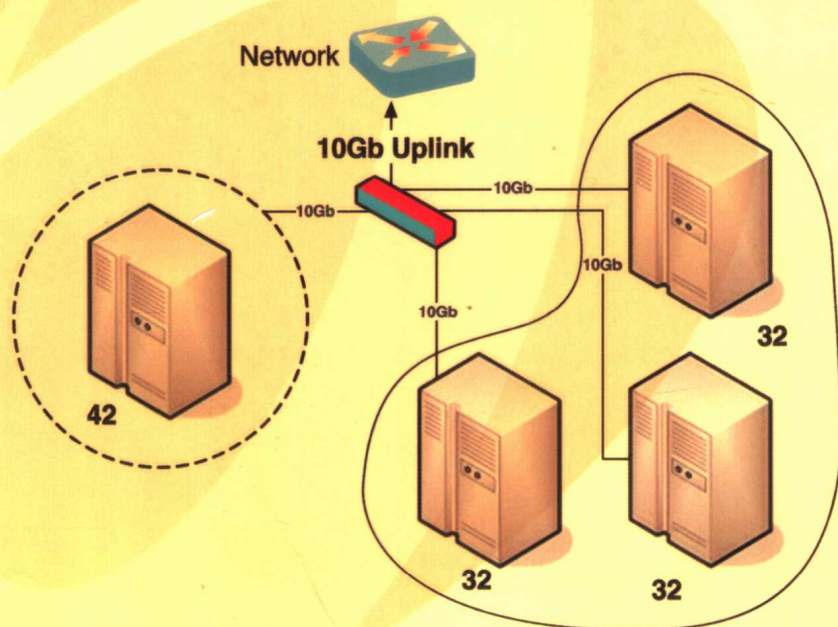




# 万兆位以太网 及其实用技术

*10 Gigabit Ethernet and Its Practical Technology*

敖志刚 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

# 万兆位以太网及其实用技术

敖志刚 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

万兆位以太网是一门正在崛起的、应用前景广泛的网络热点技术。本书系统讲述了万兆位以太网的概念、研究动态、基础知识、体系结构、工作原理、关键技术、实现机制、重要协议、标准、规范、接口、产品、布线、解决方案和新的应用,内容涉及万兆位以太局域网、城域网和广域网,以及光缆、铜缆、双绞线和背板万兆位以太网。本书取材广泛、构思新颖、内容丰富实用,集成了各种万兆位以太网技术,可以帮助读者尽快掌握万兆位以太网技术的重要内容和最新进展,全面了解其应用技巧和方法。

本书适用于网络工程与技术的业余爱好者自学,可作为计算机、网络技术和通信领域本科生和研究生的选修课或教学参考书;还可供从事网络产品设计和制造,网络规划、建设、安装、管理的工程技术人员,从事网络研究、开发、教学的科研人员和教师阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

万兆位以太网及其实用技术 / 敖志刚编著. —北京:电子工业出版社, 2007. 7

ISBN 978-7-121-04519-6

I. 万… II. 敖… III. 以太网网络 IV. TP393.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 077339 号

责任编辑: 窦 昊 特约编辑: 詹文军

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 29.5 字数: 755 千字

印 次: 2007 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系电话: (010) 68279077; 邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

随着知识经济时代的到来,人类正在开启全新的网络世界,一个以网络文化、网络教育、网络医疗、网络商务、网络娱乐、网络办公和网络家庭业务为主体的技术与产业已经展现出巨大的发展空间和市场潜力。网络创造财富,网络带来商机,网络改变着世界,网络使我们的生活和工作丰富多彩,网络已成为衡量一个国家现代化水平和综合国力的重要标志,人们无时无刻不在网络的包围之中。网络技术的发展,正推动着社会不断进步。

从 1983 年以来,局域网领域是以太网技术与令牌总线、令牌环三分天下。但随着时间的推移,以太网长盛不衰,一枝独秀,造就了网络产品几乎都是以太网产品的局面。由于不断更新技术,不断适应社会需要,从共享以太网到交换式以太网,从电以太网到光以太网,从有线和接入以太网到无线与移动以太网,从十兆位、百兆位、千兆位以太网发展到万兆位以太网,以太网创造了一个又一个辉煌和奇迹,导致以太网时至今日仍然焕发勃勃生机,令人刮目相看。

万兆位以太网是最新的、前沿的、主流的、使用广泛的、发展前景看好的网络新技术,曾入选中国通信业十大热点技术。万兆位以太网以 100 亿比特每秒的速度提供了以太网的所有特点,它借鉴了以太网、千兆位以太网的成功因素和经验,在结构、协议、接口、技术和软硬件方面引起了巨大的变革和进步;不仅速度比千兆位以太网提高了 10 倍,而且更公平,更兼容,更方便,升级容易,功能加强,性能得到提高,安全得到保障,易于管理和维护,能实现各种网络之间的无缝连接;不但价格低廉,传输距离延长,在应用范围上也得到了更多的扩展。目前形成了万兆位广域网、万兆位城域网和万兆位局域网,以及光缆、铜缆、双绞线和背板万兆位以太网百花盛开的局面;不但在网络的核心层、骨干层、汇聚层使用万兆位以太网,而且将万兆位以太网推向边缘层。随着实时融合通信、网络电视、网络游戏的推广,万兆位以太网产品有可能进入千家万户。目前,成功的万兆位以太网案例和解决方案数不胜数,越来越多的万兆位以太网正等待我们去规划、去建设、去开发。

万兆位以太网有成熟的技术作为发展背景,不但推出了多个万兆位以太网的国际标准及其版本,而且形成了几十个厂家多序列、多产品争奇斗艳的态势。万兆位以太网的适用领域十分广阔,如新兴的宽带广域网、高带宽园区和城域网骨干、数据中心的出口与汇聚、宽带交换机与宽带交换机互联、核心与骨干网的更新和升级、服务器群组网,网络与超级计算、合一(语音、视频、图像和数据)的通信、存储组网等方面都离不开万兆位以太网技术。另外它也将会在其他多媒体应用上如视频点播、数字电影制作、网络游戏、网上电视电影等领域具备市场潜力。

