

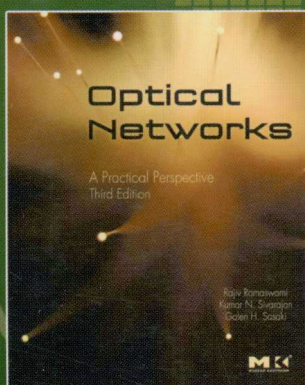
国外电子与通信教材系列



# 光网络

## (第三版)

Optical Networks: A Practical Perspective  
Third Edition



[美] Rajiv Ramaswami  
Kumar N. Sivarajan 著  
Galen H. Sasaki

徐安士 吴德明 何永琪 译



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国外电子与通信教材系列

# 光 网 络

( 第三版 )

Optical Networks: A Practical Perspective

Third Edition

Rajiv Ramaswami

[ 美 ] Kumar N. Sivarajan 著

Galen H. Sasaki

徐安士 吴德明 何永琪 译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING



北航

C1640121

TN929.11  
136

## 内 容 简 介

本书是光组网技术和方法的权威信息来源,是一本进行光组网——从规划到实施过程中每一步日常维护的指南。其主要内容包括光网络引论、元器件、光层中的客户层、波分复用网络中的组件、控制与管理、网络生存性、WDM 网络设计、接入网、光分组交换、网络应用方面的考虑,以及实例、习题和参考文献等大量丰富的内容。

本书适合作为电子信息、通信等相关专业本科生及研究生的教材,也可作为工程技术人员及相关人员了解光网络技术及其进展提供参考。

Optical Networks: A Practical Perspective, Third Edition.

Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, Galen H. Sasaki

ISBN: 978-0123740922. Copyright ©2009 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation and adapted edition published by the Proprietor.

Copyright ©2013 by Elsevier(Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Published in China by Publishing House of Electronics Industry under special arrangement with Elsevier(Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in Mainland of China. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier(Singapore) Pte Ltd. 授予电子工业出版社,仅限在中国大陆出版发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2010-0518

## 图书在版编目(CIP)数据

光网络:第3版/(美)拉马斯瓦米(Ramaswami,R.), (美)西瓦拉詹(Sivarajan,k. n.),  
(美)佐佐木(Sasaki,G. H.)著;徐安士,吴德明,何永琪译. —北京:电子工业出版社,2013.3  
(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Optical Networks: A Practical Perspective, Third Edition

ISBN 978-7-121-19785-7

I. ①光… II. ①拉… ②西… ③佐… ④徐… ⑤吴… ⑥何… III. ①无源光纤网-高等学校-教材  
IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 045892 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:余 义

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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:27 字数:691 千字

印 次:2013 年 3 月第 1 次印刷

定 价:79.00 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,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

## 译者序

光网络是信息传送的骨干传送网络,并且在可预见的将来具有不可替代性。在我国社会向数字化、信息化、网络化发展过程中起着举足轻重的作用。作为现代信息流的特点之一,就是趋于越来越大的海量信息,但其传送本身受到网络中多种因素的制约,现代信息流的传送模式使得网络状态变化越来越复杂。首先,网络承载现代信息流将导致网络结构的复杂化,包括网络物理拓扑的复杂化、网络节点结构的复杂化、交换方式的多样化、业务适配与汇聚的复杂化等。网络承载现代信息流将导致网络的控管复杂化,包括通信协议多样化与可扩展,控制的可扩展与效率,网络控制的快速、可靠、稳定与鲁棒等。现代信息流还将导致网络生存性的复杂化,包括网络恢复成功率、恢复时间及资源的利用率之间的关系复杂化。研究这些问题,将涉及光网络的网络架构、多业务适配、多粒度汇聚、交换模式、传输制式与效率、网络控管及时空资源优化调度等多方面的核心技术;同时,这也是信息时代的现代信息流传送对光网络提出的新要求。因此,现代信息流传送将对我国光网络的研究和发展提出巨大挑战,如何提升目前光网络的传送能力,适应我国未来社会需要,已成为当前亟待探索、研究和解决的问题。所以,“光网络”课程对通信与信息系统学科光通信研究领域的研究生来说应是必修课程。本书内容涉及面广,深浅适度,从实际网络出发,既适合将来从事光网络方面研究的研究生,也适合从事光网络方面应用的工程人员,甚至适合不是光网络专业人员但与光网络有关的人员的阅读和学习。

我所在的光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室(北京大学),从1997年承担我国第一个有关光网络方面的项目——国家高科技863项目“波分复用全光通信试验网”起,到承担国家自然科学基金重大项目“WDM全光通信试验网”,到承担我国973项目“Pbit/s级可控管光网络基础研究”等一系列光网络研究课题,基本上经历了我国光网络研究发展的全过程。在此背景下,我们从1999年开始准备,在2000年将“光网络”课程与“光通信系统”课程分离,新开了“光网络基础”课程。所选教材就是本书的第一版,参考书是Paul E. Green, Jr.的*Fiber Optic Networks*。当前有关光网络和光通信系统方面的教科书已经出版了不少,为了使本书的内容更加突出,我们向出版社建议,暂不翻译其中有关“光通信系统”的3章内容,即原第2章“信号在光纤中传输”、原第4章“调制与解调”和原第5章“传输系统工程”。因出版社征得了本书原作者的同意,故我们翻译的本书只有10章内容。但在本书第2章(原书第3章)“元器件”中保留了一些光通信系统的部分内容,如发射机、检测器等,以及保留了附录中相关内容,以保持本书相对完整性。

从本书3个版本的前言可以看到本书内容的增删和改版的过程,反映了随着光网络从第一代到第二代的演变对光网络研究内容的深刻变化。这种变化还在不断发展。我们在教学过程中,也会每年补充一些最新的研究内容和光网络最新的进展,以作为课程的补充内容供学生讨论。我们课程的对象主要是通信与信息系统光通信专业方面的研究生。另外,无线通信及物理学院对光网络感兴趣的研究生也选择了这门课程。课程教学采用了互动形式,研究生需要针对某个专题进行准备,讲述他们对该专题的理解并与大家一起讨论。这样,研究生就

