包含：数字诊断模块、ONU 模块电源管理、睡眠节能模块和以太网性能统计模块。表 4-1 为各模块主要涉及 SDK 层次和内容分布表。

表 4-1 本设计各模块涉及 SDK 层次和内容分布表

模块	涉及 SDK 层次	涉及相关内容
数字诊断模块	应用层 ODM 层 驱动层	OAM 扩展参数获取、OAM 逻辑认证、ODM PON 链路检测、复位检测、EEPROM 读写等
ONU 模块电源管理	应用层 ODM 层 驱动层	命令行管理、ODM 电源管理、各模块电源驱动层接口
睡眠节能模块	应用层 ODM 层	OAM 睡眠、ODM PON 口电源管理
以太网性能统计	应用层 ODM 层	OAM 以太网性能统计、ODM 层 RMON 接口

其中，数字诊断模块主要包括 OAM 组织具体操作扩展请求光模块数字诊断信息和《中国电信 SFP 封装的 PON ONU 模块技术要求》标准将相关信息写入到 EEPROM 相应地址要求，与 I2C 控制器、ODM 管理和 OAM 模块相关，模块设计按预编译指令 MOD_IN_SFP 嵌入到应用层、ODM 层和驱动层；ONU 模块电源管理主要是调用驱动层接口，设计 ODM 相应配置管理接口和命令行管理接口，与 CPU、PON、UNI、I2C、ODM 及 CLI 相关，模块设计按预编译指令 MOD_IN_PS 嵌入到应用层、ODM 层和驱动层；睡眠节能模块主要包括 OAM 组织具体操作扩展请求 PON 口节能相关信息和设置 PON 口节能参数，与 PON 接口、硬件定时器、ODM 及 OAM 模块相关；以太网性能统计主要是包括 OAM 组织具体操作扩展请求以太网性能统计信息和设置以太网性能统计参数，需要调用 ODM 层 STAT 模块接口。睡眠节能和以太网性能统计模块设计按预编译指令 MOD_IN_OAM_30 嵌入到应用层、ODM 层。

由上可见，数字诊断模块、睡眠节能模块、以太网性能统计模块均与 OAM 协议密切相关，在 CTC OAM2.1 版本中已经对光模块数字诊断信息做了定义，此处不用重新设计，而睡眠节能和以太网性能统计模块则没有定义，故必须对 OAM 模块添加新的内容，在 4.2 章节会重点分析 OAM 的结构及处理流程，在分模块软件设计中，给出了添加的 OAM 结构、函数接口以及 ODM 层接口设计的实现原理和代码实现；ODM 层为操作数据管理层，主要完成设备运行管理和维护，为上层提供接口，结构相对 OAM 而言简单些，所以在本设计中只给出了添加的接口设计主要函数，并未像 OAM 协议做详细分析。

4.2 OAM 协议相关分析

OAM 即 Operation Administration and Maintenance。EPON 设备通过 OAM 子层能为运营商提供操作、管理、维护相关实现机制。OAM 子层通过交互 OAMPDU 来进行通信。CTC 在以太网 OAM 的基础上进行了扩展，例如 OAM 扩展发现、OAM 扩展事件通告、组织特定操作等相关内容^[41]。

4.2.1 OAM 协议结构及实现原理分析

IEEE802.3ah 标准定义了 OAM 协议的帧结构，具体内容如表 4-2 所示。

表 4-2 OAM 帧结构

字节数	内容	值
6	DA	01:80:C2:00:00:02
6	SA	源 MAC 地址
2	Type/length	0x8809（慢协议）
1	Subtype	0x03
2	Flags	状态位
1	Opcode	操作码
42-1496	Data	数据
4	FCS	帧校验序列

由表 4-2 可知，OAM 协议类型码为 0x8809，子类型为 0x03，其中 Flags 表示链路状态，opcode 表示操作码，Data 为数据，FCS 为帧校验序列。由 IEEE 802.3ah 对 flags 定义可知 flags 共有 7 种状态，具体位和状态信息如表 4-3 所示。

表 4-3 flags 具体位和状态信息

flags 位	状态信息	含义
BIT 6	remote stable	远端稳定
BIT 5	remote evaluating	远端趋于稳定状态
BIT 4	local stable	本地稳定
BIT 3	evaluating	本地趋于稳定状态
BIT 2	critical event	紧急事件
BIT 1	dying gasp	致命故障
BIT 0	link fault	链路故障

OAM 帧的内容根据 opcode 值不同，又可分为信息、事件通告、变量请求、变量响应、回环检测、机构特定等不同操作。中国电信针对中国 EPON 设备通信要求对 EFM OAM 定义的操作进行了扩展，包括扩展 OAM 扩展发现、扩展 OAM 事件通告、扩展机构特定、扩展属性和操作等，具体内容如表 4-4 所示。

表 4-4 不同 opcode 对应操作

Field code	含义	值
OAMPDU_FIELD_CODE_INFO	信息	0x00
OAMPDU_FIELD_CODE_EVENT_NOTIFICATION	事件通告	0x01
OAMPDU_FIELD_CODE_VARIABLE_REQUEST	变量请求	0x02
OAMPDU_FIELD_CODE_VARIABLE_RESPONSE	变量响应	0x03
OAMPDU_FIELD_CODE_LOOPBACK_CONTROL	回环控制	0x04
OAMPDU_FIELD_CODE_ORG_SPEC	组织特定	0xfe
OAMPDU_FIELD_CODE_RESERVED	保留	0xff

OAMPDU_FIELD_CODE_INFO 用于 EFM 对端发现,处于握手阶段的 OAM 实体以一定周期发送 OAMPDU 检测链路的连通性,当设备接收到含有对端设备紧急事件消息,则向网关发送远端设备故障信息。中国电信对 OAMPDU_FIELD_CODE_INFO 进行了扩展,除了本地和远端链路检测外,在 CTC 扩展发现组织特定 TLV 中,还包含了 OUI 检测, OAM 版本协商等内容。

OAMPDU_FIELD_CODE_EVENT_NOTIFICATION 用于链路监控,当设备检测到错误帧数超限、错误误码超限、错误帧秒事件,则向对端设备发送故障信息。中国电信对 OAMPDU_FIELD_CODE_EVENT_NOTIFICATION 也进行了扩展,加入了组织特定 TLV 和相关对象告警通告,用于记录告警事件、对象、时间等信息,方便网络诊断和维护。

OAMPDU_FIELD_CODE_LOOPBACK_CONTROL 用于控制远端设备的环回状态,主设备可以通过 OAMPDU 来开启或者关闭从设备端的环回功能。

OAMPDU_FIELD_CODE_ORG_SPEC 用于厂商自定义功能,参照中国电信 (OUI=0x111111) EPON 标准,主要内容如表 4-5 所示。

表 4-5 CTC 扩展 OAM 定义的厂商具体操作

Ext opcode	含义	值
OAMPDU_CTC_EXT_OPCODE_EXT_VAR_REQ	扩展变量请求	0x01
OAMPDU_CTC_EXT_OPCODE_EXT_VAR_RESP	扩展变量响应	0x02
OAMPDU_CTC_EXT_OPCODE_SET_REQ	扩展设置请求	0x03
OAMPDU_CTC_EXT_OPCODE_SET_RESP	扩展设置响应	0x04
OAMPDU_CTC_EXT_OPCODE_XXX (泛指类似操作)	XXX 操作	0xXX

由表 4-5 可知,CTC 扩展 OAM 定义的厂商具体操作主要包括变量请求和响应、设置请求和响应、ONU 授权、ONU 软件下载、CTC 三重搅动数据加密和动态带宽分配等内容,其中扩展变量请求和扩展设置请求又按照不同的分支 (branch) 进行处理,具体内容如表 4-6 所示。

表 4-6 扩展变量和设置操作分支

branch	含义	值
OAMPDU_CTC_BRANCH_STANDARD_ATTR	标准属性	0x07
OAMPDU_CTC_BRANCH_STANDARD_ACTION	标准操作	0x09
OAMPDU_CTC_BRANCH_INSTANCE_INDEX_OF_OBJECT_2_0	OAM2.0 实例索引	0x36
OAMPDU_CTC_BRANCH_INSTANCE_INDEX_OF_OBJECT_2_1	OAM2.1 实例索引	0x37
OAMPDU_CTC_BRANCH_EXT_ATTR	扩展属性	0xc7
OAMPDU_CTC_BRANCH_EXT_ACTION	扩展操作	0xc9

由表 4-6 可知, OAM 扩展分支主要包括 CTC 扩展 OAM 操作对象实例索引、标准属性、动作和扩展属性和动作; 各个分支又按照不同的叶 (leaf) 进行处理, 其中 CTC 分支标准属性对应的叶如表 4-7 所示。

表 4-7 CTC 分支标准属性对应叶

Leaf	值
OAM_CTC_STANDARD_ATTR_LEAF_PHY_ADMIN_STATE	0x0025
OAM_CTC_STANDARD_ATTR_LEAF_PHY_ADMIN_CONTROL	0x0005
OAM_CTC_STANDARD_ATTR_LEAF_AUTO_NEG_ADMIN_STATE	0x004f
OAM_CTC_STANDARD_ATTR_LEAF_AUTO_NEG_LOCAL_TECH_ABILITY	0x0052
OAM_CTC_STANDARD_ATTR_LEAF_XXX (泛指类似 leaf)	0xXXX

CTC 分支标准操作对应的叶如表 4-8 所示。

表 4-8 CTC 分支标准操作对应叶

leaf	值
OAM_CTC_STANDARD_ACTION_LEAF_AC_PHY_ADMIN_CONTROL	0x0005
OAM_CTC_STANDARD_ACTION_LEAF_AC_AUTO_NEG_RESTAR_AUTO_CONFIG	0x000b
OAM_CTC_STANDARD_ACTION_LEAF_AC_AUTO_NEG_ADMIN_CONTROL	0x000c

CTC 分支扩展属性应的叶如表 4-9 所示。

表 4-9 CTC 分支扩展属性对应叶

Leaf	值
OAM_CTC_EXT_ATTR_LEAF_ONU_SN	0x0001
OAM_CTC_EXT_ATTR_LEAF_FIRMWARE_VER	0x0002
OAM_CTC_EXT_ATTR_LEAF_CHIPSET_ID	0x0003
OAM_CTC_EXT_ATTR_LEAF_ONU_CAPA_1	0x0004
OAM_CTC_EXT_ATTR_LEAF_XXX (泛指类似 leaf)	0xXXX

CTC 分支扩展操作对应的 leaf 如表 4-10 所示。

表 4-10 CTC 分支扩展操作对应叶

Leaf	值
OAM_CTC_EXT_ACTION_LEAF_REBOOT_ONU	0x0001
OAM_CTC_EXT_ACTION_LEAF_SLEEP_CONTROL	0x0002
OAM_CTC_EXT_ACTION_LEAF_AC_FAST_LEAVE_ADMIN_CONTROL	0x0048

leaf	值
OAM CTC_EXT_ACTION_LEAF_IAD_OPERATION	0x006c
OAM CTC_EXT_ACTION_LEAF_SIP_DIGIT_MAP	0x006d
OAM CTC_EXT_ACTION_LEAF_AC_MULTI_LLID_ADMIN_CONTROL	0x0202

leaf 为扩展 OAM 协议端点，不同 leaf 对应相应的处理函数，例如：在 CTC 扩展属性分支对应叶中 OAM CTC_EXT_ATTR_LEAF_ONU_POWER_SAVING_CAPABILITIES 对应为 ONU 节能能力查询，则在相应 leaf 处理函数中返回 ONU 支持 PON 口节能的能力。图 4-2 为示例 OAM 帧结构分析。