面对潜力巨大的国内外市场,又鉴于目前国内还没有一本系统、完整的万兆位以太网方面的书籍,而对于学习网络的人来说,必须掌握最新的进展,学会最新的理论、技术和方法。本书正是为那些渴望获取万兆位以太网新知识,想尽快全面了解万兆位以太网最新前沿技术的人编写的。其目的是促进万兆位以太网的普及、推广和应用,满足教学、科学研究、学科

发展和市场的需要。我们希望通过本书的出版和学习,使读者建立扎实的知识结构和科学基础,能够从以太网、快速以太网、千兆位以太网、万兆位以太网技术的内在联系,全面、准确而及时地掌握万兆位以太网及其实用技术,在实践中充分发挥自己的应用能力。

作者在参阅了大量参考资料的同时,不断挖掘技术深处的奥秘和运用拓展的潜力。在兼顾基础知识的同时,强调实用性和可操作性。对概念、原理、技术、数据和结论从不同的来源,多视角、多侧面进行考察、检验和论证,以确信其正确性。注重理论联系实际,学术与工程并重。用新颖、结构化的图例介绍其概念,通俗、简练的概述贯穿全书;采取由浅入深、循序渐进、层次分明、步骤详尽的写作方式,使内容丰富、全面又完整。既有探索、改革、研究、实践,又突出关键技术。为使读者易学易理解,在难易程度、广度与深度方面进行了综合考虑,做到了科学规范,书后还附有英文缩写语和中英文对照。

书中的大部分知识和要点都是万兆位以太网近几年世界科学研究的结晶。经过对大量资料的精心选取、构思和研究,系统地介绍了万兆位以太网的基础知识、体系结构、工作原理、关键技术、实现机制、重要协议、软硬件和新的应用。内容涉及到万兆位以太网的研究背景、动态、产品及其选择;光缆、铜缆、双绞线和背板万兆位以太网标准与技术;十兆位、百兆位、千兆位和交换式以太网的原理与协议;万兆位以太网的体系结构、技术实现、光收发机模块、8B/10B 编解码、64B/66B 的编解码;万兆位以太网物理层的管理数据输入输出接口、介质无关接口、附加单元接口、16 位通道接口;万兆位以太网物理层的调和子层、编码子层、接口子层、介质附件子层和介质相关子层及其协议;光缆、铜缆、双绞线万兆位以太网的规范实体与连接方法;万兆位以太网交换机的新一代技术;ProCurve Switch 8100fi 和 Quidway S8500 万兆位以太网交换机以及 CRS-1 万兆位以太网路由系统及其体系结构和实现机制;传统布线、6 类布线、7 类布线和万兆位布线系统、技术与案例;万兆位以太网局域网、城域网和广域网的应用、组网技术、优化方案和实例。不仅展示了万兆位以太网发展的来龙去脉,而且深入浅出地阐述了万兆位以太网的基本原理、技术实现的许多细节。可以提供给网络工程人员较为全面的万兆位以太网组网解决方案和技术路线。本书力图把以上内容有机联系在一起,形成一个较为清晰、完整的体系,以便帮助读者梳理其知识结构,尽快掌握万兆位以太网的重要内容和基本知识。

该书适合于网络的业余爱好者自学;也可作为计算机、网络技术和通信领域本科生和研究生的选修课和参考书;还可供从事网络产品设计和制造,网络规划、建设、安装、管理的工程技术人员,从事网络研究、开发、教学的科研人员和教师阅读。该书是您学习、实现和了解万兆位以太网的理想窗口和最佳参考指南。

解放军理工大学的张宏军主任(博导)、俞海英主任(教授)、王真军、吴海平同志参加了本书部分内容的讨论和撰写;康兴档、王冠同志和我的妻子吴迎花费了许多心血和劳动;信息技术系和信息中心的领导和同事们给予了许多支持和鼓励,借此机会向他们表示衷心的感谢和敬意。

由于万兆位以太网是一个正在不断推陈出新,不断前进的高技术领域,许多问题目前尚不明了,理解尚欠深入,限于作者的知识水平,很难对它做一个全面而深入的总结,文中难免有遗憾和错误之处,欢迎读者朋友批评指正,提出宝贵的意见和建议。

