

基于以太网的 无源光网络

Ethernet Passive
Optical Networks

〔美〕格伦·克雷默(Glen Kramer) 著
陈雪 孙曙和 刘冬 盖鹏飞 等译
陈雪 审校

EPON



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

基于以太网的无源光网络

Ethernet Passive Optical Networks

〔美〕 格伦·克雷默(Glen Kramer) 著

陈 雪 孙曙和 刘 冬 盖鹏飞 等译
陈 雪 审校

北京邮电大学出版社

· 北 京 ·

Glen Kramer

Ethernet Passive Optical Networks, 1/e

ISBN: 0-07-144562-5

Copyright © 2005 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original Language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved.

No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Beijing University of Posts and Telecommunications Press.

本书中文简体字翻译版由北京邮电大学出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2006-1001

图书在版编目(CIP)数据

基于以太网的无源光网络/(美)克雷默(Kramer, G.)著;陈雪等译. —北京:北京邮电大学出版社, 2007
ISBN 978-7-5635-1381-9

I. 基… II. ①克…②陈… III. 光纤通信—宽带通信系统—应用—以太网—研究
IV. TN915.6 TP393.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 002719 号

书 名: 基于以太网的无源光网络

作 者: [美]格伦·克雷默(Glen Kramer)

译 者: 陈 雪 孙曙和 刘 冬 盖鹏飞 等

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

北方营销中心: 电话:010-62282185 传真:010-62283578

南方营销中心: 电话:010-62282902 传真:010-62282735

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京忠信诚胶印厂

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

印 张: 17

字 数: 354 千字

印 数: 1—4 000 册

版 次: 2007 年 5 月第 1 版 2007 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-1381-9/TN·456

定 价: 32.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社营销中心联系 ·

To Chinese Reader

Dear Reader, you are holding a book about Ethernet Passive Optical Networks (EPON) — a communications architecture that has been the focus of my research for the past eight years. It is with great excitement I am writing this preface for the Chinese edition of the book.

For a scientist and an engineer it is the most gratifying experience to see the results of one's work being studied, improved upon, and eventually adopted. And where this process is more likely to take place than in China— the country with the world's highest output of engineering graduates?

Several very exciting developments have occurred after this book was initially published in English:

- Close to 6 million commercial EPON lines have been deployed worldwide, with the majority of the volume concentrated in East Asia. These deployments are carried out by telecommunications carriers, cable operators, and power companies alike;
- Chinese version of the EPON standard has been created and is in the final stages of approval in the Chinese Communications Standardization Association (CCSA);
- IEEE has initiated a new project to standardize a next generation of EPON with ten-fold increase in bandwidth.

Despite these important advancements, in the telecommunications engineering community, there linger many misconceptions about what EPON is, how it operates, what performance it can guarantee, and what services it is capable of supporting. I hope this book will be helpful to Chinese readers in better understanding both the theory and practical aspects of EPON technology.

And I humbly hope that this book will make some, however small, a contribution which would allow us all to witness how one of the oldest civilizations adopts one of the newest communications technologies.

Sincerely,

Glen Kramer

2007/4

致中国读者

亲爱的读者,您正在捧着一本关于以太网无源光网络(EPON)的书。EPON 是一种通信技术,它是我过去 8 年科研工作的重心。我怀着十分激动的心情写下这本书的中译本序言。

对于科学家和工程师来说,看到自己的工作成果被学习、改进并最终被采纳,那是最令人满足的经历。这一经历会在什么地方比在中国——世界上培养出最多工科学生的国家——更可能发生呢?

这本书的最初英文版出版后,发生了几件非常令人兴奋的事情:

- 全世界接近 600 万线 EPON 系统在电信运营商、有线电视运营商和电力公司的网络中得到商业应用,大部分应用集中在东亚;
- EPON 中国标准已制定出来了,正等待中国通信标准化协会(CCSA)的最后批准^①;
- IEEE 已开始了 10 G EPON 的标准化工作。

尽管这样,在电信工程领域关于什么是 EPON、它如何运转、它能保证什么样的性能、能提高什么样的业务,仍存在许多误解。我希望这本书能够帮助中国读者更好地理解 EPON 技术的理论和实践。

我谦恭地希望这本书能为大家将目睹的最古老文明国家之一的中国应用最新的通信技术——EPON——作出贡献,哪怕是微薄的贡献。

格伦·克雷默(Glen Kramer)