目的MAC	源MAC	OAM 类型	子类型
0x00000000 0x01 0x80 0xc2 0x00 0x00 0x02 0x00 0x00 0x00 0x11 0x11 0x11 0x88 0x09 0x03 0x00	0x00000010 0x50 0xfe 0x11 0x11 0x11 0x01 0xc7 0x00 0x0d 0x02 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00		
本地远端稳定	组织特定操作	OUI	变量获取 扩展属性 节能能力 变量宽度

图 4-2 示例 OAM 帧结构分析

图 4-2 所示为 OLT 查询 ONU 节能能力 OAMPDU，报文长度为 64 字节，填充部分为 0x00，未列出。在 OAM 处理函数中，分不同的段对 OAM 各字节内容逐层进行解析，若查找到相应的 leaf 则调用 OAM 层对应函数进行处理，将结果通过 OAM 发送模块返回给 OLT。在组织特定操作中，还包括软件下载、ONU 授权、CTC 三重搅动加密、DBA 等相关操作，在 OAM 处理函数中，若解析到对应操作，则调用相应处理函数进行处理，将返回结果发送给 OLT。

4.2.2 本设计主要涉及 OAM 结构分析

根据 4.1 及 4.2 章节相关内容分析，我们知道本设计中涉及到 OAM 协议处理的模块对应 ext.opcode、branch 和 leaf。表 4-11 为各个模块对应 OAM 扩展操作、分支、叶。

表 4-11 各模块对应 OAM 操作、分支、叶

模块名称	ext.opcode	branch	leaf
数字诊断模块	0x01 0x02	0xc7	0x0005
CTC 睡眠节能模块	0x01 0x02 0x03 0x04	0xc7 / 0xc9	0x000c 0x000d 0x000e / 0x0002
CTC 性能统计模块	0x01 0x02 0x03 0x04	0xc7	0x00b1 0x00b2 0x00b3

在表 4-11 中，ext.opcode 的值对应 OAM 变量请求、变量响应、设置请求、设置响应等 4 种操作，branch 对应标准属性、扩展属性、标准操作、扩展等 4 种分支，leaf 对应具体内容。对应含义可参考 4.2 章节相关内容或者《中国电信 EPON 设备技术要求》附录 D 相关内容。

4.3 数字诊断模块设计

数字诊断是现代智能 SFP 模块的基本功能，SFF-8472 对其进行了标准化。SFP 光模块在运行过程中通过 I2C 总线将相关信息存储在 EEPROM 存储区，网络管理单元可通过 I2C 总线实时获取光模块温度、工作电压、偏置电流、发射光功率、接收光功率等信息，通过对这些参数的测量，网络管理单元可以迅速定位网络异常单元，既方便光纤链路的维护，也提高了系统整体可靠性。其中 EEPROM A0h 区域存储模块型号、生产厂商、设备序列号、器件速率参数等固定信息；A2h 区域存储光模块温度、电压、电流、光功率等实时等数字诊断和监控信息。《中国电信 EPON 设备技术要求》针对 ONU 的功能需要对数字诊断功能进行了扩展，例如通过 OAM 协议查询 ONU 光模块温度、电压、光功率等信息，可实现在网管上查询和定位光模块异常情况。

4.3.1 数字诊断模块实现原理分析

由于 I2C 总线为多主机总线，每个连接设备都有其独立地址，故而将 QCA8829、MAX24003、EEPROM 连接到一对 I2C 总线上，由于 I2C 总线协议提供冲突检测、仲裁机制和数据保护机制，所以不需要考虑多主机通信冲突导致数据损坏的情况。数字诊断模块的通信关系如图 4-3 所示。

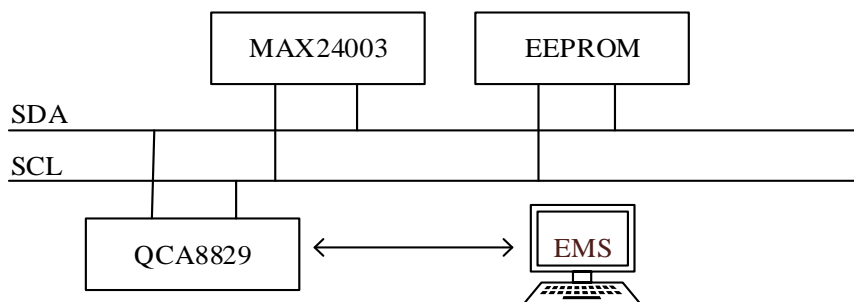


图 4-3 数字诊断模块通信关系示意图

图 4-3 中，QCA8829 和 MAX24003 均为 I2C 通信主机，EEPROM 为从机，数字诊断模块可以分成两部分：QCA8829 与 EEPROM 之间的 I2C 总线通信模块和 MAX24003 与 EEPROM 之间的 I2C 总线通信模块。模块正常工作时，MAX24003 从自身传感器读取相应的信息，然后写入到 EEPROM；当 EMS 通过 OAM 向 QCA8829 请求光模块相关数字诊断信息时，QCA8829 则读取 EEPROM 相应地址的相关数字诊断信息上报给 EMS。

在《中国电信 SFP 封装的 PON_ONU 模块技术要求》标准中, 扩展要求将 LOID PWD、PON 链路状态信息、恢复出厂设置状态、DyingGasp 等信息写入到 EEPROM 中, 以方便对 SFP PON ONU 模块的诊断和维护, 为满足该功能需要, 可以使 QCA8829 在适当的软件模块和流程中加入 EEPROM 读写函数, 以实现相应的功能。

4.3.2 数字诊断模块软件实现

1) QCA8829 与 EEPROM 之间的 I2C 通信模块: 获取数字诊断信息。其处理流程如图 4-4 所示。

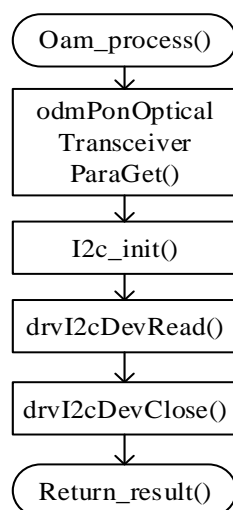


图 4-4 通过 OAM 获取数字诊断信息模块处理流程

图 4-4 中, OAM 处理函数 Oam_process()解析到 CTC OAM 相应 leaf (对应 branch = 0xc7 leaf = 0x0005)则调用 ODM 层获取光模块参数函数 odmPonOptical Transceiver ParaGet()函数, 然后对 I2C 模块进行初始化, 设置 QCA8829 为主机模式, EEPROM 则为从机模式, 读取 EEPROM 相应的数字诊断信息, 然后通过 CTC OAM 响应函数上报光模块的数字诊断信息, 最后关闭 I2C 控制器。

2) MAX24003 与 EEPROM 之间的 I2C 总线通信模块。

参考 MAX24003 芯片手册可知, MAX24003 默认支持外扩 EEPROM 实现数字诊断功能, 故将 MAX24003 的 I2C 主机线路 (SCL_MASTER 和 SDA_MASTER) 与 EEPROM 相连。软件方面, 将 MAX24003 配置为 I2C 主机模式。MAX24003 则会实时向 EEPROM 中写入数字诊断信息。

3) 实现《中国电信 SFP 封装的 PON_ONU 模块技术要求》标准扩展要求模块。

a) LOID 和 PWD 处理

《中国电信 SFP 封装的 PON_ONU 模块技术要求》标准 4.2 章节要求 SFP PON ONU 模块支持将 LOID 和 PWD 写入到 EEPROM A2h 区域的 190~225 字节。要实现该功能,可以在 LIOD 和 PWD 设置函数 envAuthLoidSet()内加入 I2C 写函数 drvI2cDevWrite()将 LOID 和 PWD 写入 EEPROM 对应地址,这样在每次调用 envAuthLoidSet()函数设置新的 LOID 和 PWD 时,能将其同步到 EEPROM 中。

b) 恢复出厂设置功能处理

根据《中国电信 SFP 封装的 PON_ONU 模块技术要求》标准 4.3 章节相关内容可知, SFP PON ONU 设备对恢复出厂设置功能支持模块接收到主设备写 EEPROM A2h 区域 226 字节的指令 0x01 后,应触发 PON MAC 芯片恢复出厂设置; PON MAC 芯片完成恢复出厂设置操作后,将 EEPROM A2h 区域 226 字节更改为 0x00。其基本实现流程如图 4-5 所示。

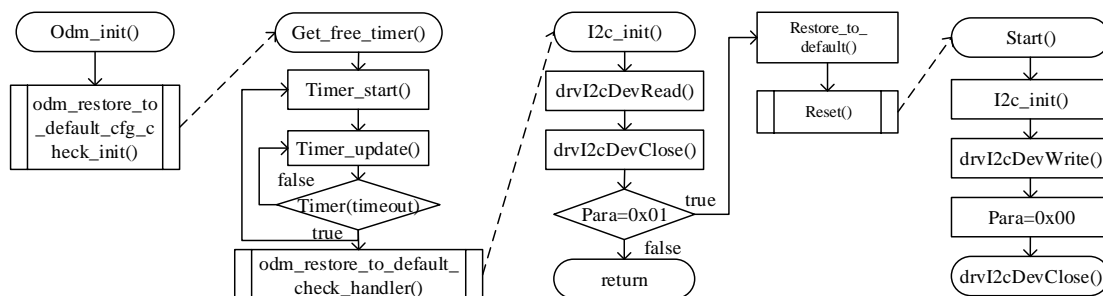


图 4-5 恢复出厂设置功能处理流程

图 4-5 中,在 ODM 层初始化函数中设计恢复出厂设置状态位检测函数 odm_restore_to_default_cfg_check_init(),为了避免 EEPROM 频繁读写给 CPU 带来严重负担,本设计采用了循环触发定时机制,间隔 1S,调用 drvI2cDevRead()函数读取 EEPROM A2h 区域 226 字节内容,若为 0x01,则调用 sysDefaultCfg()函数和 drvMiscReset()函数恢复出厂设置并重启模块,否则持续轮询。在模块复位之后,在启动函数 start()中调用 drvI2cDevWrite()函数将 EEPROM 0xA2h 区域 226 字节内容修改为 0x00。

c) PON 链路状态处理

根据《中国电信 SFP 封装的 PON_ONU 模块技术要求》标准 4.5 章节对 SFP 封装的 PON ONU 模块应支持将 PON 链路的状态写入 EEPROM A2h 区域 227 字节的功能要求,可以 ODM 层 PON 口中断处理函数_odmPonIntHandler()中加入对状态写 EEPROM 操作,将 PON 链路状态写入对应地址。

d) 发射机电源状态处理

根据《中国电信 SFP 封装的 PON_ONU 模块技术要求》标准 4.6 章节对 PON 口发射机电源状态写入 EEPROM A2h 区域 228 字节的功能需求,可以在驱动层 PON 发射机设置函数 `drvPonTxEnableSet()`中, 加入将发射机电源状态写入 EEPROM 对应字节的操作。

e) Dying Gasp 相关处理

根据《中国电信 SFP 封装的 PON ONU 设备技术要求》标准 4.5 章节对 Dying Gasp 消息的处理的要求,在硬件上,将 SFP_PLUG pin7 与 QCA8829 Dying Gasp 引脚连接;在软件上,可以调用驱动层 Dying Gasp 处理函数 `drvPonDyingGasp ParaSet()`将其设置为逻辑电平触发,在检测到 Dying Gasp 引脚电压低于 0.85V 时,调用 OAM 事件通告函数向 OLT 上报 Dying Gasp 消息。