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第 1 章 万兆位以太网简介          | 1  |
| 1.1 万兆位以太网概述            | 1  |
| 1.1.1 选用万兆位以太网的理由       | 1  |
| 1.1.2 万兆位以太网的优势         | 2  |
| 1.1.3 10GbE 技术要点        | 4  |
| 1.2 以太网的发展与展望           | 6  |
| 1.2.1 万兆位以太网的技术背景       | 6  |
| 1.2.2 发展历程              | 8  |
| 1.2.3 万兆位以太网发展动向        | 9  |
| 1.3 万兆位以太网的标准体系         | 11 |
| 1.3.1 IEEE 802 协议族      | 11 |
| 1.3.2 IEEE 802.3 协议     | 15 |
| 1.3.3 万兆位以太网协议标准        | 21 |
| 1.4 万兆位以太网产品及其选择        | 27 |
| 1.4.1 产品种类与分析           | 27 |
| 1.4.2 产品重要指标            | 28 |
| 1.4.3 万兆位以太网产品的选购       | 30 |
| 1.4.4 万兆位以太网交换机/路由器产品序列 | 32 |
| 1.4.5 10GbE 边缘网卡        | 34 |
| 第 2 章 以太网技术基础           | 36 |
| 2.1 以太网基本知识             | 36 |
| 2.1.1 以太网的概念            | 36 |
| 2.1.2 以太网的目标与优势         | 36 |
| 2.1.3 以太网的技术特性          | 38 |
| 2.1.4 以太网网络主要网元设备       | 39 |
| 2.1.5 以太网的配置            | 42 |
| 2.2 以太网的体系结构与协议         | 43 |
| 2.2.1 以太网的体系结构          | 43 |
| 2.2.2 以太网介质访问控制         | 44 |
| 2.2.3 CSMA/CD 介质访问控制    | 45 |
| 2.2.4 以太网帧格式            | 47 |
| 2.3 早期以太网的主要传输方法        | 51 |
| 2.3.1 10Base-5 粗缆以太网    | 51 |
| 2.3.2 10Base-2 细缆以太网    | 53 |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 2.3.3 | 双绞线以太网 (10Base-T)        | 54  |
| 2.3.4 | 10Base-F 光缆以太网           | 57  |
| 2.4   | 100 Mbps 的快速以太网          | 59  |
| 2.4.1 | 快速以太网的体系结构及其改进           | 59  |
| 2.4.2 | 快速以太网物理层技术规范             | 62  |
| 2.4.3 | 快速以太网的介质无关接口             | 65  |
| 2.4.4 | 自动协商机制                   | 66  |
| 2.5   | 千兆位以太网                   | 68  |
| 2.5.1 | 千兆位以太网简介                 | 68  |
| 2.5.2 | 千兆位以太网的协议结构和模型           | 71  |
| 2.5.3 | 千兆位以太网的物理层技术             | 72  |
| 2.5.4 | 千兆位以太网的介质无关接口            | 77  |
| 2.5.5 | 千兆位以太网的自动协商              | 78  |
| 2.6   | 其他以太网及其应用技术              | 82  |
| 2.6.1 | 交换式以太网                   | 82  |
| 2.6.2 | 以太网宽带接入技术                | 86  |
| 2.6.3 | 以太网供电系统的关键技术             | 91  |
| 第3章   | 万兆位以太网的体系结构及技术实现         | 99  |
| 3.1   | 万兆位以太网技术的系统结构            | 99  |
| 3.1.1 | 万兆位以太网技术的层次模型            | 99  |
| 3.1.2 | 万兆位以太网物理层规范的表达方式         | 100 |
| 3.1.3 | 两种物理层的功能模型与速率适配          | 101 |
| 3.1.4 | 帧结构                      | 104 |
| 3.1.5 | 物理传输介质                   | 105 |
| 3.1.6 | 网络的监控与管理                 | 106 |
| 3.2   | 10GbE 网络构件的原理与技术         | 107 |
| 3.2.1 | 10GbE 光收发模块设计中的主要问题及原理   | 107 |
| 3.2.2 | 10GbE 光发射机               | 109 |
| 3.2.3 | 10GbE 光接收机               | 111 |
| 3.2.4 | 10GbE 光模块及其比较            | 114 |
| 3.2.5 | 10GbE 介质访问控制 MAC 的设计与实现  | 116 |
| 3.2.6 | 10GbE 介质访问控制器            | 120 |
| 3.2.7 | 一种极低功率万兆位以太网 LAN/WAN 收发器 | 121 |
| 3.3   | 10GBase-X 编码方式与码元组合      | 122 |
| 3.3.1 | 编码方式                     | 122 |
| 3.3.2 | 码元组合和特定码元                | 124 |
| 3.4   | 8B/10B 的编码/解码方法          | 126 |
| 3.4.1 | 8B/10B 码简介               | 126 |

|       |                                             |     |
|-------|---------------------------------------------|-----|
| 3.4.2 | 8B/10B 字符编码和解码 .....                        | 128 |
| 3.4.3 | 8B/10B 的逻辑实现 .....                          | 133 |
| 3.5   | 万兆位以太网的 64B/66B 编码 .....                    | 135 |
| 3.5.1 | 64B/66B 的结构与特点 .....                        | 135 |
| 3.5.2 | 64B/66B 系统数据通路 .....                        | 135 |
| 3.5.3 | 64B/66B 传输码流程 .....                         | 136 |
| 3.5.4 | 数据与控制块结构 .....                              | 137 |
| 3.5.5 | 编码器与解码器的逻辑设计 .....                          | 141 |
| 3.5.6 | 扰码、解扰及其他 .....                              | 144 |
| 3.6   | 局域和广域 10GbE 在物理层上的实现技术 .....                | 146 |
| 3.6.1 | 局域 10GbE 的物理层实现 .....                       | 147 |
| 3.6.2 | 广域 10GbE 的物理层实现 .....                       | 148 |
| 第 4 章 | 万兆位以太网物理层接口 .....                           | 150 |
| 4.1   | 10GbE 的物理层与各接口、子层的关系 .....                  | 150 |
| 4.1.1 | 10GbE 物理层介绍 .....                           | 150 |
| 4.1.2 | 10GbE 物理子层与接口之间的关系 .....                    | 151 |
| 4.1.3 | 10GbE 物理层电平接口标准 .....                       | 153 |
| 4.1.4 | 几种流行的最新通信接口 .....                           | 154 |
| 4.2   | 管理数据输入/输出 (MDIO) 接口 .....                   | 158 |
| 4.2.1 | MDIO 接口及其寄存器 .....                          | 158 |
| 4.2.2 | MDIO 接口设备与地址 .....                          | 159 |
| 4.3   | XGMII 接口 .....                              | 162 |
| 4.3.1 | XGMII 接口的信号组成及其特性分析 .....                   | 162 |
| 4.3.2 | XGMII 的电子特性 .....                           | 166 |
| 4.3.3 | XGMII 管理接口 .....                            | 167 |
| 4.3.4 | XGMII 收发机的设计与实现 .....                       | 168 |
| 4.4   | 万兆位附加单元接口 XAUI .....                        | 173 |
| 4.4.1 | XAUI 基本知识与概念 .....                          | 173 |
| 4.4.2 | XAUI 模块接口功能的实现 .....                        | 175 |
| 4.4.3 | XAUI 接口在系统互连中的应用 .....                      | 180 |
| 4.5   | 10 Gbps 16 位通道接口 XSBI .....                 | 183 |
| 4.5.1 | XSBI 的接口信号与技术要求 .....                       | 183 |
| 4.5.2 | XSBI 的一般电子特性 .....                          | 186 |
| 4.5.3 | PMC 山脉公司基于 XSBI 光模块的单芯片 10GbE LAN PHY ..... | 188 |
| 4.6   | 10GbE ATM 通用测试及操作物理层接口 UTOPIA 的设计与实现 .....  | 190 |
| 4.6.1 | UTOPIA 接口概述 .....                           | 190 |
| 4.6.2 | UTOPIA 接口的实现 .....                          | 191 |
| 4.6.3 | 降低功耗的考虑 .....                               | 192 |