2007. 4

^① 译者注:EPON 中华人民共和国通信行业标准《接入网技术要求——基于以太网方式的无源光网络(EPON)》(YD/T 1475—2006)已于 2006 年 6 月发布。

译者序

FTTH的技术和应用迅速发展,已经成为世界范围内的热点之一。无源光网络(PON)技术经过近20年的发展,不仅成为固网运营商们“光进铜退”接入层网络转型的技术发展的重要方向,并且已开始了网络的部署实践,全球已有了百万用户级规模的应用。

以太网技术以其广泛的应用、良好的扩展性、低廉的成本优势结合无源光网络形成了EPON技术,基于千兆以太网的EPON标准化的工作是IEEE 802 第一公里以太网(Ethernet in the First Mile, EFM)任务小组在2000年11月启动的,在2004年6月完成了EPON的正式版本IEEE 802.3ah。国内通信行业技术标准组织——中国通信标准化协会(CCSA)——随即开展了一系列的系统标准制定,分别在2005年和2006年完成了设备技术要求和测试方法,互通性的要求和测试方法将在2007上半年完成。同时,EPON的产业链已开始全面成熟,几年来在全国各类运营商的网络上有几百套EPON系统投入了商业运行,包括FTTH、FTTB、FTTP等多种应用模式。相信随着对于大带宽应用需求的日益成熟、EPON技术的不断完善,一定会获得更大规模的应用。

本书是关于EPON的一部权威性的技术著作,作者Kramer博士是IEEE EFM中非常活跃的编辑之一,对EPON技术有全面深入的研究和独到的见解,参与了EPON标准的整个形成过程。这本书不仅介绍了EPON的结构、原理和关键技术,而且介绍了标准形成背后不同的方案之间的比较、权衡取舍,甚至版本的小问题。Kramer博士同时作为EPON芯片厂商Teknovus的首席科学家和系统架构师,对于EPON技术的系统实现和应用也有着较多的理解和分析。本书不仅适合工程技术人员学习理解EPON,同样也适合作通信、电子信息技术的大学高年级或研究生的教学参考书。

第一次认识Kramer博士是在2004年到格林威尔公司拜访交流时。Kramer为人谦和、严谨,交流中我们发现彼此对EPON技术及其应用有许多相同的看法,他在参观我们的EPON芯片设计和系统时非常有兴趣,随后Teknovus专门派工程师与格林威尔的工程师就芯片级的互通开展了测试合作。第二次他再来公司时,便带来他刚在美国麦格劳-希尔教育出版公司(McGraw-Hill Education)出版的新书——《Ethernet Passive Optical Networks》——送给我们。该书作为EPON技术的第一部著作,我们当即表示如果

Kramer 本人愿意,我们非常希望翻译推介这本新书到国内来,相信对国内的 EPON 开发应用会产生积极意义和影响。Kramen 博士出于对我们的信任,当时就非常肯定地给予了正面答复,并说愿意向出版公司推荐我们作为翻译者。接下来北京邮电大学出版社给予了积极的相应支持,正式向麦格劳-希尔表达引进版权合作意向,很快便得到该公司的积极反馈,并在很短的时间内签订了引进版权的出版合作协议。

参与本书翻译工作的主要是几位从事宽带无源光纤网络研究多年的技术专家,他们是北京邮电大学的陈雪教授、北京格林威尔科技发展有限公司的孙曙和、刘冬和盖鹏飞,均是“十五”期间国家 863 计划重大项目“基于千兆无源光纤网络系统 EPON”的负责人和核心骨干。参加本书初稿翻译的还有北京邮电大学无源光网络研究室的研究生宾磊、高荣、刘苑明、王晨凌、尹广兴、裘紫清、李俊玮等。全书由陈雪教授审校。

由于 EPON 技术还是新技术,译书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

在《Ethernet Passive Optical Networks》中文版即将付梓之时,特别向北京邮电大学出版社和美国麦格劳-希尔教育出版公司及其北京代表处王永诚先生的热心帮助表示衷心感谢!