4.4 电源管理模块设计

在 QCA8829 芯片中,有许多外围接口和模块,在我们平时正常使用的时候,有些未使用到的模块还在全速运转,这样不仅增加了系统整体功耗,而且还会增加设备的发热量,不利于设备散热。例如在网络流量较小的时候,CPU 还是以全速运转,这样不仅效率低,而且不利于 SFP 模块的散热。像这样的模块还有 UNI 端口、PON 端口、I2C 总线控制器等模块,如果在不影响设备正常使用的情况下,用户能根据需要关闭未使用的模块或者减慢 CPU 的运行速率^[42],这样就能进一步降低系统的功耗、降低设备的散热量、提高设备的使用效率^[43-44]。

4.4.1 电源管理模块实现原理分析

参考 QCA8829 寄存器手册可知 QCA8829 支持模块电源管理功能,包括 CPU (支持低功耗模式)、TM (流量管理)、PPE (包处理引擎)、GMAC、PMAC、I2C 控制器等模块。由于 TM 和 PPE 会直接影响运营商管理,不适合用户配置,因此本设计只针对 QCA8829 的 UNI、PON、I2C、CPU 模块的电源设计了相应的控制接口,并加入了相应的命令,方便用户根据使通过 telnet 登陆命令行自行关闭或者打开特定模块的电源开关。在本设计中,将电源管理接口及其对应命令行归类为节能模块,该模块软件设计结构如图 4-6 所示。

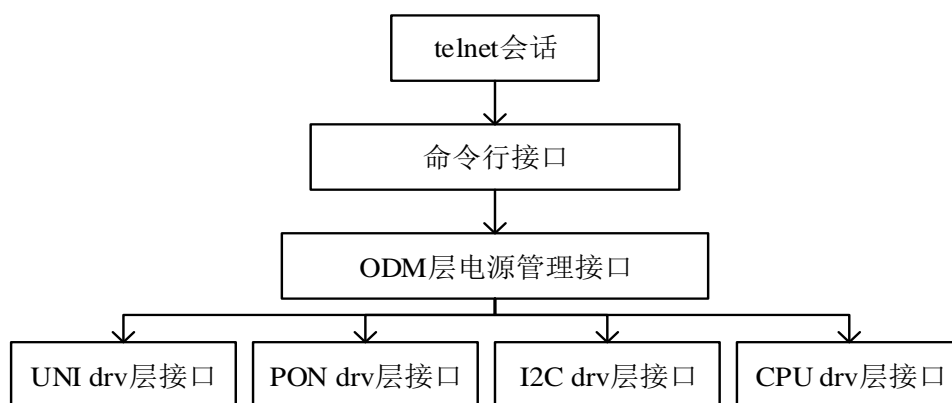


图 4-6 节能配置模块软件结构

其中，本设计主要集中于驱动层接口、ODM 层电源管理接口和命令行接口设计。QCA8829 在硬件上提供了丰富的接口，参考 QCA8829 相关寄存器手册可查询支持电源管理的模块，因此调用寄存器读写函数，即可完成驱动层模块电源控制接口设计。例如从寄存器手册查阅到 PMAC 节能控制寄存器地址为 $0x00200000$ （基地址）+ $0x0000$ （段地址）*4 + $0x0b$ （偏移地址）*4，其中该地址 bit 1 为 PON MAC 发送激光器节能控制器，bit 0 为接收激光器节能控制，为保证安全性操作，可调用写寄存器函数 `drvRegFieldWrite` 来控制 PON MAC 发送和接收激光器节能状态，将其封装成驱动层函数供 ODM 层节能管理模块调用。ODM 层将各模块驱动层接口封装，加上设置，获取、配置保存、配置获取等操作即可形成 ODM 层节能模块函数接口供命令函调用。命令行接口则调用 ODM 层函数接口，配合 `cli_parser` 命令行解析器，即可完成命令行相关操作。

4.4.2 电源管理模块软件实现

1) 定义预编译指令 `#ifdef MOD_IN_PS`，将代码归类为节能模块，加到工程。

在工程模块定义文件 `app_define.h` 中加入 `#define MOD_IN_PS`，在设计与节能模块相关的代码的前面加入 `#ifdef MOD_IN_PS`，在代码后面加入 `#endif` 指令，这样可以根据 `app_define.h` 中相关模块定义情况来决定是否编译该模块。

2) 创建 ODM 层节能模块实现源代码文件 `odm_ps_tb.c` 和 `odm_ps_tb.h` 头文件。

源文件 `odm_ps_tb.c` 主要实现节能配置模块的初始化、配置获取、参数设置、配置导入、配置保存、配置生效、参数显示等功能。头文件 `odm_ps_tb.h` 主要定义节能配置数据结构和相关函数的声明。在创建好相关文件后，需要将其加入 odm 层 `makefile` 文件中。主要数据结构和函数如下所示。

```
static ODM_PS_OBJECTS_t g_odmppsfcfg;//ODM 层全局节能配置结构体
SW_STATUS odm_ps_cfg_get(ODM_PS_OBJECTS_t* ppsfcfg)
//ODM 层节能配置获取函数，实现方式为 memcpy g_odmppsfcfg
SW_STATUS odm_ps_cfg_enable(ODM_PS_OBJECTS_t* ppsfcfg)
//ODM 层节能配置生效函数，实现方式为根据全局节能配置相关参数，调
用驱动层接口，开启或者关闭模块节能模式。
SW_STATUS odm_ps_cfg_set(ODM_PS_OBJECTS_t* ppsfcfg)
//ODM 层节能配置设置函数，实现方式为 memcpy ppsfcfg 到 g_odmppsfcfg
SW_STATUS odm_ps_cfg_init(void)//ODM 层节能配置初始化函数
SW_STATUS odm_ps_cfg_show(SW_UINT8 fd)//ODM 层节能配置显示函数，
实现方式为在命令行会话中打印全局节能配置内容。
SW_STATUS odm_ps_tb_cfg_load(SW_VOID)//ODM 层节能配置导入函数，
实现方式为调用 drv_flash_read 函数读取配置存储区相应内容
SW_STATUS odm_ps_tb_cfg_save(SW_VOID)//ODM 层节能配置保存函数，
实现方式为调用 drv_flash_write 函数将节能配置写入 flash 相应配置存储区
```

3) 在命令行加入相应的命令。

a) 显示节能配置信息命令：show ps tb cfg

b) 设置节能模块电源状态命令：

```
ps  UNI <LIST:enable,disable:UNI> PON <LIST:enable,disable:PON>
    I2C <LIST:enable,disable:I2C> CPU <LIST:enable,disable:CPU>
```

为了使命令行符合思科 IOS（网络操作系统）命令行规范（按 tab 键能自动提示和补全命令行），本设计利用了 linux 开源 cli_parser 命令行解析包工具，以文本形式书写命令，保存为 ps.cli 形式，利用 mk_parser.py 脚本在 linux 环境下生成命令解析树代码，再去掉根，将其嵌入到与其相同等级命令之中，进而将其加入到整个命令行解析树中，设计对应的命令行接口，使得命令行能自动解析、调用 ODM 层函数来管理各模块节能状态。命令行解析函数如下所示：

```
cparser_result_t cparser_cmd_pub_show_ps_tb_cfg (cparser_context_t
*context); //解析显示节能配置参数命令。

cparser_result_t cparser_cmd_ps_UNI_UNI_PON_PON_I2C_I2C_CPU_CPU
(cparser_context_t * context,SW_INT8 ** uni_ps_sta_ptr, SW_INT8 **
pon_ps_sta_ptr, SW_INT8 **i2c_ps_sta_ptr, SW_INT8 **cpu_ps_sta_ptr);
//解析设置各接口节能状态命令。
```

4.5 CTC 睡眠节能模块设计

随着PON系统能耗在通信行业能耗比例的上升，中国电信在最新的EPON设备技术要求3.0版本标准中添加了ONU PON口节能睡眠模式^[45-46]。本设计在仔细阅读和理解了该标准18章节及附录D.18-20相关内容的基础上，在SDK中加入了相应模块，并针对该模块测试，设计了相应的命令行测试模块。

4.5.1 CTC 睡眠节能模块实现原理分析

ONU睡眠节能机制主要是在OLT的控制下完成的，OLT负责检测ONU的上下行数据流量来决定ONU是否进入睡眠状态^[47]。ONU在进入睡眠状态后，为保证数据业务正常，OLT需要缓存发给ONU的下行数据，ONU需要缓存用户侧发送的上行数据。在容许提前唤醒模式下，ONU通过检测UNI端口数据流量决定是否提前退出睡眠模式。在禁用提前唤醒模式下，ONU则只能被OLT设定的睡眠定时器唤醒。在ONU退出睡眠状态后，将缓存的数据发送出去。为避免因为MPCP的超时导致的ONU解注册，ONU的睡眠时间应小于50ms，这样处于节能状态的ONU才能保持“注册”状态。图4-7为CTC睡眠模式示意图。

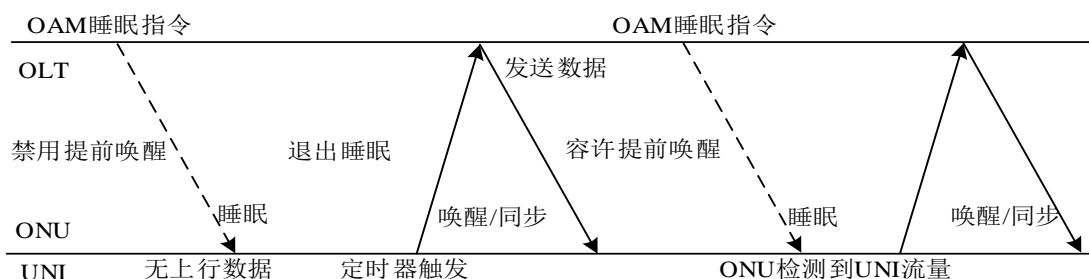


图 4-7 EPON 系统睡眠模式示意图

在图 4-5 中，OLT 在发送数据之前必须与 ONU 协商 OAM 版本，查询 ONU 发射机、接收机是否支持睡眠模式，在 CTC 扩展 OAM 发现中，若 OLT 支持 OAM3.0 版本，则可能支持睡眠模式。在满足睡眠节能条件前提下，OLT 通过统计 ONU 上下行数据流量，且在 EMS 容许情况下，控制 ONU 进入睡眠状态。

OLT 对 ONU 睡眠节能控制以周期性发送 sleep_control 配置命令为主，假设 ONU 满足睡眠条件，则 OLT 会发送一条 sleep_config 的 OAMPDU 数据给 ONU，ONU 根据 OAMPDU 内容，提取 sleep_duration、wake_duration、sleep_flag、sleep_mode 等配置信息，然后将其保存到配置管理区缓存。ONU 在 sleep_flag = 0x01 或者 0x02 的条件下，启动 ONU 睡眠全局定时器，定时时间为 sleep_duration_max，在全局定时器超时前接收到 sleep_control 消息且 sleep_flag = 0x01 或者

0x02 时, 则重置定时器, 否则唤醒 ONU, 关闭定时器。在 ONU 接收到 sleep_control 且 sleep_flag=0x01 或 0x02 的前提下, 可分 3 种情况分析, 如图 4-8 至 4-10 所示。