|              |                            |            |
|--------------|----------------------------|------------|
| 4.7          | 10GbE 线路接口的设计              | 192        |
| 4.7.1        | 10GbE 线路接口设计的数据处理流程和功能分析   | 192        |
| 4.7.2        | 基于 FPGA 的 10GbE 线路接口设计结构   | 193        |
| <b>第 5 章</b> | <b>万兆位以太网物理子层协议</b>        | <b>196</b> |
| 5.1          | 调和子层 RS 和 XGMII 扩展子层 XGXS  | 196        |
| 5.1.1        | 调和子层 RS                    | 196        |
| 5.1.2        | XGMII 扩展子层 XGXS            | 198        |
| 5.2          | 物理编码子层 PCS                 | 199        |
| 5.2.1        | PCS 子层技术分析                 | 199        |
| 5.2.2        | 基于 10GBase-X 的物理编码子层 PCS   | 203        |
| 5.2.3        | 基于 10GBase-R 的 PCS 子层      | 209        |
| 5.3          | WAN 接口子层 WIS               | 211        |
| 5.3.1        | WIS 的目标与服务原语               | 211        |
| 5.3.2        | WIS 子层的数据收发过程及功能分析         | 214        |
| 5.4          | 物理介质附件子层 PMA               | 218        |
| 5.4.1        | 基于光纤介质的 PMA 物理子层           | 218        |
| 5.4.2        | 基于 10GBase-LX4 的 PMA 子层    | 220        |
| 5.5          | 物理介质相关子层 PMD               | 221        |
| 5.5.1        | 基于光纤介质的 PMD                | 221        |
| 5.5.2        | 基于 10GBase-LX4 的 PMD 子层    | 223        |
| <b>第 6 章</b> | <b>万兆位以太网物理层规范实体与实现方法</b>  | <b>225</b> |
| 6.1          | 10GBase-X 物理层规范实体          | 226        |
| 6.1.1        | 10GBase-X 物理层工作原理          | 226        |
| 6.1.2        | 10GBase-LX4 规范实体           | 227        |
| 6.1.3        | 面向 MMF 的 10GBase-LX4       | 230        |
| 6.1.4        | 10GBase-LX4 的基本要素与替代方案     | 231        |
| 6.2          | 串行的万兆位 LAN 10GBase-R 物理层规范 | 234        |
| 6.2.1        | 10GBase-R 物理层工作原理          | 234        |
| 6.2.2        | 10GBase-SR 规范实体            | 235        |
| 6.2.3        | 10GBase-LR                 | 237        |
| 6.2.4        | 10GBase-ER                 | 239        |
| 6.3          | 串行的万兆位 WAN 10GBase-W 物理层规范 | 240        |
| 6.4          | 10GBase-LRM                | 241        |
| 6.4.1        | 10GBase-LRM 概述             | 242        |
| 6.4.2        | 10GBase-LRM 的标准化进程         | 243        |
| 6.4.3        | GBase-LRM 的主要技术            | 245        |
| 6.5          | 铜缆万兆位以太网 10GBase-CX4 规范实体  | 248        |
| 6.5.1        | 10GBase-CX4 的工作原理          | 249        |

|       |                                    |     |
|-------|------------------------------------|-----|
| 6.5.2 | 链路的连接                              | 251 |
| 6.5.3 | 10GBase-CX4 的 MDI 电子特性             | 253 |
| 6.5.4 | 电缆部件的特性                            | 257 |
| 6.6   | 双绞线铜缆 10GBase-T                    | 261 |
| 6.6.1 | 10GBase-T 的发展动态                    | 261 |
| 6.6.2 | 10GBase-T 的性能指标                    | 263 |
| 6.6.3 | 线缆之间的串扰及其解决方案                      | 267 |
| 6.6.4 | 10GBase-T 的结构、原理与实现                | 271 |
| 第 7 章 | 万兆位以太网交换机、路由器及其技术实现                | 274 |
| 7.1   | 万兆位以太网交换机                          | 274 |
| 7.1.1 | 万兆位以太网交换机的分类                       | 274 |
| 7.1.2 | 万兆位以太网交换机中的新一代技术                   | 283 |
| 7.1.3 | 以太网交换机的堆叠与级联技术                     | 286 |
| 7.1.4 | 交换机背板的设计                           | 295 |
| 7.2   | ProCurve Switch 8100fl 万兆位以太网交换机   | 301 |
| 7.2.1 | 系统组成及配置                            | 302 |
| 7.2.2 | 硬件结构及原理                            | 304 |
| 7.3   | 运营商万兆位以太网路由系统 CRS-1 的软硬件及实现原理      | 309 |
| 7.3.1 | CRS-1 的硬件结构                        | 309 |
| 7.3.2 | CRS-1 的重要软件 IOS XR 及其结构            | 312 |
| 7.3.3 | CRS-1 的可管理性及其架构                    | 318 |
| 7.4   | Quidway S8500 系列万兆位核心路由交换机系统及其技术实现 | 322 |
| 7.4.1 | Quidway S8500 系统组成                 | 322 |
| 7.4.2 | S8500 体系结构与实现特点                    | 323 |
| 第 8 章 | 万兆位以太网布线技术                         | 329 |
| 8.1   | 综合布线系统                             | 329 |
| 8.1.1 | 综合布线系统概述                           | 329 |
| 8.1.2 | 双绞线电缆及其结构特性                        | 334 |
| 8.1.3 | 同轴电缆及其特性                           | 340 |
| 8.1.4 | 光纤及其连接器件                           | 344 |
| 8.2   | 6 类布线系统和方法                         | 355 |
| 8.2.1 | 综合布线 6 类铜缆双绞线标准                    | 355 |
| 8.2.2 | 6 类布线发展趋势                          | 358 |
| 8.2.3 | 6 类布线系统的特点与技术优势                    | 359 |
| 8.2.4 | 6 类双绞线及其连接部件                       | 363 |
| 8.2.5 | 6 类布线系统的安装                         | 365 |
| 8.2.6 | 6 类系统主流布线方案                        | 370 |
| 8.3   | 7 类布线系统                            | 374 |