不仅仅是听课，而要了解专题内容，熟悉所搜索的相关资料，并具有与其他人正确交流和表达的能力。

我们共有三位翻译人员，分别为徐安士教授，博士生导师；吴德明教授，博士生导师；何永琪教授级高工，博士生导师。我们都是多年参与光网络与光通信系统研究的教员。徐安士教授翻译了本书第1、7、8、9、10章，Green先生的序言，三个版本的前言，以及附录B、C和J。吴德明教授翻译了第2、3、4章，以及附录D、E、F、G、H和I。何永琪教授翻译了第5、6章。附录A和中英文术语对照表是在翻译前由三人共同讨论决定的。吴德明教授对徐安士教授所翻译的章节进行了校对，徐安士教授也对吴德明教授和何永琪教授所翻译的章节进行了校对。最后由徐安士教授统一归纳整理，包括统一书中用词，删去了一些与改编时所删章节相关的字句，附录中公式也按此原则进行了相应修改。

由于我们平时较忙，以至于本书的翻译一直持续了两年。翻译之中难免还会存在一定错误，盼请读者指正，也期望本书的内容与翻译能符合读者的要求。

徐安士

2012年11月10日

区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室(北京大学)

北京大学科学技术学院现代通信研究所

lyrxas@pku.edu.cn

## 序

不久前,每当有人想有效地发送信息,实际上只有两种选择——通过有线或无线发送。这种情况持续了几十年,直到20世纪60年代中期,光纤革命开始了,一开始是悄悄的,然后随着研究力度的加强,人们开始明白通过微小的一丝玻璃束发送光脉冲并不是太疯狂。现在这种革命正在全力以赴,仅在美国每天敷设的光纤就有4000光纤英里。在许多应用中,光纤正在取代电缆,逐渐地,它正在成为两个新兴的主导传输技术之一,另一个是无线通信。其中之一(无线)可以达到任何地方,但它在到达之处并不做太多事情,而另一种(光纤)将永远不可能到达任何地方,但它无论到达何处却确实做了很多事情。在光纤通信早期,人们就意识到这种简单的玻璃介质具有令人难以置信的大带宽容量等待被采掘。如果实际需要它,则这个时代应该会到来,而且我们也应该能指出如何来挖掘它。现在这个时代已经到了。需求在这里,而解决方案也在这里。

本书描述了一场革命之中的一场革命,大家现在熟悉的光纤容量已得到开发,可以载负更多的信息、处理更广泛的各种传输类型,以及提供更好的可靠性和易用性。在很多地方,安装光纤仅仅作为一种比安装铜缆更好的方式,还没有证实这样做的结果足以满足对吉比特带宽容量的需求。人类天生的对带宽越来越大的渴求,再加之越来越多的人意识到富有想象力地利用光纤所带来的其他灵活性,导致人们去探索全光网络,这就是本书的主题。这样的网络就是以新的方式,无论是采用波分复用还是采用时分复用技术来组成整个网络结构,其信息都以纯光信号的形式通过各种方法从一位用户位置传送到另一位用户位置。

当我在1993年尝试出版同类书籍时,没有人能确定光网络是否能取得巨大的成功。如果失败,光网络将以“究竟发生过什么事情……”的技术故事而不复载入史册,虽然这种技术书面上听起来很棒,但是却从来没有在现实世界中成功。我的书 *Fiber Optic Networks* 用了大部分篇幅讨论有关构建码块技术和慨叹其局限性,因为很少谈及真实网络、与它们有关的结构考虑,以及它们曾为任何人做过什么好的事情。

在过去的四年中,光网络确实真的实现了,它本质上基于波分复用技术。本书作者 Ramaswami 和 Sivarajan,是这种成功的主要体系结构的设计者,已纠正了像我所著的书那样的早期书籍的不足。现在每年有数亿美元的波分复用组网系统正在出售,只生产光网络产品的新的新的大公司已经建立,带宽瓶颈正在缓解,以及协议激增的混乱状态由于这一显著透明的组网新方式而得到控制;更重要的是,对下一步网络如何发展有了丰富的体系结构方面的认识。网络专家,刚经历像 Web 一样令人兴奋的新奇事物,现在又有另一种奇妙的天地可大展才华。整个光网络的概念本身就魅力无穷——基于具有数千吉比特每秒容量的介质,却又这么小得几乎看不见;发射机不比一粒盐大;放大器在光域放大了大量带宽;传输设计越过了50年来之不易而又复杂的编码;对调制和均衡的深刻见解;以及在网络架构中纳入了通常在传统分层机制低层难以实现的许多功能——这些都是读者期待阅读本书的一些新的有趣的主题。

为了理解在这一场革命之中的这个新组网革命,必须要有经验丰富的人带领我们进入许

多人尚不熟悉的这一领域。由于本书作者具有物理和网络架构方面优秀的综合知识，是绝对有资格引领我们学习的。当你花了一段时间阅读本书后，就能更彻底地熟悉所有重要的问题：现在是如何影响光网络的、网络的潜力和局限性是什么，以及它们如何使基于电时分复用的许多传统通信网适应我们当前的需求。无论你是一位计算机网络专家，想知道如何利用光纤来突破你的系统因带宽瓶颈所产生的网络容量限制；还是一位规划者或实施者，试图使你的电话网络永不落伍；或者你是一位教员，想适当地更新你的通信工程课程内容；亦或你是一位学生，想找一份有趣而待遇又好的工作，或你是一位需要再踏上新职业生涯的中年人，这本书都能为你们提供所需的帮助。

作者描述了在一个崭新的而其他书籍还没有涉及的领域内正在发生的事情和将要发生的事情。我从阅读本书中学到了很多知识，并期望你们也能学到很多。

Paul E. Green, Jr.