译 者
2007 年 1 月

前 言

无源光网络(PON)被认为是适用于接入网的解决方案已有相对较长时间了,甚至早于互联网激发的带宽需求的出现。最早描述 PON 技术的论文之一是由英国电信的研究人员于 1988 年发表的。然而,近 10 年来的光通信技术的成熟才使 PON 接入网成为现实。

各种 PON 分别由各标准化组织所规范,区别各种 PON 的主要因素是承载协议的选择。目前,基于 ATM 的 PON(APON 和 BPON)、采用通用成帧规程(Generic Framing Procedure,GFP)的 GPON 和以太网 PON(EPON)已经标准化。

在这些 PON 标准规范中,EPON 是唯一的源于私有的企业数据以太网(非公共通信)的接入网技术。EPON 标准由美国电气与电子工程师学会(IEEE)802.3 工作组制定。IEEE 802.3 工作组统治着局域网世界,但对局域网之外涉及甚少,“第一公里以太网”标准制定是其对未知疆土的第一次“侦察”。EPON 在短短的 5 年里从原始的概念走到工业界标准,使工业界为之震撼。EPON 会在接入网领域发扬光大其前辈在局域网领域的辉煌吗?时间将会给出答案。

本书的动机

2001 年 IEEE 标准协会认识到 EPON 技术上和经济上的优势,授权成立 IEEE 第一公里以太网(Ethernet in the First Mile,EFM)任务组,把 EPON 标准制定作为任务组的主要工作目标之一。EFM 任务组于 2004 年 6 月完成了其使命——IEEE 802.3ah 标准颁布。

纵观 EPON 标准,任务组成员认识到 EPON 体系结构是以太网 30 年历史上最有意义的与传统以太网的“偏离”。任务组在 EPON 体系结构上作出的决策只有对比替代方案或了解任务组的讨论才能认识清楚。而正式的标准文本并不提供这些内容。因此,许多任务组成员建议出版一本介绍 EPON 的书,这对电信专业人士很有益处。

写这本书的另外一个动机基于 IEEE 802.3 标准只覆盖通信系统的一小部分(物理层和接入控制)这一事实。像安全性、保护、动态带宽分配、QoS 和利用率等都不在 IEEE 802.3 标准范畴之内。本书将讨论这些标准“遗留”的问题并深入分析其技术解决方案。

本书的组织

本书由 4 部分组成。

第一部分概述了 PON 的支撑技术,介绍了 EPON 的发展历程,对 EPON 与基于 ATM 的 PON 和采用 GFP 的 GPON 进行了比较。

第二部分概述了 IEEE 802.3ah 标准 EPON 相关部分。

值得强调的是,尽管本书经 IEEE 的许可引用了一些非常重要的状态机,但它不是标准的替代物,我们不恪守标准所要求的形式。相反,本书着重阐述 EPON 规范中的思想,必要时给出示例、可选方案,或者披露任务组的讨论情况。

本书关于 IEEE 802.3ah 标准的概述是基于 2004 年 6 月 IEEE 标准协会批准的版本。然而,标准正式通过后发现了几个问题。当涉及到时,我们会用下面的图标提醒读者注意。



本图标提醒读者注意此处 IEEE 802.3ah 标准目前版本存在严重问题,以后的版本将进行相关修改。

EPON 标准还在发展中,IEEE 802.3 将定期输出修订版本。

第三部分介绍不在 IEEE 802.3ah 标准之内的若干系统技术。第 10 章描述 EPON 的加密方法,第 11 章研究 EPON 几种保护方案的有效性。

第四部分介绍 EPON 的性能。这部分基于作者在加州大学 Davis 分校网络研究室的研究工作。

第 12 章研究 EPON 在各种带宽上的开销,如光物理层开销、成帧/封装开销、调度开销和纠错开销等。第 13 章说明 EPON 发现过程的效率。然后我们把注意力转向各种 EPON 调度和带宽分配方案及其对不同业务的支持。第 14 章介绍一种简单的静态带宽分配方案。EPON 刚出现时,几家 EPON 公司开发的就是基于静态带宽分配的 EPON 设备。

第 15 章介绍一种简单的动态带宽分配方案——自适应周期间插轮询(Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time, IPACT)。对于突发数据流量,IPACT 方案较前一章的静态带宽分配方案改进许多。

人们期望 EPON 成为融合的网络,支持话音、标准和高清视频、视频会议、实时和准实时交易以及数据通信等。为支持多种业务应用,EPON 必须对每种应用保证恰当的性能。第 16 章我们说明 EPON 怎样通过结合 IPACT 和严格优先级调度提供区分业务。严格优先级调度是 IEEE 802.1D 默认的调度算法。

尽管声称支持 QoS 的 EPON 设备提供商头脑里都有要提供区分业务这根弦,但在许多方面这还不够。第 17 章我们深入探讨 EPON 调度的目标,讨论业务保证、公平性、可扩展性和业务隔离等,这些远不是基于优先级方案所能提供的。