|       |                                        |     |
|-------|----------------------------------------|-----|
| 8.3.1 | 7 类布线系统概述 .....                        | 374 |
| 8.3.2 | 7 类布线的标准 .....                         | 376 |
| 8.3.3 | 7 类布线产品 .....                          | 378 |
| 8.4   | 万兆位以太网布线 .....                         | 379 |
| 8.4.1 | 万兆位以太网布线技术及发展 .....                    | 379 |
| 8.4.2 | 10GbE 综合布线与 6 类综合布线的基本区别 .....         | 381 |
| 8.4.3 | 10GbE 布线系统 .....                       | 382 |
| 8.4.4 | 10GbE 布线系统的线缆测试 .....                  | 386 |
| 8.4.5 | 万兆位以太网光纤和光缆测试 .....                    | 390 |
| 8.4.6 | 安普万兆位 XG 光纤解决方案 .....                  | 391 |
| 8.4.7 | 万兆位铜缆布线解决方案 .....                      | 394 |
| 第 9 章 | 万兆位以太网的组网应用及其解决方案 .....                | 397 |
| 9.1   | 万兆位以太网的升级 .....                        | 397 |
| 9.1.1 | 网络改造升级 .....                           | 397 |
| 9.1.2 | 网络交换机硬件设备升级 .....                      | 400 |
| 9.1.3 | 万兆位以太网的边缘部署 .....                      | 405 |
| 9.1.4 | 城域网 2.5 Gbps 到 10 Gbps 网络升级方案的实施 ..... | 410 |
| 9.1.5 | 某大学校园网络改造升级成万兆位 .....                  | 413 |
| 9.2   | 万兆位以太网的应用 .....                        | 415 |
| 9.2.1 | 万兆位以太网应用概述 .....                       | 415 |
| 9.2.2 | 10GbE 技术应用于广域网 .....                   | 418 |
| 9.2.3 | 万兆位以太网在局域网方面的应用 .....                  | 419 |
| 9.2.4 | 万兆位以太网在宽带 IP 城域骨干网的应用 .....            | 420 |
| 9.3   | 10GbE 在教育科研网络方面的解决方案与案例 .....          | 422 |
| 9.3.1 | 某大学万兆位校园网建设案例 .....                    | 422 |
| 9.3.2 | 某大学万兆位基础设施建设 .....                     | 425 |
| 9.3.3 | 某实验室万兆位 IPv6 科研网成功案例 .....             | 428 |
| 9.4   | 企业万兆位以太网的解决方案 .....                    | 430 |
| 9.4.1 | 某报社万兆位以太网构建与解决方法 .....                 | 430 |
| 9.4.2 | 某电力公司调度通信楼万兆位网络案例 .....                | 432 |
| 9.5   | 万兆位城域网的案例及解决方法 .....                   | 435 |
| 9.5.1 | 某油田万兆位城域骨干网的改造升级 .....                 | 435 |
| 9.5.2 | IP 电信万兆位城域网的案例与分析 .....                | 438 |
| 9.5.3 | 万兆位教育城域网的典型建网方案 .....                  | 441 |
| 附录 A  | 英文缩写语及其中英文对照 .....                     | 443 |
| 参考文献  | .....                                  | 454 |

# 第1章 万兆位以太网简介

## 1.1 万兆位以太网概述

万兆位以太网 (10GbE, 10 Gigabit Ethernet) 是以太网世界的最新技术, 它不仅速度比千兆位以太网提高了 10 倍, 在应用范围上也得到了更多的扩展。10GbE 不仅适合所有传统局域网的应用场合, 更能延伸到传统以太网技术受到限制的城域网和广域网范围。它能够适应新型的网络结构, 具有可靠性高、安装和维护都相对简单等很多优点, 同时采用 10GbE 构建系统的费用可以比采用 ATM/SONET 技术构建的类似系统降低 25% 左右, 并且 10GbE 能提供更新、更快的数据业务, 既可以和同步光纤网络 (SONET, Synchronous Optical Network) 协同工作, 也可以使用端到端的以太网连接。

目前, 在广域网中绝大多数采用的是同步数字序列 (SDH, Synchronous Digital Hierarchy) / SONET 传输技术, 这是因为 SDH/SONET 是一种非常成熟的传输技术, 有强大的网管、自愈和恢复功能。但是, SDH 也有自身的缺点, 如使用的帧格式较复杂、设备昂贵、开销大、净荷传送的效率低等, 同时 SDH 系统由于其最初设计是用来传输语音业务, 故接入种类有限, 通常只有准同步数字序列 PDH (Pseudo, Synchronous Digital Hierarchy) (2 Mbps、34 Mbps、140 Mbps) 和 SDH (STM-1、STM-4、STM-16、STM-64) 等速率, 对目前快速发展的数据业务 (如以太网、ATM 等) 处理起来就非常困难。而 10GbE 的局域网、城域网和广域网采用同一种核心技术, 网络易于管理和维护, 同时避免了协议转换, 因此有着广泛的发展前景。万兆位以太网入选 2002 年中国通信业十大热点技术, 入选原因是, 它是 2002 年在各种通信技术会议和论坛上出现频率最高的几个词之一。

### 1.1.1 选用万兆位以太网的理由

现在 10GbE 标准已经推出 4 年多了, 技术的成熟度不断提高, 设备的可用性不断增强, 因此在校网应用万兆位技术已经是水到渠成的事情了。技术进步可在降低成本的同时提高性能。因而, 大部分公司已能够负担得起千兆位带宽和万兆位带宽。

第一, 对于相对于现在的百兆位/千兆位网络, 万兆位/千兆位网络价格有很大的吸引力。原有校园企业网的边缘采用百兆技术, 核心采用千兆位技术, 现在转变为, 在边缘采用千兆位技术, 核心采用万兆位技术。这样的改变方式, 对于用户来说, 只需追加一点资金, 性能就能提高 10 倍。而且, 在保护用户原有投资方面, 可以将用户原有千兆位设备, 移到现有网络的边缘位置, 这样一来就可以很好地利用现有设备, 同时网络性能得到 10 倍的提升。因此, 将万兆位以太网引入到校园网来说, 非常有吸引力。

