



光网络 上卷

光纤通信技术与系统 (原书第2版)

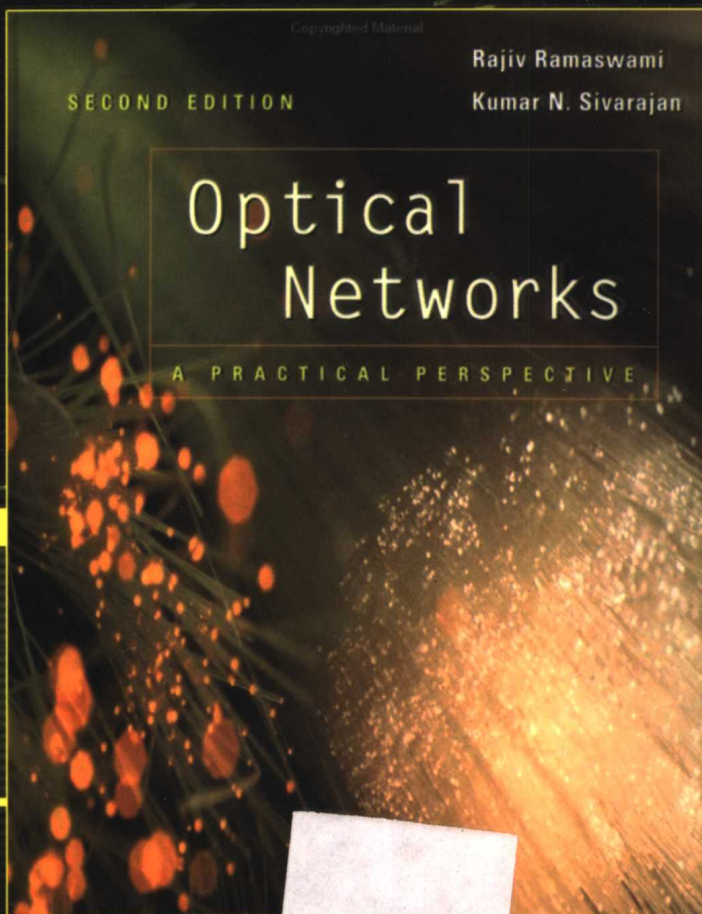
Optical Networks:

A Practical Perspective

(Second Edition)

(美) Rajiv Ramaswami 著
Kumar N. Sivarajan

乐孜纯 译



机械工业出版社
China Machine Press

电子与电气工程丛书

光网络 上卷

光纤通信技术与系统

(原书第2版)

Optical Networks:
A Practical Perspective
(Second Edition)

(美) Rajiv Ramaswami 著
Kumar N. Sivarajan

乐孜纯 译



机械工业出版社
China Machine Press

本书英文版原书是关于光通信网络技术方面的权威著作,详细地描述了网络中的单元以及传输技术,并且强调了网络评估、配备以及光学方案等一些实际的组网问题。中文版分成《光网络》(上卷:光纤通信技术与系统)和《光网络》(下卷:组网技术分析)。上卷主要讲述光网络元器件和传输技术,下卷主要介绍光网络的构造、控制和管理技术。本书不仅适合作为相关专业的教材,对专业人员 also 具有很高的参考价值。

Rajiv Ramaswami & Kumar N. Sivarajan: Optical Networks: a Practical Perspective, Second Edition (ISBN 1-55860-655-6).

Copyright © 2002 by Morgan Kaufmann Publishers.

Translation Copyright © 2004 by China Machine Press.

All rights reserved.

本书中文简体字版由美国Morgan Kaufmann公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

版权所有,侵权必究。

本书版权登记号: 图字: 01-2003-2626

图书在版编目(CIP)数据

光网络·上卷,光纤通信技术与系统(原书第2版)/(美)拉马斯瓦米(Ramaswami,R.),
(美)斯瓦拉扬(Sivarajan,K.N.)著;乐孜纯译.-北京:机械工业出版社,2004.9

(电子与电气工程丛书)

书名原文:Optical Networks: a Practical Perspective, Second Edition

ISBN 7-111-14228-4

I. 光… II. ①拉… ②斯… ③乐… III. 光纤通信-通信网 IV. TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第051737号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:蒋 玮

北京瑞德印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004年9月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·16.25印张

印数:0 001-4 000册

定价:29.00元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010) 68326294

译者序

在1970年，低损耗光纤和激光光源方面的技术取得了突破性进展，所以许多人称那一年为光纤通信元年。若以此来计算，光纤通信的发展已经经历了三十多年的历史。这一领域的快速发展是有目共睹的，光纤技术已经深入到我们的日常生活中，并对我们的生活产生了深远的影响。光纤通信所提供的高容量、高速度、长距离的信息传送能力已经使得我们获取和传递信息的能力得到了飞速的改善。难以想像离开了光通信产业，我们的信息时代会是什么样的。在过去的几年里光通信产业的迅猛发展出现了暂时的停滞，这里有经济上的原因，也有技术上的原因。目前业界已经有许多人预测它将在近期复苏，并且已经可以从统计数据中看到这种复苏的迹象。在光通信这一领域中还有很多的工作等待着我们去做的。