我们发现上述目标呈现相互矛盾的要求。一方面,为保证 SLA 和用户间的公平性,调度算法应该能为每个用户独立地分配资源,分层调度不该采用,因为它不能保证不同组里的用户的公平性。另一方面,为每个最终用户发送控制信息消耗过量的带宽,可行性差,从而又希望分层调度。

第 18 章我们提出 FQSE(Fair Queuing with Service Envelopes)算法,该算法能够满足上述矛盾的目标。它采用分层控制(也就是每个节点只从其直属子节点接收控制信息)而且保证不同组里的用户之间的公平性。

致 谢

感谢 Gerry Pesavento 和 JC Kuo 先生,他们先是 Alloptic 公司的创始人,后来又创建了 Teknovus 公司。感谢他们愿意花费创业公司稀少奇缺的资源用于创造和传播新知识。他们所构思的新的网络结构成为我研究的焦点。他们给我机会去实践我的想法并鼓励我写这本书。对此,我十分感激。

十分感谢我的导师 Biswanath Mukherjee 博士。他广博的知识和丰富的经验、发现看似无法解决难题的新解决方法的能力对我的研究工作起到关键作用。

感谢我在加州大学戴维斯分校(UC Davis)网络研究室的同事们,他们是:Narendra Singhal 博士(现在微软公司)、Amitabha Banerjee 博士、Shun Yao 博士、Keyao Zhu 博士、Canhui (Sam) Ou 博士(现在 SBC 公司)、Jian Wang 博士(现在佛罗里达国际大学)等。我有幸成为研究室的一员,从许多讨论和合作中获益匪浅。

新罕布什尔大学互操作实验室的 Eric Lynskey 和 Swapnil Bhatia 审阅了本书的草稿。最终稿根据 Eric 中肯的意见进行了修改。Swapnil 指出了 13 章数学推导中的一些错误并建议了更好的方法。在此作者表示感谢。

感谢麦格劳-希尔公司的编辑团队:主任编辑 Steve Chapman、编辑经理 David Fogarty 和编辑 Patti Scott。感谢他们的信任和耐心,他们是精益求精的典范。

最后,我必须感谢我的亲人:妻子 Irina、儿子 Anton、父母 Asya 和 Boris,以及我的弟弟 Pavel。没有他们的支持、鼓励和帮助,我不可能完成这项工作。

格伦·克雷默(Glen Kramer)

目 录

第一部分 接入网结构概述

第 1 章 引 言

1.1 现有“宽带接入”解决方案	3
1.1.1 数字用户线	4
1.1.2 ADSL	4
1.1.3 CATV 网络	5
1.2 流量的增长	6
1.3 “第一公里”的演进	7
1.3.1 光纤到驻地	7
1.3.2 下一代用户接入网	7
1.3.3 PON 是最佳候选者	9
本章参考文献	9

第 2 章 PON 支撑技术概述

2.1 光 纤	11
2.1.1 光在光纤中的传播	12
2.1.2 单模光纤与多模光纤	12
2.1.3 模式色散	13
2.1.4 色度色散	14
2.2 光分/合路器	14
2.3 PON 拓扑	15
2.4 WDMA PON 与 TDMA PON	16
2.4.1 WDMA PON	17

2.4.2 TDMA PON	17
2.5 突发模式收发器.....	18
本章参考文献	19

第3章 基于 TDMA PON 的接入网结构

3.1 ATM PON	20
3.2 EPON	21
3.3 GFP PON	23
3.4 BPON/GPON 与 EPON 的比较	23
本章参考文献	24

第4章 EPON 的出现

4.1 EPON 的标准化	27
4.1.1 工作范畴.....	28
4.1.2 物理媒质相关子层.....	29
4.1.3 点对多点协议.....	30
4.1.4 现有子句的扩展.....	30
4.2 EPON 的前景和挑战	31
本章参考文献	32

第二部分 EPON 体系结构

第5章 EPON 简介

5.1 下行传输.....	35
5.2 上行传输.....	36
5.2.1 基于竞争的与有保证的两种媒质接入机制比较.....	36
5.2.2 集中式与分布式仲裁的比较.....	37
5.3 多点控制协议.....	38
5.3.1 带宽分配.....	39
5.3.2 自动发现.....	43
5.3.3 环路时延的测量.....	47

第 6 章 逻辑拓扑仿真

6.1 点到点仿真	53
6.2 共享媒质仿真	55
6.3 P2PE 和 SME 的组合模式	57
6.4 最终的解决方案	58
6.5 前导码格式	59
6.5.1 LLID 起始定界符	60
6.5.2 循环冗余校验	61
本章参考文献	62