光网络技术泰乐公司 (Optical Network Technology Tellabs, Inc.) 董事

## 第三版前言

自从 2002 年本书最后一版出版后,光网络已相当成熟。一系列新技术,包括可重构光分/插复用器和复杂的调制格式在内,已成为当前的主流技术,并出现了从电信网到在光纤基础设施上运行分组交换的重大转变。我们将其中许多内容纳入了本修订版。

在第 2 章中,我们扩大了对多模光纤的讨论,并补充了光子晶体和塑料光纤一节。第 6 章已重写了有关通用成帧规程、光传送网和弹性分组环(RPR)的新的一节。同步光网络(SONET)的内容现包括了虚拟级联(VCAT)和链路容量调整方案(LCAS)。也扩展了以太网和多协议标签交换(MPLS)的内容,其中包括开发这些技术来支持电信级业务。第 7 章专门讲述 WDM 网络基本元部件的结构考虑,我们已经更新了可重构光分插复用器(ROADM)这一节。第 8 章反映了网络管理和控制方面的变化,包括更多对分组传送因素的探讨。第 9 章包括了以太网、MPLS 和 RPR 等客户层协议在内的网络生存性,其中重要的是理解光网络在生存性方面所起的作用。

与先前的版本一样,本书打算便于广大读者使用,包括学生、光器件方面的工程师、设备和业务提供商、网络规划者、投资者、风险投资者,以及工业和投资分析师等。它可以作为电气工程和计算机科学专业研究生的课程教科书。采用本书作为教材的教师,可通过网址 [textbooks.elsevier.com](http://textbooks.elsevier.com), 输入 ISBN(书号)9780123740922, 搜索出本书英文版信息,并按照界面提示注册后,即可获得本书习题解答<sup>①</sup>。

我们要感谢 Karen Liu 对于修改第 2 章所提供的宝贵协助,特别是对多模光纤、光子晶体和塑料光纤那一节。我们也感谢 Ori Gerstel 在光网络方面有深刻见解的讨论,以及感谢 Parthasarathi Palai 在 DWDM 网络案例研究方面所做出的投入。

## 第二版前言

自本书第一版 1998 年 2 月出版以来,我们目睹了光网络得到令人深刻印象的蓬勃发展。往常只有相当少的一部分研究人员和工程师们对光网络感兴趣,但现在许多人都对光网络抱有极大兴趣,他们包括学生、光元件和设备方面的工程师,以及业务提供商、网络规划者、投资者、风险投资者及工业和投资分析师等。

过去三年来随着技术迅速进步和光网络的广泛部署,出版本书第二版就显得很有必要了。在第二版中,我们试图包括光网络及相关技术的最新进展,并也想使本书更容易被有兴趣学习光网络的大众所接受。基于这种想法,我们已经重写了几个章节,增加了大量新材料,并删除了一些与实际光网络不相关的材料。我们也更新了参考文献,并增加了一些新的习题。

本书的主要改变如下:我们主要重写了介绍,以反映当前对光网络的理解;增加了“传输基础知识”一节,对非业界人士介绍了光网络和波分复用(WDM)技术中常用的一些术语。第 2 章已经增加了有关色散管理和孤子的重要一节,该节还描述了现在正在使用的不同类型的光纤。第 3 章涵盖了电吸收调制激光器、可调谐激光器、拉曼放大器和 L 波段掺铒光纤放大器,并且明显扩充了光开关这一节,使之包括微电机系统(MEMS)和其他技术在内的新型开关。第 4 章覆盖了归零码调制和其他更新的调制格式,如双二进制调制,以及前向纠错技术,这些现已广泛用于高比特率

---

① 若需帮助,可联络电子工业出版社外版教材教辅支持电话:010-88254555 或发邮件至 [te\\_services@phei.com.cn](mailto:te_services@phei.com.cn)——编者注。

系统中。第5章现在包括扩大了覆盖范围的色散和极化效应,这是影响高比特率、长距离系统设计的重要因素。

本书有关网络章节已经完全重写和进行了扩充,这反映了该领域所取得的明显进展。这些章节内容安排如下:第6章现在包括扩大覆盖范围的 SONET/SDH、ATM 和 IP。第7章专门讲述 WDM 网络基本元部件的结构考虑。第8章尝试为光网络中网络设计和路由等相关问题提供统一的看法。第9章明显扩大了网络管理和控制的覆盖范围。第10章专门讨论网络生存性,详细讨论了光层保护。第11章介绍了接入网,重点是新兴的无源光网络(PON)。第12章提供了最新报道的光分组交换网络。最后,第13章主要集中在网络部署考虑,意欲为读者提供电信网络如何发展的综合性理解,包括了一些典型的长途网络和城域网方面的详细的网络规划案例研究。

目前,在这一领域有许多标准机构积极制定标准。在附录中增加了相关标准列表。此外,也在附录中增列了本书使用的缩写,并将一些更先进的脉冲传播资料列入了附录。

本书删除了广播选择网络这一章,因为这些网络现在主要处于学术兴趣上。同时也删去了描述光网络测试平台这一章。

## 教学和学习

本书可以用来作为电气工程和计算机专业方面研究生课程的教科书。在我们所教的课程中包括了本书的大部分内容。第2~5章涵盖了光网络方面的组件和传输技术,第6~13章涉及了组网。为了理解组网方面的问题,学生需要具有通信网络方面本科生课程的基本知识。我们尝试让网络专业人员易于理解本书有关传输章节方面的内容。例如,首先是从网络设计师的角度以一种简单定性的方式对元件进行处理分析,然后详细解释它们的工作原理。预先具有半导体和电磁学方面的一些知识,将有助于充分理解部分章节中的详细处理。