在这样的情况下，像本书这样一部关于光通信网络技术方面的权威著作是非常有价值的。这本书由本领域的两位专家撰写，详细地描述了网络中的单元以及传输技术，并且强调了影响网络组织和构建的网络评估、配备以及光学方案等一些实际的组网问题。同时本书涉及了网络结构、控制和管理方面的一些难以获得的信息，并且包括了影响从网络规划到决策、到实施、到维护的每一个步骤的通信方面的问题。它可以作为教材，技术应用方面的学生可以学习本书的技术篇中的章节，包含在《光网络》（上卷：光纤通信技术与系统）中。网络工程设计方面的学生则可以进一步学习网络篇中的内容，包含在《光网络》（下卷：组网技术分析）中。同时本书也可以作为业界专业人士的技术参考书，它既包含了大量的实例，也对应用背后的科学知识给出了透彻的阐述。

为了适应我国光通信网络技术方面发展的需要，译者在较短的时间内完成了本书的翻译工作。由于时间仓促，译文中难免有不当之处，敬请广大读者批评指正。

译者

2004年4月

序 言

如果需要关于WDM光学电信技术快速变革的证据，那么请看看在每一年的学术期刊上所报道的关于光学领域变革的文章，以及在该领域中新建立的公司就可以了。确切地说该领域已经有15年的历史了，它已经不是一个新的领域，但是在感觉上它仍然很新，因为在技术上它还没有达到稳定的成熟状态。新的光学波段已经被开发使用，每一个波长在全光状态传输的距离范围内所能达到的比特速率之高是空前的，而这在不久之前是难以想像的。新型的光纤技术也不断出现，并且那些拥有点到点链路的运营商也使用新的光学交换和路由选择技术，将他们的链路组织成环状或者其他实际的网络结构。

所以我们特别高兴地看到作者对他们1998年的杰出著作进行了重组和修订，并且准确地描绘了此领域的发展进程。在本书的第1版中已经反映出了作者的知识背景，即一方面具有科学和行业研发方面的背景，而另一方面又拥有商业背景。这在这本新版书中也有所体现，它所提出的一种新的光通信的观点，在本领域的其他快速再版书籍中是没有的，因为那些书籍的作者不具有Ramaswami和Sivarajan的知识背景。

而在这个时候，光通信技术的迅猛发展（即向每一个用户提供更多的带宽的进程）出现了暂时的停滞，这倒不仅仅是因为经济上的原因。在我们每一个人所需要的GB容量环境与通信和光缆低层结构的TB容量环境之间，存在着一个瓶颈，而这个瓶颈是缺乏可用的、满足充足的带宽需求的“最后一公里”通信技术的结果。在本书的目前版本及其下一版本之间，我们期望基于本书的一些技术设想，能够使得“最后一公里”的瓶颈问题得以解决。

毋庸置疑，光纤通信将对我们的生活产生更广泛的影响，这里我再一次向读者极力推荐这本书。

Paul E. Green, Jr.

Tellabs公司，光网络技术部主任（已退休）

前言

自1998年2月本书第1版面世以来,我们已经注意到光网络令人瞩目的发展。对光网络的研究曾经一度只局限于研究人员和工程师这样一个很小的范围,现在光网络引起了包括学生、光学元器件工程师和光学设备工程师、服务提供商、网络设计者、投资者、风险投资者以及产业与投资分析师在内的众多人员的兴趣。

在过去的三年里,随着光网络技术的迅速发展和广泛的应用,对本书第2版的需求也显现了出来。在第2版中,我们尽量将光网络最新进展及其底层技术编写在内,同时我们也努力使有兴趣学习光网络的广大读者感到此书通俗易懂。基于这样的想法,我们将此书中的几章进行了重新编写,加入了大量的新素材,删除了一些与实际的光网络不太相关的内容,同时对参考文献进行了更新,并加进了一些新的习题。

本书的主要变化如下:为了反映业界当前对光网络的理解和认识,对第1章进行了重新编写。在光网络概述中添加了“传输系统的基本概念”一节,在此节中介绍了与光网络系统工程和波分复用(WDM)相关的一些基本术语和概念,目的是使初学者容易入门。

在第2章中,我们添加了几小节,介绍了色散控制和光孤子方面的内容,还加入了一节来描述目前已有的光纤种类。在第3章中,我们将电吸收调制激光器、调谐激光器、喇曼放大器和L波段掺铒光纤放大器的内容包括了进来。也大大扩充了关于光开关的章节,包括了利用微电机系统(MEMS)和其他技术的新类型的开关。

在第4章中,包括了归零调制和其他一些广泛用于高比特率系统的新的调制技术,如双二元调制、前向纠错等。第5章扩充了色散补偿和极化效应方面的内容,这些都是影响高比特率长距离传输系统设计的重要因素。

对本书中涉及网络系统的章节进行了彻底的改写和补充,以便更清楚地反映本领域所取得的重大进展。这些章节的安排如下:第6章^①现在包括同步光网络/同步数字体系(SONET/SDH)、异步传输模式(ATM)和网际协议(IP);第7章专门介绍基于波分复用(WDM)网络单元的网络结构特征;第8章集中描述了一些与光网络的设计和路由相关的问题;第9章详细描述了网络的管理和控制;第10章介绍了网络的生存性,详细讨论了光学层的保护问题;第11章中涵盖了接入网的内容,重点介绍新兴的无源光网络(PON);第12章介绍了光学包交换网络的最新进展;最后,在第13章中重点介绍了光网络的应用依据,并试图使读者能更广泛地理解电信网络的发展过程,在这一章中包括一些典型的长距离和城域网络规划实例研究。

当前在光网络领域中有很多的标准,我们在附录中列出了这些相关的标准。在附录中,我们还列出了本书中采用的一些英文缩写术语,并将关于脉冲传播的一些较深层的内容放在附录中介绍。

