



WILEY

光学与光电子学



Fiber-Optic Communication Systems
Fourth Edition

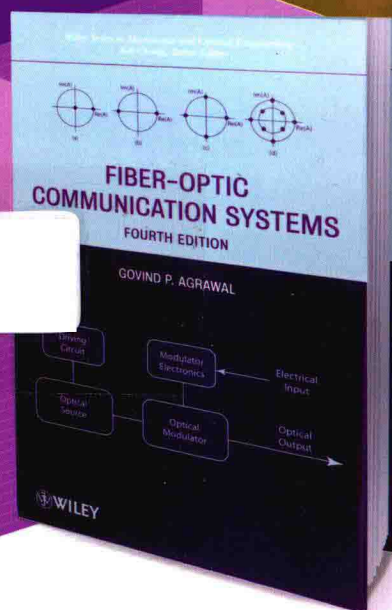
光纤通信系统

(第四版)

Fiber-Optic Communication Systems
Fourth Edition

【美】 Govind P. Agrawal 著

贾东方 忻向军 译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

经典译丛·光子学与光电子学

光纤通信系统

(第四版)

Fiber-Optic Communication Systems
Fourth Edition

[美] Govind P. Agrawal

贾东方 忻向军



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是光纤通信方面的一本经典巨著,在国内外享有盛誉。全书共计 11 章,主要内容包括:光纤通信概述;光纤通信系统的主要组成部分——光纤、光发射机和光接收机;单信道和多信道光纤通信系统的设计;光纤的损耗管理、色散管理和非线性管理技术;先进光波系统;全光信号处理。全书内容系统全面,理论体系严谨,讲解深入浅出,理论与实践结合紧密,同时非常注重近年来光纤通信中出现的新技术。

本书是通信工程、电子信息工程、光电信息工程、电子科学与技术等专业高年级本科生、研究生的一本优秀教材,也是光纤通信领域的科研人员、工程技术人员和管理人员的一本很好的参考书。

Fiber-Optic Communication Systems, Fourth Edition, 9780470505113, Govind P. Agrawal.

Copyright © 2010, John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

本书简体中文字版专有翻译出版权由美国 John Wiley & Sons Inc. 授予电子工业出版社。

未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字:01-2011-4144

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信系统:第4版/(美)阿戈沃(Agrawal, G. P.)著;贾东方,忻向军译. —北京:电子工业出版社, 2016.3

(经典译丛·光学与光电子学)

书名原文:Fiber-Optic Communication Systems, Fourth Edition

ISBN 978-7-121-28140-2

I. ①光… II. ①阿… ②贾… ③忻… III. ①光导纤维通信系统-高等学校-教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第025490号

策划编辑:马 岚

责任编辑:李秦华

印 刷:三河市华成印务有限公司

装 订:三河市华成印务有限公司

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:30.5 字数:861千字

版 次:2016年3月第1次版(原著第4版)

印 次:2016年3月第1次印刷

定 价:89.00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 zltz@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

自从1966年英籍华人高锟提出光纤通信的概念以来,在此后的半个世纪里,光纤通信获得了突飞猛进的发展。光纤通信以其独特的优越性,已经成为现代通信发展的主流方向,是当今信息社会的基石。随着包括移动互联网、大数据、物联网等新一代业务和应用的不断推进,对光纤通信技术的要求也不断提高,光纤通信也势必将迎来又一个发展高峰。因此,无论是对于高等院校通信工程、电子信息工程、光电信息工程、电子科学与技术及相关专业的高年级本科生和研究生而言,还是对于从事信息技术的科研人员而言,了解光纤通信的基础知识是至关重要的。

美国罗切斯特大学 Govind P. Agrawal 教授的著作 *Fiber-Optic Communication Systems* 是一本系统介绍光纤通信的基本理论、技术和发展前沿的巨著,在国内外享有盛誉,包括哈佛大学、斯坦福大学、加州理工学院、罗切斯特大学、南安普敦大学在内的世界上许多著名大学都采用该书作为光纤通信课程的教材。同时,该书在光纤通信文献中的引用率也相当高,这从一个侧面说明了该书的权威性和经典性。Govind P. Agrawal 教授作为世界光纤通信领域的著名学者,从1989年就开始在罗切斯特大学光学研究所讲授光纤通信课程,并长期从事该领域和相关领域的研究工作,本书正是作者多年教学和科研工作的结晶。该书于1992年问世,再版于1997年,2002年推出了第三版,2010年推出了目前的第四版,被行业人士誉为大师之作。与上一版相比,第四版新增了两章内容,全书主要内容包括:光纤通信概述;光纤通信系统的主要组成部分——光纤、光发射机和光接收机;单信道和多信道光纤通信系统的设计;光纤的损耗管理、色散管理和非线性管理技术;先进光波系统;全光信号处理。纵览全书,其内容系统全面,理论体系严谨,讲解深入浅出,理论与实践结合紧密,同时非常注重近年来光纤通信中出现的新技术,是一本不可多得的优秀教材,也是一本很有价值的参考书。