## 致谢

我们很幸运有一组优秀评审员,他们尽力详细阅读了本书所有章节,并在本书内容和素材方面提出了许多建议。他们在塑造这个版本方面的作用是非常宝贵的。我们要特别感谢 Paul Green、Goff Hill、David Hunter、Rao Lingampalli、Alan McGuire、Shawn O'Donnell、Walter Johnstone、Alan Repech、George Stewart、Suresh Subramaniam、Eric Verillow 和 Martin Zirnigbl。另外,我们要感谢 Bijan Raahemi、Jim Refi、Krishna Thyagarajan 和 Mark R. Wilson 对一些专题的投入并提出了一些建议,指出了本书第一版中的一些错误。Mark R. Wilson 根据他上的课程向我们提供了一些面向应用的习题,我们已将这些习题收集在本版本中。我们还想感谢 Amit Agarwal、Shyam Iyer、Ashutosh Kulshreshtha 和 Sarath Kumar,他们让我们使用其网状网络设计工具,感谢 Ashutosh Kulshreshtha 详细计算了网状网络设计实例,Tapan Kumar Nayak 计算了光路拓扑设计实例,Parthasarathi Palai 仿真计算了 EDFA 增益曲线,Rajeev Roy 验证了我们的一些计算结果。

## 第一版前言

光纤光学已经成为电信和数据网络基础设施的核心。光纤是任何超过每秒几十兆比特、距离超过1 km 以上的数据传输的首选方式。第一代光网络主要用光纤替代铜电缆,在较高比特率下进行较长距离的传输。第二代光网络刚刚兴起。这些网络真正利用光纤的容量实现了每秒数十吉比特至每秒太比特的整体传输容量。此外,他们还在光域开发了信号的路由和交换。技术的快速发展及对带宽永无止境的需求,导致这些网络迅速从实验室研究过渡到市场。

有几本书很好地论及了光纤传输的基本原理。然而,需要一本书来覆盖第二代光网络的传输方面,并侧重于组网,如网络架构、控制和管理等方面。因此,如果没有对构筑这些网络所需的元器件的描述,则这样一本书将不会是完整的。特别是网络架构在很大程度上依赖于这些组件,并且光网络设计人员也需要熟悉它们的性能。因此,本书试图涵盖与第二代光网络相关的元件、传输和组网问题。本书针对的是网络规划者、设计者或运营商、在电气工程和计算机专业方面的研究生,以及想了解光网络的工程师等各方面的专业人士。

## 教学和学习

本书可以用来作为电气工程和计算机专业研究生课程的教科书。在我们所教的课程中,涉及了这本书中的大部分内容。第一部分涵盖了光网络方面的元件和传输技术,第二部分涉及了组网。为了理解第二部分中的组网问题,学生需要有本科生课程中的通信网络和概率方面的基本知识。我们尝试让网络专业人员易于理解本书第一部分中有关传输章节方面的内容。例如,从网络设计师的角度,首先以一种简单定性的方式对元件进行处理分析,然后详细解释它们的工作原理。预先具有电磁学方面的一些知识将有助于理解部分章节中的详细定量处理。较高深的内容用星号标注,这样,即使不讲授这部分内容,也不会丢失本课程的连续性。

## 本书概述

第1章介绍了光网络。本书第一部分致力于光网络的基本技术。第2章介绍了光如何在光纤中传播,并涉及了损耗、色散和光纤非线性现象,这些现象在传输系统设计中起着重要作用。第3章概述了构建网络所需的不同组件,如发射机、接收机、复用器和开关等。第4章介绍了电信号如何在发射机中转换成光信号(调制过程)和它们在接收机中如何恢复成电信号(解调过程)。第5章则侧重于最新一代传输系统和网络的物理层设计,以及限制系统性能的因素。

第二部分专门讲述光网络的各种组网。第6章介绍了不同的现今还广泛采用的第一代光网络。第7章涵盖了广播选择 WDM 网络,这些网络适用于局域网和城域网。将在一个统一的框架下描述和比较不同的拓扑结构、媒体访问和调度方法。第8章介绍了采用波长路由的网络。这些网络正在从实验室进入商业部署。本章涵盖了这些网络的架构方面,重点放在关键的设计问题。第9章介绍如何覆盖虚拟网络,例如,如何在第二代光网络基础上运行 IP 或 ATM 网络。第10章涵盖了控制和管理,包括连接管理、故障管理和安全管理。第11章介绍了几个重要的波长路由实验示范网、现场试验和原型。第12章介绍了光纤到路边、光纤到家庭接入网应用的无源光网络解决方案。第13章涉及了在不同类型的电信网络中部署新的第二代技术的相关问题。第14章讲述了光时分复用网络,该网络当今还处在实验室研究之中,但在每个 WDM 信道上提供很高的传输比特率方面具有进一步的发展潜力。

附录包括了一些随机过程和图论的基本知识,可作为背景资料阅读。第一部分(技术)中所使用的大量符号和参数也在附录中进行了归纳总结。

## 致谢

首先也是最重要的,想感谢 Paul Green 将我们引入了这一领域,多年来成为我们的良师益友,以及为本书撰写前言。我们想特别感谢 Rick Barry、Ori Gerstel、Ashish Vengsarkar、Weyl-Kuo Wang 和 Chaoyu Yue,他们详细审阅和讨论了本书的部分或全部材料。另外,我们还要感谢 Venkat Anantharam、Dan Blumenthal、Kamal Goel、Karen Liu、Roger Merel、Rick Neuner 和 Niall Robinson 为本书提供了建议。我们也想感谢 Rajesh M. Krishnaswamy 为 10.2.2 节完成了一项仿真,感谢 A. Selvarajan 回答了一些与我们技术相关的问题,感谢 Chandrika Sridhar 帮助准备了习题答案。