我们在添加新素材的同时,也删除了第1版中的一些章节,删除了广播和分配网,因为这些网络当前主要侧重在理论研究方面;同样,我们也删掉了描述光网络测试台的章节,因为

^① 前言中第6章对应下卷第1章,依次类推。——编辑注

现在已经没有讨论它们的必要了。有兴趣的读者可以在网站www.mkp.com/opticalnet2 上得到这些章节的内容。

怎样使用本书

本书可以作为电子工程或计算机科学专业的研究生教材，本书中的大部分内容都包含在我们所教过的课程之中。第2章到第5章包括了光网络元器件和传输技术方面的知识，第6章到第13章则介绍关于网络方面的内容。为了理解网络方面的知识，要求学生具备通信方面大学本科水平的基本知识。我们尝试在本书中加入了一些与传输相关的章节，以使其更易于为网络工程方面专业人士所接受和利用。例如，首先从网络设计者的角度对元器件进行了简单定性的论述，然后再详细解释它们的运行原理。半导体和电磁学方面的先期知识将有助于理解某些章节的详细深入的论述部分。

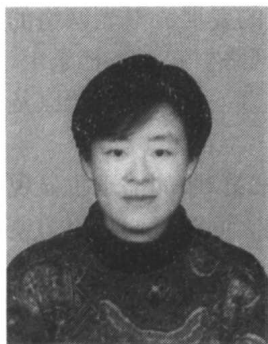
期望更广泛地了解光网络主要内容的读者可以阅读第1、第6、第7和第13章；对底层元器件和传输技术感兴趣的读者可以跳过那些定量描述的章节，而只详细阅读第1至第5章内容。

这本书可以作为电子工程或计算机科学专业的研究生课程的基本教材。与网络有关的课程侧重网络的构造、控制和管理，因此在使用本书时可以略去技术部分的章节，只讲授本书的第6至第13章。对于电子工程等与光学传输有关的课程，在使用本书时可以只讲授第2至第5章而略去其他章节。每章后面附有一定数量的习题，习题的参考答案可向英文版原出版社（mkp@mkp.com）索取。

致谢

首先，我们要感谢的是评阅本书的那些出色的专家，他们仔细地阅读了本书的所有章节，对本书素材的选择和组织提出了很多建议，他们对本书的最终成稿所起到的作用是非常宝贵的。应该说我们对此感到非常荣幸，在此我们要特别感谢Paul Green, Goff Hill, David Huuter, Rao Lingampalli, Alan McGuire, Shawn O' Donnell, Walter Johnstone, Alan Repech, George Stewart, Suresh Subramainiam, Eric Verillow, Martin Zirngibl。此外，我们非常感谢Bijan Raahemi, Jim Refi, Krishna Thyagarajan, Mark R. Wilson，他们指出了本书第1版中的一些错误，也对本书第2版提出了一些建议。Mark R. Wilson还为我们提供了他在讲课中使用的一些面向应用的习题，这些习题已经被收录到本书的第2版中。我们还要感谢Amit Agarwal, Shyam Iyer, Ashutosh Kulshreshtha 和Sarath Kumar，我们使用了他们的网路分布设计工具，Ashutosh Kulshreshtha还提供了网路分布设计实例。感谢Tapan Kumar 提供了光学通道拓扑结构设计实例，Parthasarathi Palai提供了掺铒光纤放大器（EDFA）增益曲线的模拟计算图，Rajeev Roy对我们的一些结果进行了验证。本书作者将对此书中任何错误和疏漏负责，感谢您的批评指正，请将您的意见和建议用电子邮件发送至mkp@mkp.com。

译者简介



乐孜纯，1965年生，教授，现任浙江工业大学光纤通信与信息工程研究所所长。1987年毕业于浙江大学光仪系光仪专业，获工学学士学位。1997年毕业于中国科学院长春光学精密机械研究所，获理学博士学位。1997年至1999年就读吉林大学物理学博士后流动站博士后。曾先后作为博士后、签约教授、客座研究人员在英国牛津大学、韩国全南国立大学、德国比勒费尔德大学工作。先后参加欧共体IST项目、韩国21世纪人才项目（BK21）、国家自然科学基金、中国工程物理研究院项目、国家重点实验室项目等十余项科研课题。获中国科学院科技进步二等奖一项。近5年来，作为第一作者发表学术论文三十多篇，申请发明专利4项。