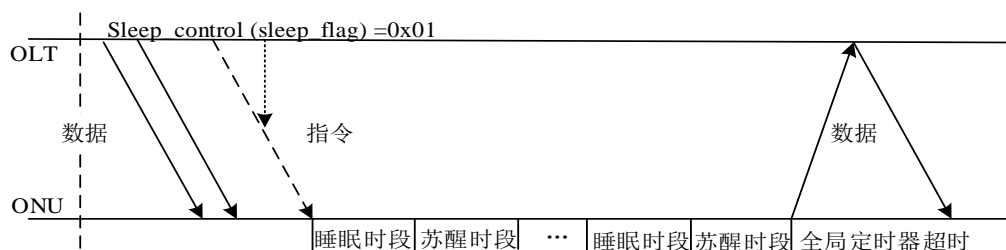


图 4-8 进入睡眠模式后未收到 sleep_control 消息情况示意图

在图 4-8 中, ONU 收到 sleep_config 睡眠消息, 启动睡眠定时器, 在睡眠定时器超时后, 关闭睡眠定时器, 转入唤醒状态, 开启唤醒定时器, 等唤醒定时器超时后关闭睡眠定时器, 再转入睡眠状态, 如此循环反复。中间未收到任何 sleep_config 消息, 直到全局定时器超时, 退出睡眠状态。

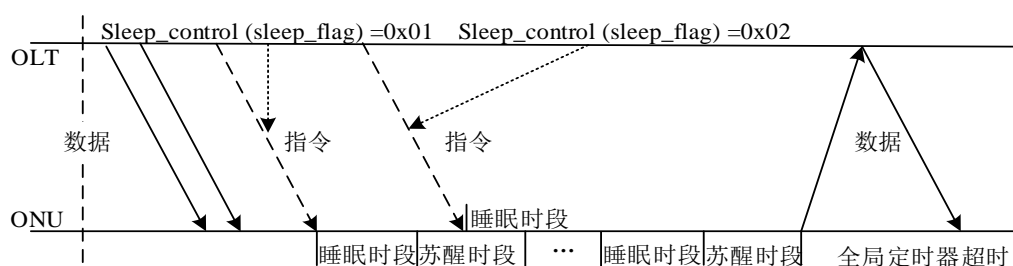


图 4-9 进入睡眠模式后收到睡眠消息情况示意图

在图 4-9 中, ONU 收到 sleep_config 睡眠消息, 启动睡眠定时器, 睡眠结束后进入唤醒状态, 唤醒状态收到新的睡眠指令, 重置睡眠定时器, 进入新的睡眠循环, 直到接收到唤醒消息或全局定时器超时, 退出睡眠状态。

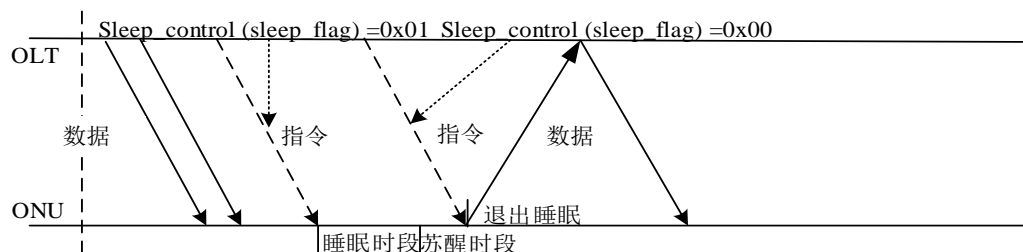


图 4-10 进入睡眠模式后收到唤醒消息情况示意图

在图 4-10 中, ONU 收到 sleep_config 睡眠消息, 启动睡眠定时器, 在睡眠结束后进入唤醒状态, 在唤醒状态收到新的唤醒消息, 则退出睡眠状态。

4.5.2 CTC 睡眠节能模块软件实现

1) 根据《中国电信 EPON 设备技术要求 V3.0》附录 D.17 至 D.19 对睡眠节能功能的描述，定义相关数据结构和函数，并将其归类到 OAM_30 模块。

a) 在工程模块定义文件 app_define.h 中加入#define MOD_IN_OAM_30 命令，将睡眠节能模块代码归类到 MOD_IN_OAM_30

b) 定义 CTC 扩展属性 branch 中睡眠节能功能对应 leaf

与睡眠节能相关的 CTC 扩展属性 branch 主要包括 CAPABILITIES_3(ONU 对 IPv6 和光模块发射机电源强制关闭支持能力)、PS_CAPABILITIES (ONU 节能支持能力)、PS_CONFIG(节能配置)等 leaf, 对应的值分别 0x000c、0x000d、0x000e, 主要用来查询 ONU 睡眠节能相关支持能力和配置。

c) 定义 CTC 扩展操作 branch 中睡眠节能功能对应 leaf

与睡眠节能相关的 CTC 扩展操作 branch 有 PS_SLEEP_CONTROL (睡眠节能配置) leaf, 对应的值为 0x0002, OLT 下发 sleep_control 消息控制 ONU 进入或者退出睡眠状态, sleep_control 消息包含 sleep_duration、wake_duration、sleep_flag、sleep_mode 等参数。

d) 定义 CTC 扩展属性 branch 中睡眠节能相关枚举类型数据结构

在睡眠节能相关 CTC 扩展 branch、leaf 处理模块, 包含一些特定的数据结构。主要包括 PS_IPV6_SUPPOTRED_e (IPv6 支持)、PS_POWER_SUPPLY_CONTROL_e (电源控制能力支持)、PS_EARLY_WAKEUP_SUPPOTRED_e (提前唤醒功能支持)、PS_SLEEP_FLAG_e (睡眠标识)、PS_SLEEP_MODE_t (睡眠模式) 等枚举类型。

e) 定义睡眠节能 OAM 数据处理相关结构体

CTC 扩展 OAM 结构类似树形结构, 在定义不同分支处理结构时, 可重构共有部分, 简化数据结构, 例如 PS_CAPABILITIES_3_s 结构包括 branch、leaf、variable_Width 等相同结构, 因此将其定义为一个新的 VARIABLE_DESCRIPTOR_t 结构, 则可在其他结构复用。与睡眠节能 OAM 相关的结构与 CTC 扩展属性 branch 及操作 branch 相关 leaf 对应, 主要包括 PS_CAPABILITIES_3_s、PS_CAPABILITIES_s、PS_CONFIG_s 和 PS_SLEEP_CONTROL_s 等结构。

2) 设计睡眠节能相关 leaf 处理函数。

睡眠节能相关 leaf 对应处理函数及功能如表 4-12 所示。

表 4-12 睡眠节能相关 leaf 对应处理函数及功能

leaf	处理函数	功能
CAPABILITIES_3	ctcExtVarReqCapabilities_3Get()	获取 ONU 对 IPV6、发射机接收机节能、SLA 最大数目支持
PS_CAPABILITIES	ctcExtVarRePsCapabilitiesGet()	获取 ONU 发射机接收机节能、提前唤醒状态
PS_CONFIG	ctcExtVarReqPs ConfigGet()	获取 ONU 节能配置
PS_SLEEP_CONTROL	_ctcExt SetPs_Sleep_Control()	设置 ONU 睡眠节能参数

其中只有 ctcExtVarReqPs ConfigGet()函数和_ctcExt SetPs_Sleep_Control()函数需要调用 ODM 层接口来实现相应功能,其他函数可根据 ONU 支持情况返回相应参数。

3) 将睡眠节能相关 leaf 处理函数加入到 CTC 扩展处理函数中。

在 CTC 扩展变量请求处理函数_ctcExtVariReqProcess()中加入对应 CAPABILITIES_3、PS_CAPABILITIES、PS_CONFIG 对应 leaf 处理函数。在 CTC 扩展设置请求处理函数_ctcExtSetReqProcess()中加入 PS_SLEEP_CONTROL 对应 leaf 处理函数。

4) 设计 ODM 层睡眠节能相关参数、配置和状态处理函数。

睡眠节能协议主要参数有 SleepDurationMax (ONU 最大睡眠时间)、EarlyWakeup Status (提前唤醒状态)、odm_ps_sleep_config (睡眠参数,包括 SleepDuration、WakeDuration、SleepFlag 和 SleepMode),因此需要对各个参数需要设计获取和设置两种函数接口。ODM 层睡眠节能相关函数接口定义如下:

```
SW_STATUS odm_ps_sleep_init(void);//ODM 层睡眠节能模块初始化函数
SW_STATUS OdmGetPsEarlyWakeupStatus (ODM_PS_EARLY_WAKEUP_
STATUS_t earlyWakeupStatus);//获取提前唤醒状态
SW_STATUS OdmSetPsEarlyWakeupStatus (ODM_PS_EARLY_WAKEUP_
STATUS_t earlyWakeupStatus);//设置提前唤醒状态
SW_STATUS OdmGetPsSleepDuration_max (SW_UINT8 num_tq [6]);
//获取最大睡眠时间量子数
SW_STATUS odmSetSleepDuration (SW_UINT32 sleepduration);
//设置睡眠时间
```

```
SW_STATUS odmSetWakeDuration (SW_UINT32 wakeduration);
```

```
//设置唤醒时间
```

```
SW_STATUS odmSetSleepFlag(SW_UINT8 sleepflag);//设置睡眠标识
```

```
SW_STATUS odmSetSleepMode(SW_UINT8 sleepmode);//设置睡眠模式
```

- 5) 参考 4.6.1 章节对睡眠节能处理流程的分析，可以设计 ONU 睡眠处理状态机。ONU 睡眠处理基本结构如下图 4-11 所示。

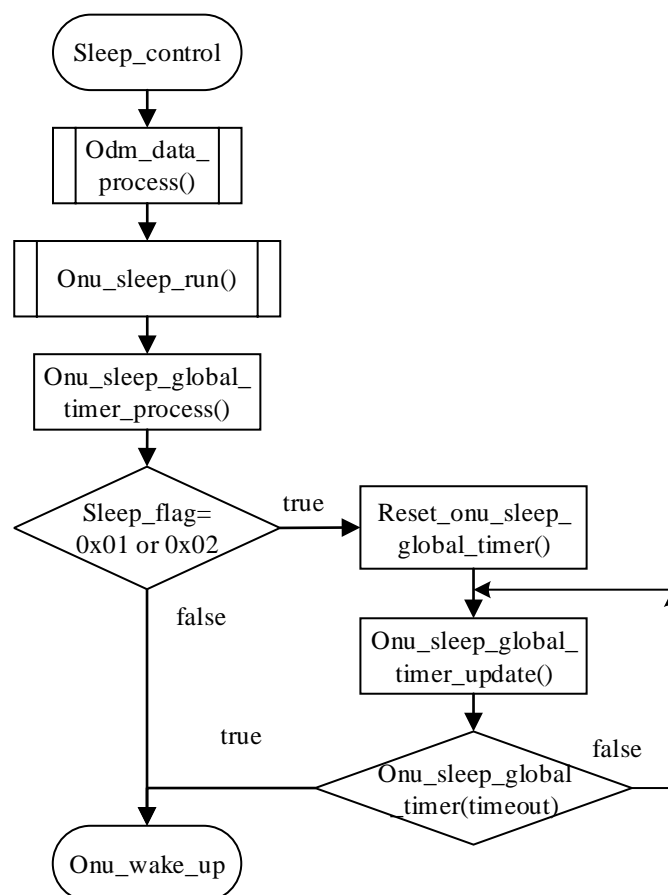


图 4-11 ONU 睡眠模块处理状态机

在图 4-11 中，主要包含全局睡眠定时器处理模块、ODM 睡眠数据处理模块和 sleep_run 状态机处理模块，由图可知，sleep_control 调用 Onu_sleep_global_timer_process 函数进行全局睡眠定时器处理，只有 sleep_flag= 0x01 或者 0x02 时，启动全局定时器，并每次接收到睡眠消息，复位定时器，重新开始计时。在接收到唤醒消息或者在全局定时器超时之前未收到新的睡眠消息，则退出睡眠状态。ODM 睡眠数据处理模块主要记录睡眠配置参数以及收到 sleep_control 的状态，sleep_run 状态机通过获取相应参数及状态控制整个睡眠流程。图 4-12 为 ODM 睡眠数据处理模块。