# 目 录

|                              |    |                         |     |
|------------------------------|----|-------------------------|-----|
| <b>第1章 光网络引论</b> .....       | 1  | 2.3.4 光纤光栅 .....        | 41  |
| 1.1 通信网络体系结构 .....           | 1  | 2.3.5 法布里-珀罗滤波器 .....   | 44  |
| 1.2 业务、电路交换和分组交换 .....       | 3  | 2.3.6 多层介质膜滤波器 .....    | 46  |
| 1.2.1 业务改变的前景展望 .....        | 5  | 2.3.7 马赫-曾德尔干涉仪 .....   | 47  |
| 1.3 光网络 .....                | 6  | 2.3.8 阵列波导光栅 .....      | 50  |
| 1.3.1 复用技术 .....             | 7  | 2.3.9 声光可调谐滤波器 .....    | 52  |
| 1.3.2 第二代光网络 .....           | 8  | 2.3.10 多信道数复用器结构 .....  | 55  |
| 1.4 光层 .....                 | 10 | 2.4 光放大器 .....          | 57  |
| 1.5 透明和全光网络 .....            | 14 | 2.4.1 受激发射 .....        | 58  |
| 1.6 光分组交换 .....              | 16 | 2.4.2 自发发射 .....        | 58  |
| 1.7 传输基础知识 .....             | 17 | 2.4.3 掺铒光纤放大器 .....     | 59  |
| 1.7.1 波长, 频率和信道间隔 .....      | 17 | 2.4.4 拉曼放大器 .....       | 63  |
| 1.7.2 波长标准 .....             | 17 | 2.4.5 半导体光放大器 .....     | 64  |
| 1.7.3 光功率和损耗 .....           | 18 | 2.4.6 SOA 中的串扰 .....    | 66  |
| 1.8 网络演进 .....               | 19 | 2.5 光发射机 .....          | 66  |
| 1.8.1 早期——多模光纤 .....         | 19 | 2.5.1 激光器 .....         | 67  |
| 1.8.2 单模光纤 .....             | 21 | 2.5.2 发光二极管 .....       | 73  |
| 1.8.3 光纤放大器和波分复用<br>技术 ..... | 22 | 2.5.3 可调谐激光器 .....      | 74  |
| 1.8.4 从传输链路到光网络 .....        | 24 | 2.5.4 直接调制和外调制 .....    | 80  |
| 总结 .....                     | 24 | 2.5.5 用于拉曼放大器的泵浦源 ..... | 82  |
| 进一步阅读材料 .....                | 25 | 2.6 检测器 .....           | 83  |
| 参考文献 .....                   | 26 | 2.6.1 光检测器 .....        | 83  |
| <b>第2章 元器件</b> .....         | 29 | 2.6.2 前置放大器 .....       | 87  |
| 2.1 耦合器 .....                | 29 | 2.7 光开关 .....           | 88  |
| 2.1.1 耦合器的工作原理 .....         | 31 | 2.7.1 大规模光开关 .....      | 89  |
| 2.1.2 能量守恒 .....             | 31 | 2.7.2 光开关技术 .....       | 94  |
| 2.2 隔离器和环形器 .....            | 32 | 2.7.3 大规模电子开关 .....     | 97  |
| 2.2.1 工作原理 .....             | 33 | 2.8 波长变换器 .....         | 98  |
| 2.3 复用器和滤波器 .....            | 34 | 2.8.1 电光方法 .....        | 99  |
| 2.3.1 光栅 .....               | 36 | 2.8.2 光选通方法 .....       | 100 |
| 2.3.2 衍射图样 .....             | 39 | 2.8.3 干涉仪技术 .....       | 101 |
| 2.3.3 布拉格光栅 .....            | 39 | 2.8.4 四波混频技术 .....      | 103 |
|                              |    | 总结 .....                | 103 |

|                                    |            |                       |            |
|------------------------------------|------------|-----------------------|------------|
| 进一步阅读材料                            | 104        | 习题                    | 155        |
| 习题                                 | 105        | 参考文献                  | 155        |
| 参考文献                               | 108        |                       |            |
| <b>第3章 光层中的客户层</b>                 | <b>114</b> | <b>第4章 波分复用网络中的组件</b> | <b>157</b> |
| 3.1 SONET/SDH                      | 115        | 4.1 光线路终端             | 158        |
| 3.1.1 复用技术                         | 116        | 4.2 光线路放大器            | 160        |
| 3.1.2 虚串联(VCAT)和链路容量<br>调节方案(LCAS) | 119        | 4.3 光分插复用器            | 160        |
| 3.1.3 SONET/SDH 层                  | 120        | 4.3.1 OADM 结构         | 162        |
| 3.1.4 SONET 帧结构                    | 120        | 4.3.2 可重构 OADM        | 166        |
| 3.1.5 SONET/SDH 物理层                | 123        | 4.4 光交叉互连             | 169        |
| 3.1.6 SONET/SDH 基础设施中的<br>工作单元     | 125        | 4.4.1 全光 OXC 配置       | 173        |
| 3.2 光传送网                           | 128        | 总结                    | 176        |
| 3.2.1 OTN 体系                       | 129        | 进一步阅读材料               | 177        |
| 3.2.2 帧结构                          | 129        | 习题                    | 177        |
| 3.2.3 复用技术                         | 132        | 参考文献                  | 179        |
| 3.3 通用成帧规程                         | 132        |                       |            |
| 3.4 以太网                            | 134        | <b>第5章 控制与管理</b>      | <b>181</b> |
| 3.4.1 帧结构                          | 136        | 5.1 网络管理功能            | 181        |
| 3.4.2 交换机                          | 137        | 5.1.1 管理架构            | 182        |
| 3.4.3 以太网物理层                       | 139        | 5.1.2 信息模型            | 183        |
| 3.4.4 载波传送                         | 140        | 5.1.3 管理协议            | 184        |
| 3.5 IP                             | 142        | 5.2 光层业务与接口           | 184        |
| 3.5.1 路由和转发                        | 143        | 5.3 光层中的层             | 185        |
| 3.5.2 服务质量                         | 144        | 5.4 多销售商互操作性          | 186        |
| 3.6 多协议标签交换                        | 145        | 5.5 性能与故障管理           | 187        |
| 3.6.1 标签和转发                        | 146        | 5.5.1 透明性的影响          | 188        |
| 3.6.2 服务质量                         | 148        | 5.5.2 BER 测量          | 188        |
| 3.6.3 信令和路由                        | 148        | 5.5.3 光路踪迹            | 188        |
| 3.6.4 载波传送                         | 148        | 5.5.4 告警管理            | 189        |
| 3.7 弹性分组环                          | 149        | 5.5.5 数据通信网与信令        | 190        |
| 3.7.1 服务质量                         | 150        | 5.5.6 监控              | 191        |
| 3.7.2 节点结构                         | 150        | 5.5.7 光层开销            | 191        |
| 3.7.3 公平性                          | 151        | 5.5.8 客户层             | 194        |
| 3.8 存储区域网                          | 152        | 5.6 配置管理              | 195        |
| 3.8.1 光纤信道                         | 153        | 5.6.1 设备管理            | 195        |
| 总结                                 | 153        | 5.6.2 连接管理            | 195        |
| 进一步阅读材料                            | 154        | 5.6.3 适配管理            | 199        |
|                                    |            | 5.7 光学安全性             | 200        |
|                                    |            | 5.7.1 开放式光纤控制协议       | 201        |
|                                    |            | 总结                    | 202        |