目 录

译者序		
序言		
译者简介		
前言		
第1章 光网络概述	1	
1.1 电信网络结构	2	
1.2 服务、线路交换和包交换	4	
1.3 光网络	7	
1.3.1 复用技术	8	
1.3.2 第二代光网络	10	
1.4 光学层	11	
1.5 网络透明性和全光网络	16	
1.6 光学包交换	18	
1.7 传输系统的基本概念	19	
1.7.1 波长、频率和信道间隔	19	
1.7.2 波长标准	20	
1.7.3 光功率和损耗	21	
1.8 网络进化	22	
1.8.1 光纤通信初期——多模光纤	22	
1.8.2 单模光纤	24	
1.8.3 光放大器和波分复用	25	
1.8.4 从传输链路到网络	27	
小结	28	
辅助阅读材料	28	
参考文献	29	
第2章 信号在光纤中的传输	33	
2.1 光纤中的光传播	33	
2.1.1 几何光学理论	34	
2.1.2 电磁场理论	37	
2.2 损耗和带宽	43	
2.3 色散射	45	
2.3.1 啁啾高斯脉冲	46	
2.3.2 色散控制	49	
2.4 非线性效应	50	
2.4.1 有效长度和面积	51	
2.4.2 受激布里渊散射	52	
2.4.3 受激喇曼散射	53	
2.4.4 非线性介质中信号的传播	54	
2.4.5 自相位调制	55	
2.4.6 高斯脉冲的自相位调制感应啁啾	57	
2.4.7 交叉相位调制	59	
2.4.8 四波混频	60	
2.4.9 新型光纤	61	
2.5 光孤子	65	
小结	67	
辅助阅读材料	67	
习题	68	
参考文献	69	
第3章 光网络中的元器件	71	
3.1 耦合器	71	
3.1.1 耦合器的工作原理	73	
3.1.2 能量守恒	73	
3.2 隔离器和环形器	74	
3.3 复用器和滤波器	76	
3.3.1 光栅	79	
3.3.2 衍射图形	81	
3.3.3 Bragg光栅	82	
3.3.4 光纤光栅	84	
3.3.5 F-P滤波器	86	
3.3.6 多层介质薄膜滤波器	89	
3.3.7 马赫-曾德尔干涉仪	90	
3.3.8 阵列波导光栅 (AWG)	93	
3.3.9 声光可调谐滤波器 (AOTF)	95	
3.3.10 高信道数的复用器结构	99	
3.4 光放大器	101	
3.4.1 受激辐射	101	
3.4.2 自发辐射	102	

3.4.3 掺铒光纤放大器	103	4.4.3 前端放大器噪声	173
3.4.4 喇曼放大器	106	4.4.4 雪崩光电二极管 (APD) 的噪声	173
3.4.5 半导体光放大器	107	4.4.5 光学前置放大器	173
3.4.6 SOA中的串扰	110	4.4.6 误码率 (BER)	175
3.5 发射机	110	4.4.7 相干检测	178
3.5.1 激光器	111	4.4.8 时钟恢复	180
3.5.2 发光二极管	118	4.4.9 均衡	180
3.5.3 调谐激光器	119	4.5 检错和纠错	181
3.5.4 直接调制和外部调制	125	4.5.1 Reed-Solomon 编码	183
3.5.5 喇曼放大器的泵浦光源	128	4.5.2 交错	184
3.6 检测器	129	小结	184
3.6.1 光检测器	129	辅助阅读材料	185
3.6.2 前端放大器	133	习题	185
3.7 开关	134	参考文献	189
3.7.1 大型光开关	135	第5章 传输系统工程	193
3.7.2 光开关技术	139	5.1 系统模型	193
3.7.3 大型电子开关	145	5.2 功率代价	194
3.8 波长转换器	145	5.3 发射机	195
3.8.1 光电子技术	146	5.4 接收器	196
3.8.2 光学选通	146	5.5 光学放大器	197
3.8.3 干涉仪技术	148	5.5.1 EDFA中的增益饱和	198
3.8.4 波混合	149	5.5.2 EDFA中的增益均衡	198
小结	151	5.5.3 放大器级联	200
辅助阅读材料	151	5.5.4 放大器间隔代价	201
习题	152	5.5.5 功率瞬变和自动增益控制	202
参考文献	157	5.5.6 激光环	203
第4章 调制和解调	163	5.6 串扰	204
4.1 调制	163	5.6.1 信道内串扰	204
4.2 副载波调制及复用	165	5.6.2 信道间串扰	205
4.2.1 限幅和互调制产物	165	5.6.3 网络中的串扰	207
4.2.2 副载波复用的应用	166	5.6.4 双向系统	207
4.3 光谱效率	167	5.6.5 串扰抑制	208
4.3.1 光学双二元调制	167	5.6.6 级联的滤波器	209
4.3.2 光学单边带调制	168	5.7 色散	210
4.3.3 多级调制	169	5.7.1 色散的限制: NRZ调制	211
4.3.4 光纤的容量限制	170	5.7.2 色散的限制: RZ调制	212
4.4 解调	170	5.7.3 色散补偿	215
4.4.1 理想的接收机	171	5.7.4 偏振模色散 (PMD)	218
4.4.2 实际的直接检测接收机	172	5.8 光纤的非线性	221

5.8.1 在放大系统中的有效长度	221	5.12.3 色散射补偿	235
5.8.2 受激布里渊散射	222	5.12.4 调制	235
5.8.3 受激喇曼散射	223	5.12.5 非线性	235
5.8.4 四波混频	225	5.12.6 信道间的间隔和波长数目	235
5.8.5 自相位/交叉相位调制	227	5.12.7 全光网络	236
5.8.6 色散射控制的作用	229	5.12.8 波长规划	237
5.9 波长稳定性	229	5.12.9 透明度	238
5.10 光孤子系统设计	230	小结	238
5.11 色散控制光孤子系统的设计	231	辅助阅读材料	238
5.12 总体设计考虑	234	习题	239
5.12.1 光纤类型	234	参考文献	244
5.12.2 发射功率和放大器间隔	234		

第1章 光网络概述

进入新千年以来,电信工业的变化令人瞩目,已对我们的生活方式产生了深远的影响。引起这些变化的原因当然有很多,首先最重要的是持续增长的网络增容需求。激发或者说加速了这些需求增长的因素中,最主要的是互联网和万维网(World Wide Web)的飞速发展,包括用户数量的增长、网络用时的增长和每个用户所使用带宽的增长。取自业界最新现象的一个简单实例是:当人们使用普通电话交流时,平均通话时间大约为3分钟。而若使用网络电话进行交流,一般的通话时间则为20分钟。因此网络电话带给传输网络的数据流量约为普通电话的6倍。