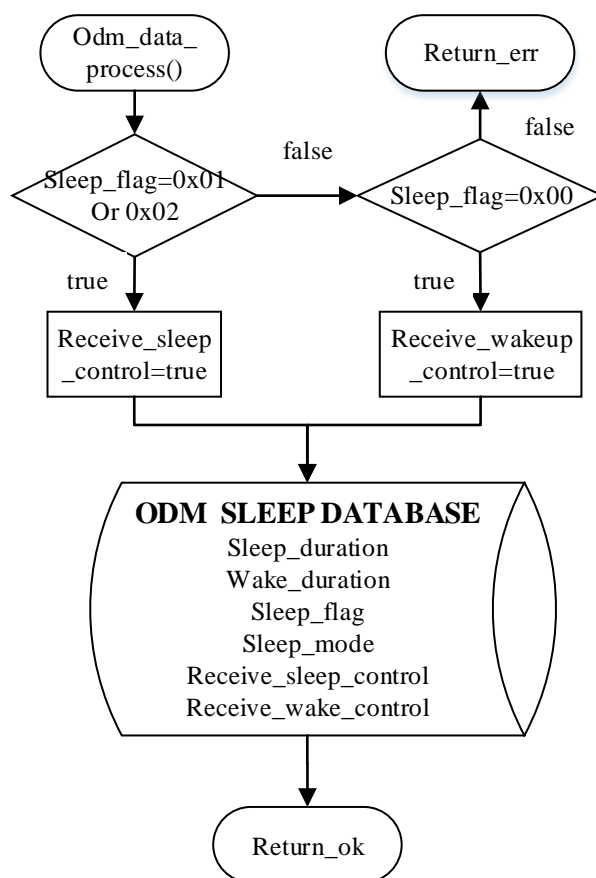


图 4-12 odm_data_process 子流程流程图

Sleep_control 处理函数在调用全局睡眠定时器处理函数的同时，也调用了 Odm_data_process()函数设置了相应的 sleep_duration、wake_duration、sleep_flag、sleep_mode 等参数，根据 sleep_flag 的值设定了 receive_sleep_mode 和 sleep_wake_control 的值，将这些参数存储在 ODM SLEEP DATABASE 中。这两个值是控制 sleep_run 模块中睡眠和唤醒交替循环的条件。在 sleep_run 状态机处理模块中起着十分重要的作用。图 4-13 为 sleep_run 状态机模块处理流程图。

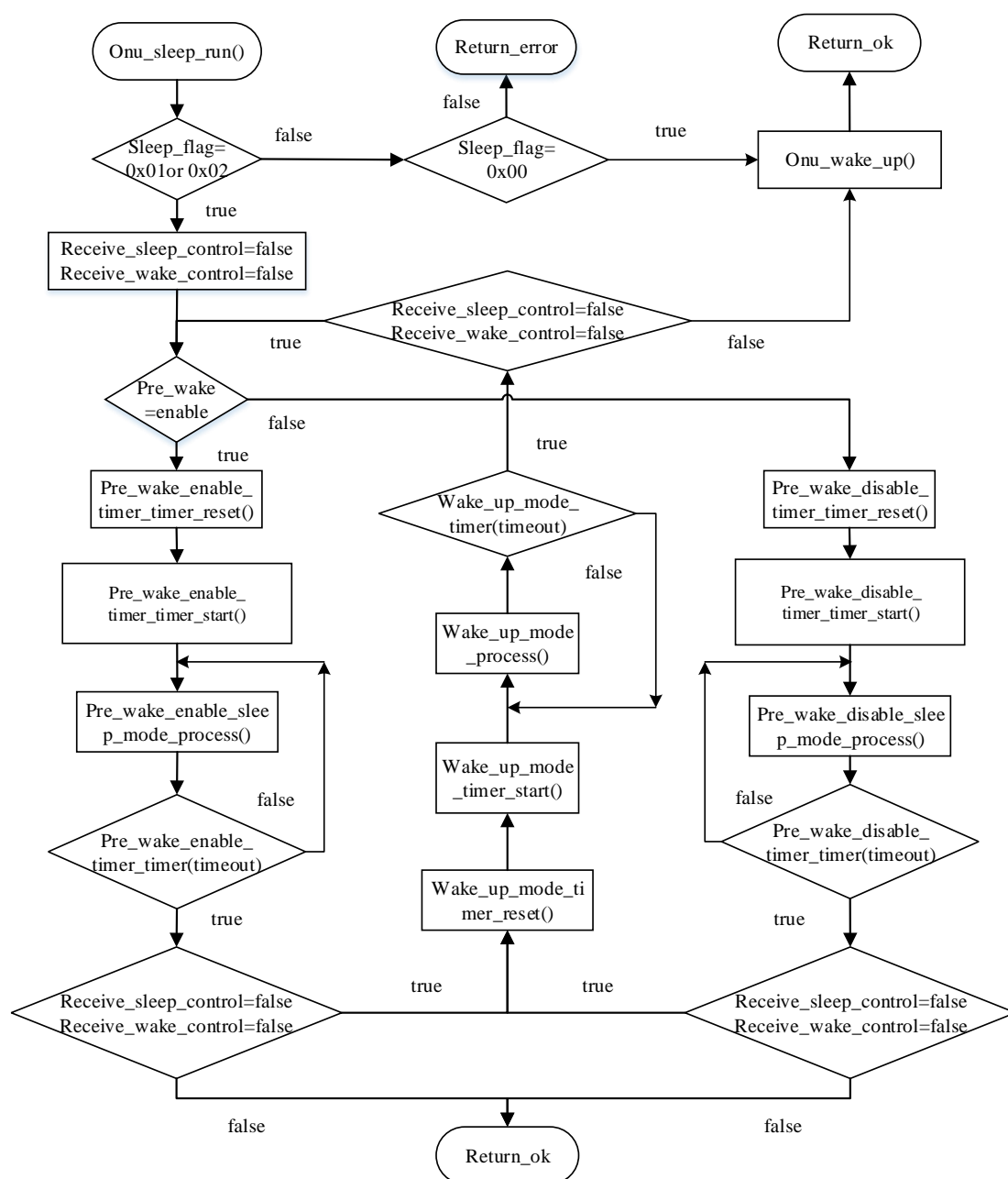


图 4-13 sleep_run 状态机处理流程图

sleep_run 状态机处理流程主要分为两个分支：onu_wakeup 和 onu_sleep，其中 onu_sleep 按 pre_wakeup 状态可分为 pre_wake_enable_timer_process 和 pre_wake_disable_timer_process 两个处理模块。在进入睡眠处理模块后，将 receive_sleep_control 和 receive_wake_control 全局变量设置为 false，如果后续未收到 sleep_control 消息（全局定时器未超时之前），则 onu 会周期性睡眠和苏醒；一旦收到 sleep_control 消息，则 receive_sleep_control 或者 receive_wake_control 的状态就会改变，循环就会终止，从而进入新的 sleep_control 处理流程。

4.6 CTC 性能统计模块设计

《中国电信 EPON 设备技术要求 V3.0》标准在 17 章节标准中明确规定了 EPON 设备 OLT 和 ONU 应支持以太网数据的性能统计功能，该功能默认关闭，OLT 可通过 OAM 协议设置 ONU 以太网性能统计功能开关和统计周期。该功能对运营商而言有很重要的意义。首先，该功能可以为运营商操作、管理、维护提供有力的数据支撑，比如验证给用户分配的固定带宽，快速定位故障终端设备，统计用户数据流量作为计费依据等等。其次，性能统计能验证 ONU 传输与指定时间同步问题，直接反映 OLT 与 ONU 之间的数据交换效率^[48-49]。

4.6.1 CTC 性能统计模块实现原理分析

以太网性能统计是运营商通过 EMS 管理 OLT 获取 ONU PON 口和以太网口的性能统计信息的基本方式。其实现流程如下：

OLT 下发性能统计 OAM 消息，ONU 收到 OAM 消息并解析，然后调用性能统计相关处理函数，获取相应统计数据，通过 OAM 返回给 OLT。

参考 QCA8829 寄存器手册可知，QCA8829 硬件对 PON、GE、MPCP 端口性能信息进行了统计，并在 STAT 模块对数据进行了管理。因此在此基础上，只需要设计 OAM 层性能统计函数，调用 ODM 层 STAT 接口获取性能统计数据或者设置性能统计参数。

4.6.2 CTC 性能统计模块软件实现

1) 根据《中国电信 EPON 设备技术要求 V3.0》标准 17 章及附录 D.49 相关内容定义相应的 OAM 相关数据结构和函数接口，将其归类为 OAM_30。

a) 定义性能统计相关 CTC 扩展属性 leaf

与性能统计相关的 CTC 扩展属性 leaf 主要包括 PERFORMANCE_MONITORING_STATUS（性能统计开关状态）、PERFORMANCE_MONITORING_CURRENT_DATA（当前统计数据）、PERFORMANCE_MONITORING_HISTORY_DATA（历史统计数据），对应的值分别 0x00b1、0x00b2、0x00b3，主要用来设置 ONU 性能统计开关状态和获取 ONU 性能统计数据，参考定义见附录。

b) 定义性能统计相关 OAM 数据结构

性能统计相关 OAM 数据结构与对应 leaf 存在对应关系，其中 PERFORMANCE_MONITORING_STATUS_s 主要包括 VARIABLE_DESCRIPTOR_t (branch、leaf、variable_Width)、monitoring_status (性能统计状态)、monitoring_period (统计周期)；PERFORMANCE_MONITORING_CURRENT_DAT_s 结构与 PERFORMANCE_MONITORING_HISTORY_DAT_s 一致，主要包括 VARIABLE_DESCRIPTOR_t 和上下行特征数据数目。

2) 设计性能统计相关 leaf 处理函数。

性能统计相关处理函数及功能如表 4-13 所示。

表 4-13 性能统计相关处理函数及功能

leaf	处理函数	功能
MONITORING_STATUS	_ctcExtGetReqPerformanceMonitoringStatus()	获取 ONU 性能统计状态及周期
	_ctcExtSetReqPerformanceMonitoringStatus()	设置 ONU 性能统计状态及周期
PERFORMANCE_MONITORING_CURRENT_DATA	_ctcExtGetReqPerformanceMonitoringCurrentData()	获取当前性能统计数据
	_ctcExtSetReqPerformanceMonitoringCurrentData()	重置 ONU 当前性能统计数据
PERFORMANCE_MONITORING_HISTORY_DATA	_ctcExtGetReqPerformanceMonitoringHistoryData()	获取历史性能统计数据
	_ctcExtSetReqPerformanceMonitoringHistoryData()	重置 ONU 历史性能统计数据

表 4-13 中所有性能统计相关处理函数均需调用 ODM 层 STAT 模块函数。

3) 将睡眠节能相关 leaf 处理函数加入到 CTC 扩展处理函数中。

在 CTC 扩展变量请求处理函数 _ctcExtVariReqProcess() 中加入 MONITORING_STATUS、PERFORMANCE_MONITORING_CURRENT_DATA、PERFORMANCE_MONITORING_HISTORY_DATA 对应 leaf 判断及对应表 4-13 的参数获取函数。在 CTC 扩展设置请求处理函数 _ctcExtSetReqProcess() 中加入 MONITORING_STATUS、PERFORMANCE_MONITORING_CURRENT_DATA、PERFORMANCE_MONITORING_HISTORY_DATA 对应 leaf 判断及对应表 4-13 的参数设置函数。