第二, 随着现在桌面用户对于速度提升的要求, 千兆位到桌面也将在未来得以实现。IDC 的研究表明, 固定配置的千兆位以太网交换机端口的平均价格已经从 1998 年这项技术

刚兴起时的每端口 800 美元下降到 2003 年的每端口 100 美元以下。新型高密度交换机的出现使用户能够利用现有的第 5/5e 类电缆部署千兆位以太网, 因而无须重新为 LAN 布线。借助当今高密度 LAN 交换机上的 10/100/1000 端口, 网络管理员可以在网络需要且预算允许时, 移植到速度更高的终端站点。由于在核心层部署万兆位网络后, 桌面用上千兆位也就是非常容易的事情了。

第三, 除了需降低成本之外, 还存在着其他明显的需求。越来越多的应用需要可观的带宽来支持大型数据、视频和音频文件的传输。随着带宽密集性应用和延时敏感型流量类型的普及, 同样普遍存在着为其提供支持和传输的需要。

第四, 从保护投资方面来看, 在万兆位/千兆位网络上可以运行现在所有的能见到的和将来能预见到的一般应用程序。也就是说, 在未来很长一段时间内万兆位/千兆位网络不会因为信息手段应用的增加而不断的升级、扩容、更新。而且万兆位网络在未来的几年内都不会落后, 在其上开展各种应用业务也水到渠成。由此可见, 万兆位/千兆位网络的成本已大幅下降, 因而已不再是部署决策中最重要的因素。

过去, 光纤和电缆布线系统在安装时, 预期只有 10 年的使用寿命。但是随着网络技术快速、不断的发展, 公司必须考虑其当前基础设施架构可以保持同步扩展的能力。网络重新布线的成本十分昂贵, 组织应当采取预防性措施, 以保证其布线系统能够充分适应未来发展的需求。万兆位为支持未来的技术提供最好的保证, 同时也提供最大限度的投资保护。

基于运营商的服务虽然摆脱了建立和维护万兆位主干链路的负担, 却限制了灵活性, 而且每月昂贵、无休止的账单也使成本过高。因此, 对于教育机构、政府组织和医院及并非每年都有预算的企业而言, 可能无法负担这种后续支出。建立万兆位工作区主干链路是一项一次性的开支, 与每月的通信链路账单相比, 可大大节省成本。

### 1.1.2 万兆位以太网的优势

当今, 世界范围网络信息的急剧增长, 正迫使网络业务供应商、企业管理者和网络总体设计者寻找更高速率、更简单的实用化网络技术, 以便解决带宽需求扩展带来的矛盾。随着 10GbE 技术标准的制定, 使之其技术日趋成熟, 其种种优越性已成为令人刮目相看的实用化网络技术。10GbE 技术的主要优越性可表现为以下几点:

(1) 更公平, 更兼容。新标准的出台使得厂商间的竞争变得“有法可依”而更为公平, 并获得了许多厂家的支持, 互操作性强, 在同一个网络中可允许存在众多销售商不同的以太网产品共同运行, 其产品功能和接口符合统一的 IEEE 802.3 系列标准。用户选购产品时再也不用担心不同厂商产品间的兼容性问题。

(2) 简单方便, 升级容易。10GbE 技术基本承袭了以太网、快速以太网及千兆位以太网技术, 采用人们熟悉的管理工具并基于通用技术, 因此在用户普及率、使用方便性、网络互操作性及简易性上皆占有极大的引进优势。另外, 10GbE 技术可将原 10 Mbps/100 Mbps/1000 Mbps 以太网速率方便地提升到 10 Gbps。在升级到 10GbE 解决方案时, 大多数网络管理程序和布线都可以保持不动, 用户不必担心既有的程序或服务是否会受到影响, 因此升级的风险非常低, 可无缝地向更高性能的网络直接升级。同时在未来升级到 40 Gbps 甚至 100 Gbps 都将有很明显的优势。

(3) 更高的带宽和更远的传输距离。万兆位标准意味着以太网将具有更高的带宽 (10 Gbps) 和更远的传输距离 (最长传输距离可达 40 km)。

(4) 结构简化, 性能提高。在企业网中采用 10GbE 可以最好地连接企业网骨干路由器, 这样大大简化了网络拓扑结构, 提高网络性能。10GbE 技术可通过建立虚拟局域网 (VLAN, Virtual LAN) 的方法优化网络拓扑结构, 运用 IEEE 802.1s 标准 VLAN 用户组从而在网络中增多 VLAN 用户, 使连接用户数目不受限制。

(5) 功能加强, 安全得到保障。10GbE 技术提供了更多的更新功能, 大大提升 QoS, 具有相当的革命性, 因此, 能更好地满足网络安全、服务质量、链路保护等多个方面需求。10GbE 技术可按 IEEE 802.1p 和 IEEE 802.1q 标准将用户不同服务质量要求的信息归类到有满足服务质量要求的 VLAN 中, 从而保证了用户对于信息的各种服务质量要求。

(6) 成为融合的工具。使用 10GbE 技术能满足局域网、城域网和广域网传输的关键需求。随着网络应用的深入, WAN/MAN 与 LAN 融合已经成为大势所趋, 各自的应用领域也将获得新的突破, 而 10GbE 技术让工业界找到了一条能够同时提高以太网的速度、可操作距离和连通性、可靠性和可伸缩性的途径, 10GbE 技术的应用必将为三网发展与融合提供新的动力。

(7) 以太网使用简单网络管理协议 (SNMP, Simple Network Management Protocol) 提供网络管理和维护功能。SNMP 在网际协议 (IP, Internet Protocol) 和绝大多数网络设备中是实际标准的网络管理协议, 其第 3 版提供了基于以太网设备的强大的运行、管理和维护 (OAM, Operation, Administration and Maintenance) 方法。SNMP 的第 3 版能加密 SNMP 包数据单元, 从而确保网络管理设备上层的安全性。

网络管理程序利用 SNMP 除了提供服务准备和网络故障分析功能外, 还可以使运营商快速展开业务。除此之外, 以太网其他一些标准如 RFC 3167 还能获取网络的业务流的流量, 这可以使运营商能获得从第 2 层到第 7 层任意的网络业务流的调用数据记录 (CDR, Call Data Records)。这样, 运营商可以将收费模式从统一价格或基于字节计费改成基于应用模式计费, 增加了运营商的收入。例如, 运营商可以选择特定的应用如 E-mail 传输、网页传输或因特网报文等。