每隔4到6个月,网络流量就会翻一倍。就目前的趋势看,这种情况还会持续一段时间。同时我们还注意到,目前的宽带接入技术,如数字用户线(digital subscriber line, DSL)和线缆调制解调器的应用,为每个用户提供了1 Mb/s量级的带宽。而采用拨号技术的带宽只有(28~56) kb/s。宽带接入技术的应用对于互联网的影响是非常巨大的,一个亿的美国普通用户数量只要再增长10%,并假设其中10%的用户在同时使用网络,互联网的流量将再增长1 Tb/s。

与此同时,现代商业行为也越来越依赖于高速互联网。不仅是公司内部交流,公司与公司间的商业交流也依赖于互联网。一些大企业原来租用1.5 Mb/s的专用网络线路连接公司内部的站点,而现在则多已改租155 Mb/s的专用网络线路。

1

对网络带宽需求的增长与带宽价格的变化也有紧密关联。技术上的进步已使得带宽的价格持续降低,反过来又刺激了新的带宽应用领域的发展。一个简单的例证是,它使得电话通话的费用降低,因此人们利用电话交流的时间大幅度增加,进而使增加网络带宽的需求随之增长。这种良性循环在近期内不会改变。

引起这些变化的另一个主要因素是电信业自由化,即电信业垄断的瓦解。电信业已经被几个运营商垄断控制了几十年,事实上目前世界上仍有一些区域处于这种垄断的状态。众所周知,垄断妨碍了快速发展,垄断公司可以从容地缓解电信业的变化,并且不必积极地去降低价格和提供新型服务。垄断的瓦解刺激了公司间的竞争,随之而来的是价格的降低以及新技术和新服务快速投放市场。例如,自从1984年美国长途电话市场自由化后,长途电话的费用以每年1.8%的速率下降,而仍处于垄断状态的本地电话的费用则以每年3.6%的速率上涨。同时,这种市场自由化也导致了新的服务公司以及为这些新服务公司提供设备的公司的数量大幅度增长。这与上个世纪90年代中晚期,电信业由几个大型服务提供商和设备供应商所垄断的局面是大不相同的。

同时发生巨大变化的还有网络上所传输信息的类型。大多数新的需求来自于数据传输而非传统的声音信息的传输,而且这种趋势已存在了很长一段时间。然而,目前的网络构架却是有效地支持声音而不是数据信息的传输。网络中传输信息的多元化在很多时候要求运营商重新考虑构架网络的方法、提供服务的类型,甚至是他们整体的商业模式。在本章后面的小节中,我们还将讨论传输信息类型的变化对网络的影响。

上述的这些因素已经促进了大容量光网络的发展,并驱使其以令人瞩目的速度,完成了

从实验室到商业应用的转化。本书将介绍光网络技术、系统、组网问题，以及在经济上和其他应用方面的考虑。

2

1.1 电信网络结构

本书主要讨论所谓的公共 (public) 网络，此类网络由服务提供商 (service provider) 和运营商 (carrier) 操纵，运营商利用他们的网络向用户提供多种类型的服务。在过去，运营商多为电话公司或依托于电话公司，而现在已有了不同类型的运营商，采用不同的商业运营模式提供服务，其中的一些运营商甚至不提供电话服务。另外，传统的运营商通常提供电话服务和专用网络线，而现在很多的运营商则致力于构建与互联网服务提供商 (Internet service provider, ISP) 之间的互联。互联网服务提供商是指那些为其他运营商，甚至是一些没有任何网络基础设施的虚拟运营商，提供大容量带宽的商业公司。

在很多情况下，运营商拥有自己的网络设施（例如，光纤传输线）和用于网络结构中的设备。要知道，铺设光纤需要公用道路特许权，不是任何人都可以挖掘公用道路的！当今光纤的铺设可以有不同的方式：可埋于地下、驾于高空，也可沿油气管道或铁轨铺设。还有一些情况下，部分运营商可以从其他运营商那儿租用网络设施，并利用这些网络设施为顾客提供增值服务。例如，一个长途电话服务提供商可能并不拥有网络设施，但是他可以简单地从其他运营商那儿购买一定容量带宽的使用权，并将整个带宽分成多个分区转卖给他的终端网络用户。

本地交换运营商 (local-exchange carrier, LEC) 提供城区内的本地服务，而互联交换运营商 (interexchange carrier, IXC) 则提供长距离服务。随着本地交换运营商的服务范围向长途服务扩展，以及互联交换运营商的服务范围向本地服务扩展，这种区分方法正迅速变得模糊起来。为了更好地理解这种状况，需要回顾一下电信服务业反垄断的历史。1984年以前，在美国仅有一家电话公司——美国电话电报公司 (AT&T)。AT&T和它所拥有的当地的贝尔运营公司垄断了长途和本地的电信服务。1984年，电信反垄法规通过，整个集团公司分成了仅提供长途业务的AT&T公司和仅提供本地通信业务的几个贝尔子公司（或称为贝尔区域运营公司）。长途服务的反垄断结果导致了很多其他公司成功地介入了长途服务市场，MCI和Sprint公司就是这样的例子。在本地服务方面，贝尔子公司，即现在的本地交换责任运营公司 (ILEC)，仍然垄断着当地的通信服务。经过了电信业中的多次公司联营和合并，目前还留有四家贝尔区域运营公司，分别是西南贝尔通信公司 (SBC)、贝尔Atlantic (现称Verizon)、贝尔South和U. S. West (目前为Qwest的一部分)。目前，除了贝尔区域运营公司之外，还有一些其他的本地交换投标运营商 (CLEC)，这些投标运营商较少受到调控，他们与贝尔区域运营公司竞争，也提供本地通信服务。