- 4) 利用 ODM 层 STAT 相关接口设计 ODM 层性能统计函数接口。

```
SW_STATUS odm_get_per_mon_status(SW_UINT16 per_monitor_status);
//获取 ODM 层 STAT 模块定义的全局变量 g_odmStatPollFlag 的值
SW_STATUS odm_get_per_mon_period(SW_UINT32 per_monitor_period);
//获取 ODM 层 STAT 模块定义的全局变量 g_odmStatPeriod 的值
SW_STATUS odm_set_per_mon_status(SW_UINT16 per_monitor_status);
//设置 ODM 层 STAT 模块定义的全局变量 g_odmStatPollFlag 的值
SW_STATUS odm_set_per_mon_period(SW_UINT32 per_monitor_period);
//设置 ODM 层 STAT 模块定义的全局变量 g_odmStatPollFlag 的值
SW_STATUS odm_get_per_mon_cur_data(SW_UINT64 a[40]);
//memcpy ODM 层 STAT 模块 g_odmStatPonCurrentData 数据
SW_STATUS odm_get_per_mon_his_data(SW_UINT64 a[40]);
//memcpy ODM 层 STAT 模块 g_odmStatPonHistoryData 数据
SW_STATUS odm_set_per_mon_cur_data(SW_UINT64 a[40]);
//memset ODM 层 STAT 模块 g_odmStatPonCurrentData 数据
SW_STATUS odm_set_per_mon_his_data(SW_UINT64 a[40]);
//memset ODM 层 STAT 模块 g_odmStatPonHistoryData 数据
```

- 5) 建立 ctc 扩展请求和设置性能统计相关函数和 ODM 层接口调用关系，即 _ctcExt_xx()函数调用对应 odm_xx()函数。

4.7 本章小结

本章也主要按总分的结构展开论述，首先介绍了本设计所用的 SDK 的基本结构，分析了本设计在 SDK 基础上修改和增加内容在 SDK 中所在层次和结构。针对数字诊断、CTC 睡眠节能、以太网性能统计等 3 个模块均涉及的 OAM 协议模块进行了结构及处理流程分析。然后在此分析的基础上，分别按照数字诊断模块、电源管理模块、CTC 睡眠节能模块、以太网性能统计模块的顺序进行了实现原理分析和软件实现过程分析。

其中关于 OAM_30 模块处理，还需要在 CTC 扩展发现处理模块添加 ONU 对 OAM3.0 版本的支持信息，这样 OLT 与 ONU 进行 OAM 版本协商时，才能兼容 OAM3.0 版本。

第 5 章 系统功能测试

5.1 整体功能测试

根据《中国电信 EPON 设备测试方案》第三部分对 ONU 设备的测试，本设计主要针对 SFP EPON ONU 模块进行了整体功能测试，其中包括 ONU 与 OLT 互通性测试、二层数据转发性能测试、业务模板配置测试等内容，此处以 RFC2544 为例，测试了 SFP EPON ONU 及配套测试板吞吐量、延时、丢包率等项，下图 5-1 为测试配置图。

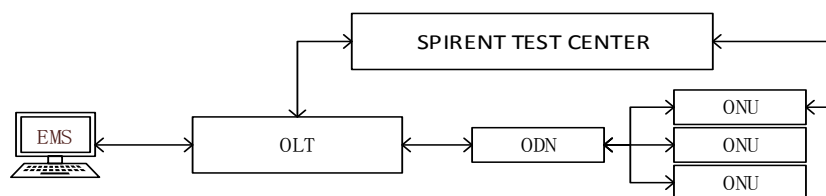


图 5-1 测试配置图

其中 EMS 为网管系统，主要负责整个 EPON 系统的配置，OLT 与 ONU 之间使用-5db 1:8 光分连接，TEST CENTER 连接 OLT 上联口和 ONU 的 UNI 端口，负责测试 EPON 系统数据转发性能。下图 5-2 为 RFC2544 测试结果图。

Trial	Frame Size (bytes)	Result	Intended Load (%)	Offered Load (%)	Throughput (%)	Port Name	Throughput (fps)	Theoretical Max Throughput (fps)	Throughput (Mbps)	Theoretical Max Throughput (Mbps)	Frame Loss (%)	Max Latency Threshold Exceeded	Out of Sequence Threshold Exceeded
1	256	Passed	99.258	99.258	99.258		899074.4	905797.101	1985.15626	2000	0	False	False
						Port //2/1	449537.2	452898.551	992.58	1000			
						Port //2/2	449537.2	452898.551	992.58	1000			
1	512	Passed	99.258	99.258	99.258		466437.133	469924.812	1985.15626	2000	0	False	False
						Port //2/1	233218.567	234962.406	992.58	1000			
						Port //2/2	233218.567	234962.406	992.58	1000			
1	1024	Passed	98.516	98.516	98.516		235909.067	239463.602	1970.3125	2000	0	False	False
						Port //2/1	117954.533	119731.801	985.16	1000			
						Port //2/2	117954.533	119731.801	985.16	1000			
1	1518	Passed	99.258	99.258	99.258		161342.4	162548.765	1985.15626	2000	0	False	False
						Port //2/1	80671.2	81274.382	992.58	1000			
						Port //2/2	80671.2	81274.382	992.58	1000			

图 5-2 SFP EPON ONU RFC2544 测试结果图

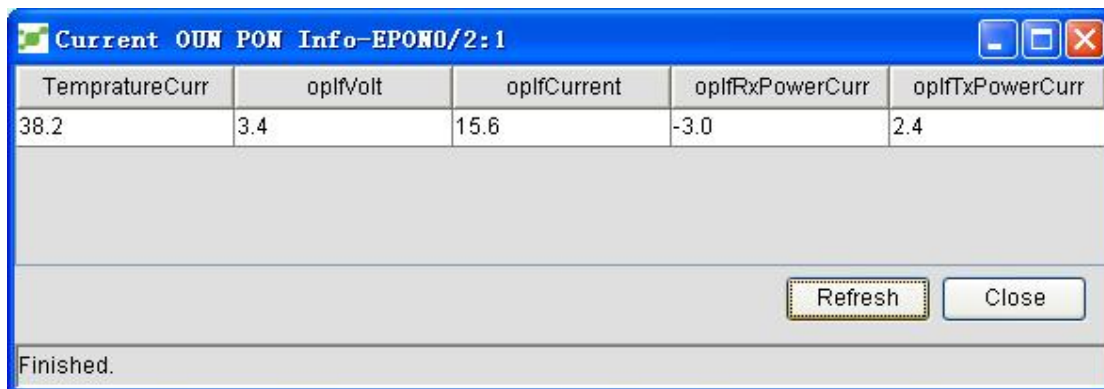
《中国电信 EPON 设备技术要求 V3.0 要求》标准规定 EPON ONU 设备下行容许丢包率为 5%，上行容许丢包率为 10%，其中 64 字节包长可适当放宽要求，上述 TEST CENTER 中设置速率为 1G，包长分别为 256、512、1024、1518，由图 5-2 可知，SFP EPON ONU 设备吞吐量>980M、丢包率为 0、未超过标准延时、未超过队列阈值，满足中国电信 EPON 设备性能要求。

本设计 SFP EPON ONU 模块委托武汉邮科院网瑞实验室进行入网设备测试。测试结果满足《中国电信 EPON 设备技术要求》A 型 ONU 设备技术要求。

5.2 数字诊断模块测试

5.2.1 通过 OAM 获取光模块数字诊断信息测试

数字诊断模块主要是通过 OAM 协议获取光模块的温度、电压、光功率等参数，下图 5-3 为 OLT 网管上获取到的关于 ONU 的数字诊断信息截图。



TemperatureCurr	oplfVolt	oplfCurrent	oplfRxPowerCurr	oplfTxPowerCurr
38.2	3.4	15.6	-3.0	2.4

图 5-3 ONU 数字诊断信息截图

从图中可以看出，当前光模块的温度为 38.2 度，电压为 3.4V，当前发送偏置电流为 15.6mA，接收功率为-3.0db，发送功率为 2.4db。

5.2.2 CTC SFP PON ONU 扩展部分测试

根据《中国电信 SFP 封装的 PON ONU 设备技术要求》标准第四章相关要求，在 SFP 交换机中无法直接获取 EEPROM 相关内容，而且通过编程器读取 EEPROM 相应字节内容相对麻烦，因此，本设计针对这部分测试在命令行调用了 EEPROM 读取函数，实现在命令行打印出 EEPROM 相关信息。

(1) LOID 和 PWD 设置和读取

设置 loid 和 pwd 之前：

```
CTC SFP PON ONU EEPROM PARA:
loid address: 0xbe length: 0x18 vlaue:
offset 0xbe:  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00
offset 0xc6:  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00
offset 0xce:  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00
pwd address: 0xd6 length: 0x0c vlaue:
offset 0xd6:  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00
offset 0xde:  0x00  0x00  0x00  0x00
```

图 5-4 设置 loid 和 pwd 之前 EEPROM 相关信息

设置 loid 和 pwd 之后: (注: loid:“123456789” pwd:“987654321”)

```
CTC SFP PON ONU EEPROM PARA:
loid address: 0xbe length: 0x18 vlaue:
offset 0xbe:  0x31  0x32  0x33  0x34  0x35  0x36  0x37  0x38
offset 0xc6:  0x39  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00
offset 0xce:  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00  0x00
pwd address: 0xd6 length: 0x0c vlaue:
offset 0xd6:  0x39  0x38  0x37  0x36  0x35  0x34  0x33  0x32
offset 0xde:  0x31  0x00  0x00  0x00
```

图 5-5 设置 loid 和 pwd 之后 EEPROM 相关信息

(2) 恢复出厂设置状态

恢复出厂设置, 重启之前:

```
restore_to_default info address: 0xe2 length:0x01 vlaue:
offset 0xe2: 0x01
```

图 5-6 恢复出厂设置, 重启之前 EEPROM 相关信息

恢复出厂设置, 重启之后:

```
restore_to_default info address: 0xe2 length:0x01 vlaue:
offset 0xe2: 0x00
```

图 5-7 恢复出厂设置, 重启之后 EEPROM 相关信息

(3) PON 链路状态

PON 链路正常时:

```
pon_link status address: 0xe3 length:0x01 value:
offset 0xe3: 0x01
```

图 5-8 PON 链路正常时 EEPROM 相关信息

PON 链路不正常时:

```
pon_link status address: 0xe3 length:0x01 value:
offset 0xe3: 0x00
```

图 5-9 PON 链路不正常时 EEPROM 相关信息

(4) PON 发射机电源状态

PON 发射机电源关闭:

```
pon tx power address: 0xe4 length:0x01 value:
offset 0xe4: 0x01
```

图 5-10 PON 发射机使能时 EEPROM 相关信息

PON 发射机电源开启:

```
pon tx power address: 0xe4 length:0x01 value:
offset 0xe4: 0x00
```

图 5-11 PON 发射机去使能时 EEPROM 相关信息

5.3 电源管理模块测试

本设计 SFP EPON ONU 模块电源管理是通过 QCA8829 命令行来管理，命令行可以通过串口或者 telnet 接入，SFP EPON ONU 模块只能通过 telnet 方式接入，本设计主要设计了 UNI、PON、I2C、CPU 等模块的电源管理，通过 show ps tb cfg 来显示节能配置，图 5-12 为以上模块电源管理配置状态图。

```
QCA8829#show ps tb cfg
PowerSaving Configuration:
  UNI:disable
  PON:disable
  I2C:disable
  CPU:disable
```

图 5-12 ONU 模块电源管理状态图

其中，UNI PON I2C SCB CPU 接口均未开启节能状态，即各模块电源均为正常工作状态。可以通过 ps 命令来设置各模块节能状态。下图 5-13 为设置模块电源配置状态图。

```
QCA8829#ps UNI disable PON disable I2C disable CPU enable
```