第 7 章 激光器控制功能

7.1 数据检测器功能	63
7.2 数据检测器状态图	65
7.2.1 等待码组状态	65
7.2.2 数据到达状态	67
7.2.3 打开激光器状态	68
7.2.4 空闲码组到达状态	68
7.2.5 关闭激光器状态	68
7.2.6 TRANSMIT_CODE_GROUP 状态	68
7.3 FIFO 缓冲区大小	68
本章参考文献	69

第 8 章 多点控制协议:正式规范

8.1 多点控制协议帧结构	70
8.1.1 报告帧	71
8.1.2 授权帧	74
8.1.3 注册请求帧	77
8.1.4 注册帧	78
8.1.5 注册确认帧	79
8.2 通用的处理过程	80
8.2.1 控制解析器	80
8.2.2 ONU 控制复用器	83
8.2.3 多点传输控制	87

8.2.4 OLT 控制复用	89
8.3 授权过程	92
8.3.1 OLT 生成授权帧	92
8.3.2 ONU 接收授权帧	94
8.3.3 授权激活	96
8.4 报告过程	101
8.4.1 ONU 生成报告	101
8.4.2 OLT 接收报告	102
8.5 发现过程	103
8.5.1 OLT 的生成发现授权过程	105
8.5.2 OLT 的请求接收过程	106
8.5.3 OLT 的生成注册帧过程	107
8.5.4 OLT 的最终注册过程	109
8.5.5 ONU 侧的发现过程	112

第9章 前向纠错

9.1 FEC 编码基础	116
9.2 基于流与基于帧 FEC 的对比	117
9.3 FEC 帧定义	118
9.3.1 FEC 标记的汉明距离	119
9.3.2 后向兼容	121
9.4 编码流程	121
9.5 解码流程	122
本章参考文献	123

第三部分 EPON 系统技术

第10章 EPON 加密

10.1 关于安全机制规范	128
10.2 EPON 特有的加密	128
10.2.1 块加密	128
10.2.2 下行加密	132
10.2.3 上行加密	132

10.2.4 密钥更换.....	133
10.3 小 结.....	135
本章参考文献.....	135

第 11 章 EPON 的保护倒换

11.1 无保护的树形 PON	138
11.2 主干保护的树形 PON	138
11.3 分支保护的树形 PON	138
11.4 主干和分支均保护的树形 PON	139
11.5 “树”保护 PON	139
本章参考文献.....	141

第四部分 EPON 的性能

第 12 章 性能基础

12.1 封装开销.....	145
12.2 调度开销.....	146
12.2.1 控制通道开销.....	146
12.2.2 保护段开销.....	147
12.2.3 发现窗口开销.....	147
12.2.4 帧定界开销.....	148
12.3 FEC 开销	150
12.4 小 结.....	150
本章参考文献.....	151

第 13 章 发现时隙的分配

13.1 两个 ONU 发生冲突的概率	153
13.2 平均成功速率.....	154
13.3 发现时隙长度的效率.....	155
13.4 最佳的发现时隙长度.....	155

第 14 章 采用静态时隙分配的 EPON

14.1 介 绍.....	157
---------------	-----

14.2 系统架构.....	157
14.3 业务模式.....	159
14.4 性能分析.....	159
14.4.1 平均分组时延.....	160
14.4.2 平均队列长度.....	161
14.4.3 帧丢失.....	162
14.4.4 带宽利用率.....	162
14.5 小 结.....	166
本章参考文献.....	166

第 15 章 采用动态时隙分配的 EPON

15.1 DBA 算法	168
15.1.1 最大传输窗口.....	171
15.1.2 分组时延的构成.....	172
15.1.3 IPACT 分配方案	172
15.2 仿真试验的结果.....	174
15.3 小 结.....	178
本章参考文献.....	178

第 16 章 对区分服务的支持

16.1 介 绍.....	180
16.2 系统结构:在 EPON 中集成优先级队列	183
16.3 包时延分析.....	184
16.4 优化方案.....	186
16.4.1 串行队列调度.....	186
16.4.2 CBR 信用	188
16.4.3 带宽利用.....	193
16.5 小 结.....	195
本章参考文献.....	196

第 17 章 EPON 调度算法的目标

17.1 公平性的正式定义.....	199
17.2 公平性调度.....	201
17.2.1 直接(单级)调度器.....	202