3

上面是关于北美的一些情况。在欧洲，情形也很相似，政府拥有提供邮政、电话和电报 (PTT) 服务的公司，并在其各自的国家占据垄断地位。在过去的几十年里，反垄断一直在进行，现在，在欧洲有很多新的运营商既提供长途服务又提供本地通信服务。

在本书的其余部分，我们将深入探讨有关运营商的工作，并将其分类为城域运营商或长距离运营商。虽然同一家运营商可能既提供城域内的服务，又提供长距离服务，但是用来提供长距离服务的网络与提供城域内服务的网络多少有些不同，因此保留分类上的这种差异是有用处的。

对应于公共网络，还存在由一些团体拥有和控制的私人（private）网络，主要用于其内部的互联和通信。许多这样的团体都靠着公共网络为其提供的容量来构架自己的私人网络，特别是当他们的网络需要占用有公共道路特许权才能动用的公用土地时。那些通常构建在建筑物内、通信距离最多几公里的网络，被称为局域网（local-area network, LAN）。而那些通常的覆盖范围为几十至上百公里，覆盖大学校园或都市城区的网络被称为城域网（metropolitan-area network, MAN）。若网络覆盖距离更长，从几百至几千公里时，则被称为广域网（wide-area network, WAN）。在公共网络中，分类也基本相同。

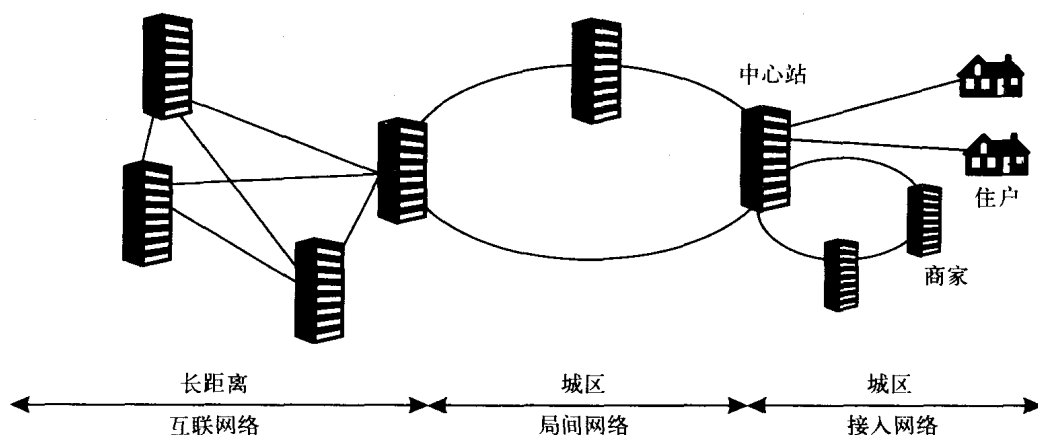


图1-1 公共网络的不同部分

图1-1给出了一个典型的公共光纤通信网的结构简图。从图中可以看出，这个网络是巨大而复杂的，网络中不同的部分可能由不同的运营商拥有和操纵。网络的节点是那些中心（交换）局（central office），有时也被称为存在点（point of presence, POP，一般POP指小节点，而hub指大节点）。节点之间的连接靠光纤对来实现，在大多数场合，用多路光纤对来实现。长距离网络的连接造价很高，因此很多北美长距离网络布局是相当稀疏的。而在欧洲，网络间的连接长度短，因此在欧洲长距离网络布局趋于稠密。另外，为防止网络通道中断，必须铺设备用通道保证通信的畅通。这些限制条件使得环形拓扑结构得到了广泛的应用。环形结构的布局是很稀疏的（每节点只有两条连线），但是已经提供了一条备用通道来传递信息。在很多情况下，用网状网络来实现环形网络中的互联。

在一个较高的层次上，网络可以被分成城域网（metropolitan, or metro）网络和长距离（long-haul）网络。城域网是位于大城市或地区的网络的一部分，长距离网络则将不同的城市 and 地区连接起来。城域网包括城域网接入（access）网络和城域网局间（inter office）网络。城域网接入网络从一个中心（交换）局向外扩展连接到个别的商业或个人用户（目前，一般的情况是连到居民小区而不是连到个别住户）。接入网的范围一般为几公里，通常收集客户传入的信息，并将其连入运营商的网络。因此大多数接入网的信息被中枢点转接入运营商的中心（交换）局。城域网局间网络则负责连接城域网或地区内的那些中心（交换）局，该网络覆盖的工作范围，即中心（交换）局之间的距离，一般为几公里到几十公里。长距离网络连接不同的城市或地区，它覆盖的工作范围，即中心（交换）局之间的距离，一般为几百到几千公里。有时，存在这样一种网络分支，该网络分支提供城域网和长距离网络之间的跨区转接，特别当这些网络是由不同的运营商操纵时。与城域网接入网不同，城域网局间网络和长距离网络中

传输信息的分布是网状的（或分布式的）。上文提及的网络覆盖的距离只是些直观意义上的尺度，很大程度上依赖于网络所处的地点。例如在欧洲，城市之间的距离通常只有几百公里，而在北美则可长达几千公里。