图 5-13 设置模块电源状态图

设置后显示来查看是否配置成功。图 5-14 为设置模块电源后的状态图。

```
QCA8829#show ps tb cfg
PowerSaving Configuration:
  UNI:disable
  PON:disable
  I2C:disable
  CPU:enable
```

图 5-14 设置模块电源后状态图

其中 CPU 进入节能状态，如图 4-6 中的命令对应。由此可见命令行能对各模块的电源管理进行正确的配置。

对软件管理模块测试后，我们需要对节能效果进行测试。测试环境如下所示：

设备：1600E OLT、SFP EPON ONU、网线、1：8 光分、万用表、12V-1A 直流电源、带 SFP 上联口测试板（12V 电源转换芯片+AR8031PHY+网口变压器+RJ45）电脑 2 台 SPRIENT TESTCENTER 一台。

测试方法：

(1) 测试零流量负载时未开启 ONU 模块节能开关和开启节能开关情况下 SFP EPON ONU+测试板整机功耗。

(2) 测试 100M 负载时未开启 ONU 模块节能开关和开启节能开关情况下 SFP EPON ONU+测试板整机功耗。

测试结果：

模块及带 SFP 上联口测试板整机电源测试结果如表 5-1 所示：

表 5-1 节能配置模块测试结果

UNI 节能	PON 节能	I2C 节能	CPU 节能	整机功耗(零流量)		整机功耗 (100M)	
关闭	关闭	关闭	关闭	12V	110.2mA	12V	120.5mA
关闭	关闭	关闭	开启	12V	107.5mA	12V	114.5mA
关闭	关闭	开启	开启	12V	106.5mA	12V	113.5mA
关闭	开启	开启	开启	12V	103.3mA	12V	108.9mA
开启	开启	开启	开启	12V	100.0mA	12V	103.0mA

结果处理和分析：

由表 5-1 可知，测试 SFP EPON ONU 模块和测试板整机功耗随着模块节能开关的开启，整机功耗呈现下降趋势。通过计算可知：

零流量：CPU 降耗比例 = $(110.2-107.5) * 12 / (110.2 * 12) = 2.45\%$

I2C 降耗比例 = $(107.5-106.5) * 12 / (110.2 * 12) = 0.91\%$

PON 降耗比例 = $(106.5-103.3) * 12 / (110.2 * 12) = 2.90\%$

UNI 降耗比例 = $(103.3-100.0) * 12 / (110.2 * 12) = 3.00\%$

100M 流量：CPU 降耗比例 = $(120.5-114.5) * 12 / (120.5 * 12) = 4.98\%$

I2C 降耗比例 = $(114.5-113.5) * 12 / (120.5 * 12) = 0.83\%$

PON 降耗比例 = $(113.5-108.9) * 12 / (120.5 * 12) = 3.82\%$

UNI 降耗比例 = $(108.9-103.0) * 12 / (120.5 * 12) = 4.08\%$

分析：

在零流量时，整机功耗比跑流量时整机功耗低，CPU 节能模式开启对突发或者周期性数据流节能效果明显，不影响正常通信；I2C 控制器在未使用状态下，节能效果趋于稳定；PON 口节能开关影响 ONU 与 OLT 数据交换，因而在开启了 PON 口节能开关后，节能效果明显；在全双工模式下，UNI 端口数据流量对整机功耗影响较大，同时开启 PON 口和 UNI 端口节能模式就完全断开了数据通道，但是 UNI 端数据流触发了 UNI 端退出 UNI 节能模式，UNI 端的中断请求触发了 CPU 退出节能模式，因此相对于无流量时整机功耗稍大一些。

5.4 睡眠节能模块测试

由于实验室 OLT 睡眠节能功能还在开发中，故本设计在软件模块加入了相应测试代码，可以在命令行对 ONU PON 口节能模块进行功能测试，其中测试代码睡眠时间和苏醒时间均为 1s，关闭提前唤醒功能。本测试针对睡眠状态机运行状态进行了检测，图 5-15 为关闭提前唤醒睡眠模式下 ONU 睡眠状态。

```
QCA8829#ctc sleep mode enable
QCA8829#show sleep mode status
ctc sleep mode status
    enable
onu sleep status
    sleep
QCA8829#show sleep mode status
ctc sleep mode status
    enable
onu sleep status
    not sleep
QCA8829#show sleep mode status
ctc sleep mode status
    enable
onu sleep status
    sleep
QCA8829#ctc sleep mode enable
QCA8829#show sleep mode status
ctc sleep mode status
    enable
onu sleep status
    sleep
```

图 5-15 关闭提前唤醒睡眠节能模式 ONU 相关状态信息

由图 5-15 可知，在 ctc sleep mode enable 命令控制下，ONU 进入睡眠状态，由 4.5.1 章节分析可知，ONU 在未收到 sleep control 消息时，进入睡眠和唤醒循环模式，在重新收到 sleep control 消息后，ONU 重置定时器，进入睡眠状态。另外测试了 ONU 退出睡眠状态，如图 5-16 所示：

```
QCA8829#ctc sleep mode disable
QCA8829#show sleep mode status
ctc sleep mode status
    disable
onu sleep status
    not sleep
```

图 5-16 ONU 唤醒时状态信息

由 5-16 可知，ONU 在 ctc sleep mode disable 的命令下退出睡眠模式，在未收到睡眠命令前提下，经历了 wakeup_duration 时间后，仍然保存唤醒状态。

5.5 以太网性能统计模块测试

以太网性能统计模块主要是通过 OAM 协议获取 ONU 端 PON 口以太网性能统计数据, 下图 5-17 为 OLT 网关上获取到的 ONU PON 以太网性能统计截图。

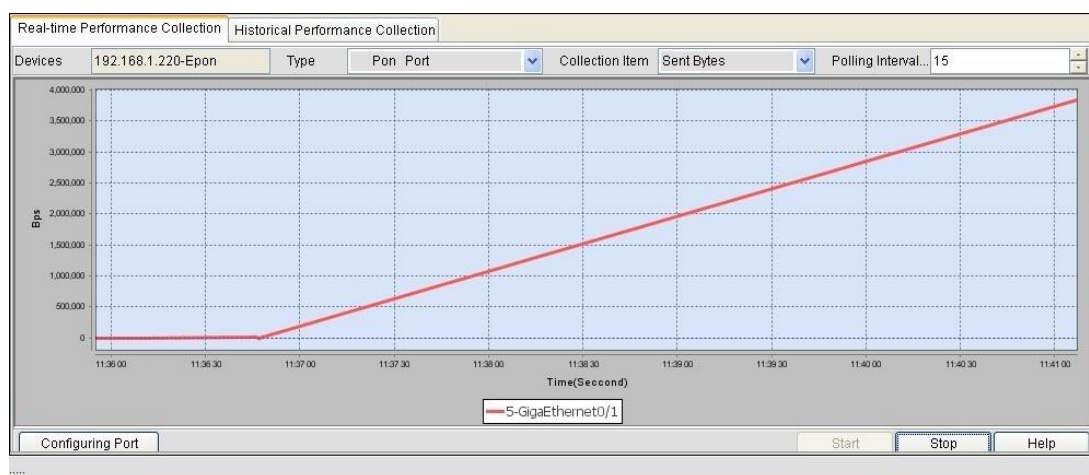


图 5-17 ONU PON 口以太网性能统计图

由图 5-17 可见, 在 EMS 上可以查询到 PON 端口发送字节数统计信息, 统计周期为 15 秒, 在 11:36:45 处开始检测到 PON 端口数据流量, 在间隔 15 秒后, 检测到发送速率 220bps 左右, 后续流量速率成线性速率增长。由此可见 EMS 通过 OAM 协议获取 PON 口性能统计信息正常。除此之外, 也可以通过 ONU 命令行获取相应的性能统计信息, 如图 5-18 所示:

```
QCA8829#show counter pon
Name                               Value
TxOctets                          0
TxFrames                          606003
TxMacCtrlFrames                   603765
TxUnicastFrames                   1021
TxBroadcastFrames                 1217
TxMultFrames                      603765
TxPauseFrames                     0
TxDropFrames                      0
TxDropOctets                      0
TxOctet64Frames                   605033
TxOctet65to127Frames             471
TxOctet128to255Frames            453
TxOctet256to511Frames            6
TxOctet512to1023Frames           36
TxOctet1024to1518Frames          4
TxOctet1519toMtuFrames           0
```

图 5-18 PON 口性能统计信息

5.6 节能参数及能效测试

参照 YDB-067-2011（接入设备节能参数和测试方法 EPON 系统）标准第七章 SFU/HGU 节能参数及测试方法，对本设计 SFP EPON ONU 及测试板进行了模块功耗测试和能效等级计算，具体结果如下所示：

$$P_{SFU} = \beta_{SFU-S1} \times P_{SFU-S1} + \beta_{SFU-S2} \times P_{SFU-S2} + \beta_{SFU-S4} \times P_{SFU-S4} \quad \text{式(5-1)}$$

其中 P_{SFU} 为 SFU 加权功率

P_{SFU-S1} 全功耗功率 P_{SFU-S2} 低功耗状态功率 P_{SFU-S4} 为关机状态功率

β_{SFU-S1} 全功耗加权 β_{SFU-S2} 低功耗加权 β_{SFU-S4} 关机功耗加权

$$\beta_{SFU-S1} = 0.2 \quad \text{式(5-2)}$$

$$\beta_{SFU-S2} = 0.2 \quad \text{式(5-3)}$$

$$\beta_{SFU-S4} = 0.6 \quad \text{式(5-4)}$$

$$P_{SFU-S1} = 12 \times 0.140 = 1.68W \quad \text{式(5-5)}$$

$$P_{SFU-S2} = 12 \times 0.100 = 1.20W \quad \text{式(5-6)}$$

$$P_{SFU-S4} = 12 \times 0.001 = 0.12W \quad \text{式(5-7)}$$

由式 5-1 至 5-7 可得：

$$P_{SFU} = 0.2 \times 1.68 + 0.2 \times 1.2 + 0.6 \times 0.12 = 0.648W \quad \text{式(5-8)}$$

由 E 能效指数公式及《接入设备节能参数和测试方法 EPON 系统》标准第七章表 7 相关内容可得：（ P_{LMT_SFU} 为 SFU 设备整机功耗限定值）

$$E_{SFU} = \frac{P_{SFU}}{P_{LMT-SFU}} = \frac{0.648}{(0.4 + 0.3) \times 0.2 + (7.7 + 1.3) \times 0.2 + 0.3 \times 0.6} = 0.228$$

由能效分级表 5-2 可知：

表 5-2 EPON SFU/HGU 设备能效分级表

能效级别	能效指数 $E_{SFU/HGU}$
一级	<0.70
二级	$0.70 < E_{SFU/HGU} < 0.75$
三级	$0.75 < E_{SFU/HGU} < 0.80$
四级	$0.80 < E_{SFU/HGU} < 0.90$
五级	$0.90 < E_{SFU/HGU} < 1.00$

综上可知，该 SFP EPON ONU 和测试板满足一级能效设备要求。当本设计 SEP EPON ONU 设备应用于其他交换设备时，不会降低设备的能效等级，而且在一定程度上能够有效提高设备的能效等级。

5.7 本章小结

本章首先介绍了本设计 SFP EPON ONU 整体功能测试，主要包括性能测试和功能测试，然后分别按照软件设计模块分别测试数字诊断模块、电源管理模块、睡眠节能模块、性能统计模块等内容。最后结合具体测试参数，针对本设计的 SFP EPON ONU 进行了节能参数及能效测试，证明了该模块节能特性。