|                      |            |                     |            |
|----------------------|------------|---------------------|------------|
| 进一步阅读材料              | 203        | 7.2.2 路由与波长分配       | 259        |
| 习题                   | 204        | 7.2.3 波长转换          | 260        |
| 参考文献                 | 205        | 7.3 波长路由网络容量设计      | 263        |
| <b>第6章 网络生存性</b>     | <b>207</b> | 7.4 统计设计模型          | 264        |
| 6.1 基本概念             | 208        | 7.4.1 首次穿越模型        | 265        |
| 6.2 SONET/SDH 保护     | 211        | 7.4.2 阻塞模型          | 266        |
| 6.2.1 点对点链路          | 211        | 7.5 最大负载容量设计模型      | 271        |
| 6.2.2 自愈环            | 213        | 7.5.1 离线光路请求        | 272        |
| 6.2.3 单向路径倒换环        | 214        | 7.5.2 环形网中在线 RWA 问题 | 275        |
| 6.2.4 双向线路倒换环        | 215        | 总结                  | 276        |
| 6.2.5 环互连与双归属        | 219        | 进一步阅读材料             | 277        |
| 6.3 客户层保护            | 220        | 习题                  | 277        |
| 6.3.1 弹性分组环保护        | 221        | 参考文献                | 280        |
| 6.3.2 以太网保护          | 222        | <b>第8章 接入网</b>      | <b>284</b> |
| 6.3.3 IP 保护          | 223        | 8.1 网络体系结构概述        | 285        |
| 6.3.4 MPLS 保护        | 224        | 8.2 增强型 HFC         | 288        |
| 6.4 为何要光层保护          | 226        | 8.3 光纤到路边           | 289        |
| 6.4.1 基于保护的业务等级      | 231        | 8.3.1 PON 的演进       | 296        |
| 6.5 光层保护方案           | 231        | 总结                  | 297        |
| 6.5.1 1+1 OMS 保护     | 233        | 进一步阅读材料             | 297        |
| 6.5.2 1:1 OMS 保护     | 233        | 习题                  | 298        |
| 6.5.3 OMS 专用保护环      | 233        | 参考文献                | 298        |
| 6.5.4 OMS 共享保护环      | 235        | <b>第9章 光分组交换</b>    | <b>300</b> |
| 6.5.5 1:N 波长转发器保护    | 236        | 9.1 光时分复用           | 303        |
| 6.5.6 1+1 OCh 专用保护   | 236        | 9.1.1 比特间插          | 304        |
| 6.5.7 OCh 共享保护环      | 237        | 9.1.2 包间插           | 305        |
| 6.5.8 OCh 网状保护       | 237        | 9.1.3 光与门           | 307        |
| 6.5.9 GMPLS 保护       | 240        | 9.2 同步              | 310        |
| 6.6 层间互通             | 241        | 9.2.1 可调延迟          | 310        |
| 总结                   | 242        | 9.2.2 光锁相环          | 311        |
| 进一步阅读材料              | 242        | 9.3 信头处理            | 312        |
| 习题                   | 243        | 9.4 缓存              | 312        |
| 参考文献                 | 244        | 9.4.1 输出缓存          | 314        |
| <b>第7章 WDM 网络设计</b>  | <b>247</b> | 9.4.2 输入缓存          | 315        |
| 7.1 权衡:一个详细的环形网例子    | 249        | 9.4.3 循环缓存          | 315        |
| 7.2 光路拓扑设计和路由与波长分配问题 | 254        | 9.4.4 利用波长解决竞争      | 316        |
| 7.2.1 光路拓扑设计         | 255        | 9.4.5 偏射路由          | 318        |
|                      |            | 9.5 突发交换            | 321        |