图1-1给出的是一个陆上网络结构图，光纤还被广泛应用于海底网络系统。海底网络系统覆盖的距离从几百公里到横跨大西洋和太平洋的几千公里。

1.2 服务、线路交换和包交换

运营商为他们的客户提供很多种类的服务，多数情况下，这些服务是面向连接（connection-oriented）的服务，这里连接的概念是指利用底层网络为双方或多方提供互联。连接的带宽和支持连接所用的底层网络的类型均有所不同，并在很大程度上影响着运营商向其客户提供的服务的质量。当然，网络也可以提供非连接（connectionless）服务，将在本节后面内容中阐述。

基于信号在网络中的复用和交换方式的不同，底层网络结构通常有两种基本类型：线路交换（circuit-switched）和包交换（packet-switched）。图1-2显示了在这些情况下所用的复用类型的不同。

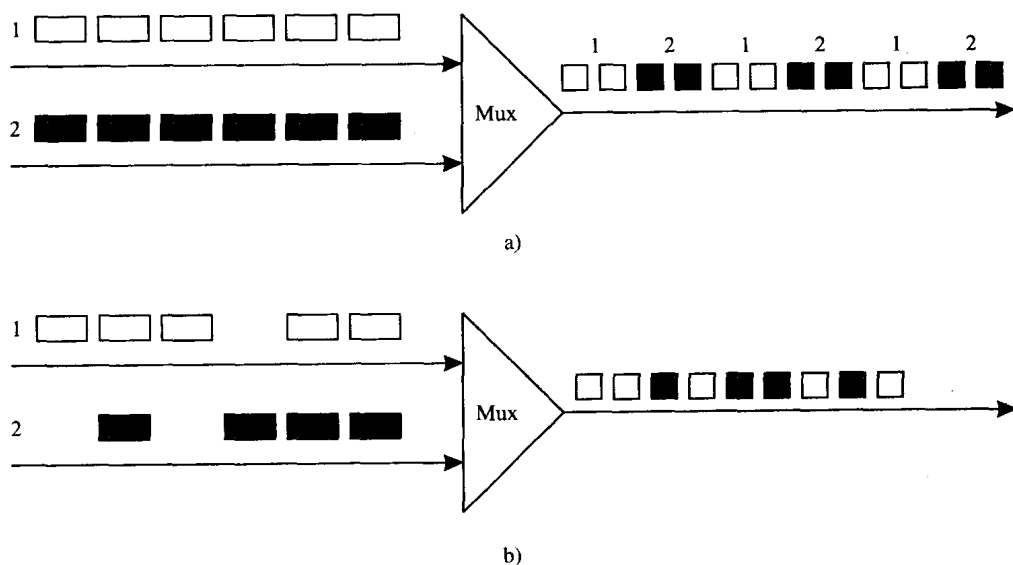


图1-2 时分复用的不同类型

a) 固定式 b) 统计式

线路交换网络为其客户提供线路交换连接服务。在线路交换中，一旦连接被建立，承诺的带宽使用量便被分配给每处连接点，并且在所有时间都是连接着的。所有线路或连接点的带宽的总和必须小于链路的带宽。线路交换网络最常用的例子是公共交换电话网（PSTN）。一旦建立连接，公共交换电话网向终端用户提供固定带宽（典型值约为4 kHz）的固定连接。在运营商的中心（交换）局，这一线路被转换到一个数字的64 kb/s的线路。公共交换电话网支持音频信号的传输并提供了很好的服务效果。

今天，运营商提供的线路交换服务已经能够包含各种比特速率，范围从64 kb/s（音频）

直至几个Gb/s。已建立的具有一定带宽的连接通常由运营商租借给他的客户，下行连接一般保持相当长的时间，几天、几个月、甚至几年。此类服务常被称为专用线服务（private line service）。公共交换电话网虽然也属于线路交换，却有一个重要的不同点。对于公共交换电话网，用户靠拨号建立彼此的连接，而对于专用线服务，则通常由运营商利用其管理系统为客户建立连接。线路交换服务一直处在发展和变化中，特别是连接所需的时间不断减少。毋庸置疑，将来会有越来越多的用户使用高速的专用线服务。

线路交换的缺点是当它在处理突发数据信息时显得无效。突发数据信息流的一个例子是用户通过键盘输入的信息，如果用户一直在敲击键盘，则传输的比特率基本是稳定的。一旦用户停止了键盘输入，信息的传入也随即停止。再比如网页浏览，如果用户正在阅读刚刚下载的网页，则几乎没有信息在网络中传输。但如果用户点击了超级链接，则一个新网页需要尽快通过网络下载。因此，一旦有突发数据信息流，就需要占用大量的带宽容量，没有突发信息流时，带宽的需求量则很少。这种情况通常用平均（average）带宽和峰值（peak）带宽来表征，分别对应于网络信息流的长程平均值和短程突发率。在线路交换网络中，我们不得不预留充足的带宽来处理峰值带宽需求，可是这些带宽在很多时间里（非峰值区）都处于闲置不用的状态。

包交换可以有效地解决突发数据信息流传输的问题。在包交换网络中，数据流被分成一些小的数据包，这些小的数据包与网络中其他数据流分成的小数据包组合在一起，按照传送的目的地在网络中传输和交换。为了便于交换，每个小数据包要加上数据包头文件，头文件中包含地址信息，例如传送目的地的地址或传送途中下一个节点的地址。在传输线路中间的节点读取头文件，然后根据头文件包含的信息决定数据的交换方向。在目的地，属于不同数据信息流的数据包被接收分类后再按原样重新组合起来。包交换的一个突出的例证就是互联网，它使用网际协议（Internet Protocol, IP），将信息从其发送源导向接收处。