(8) 成本低廉。10GbE 技术与现有其他网络技术相比, 使网络拥有者花费得更少。以太网网络速率提升到 10 Gbps 后, 网络软硬件增加的费用、培训、安装和网络管理与维护的费用都相对低廉。例如, 采用 10GbE 技术的网络比采用 SDH/SONET、异步传输模式 (ATM, Asynchronous Transfer Mode) 网络技术可节省费用约 1/4。

(9) 为网络设计者带来充分的灵活性。网络设计者在采用统一 10GbE 技术的基础上, 可选择不同的工作速率、不同的传输介质和各类接口, 使之实现全网的灵活布局。

(10) 可充分利用互连和捆绑技术。过去有时需采用数千兆位捆绑以满足交换机互连所需的高带宽, 因而浪费了更多的光纤资源, 现在可以采用万兆位互连, 甚至 4 个万兆位捆绑互连, 达到 40 Gbps 的宽带水平。

(11) 采用 10GbE, 网络管理者可以用实时方式, 也可以用历史累积方式轻松地看到第 2 层到第 7 层的网络流量。允许“永远在线”监视, 能够鉴别干扰或入侵监测, 发现网络性能瓶颈, 获取计费信息或呼叫数据记录, 从网络中获取商业智能。

当设计网络时, 网络管理者和网络服务提供者可有多种选择。例如, 建设的校园网和企业

网与城域网 (MAN, Metropolitan Area Network) 连接时, 可选择多种传输介质、技术标准和接口, 这里可采用以太网技术 (速率为 10 Mbps、100 Mbps、1000 Mbps 和 10 Gbps)、SDH/SONET 同步网络复用技术 (速率为 155 520 kbps、622 080 kbps、2 488 320 kbps 和 9 953 280 kbps)、在 SDH/SONET 同步网络范围内传输数据包和 IEEE 802 专业组新签署的 IEEE 802.17 有弹性 (自动恢复) 数据包环路 (Resilient Packet Ring) 等。

高级智能化 10GbE 多层交换机改变了网络与拓扑的设计和运行。在 LAN 网络中其核心网络技术在迅速移向 10GbE 技术, 而市场倾向性的影响使之 10GbE 技术开始运用于长达数十公里的专用网。随着 10GbE 技术的开发, 工业开发的内容不仅将以太网速率提高到 10 Gbps, 而且还必须扩展其网络的运行距离并有充分的互操作性。10GbE 技术的种种优越性使网络的设计者和管理者将愿意使用 10GbE 技术作为 LAN、MAN 和 WAN 网络结构的基石。

在 10GbE 方面也存在一些问题:

尽管社会的发展对信息高速传输使得 10GbE 面临前所未有的发展机遇, 业界也非常乐于谈论 10GbE。但结合现在的实际情况, 关于 10GbE 问题存在一些“过热”迹象, 10GbE 走进大众, 还有诸多问题有待解决。

10GbE 继承了以太网一贯的弱服务质量 (QoS, Quality of Service) 特点, 如何进行有保障的区分业务承载, 仍然没有解决。10GbE 技术相对其他替代的链路层技术 (如 2.5GPOS、捆绑的千兆位以太网) 优势不是很明显。也有人认为, 目前城域网的瓶颈并不在于带宽, 而在于如何将城域网建设成为可管理、可运营和可盈利的网络。因此, 10GbE 技术的应用将取决于宽带业务地开展。只有广泛开展宽带业务, 如视频电波、视频组播、高清晰度电视和实时游戏等, 才能促使 10GbE 技术广泛应用和网络健康有序发展。

### 1.1.3 10GbE 技术要点

尽管 10GbE 是在以太网技术的基础上发展起来的, 但为了解决 10GbE 在广域传输中存在的问题, 在制定标准时充分考虑了广域网对信号传输的要求, 从而使 10GbE 与原来的以太网技术相比有很大的差异。10GbE 技术要点主要表现在以下几点:

#### 1. 全双工的工作模式

万兆位以太网只支持全双工模式, 而不支持单工模式, 而以往的各种以太网标准均支持单工或双工模式。

#### 2. 不支持 CSMA/CD 协议

万兆位以太网不满足带冲突检测的载波侦听/多址访问 (CSMA/CD, Carrier Sensing Multiple Access with Collision Detection) 协议, 因为这种技术属于较慢的单工以太网技术。

#### 3. 物理层 (PHY, Physical Layer) 特点

由于 10GbE 可作为局域网 (LAN, Local Area Network) 也可作为广域网 (WAN, Wide Area Network) 使用, 而 LAN 和 WAN 之间由于工作环境不同, 对于各项指标的要求存在许多的差异, 主要表现在时钟抖动、比特差错率 (BER, Bit Error Rate)、QoS 等要求不同, 就此制定了两种不同的物理介质标准。

10 Gbps 局域以太网物理层的 MAC 时钟可选择工作在 1 Gbps 方式下或 10 Gbps 方式下,

允许以太网复用设备同时携带 10 路 1 Gbps 信号帧格式与以太网的帧格式一致, 工作速率为 10 Gbps。10 Gbps 局域网可用最小的代价升级现有的局域网, 并与 10/100/1000 Mbps 兼容, 使局域网的网络范围最大达到 40 km。

10 Gbps 广域网物理层的特点: 由于局域以太网采用以太网帧格式, 传输速率为 10 Gbps, 而 10 Gbps 广域以太网采用 OC-192c(OC-192c 是 STS-192c 的光对应物)帧格式在线路上传输, 传输速率为 9.584 64 Gbps, 所以 10 Gbps 广域以太网 MAC 层有速率匹配功能。通过 10 Gbps 介质无关接口(MII, Medium Independent Interface)提供 9.584 64 Gbps 的有效速率。线路比特误码率可为  $10^{-12}$ 。与 OC-192c 的 SONET 再生器协同工作, 并利用 OC-192c 帧格式和最少的段开销与现有的网络兼容, 当物理介质采用单模光纤时, 传输距离可达 300 km; 采用多模光纤时, 可达 40 km。而以往的以太网只支持局域网应用, 有效传输距离不超过 5 km。其有效作用距离的增大为万兆以太网在广域网中的应用打下了基础。