|                           |     |                       |     |
|---------------------------|-----|-----------------------|-----|
| 9.6 试验平台 .....            | 322 | 10.2.6 长途网络成功案例 ..... | 346 |
| 9.6.1 光分组交换关键技术 .....     | 322 | 10.2.7 长途海底网络 .....   | 351 |
| 9.6.2 NTT 公司光分组交换实验 ...   | 324 | 10.2.8 城域网 .....      | 352 |
| 9.6.3 BT 实验室试验平台 .....    | 324 | 10.2.9 城域网案例研究 .....  | 353 |
| 9.6.4 普林斯顿大学试验平台 ...      | 325 | 10.2.10 从不透明链路到灵活的    |     |
| 9.6.5 全光网 .....           | 325 | 全光网络 .....            | 355 |
| 9.6.6 采用延迟线解决竞争方法的        |     | 总结 .....              | 356 |
| 试验平台 .....                | 326 | 进一步阅读材料 .....         | 356 |
| 总结 .....                  | 326 | 习题 .....              | 357 |
| 进一步阅读材料 .....             | 327 | 参考文献 .....            | 359 |
| 习题 .....                  | 328 | 附录 A 缩略语 .....        | 360 |
| 参考文献 .....                | 329 | 附录 B 符号与参数 .....      | 368 |
| 第 10 章 网络应用方面的考虑 .....    | 334 | 附录 C 标准 .....         | 371 |
| 10.1 不断发展的电信网络 .....      | 334 | 附录 D 波动方程 .....       | 374 |
| 10.1.1 SONET/SDH 核心网络 ... | 335 | 附录 E 光纤中脉冲信号的传输 ..... | 376 |
| 10.1.2 下一代传输网络架构的         |     | 附录 F 非线性偏振 .....      | 383 |
| 选择 .....                  | 337 | 附录 G 多层介质薄膜滤波器 .....  | 384 |
| 10.2 传输层设计 .....          | 341 | 附录 H 随机变量与随机过程 .....  | 389 |
| 10.2.1 采用 SDM .....       | 342 | 附录 I 接收机噪声的统计理论 ..... | 393 |
| 10.2.2 采用 TDM .....       | 342 | 附录 J 异步传输模式 .....     | 397 |
| 10.2.3 采用 WDM .....       | 343 | 中英文术语对照表 .....        | 403 |
| 10.2.4 单向与双向 WDM 系统 ...   | 344 |                       |     |
| 10.2.5 长途网络 .....         | 345 |                       |     |

# 第1章 光网络引论

随着新千禧年的开始,我们看见通信产业正在产生巨大的变化,这些变化将对我们的生活方式产生深远的影响。有几个原因促成了这些变化。第一个也是最重要的一个原因是社会持续不断地增大对网络容量的需求。这个需求被许多因素所推动。由于互联网和万维网在用户数量和上网时间两方面的巨大发展,因此,每一位用户所占用的带宽是一个重要的因素。许多年来互联网的流量一直飞速增长。近些年来对增长速度的估计差别很大,一些早期估计认为每四至六个月增长一倍。尽管估计不同,但对增长速度估计总是很高的,最近估计年增长率大约在50%左右。同时,宽带接入技术,如能提供给每位用户1 Mb/s量级的数字用户线(DSL)和电缆调制解调器(cable modem)已普遍应用。例如,在2008年美国大约55%的成年人家中已有宽带接入,而只有10%的家庭通过28~56 kb/s的电话线拨号上网。光纤用户呈现稳定增长,亚洲市场表现出最高的市场渗透。

同时,今天的商业依赖于高速网络来管理其业务。这些网络被用来连接公司内部的多地点,以及处理公司之间的业务。那些曾经租赁155 Mb/s速率线来连接其国内各分部的大公司,现在一般都租赁1 Gb/s来连接了。

需求增长和带宽成本之间也有很强的相关性。技术进步已经连续成功地降低了带宽成本。成本降低反过来又驱使开发新的应用,这些应用又使用更多的带宽并影响了行为模式的发展。一个简单的例子就是打电话越便宜,人们就花越多的时间打电话。这样的技术开发反过来又驱动对网络更大带宽的需求。这种良性循环没有迹象表明在不久的将来会有减弱的迹象。

在行业内引起重大变化的另一个因素是电信产业放松管制。众所周知的事实是垄断阻碍了产业的迅速发展,垄断企业能够获得时间来适应改变,没有动力降低成本和提供新的业务。对垄断行业放松管制已经刺激市场上的竞争,这反过来又导致了更低的成本和更快地部署新的技术和业务,并且也导致了形成许多新业务的提供商,以及产生给这些提供商销售设备的新公司。

另外,网络流量现在主要是数据,而不是传统的语音通信。以前的网络主要用来支持语音业务,而不是数据业务。现在,网络普遍传送数据业务,并能够为一些实时应用业务提供服务,如实时语音和电视业务等。

这些因素驱动了高容量光网络的开发和从实验室研究到商业应用的迅速转换。本书旨在涵盖光网络技术、系统和网络问题,以及经济和其他部署的考虑。

## 1.1 通信网络体系结构

这本书的重点主要是所谓的公共网络,它是由业务提供商,或按他们通常的叫法,由运营商来操控的。运营商利用其网络为他们的顾客提供各种业务。运营商本来是一些电话公司,但是,现在有许多不同种类的运营商在不同的商业模式下运作,他们之中许多人

甚至不提供电话业务。除了提供电话和线路租赁业务的传统运营商之外,有许多运营商专注于互联网业务提供商(ISP)之间的相互链接,还有一些运营商专门提供批量带宽给其他一些运营商,甚至有一些实际的运营商虽提供业务但没有属于自己的任何基础设施。

在许多情况下,运营商拥有属于自己的资源(如光纤链路)和网络内部配置的设备。建立光纤链路需要用地特许,不是任何人都能挖开街道的。现在采用了许多不同的方式敷设光缆——掩埋在地下、安装在电线杆上、掩埋在石油和天然气管道旁,以及沿着铁路敷设等。还有一些情况是一些运营商向另外一些运营商租赁设备,然后利用这些租赁来的设备提供一些增值业务。例如,一家长途电话公司可能完全没有自己的网络,而是简单地从其他运营商处购买带宽后再将带宽分成更小部分后卖给终端用户。

本地电信局(LEC)在城域网中提供本地业务,长途电信局(IXC)提供长途业务。这种区别能够很快地将本地电信局的业务扩展到长途,同时长途电信局的业务也将扩展到本地。为了更好地理解这种变化,需要回顾电信产业放松管制的历史。美国在1984年前只有一家电话公司——AT&T。AT&T与隶属于其地方的贝尔运营公司一起垄断了美国的长途和本地业务。随着1984年美国通过解除电信管制法案,AT&T公司被分成了只允许经营长途业务的AT&T公司和一些贝尔子公司,或称为地方贝尔运营公司(RBOC)。这些地方贝尔运营公司只允许经营本地业务,而不允许经营长途业务。长途业务管制法令被取消后,其他许多公司,如MCI公司和Sprint公司则成功地进入了长途业务市场。而那些贝尔子公司本来就经营短途业务著称,因而仍然垄断本地短途业务。产业界已经得到了长足的整合,其中RBOC甚至收购了长途电话公司。例如,RBOC西南贝尔通信公司甚至收购了AT&T公司,组成了新的AT&T公司,并且Verizon通信公司(原RBOC贝尔大西洋公司)收购了MCI公司等。现在地方贝尔运营公司是下面三家公司:AT&T公司、Verizon和Qwest。除了地方贝尔运营公司之外,还有其他一些有竞争力的地方电信局(CLEC),它们较少受到控制,并与地方贝尔运营公司在地方短途业务上形成竞争。