包交换使用一种称为统计复用（statistical multiplexing）的技术，在一个链路中将多个突发数据流复用起来。由于每一个数据流都是突发的，因此在任意的一个时刻，可能只有部分数据流被激活，所有数据流同时被激活的可能性是很小的。因此，链路带宽的需求实际上可以很小，比所有数据流同时被激活时所需要的带宽量要小得多。

统计复用提高了带宽的利用率，但也引入了其他一些影响。假如足够多的数据信息流同时被激活，并因此而导致所需的带宽量大于链路的总带宽时，有一些数据包将不得不被置于等待（queued）或缓存（buffered）的状态，直至链路重又畅通为止。一个数据包延迟的时间依赖于在它的前面还有多少数据包处于等待状态，这就使延时成了一个随机参数。有时，链路中传输的数据信息流过多，使得缓存出现溢出。若发生了这种情况，一些数据包就必须从网络中丢弃。通常更高层的传输协议，如互联网中的传输控制协议（transmission control protocol, TCP），可以检测到这种情况的发生，并可以重新发送这些数据包。还有，一个传统的包交换网络甚至不支持连接的概念。属于某一连接的数据包被识别为一个独立的入口，不同的数据包可以通过不同的传输路径在网络中传输，基于网际协议的互联网就采用这样的工作方式。此类无连接服务（connectionless service）被称为数据报服务（datagram service）。上述这些情况增加了不同数据包延时的多样化，并迫使高层传输协议对到达终端的无序数据包重新排序。

传统意义上的包交换网络提供的是“尽力（best-effort）”服务，这种网络试图但并不保

证以最快的速度，将数据信息从发射端传输到接收端，事实上目前大多数互联网仍处于这样的状态。此类服务的另一个例子是帧中继（frame relay）。帧中继是一种通用的包交换服务，由运营商为公司（或社团）数据网络提供互联。当一个用户登记使用帧中继服务时，便可以获得使用一定平均带宽的权限，并可以处理超过平均带宽的突发数据流，但是超过平均带宽的数据流的传输性能得不到保证。为了保持网络的负载不至于过高，用户数据在输入网络时受到限制，使其不至于长时间超越其被准许使用的带宽额度。换句话说，一个拥有64 kb/s平均带宽使用权的用户可以偶尔传输128 kb/s的数据，而在其他时间传输32 kb/s的数据，但是不允许该用户长时间传输超越64 kb/s平均速率的数据。

包交换网络提供的“尽力”服务已经在一些应用领域获得了很好的效果，如网页浏览和文件传输。因为对于这样的应用，对数据包延时并不是很敏感。然而有一些应用，如实时视频或音频信号的传输是不容许随机的数据包延时的。因此，目前人们正致力于设计能够对服务质量（quality of service, QoS）提供一些保证的包交换网络。QoS可以包括提供最大数据包延时保证，同时也包括延时的调整，以及提供每一链接的最小平均带宽保证。异步传输模式（asynchronous transfer mode, ATM）网络就是为实现这种想法而构建的，网际协议在提供类似的服务方面也已经有所增强。大多数此类的QoS工程都依赖于拥有面向连接的层。例如，在IP网络中，多协议标记交换（multi-protocol label switching, MPLS）提供虚拟线路，支持端到端的信息流。一条虚拟线路能使属于这一线路的所有数据包在网络中沿相同路径传输，允许最优化地分配网络资源来满足服务质量的承诺，比如每一数据包的有界延时。与实际的线路交换网络不同的是，由于虚拟线路使用统计复用方法，因此一条虚拟线路并不提供固定的带宽。

服务模式发展展望

随着网络和相关技术的发展以及运营商之间竞争的增强，运营商们所使用的服务模式也在快速变化。每个连接所传送的带宽在增加，租用容量为155 Mb/s到2.5 Gb/s，甚至高达10 Gb/s的专用线，已是很平常的事。在很多情况，一个运营商的客户就是另一个运营商。这些所谓的母运营商，即运营商的运营商通常都操纵着很大数量的带宽容量，并与其他运营商所拥有的网络互连。由于客户需求的增长以及行业竞争的增强，运营商现在都必须能够快速连接并传输数据。这个时间通常为几分钟至几小时，而不像以前需要几天至几个月。而且，现在的客户希望签署更短周期的服务协议，而不是几个月到几年。其实我们不难理解一个客户为什么会租用大量的带宽，却只租用很短的时间，在下列的一些情况下客户一般就会这样做。比如，一个客户要在一天的一个特定时段进行大量数据的备份，或处理一些特别的事件，或提供一些临时的巨大量级的数据信息传输。

变化的另一方面与线路的可利用率（availability）有关，可利用率定义为运营商向其客户提供服务时间的百分率。可利用率的典型值是99.999%，意味着每年只允许网络有5分钟的不可用时间。这就要求在出现网络故障，如光纤折断等情况时，我们设计及构建的网络能提供非常快的修复率。目前对修复率的要求约为50 ms，对其子系统或附属设备的修复率的要求也相同。虽然有一些其他的连接可能容许更长的修复时间，比如，有一些连接可能根本不需要运营商去修复，当连接中断时，其用户们将选择其他路由进行连接和传输。一般来说，高速的修复率只在满冗余度情况下才能达到，即需要预留一半的网络带宽来达到这一目的。研究

8

9