#### 4. 帧格式

在帧格式方面, 由于 10GbE 是高速以太网, 所以为了与以前的所有以太网兼容, 必须采用以太网的帧格式承载业务。由于 10 Gbps 的高速率, 造成骨干网络管理较弱, 传输距离短且对物理线路没有任何保护措施, 所以当以太网作为广域网进行长距离高速传输时, 必然导致线路信号频率和相位较大的抖动。而以太网的传输是异步的, 在宿端实现同步比较困难。因此, 如果以太网帧在广域网中传输, 需要对以太网帧格式进行修改。为此, 对帧格式进行了修改, 添加长度域和 HEC 域。

#### 5. 速率适配

10 Gbps 局域以太网和广域以太网物理层的速率不同, LAN 的数据率为 10 Gbps, WAN 的数据率为 9.584 64 Gbps (9.584 64 Gbps 速率是 PCS 层未编码前的速率)。但是两种速率的物理层共用一个 MAC 层, MAC 层的工作速率为 10 Gbps, 采用什么样的调整策略将万兆位介质无关接口(XGMII, 10 Gigabit Media Independent Interface)的传输速率 10 Gbps 降低, 使之与物理层的传输速率 9.584 64 Gbps 匹配, 是 10 Gbps 以太网需要解决的问题。目前将 10 Gbps 适配为 9.584 64 Gbps 的 OC-192c 的调整策略有 3 种:

(1) 在 XGMII 接口处发送 HOLD 信号, MAC 层在一个时钟周期停止发送。

(2) 利用“Busy idle”, 物理层向 MAC 层在 IPG 期间发送“Busy idle”, MAC 层收到后, 暂停发送数据。物理层向 MAC 层在 IPG 期间发送“Normal idle”, MAC 层收到后, 重新发送数据。

(3) 采用 IPG 延长机制。MAC 每次传完一帧, 根据平均数据速率动态调整 IPG 间隔。

#### 6. 接口方式

10GbE 作为新一代宽带技术, 在接口类型及应用上提供了更为多样化的选择。局域网 PHY、城域网 PHY 及广域网 PHY 可以适用于不同的解决方案。

10GbE 在局域网、城域网、广域网不同的应用上提供了多样化的接口类型, 在局域网方面, 针对数据中心或服务器群组的需要, 可以提供多模光纤长达 300 m 的支持距离, 或者针对大楼与大楼之间/园区网的需要提供单模光纤长达 10 km 的支持距离。在城域网方面, 可以提供 1 550 nm 波长单模光纤长达 40 km 的支持距离。在广域网方面, 更可以提供 OC-192C 广域网 PHY, 支持长达 70~100 km 的连接。

## 7. 编码方式

万兆位以太网使用 64B/66B 和 8B/10B 两种编码方式, 而传统以太网只使用 8B/10B 编码方式。

(1) 采用 4 路的千兆位以太网所使用的 8B/10B 编码技术进行数据传输。

(2) 采用单路的 64B/66B 编码技术进行数据传输。

第一种编码技术主要用于基于密集波分复用 (DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing) 技术的 10GbE 的 LAN PHY 接口。在该编码技术中, 将 1 Gbps 以太网的千兆位媒体独立接口 (GMII, Giga-bits Medium Independent Interface) 的主频率提高 2.5 倍后, 分 4 路传输以达到 10 Gbps 的总速率。这种编码技术较简单, 但系统互连很复杂。

单路的 64B/66B 编码技术是一种高效的新编码技术。在该编码技术中, 从上层 MAC 子层传来的 64 bit (位) 数据块。加上物理层的用于控制的 2 bit (“01”表示 MAC 数据, “10”表示物理层的控制帧), 这样就组成了 66 bit 的数据块。在物理层中便以 66 bit 数据块为基础进行数据传输。由于 64B/66B 编码技术具有均匀的 4 bit 汉明 (Hamming) 保护距离, 平均分组出错率非常低, 而且, 该编码技术的统计直流平衡性好, 因此, 在 IEEE 802.3ae 标准中作为 10GbE 的主流编码技术。

## 8. 捆绑互连

过去有时需采用数个千兆位捆绑以满足交换机互连所需的高带宽, 因而浪费了更多的光纤资源, 现在可以采用万兆位互连, 甚至 4 个万兆位捆绑互连, 达到 40 Gbps 的宽带水平。

# 1.2 以太网的发展与展望

## 1.2.1 万兆位以太网的技术背景

随着网络技术和通信技术的快速发展, 尤其是 Internet 和多媒体技术的飞速发展, 使网络用户数量和网络数据流量迅速增加, 原有速率的网络已难以满足用户通信要求。从 1983 年以来, 局域网领域是以太网技术 (802.3) 与令牌总线 (802.4)、令牌环 (802.5) 三分天下。但随着时间的推移, 这种局面渐渐变成了现在以太网一枝独秀。为什么呢? 理由其实很简单, 因为以太网技术的每一次产品变革, 都是“科技适应社会需要”的表现; 它既没有落伍于社会的发展, 成为拖累, 也没有不顾现实情况, 发明而没有实用。以太网标准在首次公布时就没有添加任何版权限制, 它们的想法是让其他人能够方便地得到以太网技术, 进而生产以太网产品。IEEE 组织的许多举动得到了众多服务提供商的支持, 使以太网很容易融入到新产品开发中。以太网的改进始终保持向前兼容, 也不影响原来的业务部署和应用。以太网结构简单、管理方便、价格低廉, 因而得到了广泛的应用。以太网技术的持续改进满足了用户不断增长的需求, 如物理介质从粗同轴电缆到细同轴电缆、双绞线、光纤的扩展, 网络功能从共享以太网到全双工、交换以太网的进步, 传输速率从 10~100 Mbps、1000 Mbps 乃至 10 Gbps 的提升, 极大地满足了广大用户对各类应用的需求。图 1-1 对全球不同端口以太网交换机的销售情况进行了预测。