第 6 章 总结与展望

本文主要研究了节能型 SFP EPON ONU 模块的设计与实现, 针对网络改造特殊时期减小改造成本和资源和如何实现 ONU 节能等问题设计了 SFP EPON ONU 模块。本文围绕该模块设计主要做了以下工作:

1) 首先通过研究 EPON、SFP EPON ONU、EPON 节能等技术发展现状, 分析了 EPON ONU 协议层结构, 论证了 SFP EPON ONU 设计的可行性, 提出了节能型 SFP EPON ONU 设计需求和设计思路。

2) 和项目组成员合作, 提出了 QCA8829+MAX24003 硬件设计方案, 分析了硬件设计可行性和信号兼容性, 提出了分母板和扣板的电路设计思路, 然后具体分析了母板和扣板详细电路设计, 指出了电路中包含高速差分数字信号线的 PCB 电路设计要求。

3) 通过对高通 QCA8829 软件平台、光模块数字诊断功能、《中国电信 SFP 封装的 PON ONU 模块技术要求》标准的研究, 完成了光模块数字诊断功能设计; 在参考 QCA8829 寄存器手册基础上, 结合 SFP EPON ONU 节能特性, 设计了 ONU 电源管理模块, 实现了命令行管理 ONU 各个模块电源功能; 通过研究《中国电信 EPON 设备技术要求 V3.0》标准睡眠节能相关内容, 结合 QCA8829 软件平台, 设计了睡眠节能模块, 实现了 OLT 控制 ONU 睡眠节能功能, 凸显了 SFP EPON ONU 模块的节能特性; 针对《中国电信 EPON 设备技术要求 V3.0》标准新加入的基于 OAM 的性能统计功能了, 结合 QCA8829 ODM 层 STAT 模块接口, 设计了基于 OAM 的 ONU 性能统计模块, 实现了在 EMS 上直接获取 ONU 端口性能统计数据的功能, 增强了运营商的管理、维护能力; 针对 QCA8829 支持 OAM2.1 兼容 OAM2.0 的特点, 在代码上加入了兼容 OAM3.0 模块, 增强了 ONU CTC OAM 版本向下兼容性。

4) 通过系统整体功能测试、新加入功能针对性测试和节能效果及能效测试, 基本验证了本设计 SFP EPON ONU 模块的基本功能和节能特性。

限于本人在公司担任的主要任务是软件设计, 因此本设计重点在于软件模块设计, 对于硬件设计方面还需要更加深入地了解; 除此之外, 本设计 SFP EPON ONU 模块对电力、石油等特殊行业突发、周期性数据流特点开启 CPU 节能模式, 节能效果会更明显, 在该模块大规模应用时, 会带来一定的经济效益。

致谢

宝贵的研究生学习生涯即将结束，在本论文即将完成之际，我首先要特别感谢我的导师郭金旭老师。

郭老师为人谦和、平易近人，而且具有严谨的治学态度。在我做毕业设计的每个阶段，从选题、定题到相关文献查询，从论文提纲确定到初稿书写，从后期论文修改到逐步完善，郭老师对我的毕业论文修改都细致入微，对我悉心指导。由衷感谢郭老师对我莫大的支持和鼓舞，祝愿老师能够“桃李满天下”。

感谢深圳亚光通信科技有限公司的王波总经理、李卫军经理给我实习的机会和后期论文测试环境的支持；感谢硬件工程师张正茂、蔡秀丽给我硬件设计原理上的启发和帮助；感谢软件工程师彭光尼对我的指导。

感谢武汉长光科技有限公司嵌入式软件部门的唐骏经理和人力资源部李蓓经理给我实习机会；感谢刘宁导师、肖庆华、鲁方曾对我技术方面的指导。

感谢和我一起学习和生活的室友：白小龙、冯军、袁有禄、黄仁伟，谢谢他们带给我快乐和睦的寝室生活，谢谢他们在学习交流中给我的热心帮助。

我还要感谢我的家人对我的大力支持，感谢他们平时对我生活和学习无微不至的关心和照顾。

最后，感谢在百忙之中来参加论文评审的各位老师，谢谢老师们的批评和指正。

参考文献

- [1] 王晓颖. 全球宽带战略继续深入用户仍处高速增长期[J].世界电信,2012.
- [2] 汪卫国. 全球宽带接入市场仍处快速发展期[R].世界电信,2013.
- [3] 高春久. EPON 技术及其在接入网中的应用研究[D].吉林大学,2011.
- [4] 肖巧生, 寿国础, 胡怡红, 郭志刚. 无源光网络睡眠节能方式研究[J].光通信研究,2012.
- [5] LANGE C, GLADISCH A. On the energy consumption of FTTH access networks[C].Proc of Optical Fiber Communication and National Fiber Optic Engineers Conference.2009: 1-3.
- [6] Kani J. Power saving techniques and mechanisms for optical access networks systems [J]. Lightwave Technology, Journal of, 2013, 31(4): 563-570.
- [7] Hirth R E, Boyd E W, Goswami S.EPON With Power-Saving Features: U.S. Patent Application 13/931,221[P]. 2013-6-28.
- [8] 《中国电信 SFP PON_ONU 模块技术要求》[S].中国电信集团公司,2011.
- [9] 梁晓红. 基于 EPON 的电力配电网通信方案设计[J]. 光通信技术,2013,09:38-41.
- [10] 王成英. 基于无源光网络的电力 ONU 研究[D].武汉理工大学,2012.
- [11] Xiaotian C, Pan W, Shidong L. Research on Electric Power EPON Access Network Service Quality Improvement Based On The Intelligent Pipeline Architecture[C]//2013 International Conference on Advanced ICT and Education (ICAICTE-13). Atlantis Press, 2013.
- [12] Bonilla M L, Barbosa F R, Moschim E. Techno-economical comparison between GPON and EPON networks[C]//Innovations for Digital Inclusions, 2009. K-IDI 2009. ITU-T Kaleidoscope. IEEE, 2009: 1-5.
- [13] Kramer G, De Andrade M, Roy R, et al. Evolution of optical access networks: Architectures and capacity upgrades [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(5): 1188-1196.
- [14] De Andrade M, Maier M, McGarry M P, et al. Passive optical network (PON) supported networking[J]. Optical Switching and Networking, 2014.
- [15] Skubic B, Chen J, Ahmed J, et al. A comparison of dynamic bandwidth allocation for EPON, GPON, and next-generation TDM PON [J]. Communications Magazine, IEEE, 2009, 47(3): S40-S48.
- [16] 刘辉. 高集成度芯片为快速增长的 EPON 市场提供低功耗, 低成本解决方案[J]. 集成电路应用, 2011 (7): 30-31.
- [17] Tokuhashi K, Sato T, Ashizawa K, et al. Extended MPCP slot data transmission experimental system for active optical access network [J]. OECC2010, 2010 (8A1-5).

- [18] Hossein M, Hanawa M. Adaptive limited DBA algorithm for multi-OLT PON-based FTTH and wireless sensor networks[C]// 2012 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC). IEEE, 2012: 372-377.
- [19] Zeng T, Xie Y, Wang D. Multicast control method in Ethernet Passive Optical Network: U.S. Patent 8,509,115[P]. 2013-8-13.
- [20] Dinh N, Walid A. Power saving protocol for 10G-EPON systems: A proposal and performance evaluations[C]//Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE. 2012: 3135-3140.
- [21] Kramer G, De Andrade M, Roy R, et al. Evolution of optical access networks: Architectures and capacity upgrades [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(5): 1188-1196.
- [22] 石永辉, 卢锐. 下一代 PON 技术发展及现状[J]. 电力系统通信, 2011, 32(3): 39-44.
- [23] 岳宇君. 我国三网融合的多视角解读[D].北京邮电大学,2013.
- [24] 赵隽如. 基于 PON 技术的 FTTx 建设模式研究[D].北京邮电大学,2011.
- [25] 张超. 基于 FTTx 的宽带接入网的设计与研究[D].电子科技大学,2012.
- [26] Jaroslaw Wojtowicz, Santa Rosa. SMALL FORM FACTOR, PLUGGABLE ONU: US 7693178B2 [P]. Apr.6,2010.
- [27] 《中国电信 SFP 封装的 PON ONU 模块技术要求》[S].中国电信集团公司,2010.
- [28] Thomas Anschutz, Conyers. PON ONU CONFIGURED IN THE FORM OF A GIGABIT INTERFACE CONVERTER: US2011/0002690A1 [P]. Jan.6,2011.
- [29] 赵其圣、何鹏、杨思更、张强、薛登山. 一种采用 SFP ONU 光模块的无源光网络:中国 202455488[P]. 2012.
- [30] Ying Yan, Shing-Wa Wong, Luca Valcarengi, She-Hwa Yen, Divanilson R. Campelo, Shinji Yamashita, Leonid Kazovsky, and Lars Dittmann. Energy Management Mechanism for Ethernet Passive Optical Networks (EPONs)[J]. IEEE,2010.
- [31] Zhen Wang, Wenchang Yu, Liqian Wang. Energy Saving Mechanism Based On Double-way Polling DBA Algorithm and ONU Sleep Mode for EPON [J]. EMEIT, 2011.
- [32] 《中国电信 EPON 设备测试方案》[S].中国电信集团公司,2007.
- [33] 《接入设备节能参数和测试方法 EPON 系统》[S].中国通信标准化协会,2011.
- [34] 王砺超. PON 技术及北京电信 PON 网络规划设计和工程应用[D].北京邮电大学,2012.
- [35] 何晔. 多级级联分光无源光网络保护策略研究[D].南京邮电大学,2013.
- [36] 周凤金. SFP 光模块的监测系统研究与实现[D].武汉理工大学,2012.
- [37] 张雅青, 许远忠. 10 Gbit/s EPON ONU 光模块的设计[J]. 光通信研究, 2011 (3): 44-47.
- [38] 韦雪明. 高速 SERDES 接口芯片设计关键技术研究[D].电子科技大学,2012.

- [39] 梅艳,张跃进,李立.基于 SFP 的 OLT 新型光收发模块的设计[J].光通信技术,2012,05:20-23.
- [40] 胡庆红. SFP 光收发模块测试平台的研究与设计[D].武汉理工大学,2013.
- [41] 王晓骏. EPON 系统中 OAM 软件模块的研究与实现[D].电子科技大学,2011.
- [42] Hirth R E, Boyd E W, Goswami S. Epon with power-saving features: U.S. Patent 8,498,534[P]. 2013-7-30.
- [43] Dixit Abhishek, Lannoo Bart, Colle Didier, Pickavet Mario, Demeester Piet. ONU power saving modes in next generation optical access networks: progress, efficiency and challenges. [J]. Optics Express, 2012, 2026.
- [44] B. Skubic, D. Hood. Evaluation of ONU power saving modes for gigabit-capable passive optical networks. [J]. IEEE Network, 2011, 25.
- [45] Zhang J, Hosseinabadi M T, Ansari N. Standards-compliant EPON sleep control for energy efficiency: Design and analysis [J]. Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of, 2013, 5(7): 677-685.
- [46] S. W. Wong, L. Valcarenghi, Y. She-Hwa, D. R. Campelo, S. Yamashita, and L. Kazovsky, "Sleep mode for energy saving PONs: advantages and drawbacks," in Proc. of IEEE Globecom, Honolulu, HI (2009).
- [47] Skubic B, Hood D. Evaluation of ONU power saving modes for gigabit-capable passive optical networks [J]. Network, IEEE, 2011, 25(2): 20-24.
- [48] Janarthan T, Archana N, Janakiraman V, et al. Performance Evaluation of Video MAC Protocol in EPON Based Network[J]. International Journal of Computer Science & Applications (TIJCSA), 2013, 1(11).
- [49] Passive optical networks: principles and practice [M]. Academic Press, 2011.