上面使用的一些术语主要流行于北美。在欧洲曾有过类似的情况,政府全资拥有的邮局、电话和电报(PTT)公司在它们各自的国家内垄断了其行业。但在过去十年里已经开始放松管制,在欧洲已经有一些新的运营商既提供地方短途业务,又提供长途业务。

在本书的其他部分,将采用一种更普遍的方法,把运营商分类为城域运营商和长途运营商。虽然同一运营商可能同时提供城域和长途业务,但用来传送长途业务的网络与城域网稍有不同,因此我们还是保留了这种分类。

与公共网相比,专用网是单位自有、由自己运行并供内部使用的网络。但这些公司中的大多数又依赖于公共网提供的容量来配置专用网,特别是这些专用网穿过公众用地,并且在该建网用地又必须得到准许的时候。横跨在建筑物内最多相距几千米的网络称为局域网(LAN);而那些跨越校园或城区,相距数十千米或几百千米的网络称为城域网(MAN);那些相距更长距离,范围从几百千米到几千千米的网络则称为广域网(WAN)。下面讨论的公共网也将采用同样的分类。

图1.1表示了一个典型的公共光纤网结构示意图。这种网络是庞大而复杂的,网络的不同部分可能属于不同的运营商,并由运营商各自运行。网络中的那些节点是中心局,有时候也称为接入点(POP)。[一些情况下,接入点(POP)指“小的”节点,而枢纽节点相对指“大的”节点。]节点之间的链路由光纤对组成,许多情况下,是由多组光纤对组成。长途网络中的链路构

建往往是非常昂贵的。由于这个原因,许多北美长途网络的拓扑结构是相当稀疏的。在欧洲由于链路长度相对较短,因此长途网络拓扑结构常常是较密集的。同时,至关重要的是在某些链路产生故障的情况下,为信息流提供备份路径是绝对必要的。这些约束导致了环形拓扑结构得到广泛应用,特别是在北美。环形结构是稀疏的(每个节点只有两条链路),但仍然提供了备份路径以重新路由流量。在许多情况下,网状网实际上是由相互连接的环形网组成的。

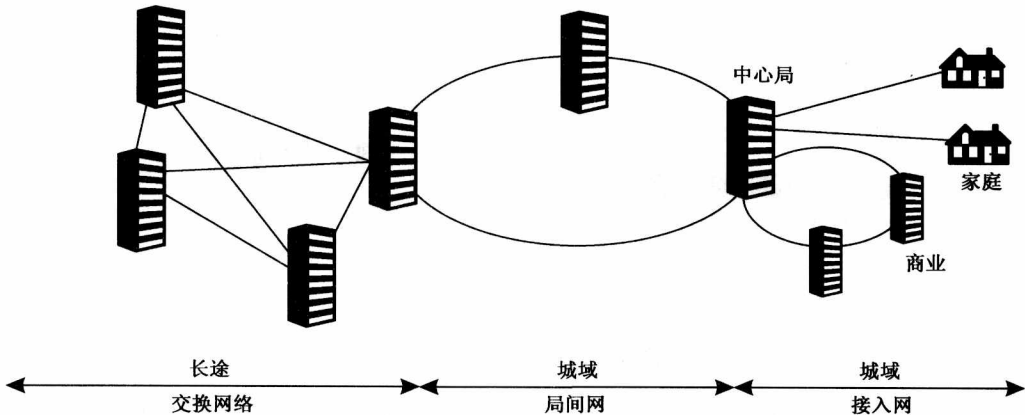


图 1.1 公共网的不同部分

在高层,网络分成城域网和长途网。城域网是网络位于大城市内或地区内的那部分。而长途网是连接城市之间或不同城区之间的网络。城域网包括城域接入网和城域网局间网。接入网从中心局延伸到每个商户或家庭(通常情况下,这次是指一些家园小区,而不是一些单户家庭)。接入网的覆盖范围通常是几千米远,它主要是收集客户位置到运营商网络的信息流。这样,接入网的大部分信息流都集中到了运营商网络的中心局。在城市或地区内的局间网络将一群中心局连接到一起。这个网络的中心局之间通常相距几千米到几十千米。长途网相互连接不同的城市或地区,这时中心局之间的距离是几百千米到几千千米。在一些情况下,还有一部分网络提供了城域网与长途网之间的切换,特别是这些网络是属于不同运营商运行的时候。与接入网相比,在城域网局间网和长途网中流量分布是网状的(或分布的)。这里显示的距离是说明性的,很大程度上取决于网络的位置。例如,欧洲城市间的距离常常只有几百千米,而北美城市间的距离能够到几千千米远。

图 1.1 所示的网络是一地面网络。光纤也同样广泛应用在海底网络中。海底网络的范围可以从几百千米到数千千米,路由穿越大西洋和太平洋。

## 1.2 业务、电路交换和分组交换

运营商给其客户提供许多类型的业务。在许多情况下,这些都是面向连接的业务,这些业务中存在一个通过底层网连接两个部分或多个部分的概念。其不同在于连接的带宽和支持该连接的底层网络类型,这对运营商为客户提供的服务质量保证有重要的影响。网络也能提供无连接的业务。我们将在本节后面讨论这种业务。

底层网络基础设施根据流量在网络内如何复用和交换分为两种基本类型:电路交换和分组交换。图 1.2 说明了这两种情况下所采用的复用类型的一些区别。