我们认为很有必要将这本光纤通信领域的经典名著介绍给中文读者。本书的翻译工作由天津大学的贾东方和北京邮电大学的忻向军共同完成。在本书的翻译过程中,对原书中明显的错误进行了一些更正。

感谢 Govind P. Agrawal 教授对中文译书出版方面给予的合作。感谢电子工业出版社对翻译工作的大力支持,特别要衷心感谢本书的策划编辑马岚女士和责任编辑李秦华先生,正是他们的严谨细致和辛勤付出,本书才得以顺利出版。

由于译者学识所限,疏漏乃至错误在所难免,恳请广大读者及专家不吝赐教,提出修改意见,我们将不胜感激。

Forward

It is with pleasure that I write this forward for the Chinese translation of the fourth edition of my book *Fiber-Optic Communication Systems* published in 2010 by Wiley. This book has expanded considerably from its third edition because of the recent adoption of phase-modulation techniques together with the use of digital processing at optical receivers. In addition to additions and updates in all chapters, the fourth edition contains two new chapters entitled *Advanced Lightwave Systems* and *Optical Signal Processing*.

The Optiwave Corporation provides a state-of-the-art software package suitable for designing modern lightwave systems. It is my hope that the software package will help to train the students and will prepare them better for an industrial job.

The Optical Communication Group of Tianjin University is to be commended for undertaking this project and finishing it in a timely fashion. The same group translated my two books on Nonlinear Fiber Optics and published a combined Chinese edition of them in 2010. I am very pleased with the quality of that translation and am confident that the translation of my book on *Fiber-Optic Communication Systems* will preserve the quality and will be liked by everyone.

I visited several universities in Beijing and Chengdu during my China trip in 2007. I learned during that trip that previous Chinese editions of my books have been well received by both the Chinese scientists and students. Both my wife and I enjoyed our 2007 visit so much that we are looking forward to visiting China in the near future.

I am pleased that my work is available to a wide audience in China, and I thank the translators and the Chinese publisher, Publishing House of Electronics Industry (PHEI), for making this possible. Thanks are also due to the U. S. Publisher, John Wiley & Sons, for granting the permission for this translation.



Govind P. Agrawal
Rochester, New York, USA
March 2014

前 言

自从本书于 1992 年首次出版以来, 尽管初版和第四版之间只有相对短的 18 年时间, 但光纤通信系统的研究已经取得突飞猛进的发展。1992 年, 商用光纤链路的最大容量只有 2.5 Gbps; 仅仅四年后, 随着波分复用(WDM)技术的出现, 总容量为 40 Gbps 的系统已经能商用。2001 年, 商用 WDM 系统的容量超过了 1.6 Tbps。与此同时, 全世界部署的跨洋光波系统的容量也呈爆炸式增长。2001 年, 计划全球网络以 2.5 Tbps 的容量(64 个 WDM 信道, 单信道 10 Gbps, 4 个光纤对)覆盖 250000 km; 2004 年, 实现了这个宏伟计划, 系统开始商业运营(目前, 这个系统是由一家印度电信公司 VSNL 运营的)。尽管在 2001 年以后的几年内, 随着所谓的“通信泡沫”的破裂, 光纤通信发展的脚步慢了下来, 但在光波系统的设计上仍取得了进展。特别是在 2006 年以后, 随着基于相位的调制格式、100 Gbps 以太网和正交频分复用技术的出现, 光纤通信又开始加速发展。

自从本书的第三版于 2002 年出版以来, 已广泛受到从事光波技术的科学机构和教育机构的欢迎, 世界上很多大学将它作为教科书。因为在过去 8 年中, 光纤通信系统又得到了迅猛的发展, 出版商和我都认为, 如果想要本书能继续提供关于光纤通信系统一个全面的和最新的报告, 有必要推出第四版; 结果就在你的手中。本版本的主要目的仍和原先几个版本的一样, 具体地说, 它应能同时作为教科书和参考书。基于这个原因, 本书强调了对物理概念和物理规律的理解, 但对工程方面的讨论也贯穿始终。

为使本书涵盖的内容更广, 需要新增大量的素材, 因此与初版相比, 本版本的开本已经有了显著增大。尽管所有章节都有所更新, 但主要变化是在第 7 章至第 11 章。我借助这个再版的机会重新编排了素材, 使本书更适合两个学期的光通信课程。特别是, 将波分复用(WDM)这一章内容前移, 现在作为第 6 章出现在本版本中。利用这种编排, 第 1 章至第 6 章作为本版本的基础, 而第 7 章至第 11 章涵盖了与先进光波系统设计有关的重要课题。更具体地说, 在第 1 章引入光纤通信的基本概念后, 第 2 章至第 4 章将分别重点介绍光纤通信的 3 个主要部分——光纤、光发射机和光接收机。第 5 章和第 6 章将分别关注单信道和多信道系统的设计问题。第 7 章和第 8 章将分别重点介绍用于光纤损耗管理和光纤色散管理的先进技术。第 9 章将关注非线性效应的影响和用来管理它们的技术(如光孤子的使用和通过增强色散的伪线性传输)。第 10 章和第 11 章是本版本新增的两章, 其中第 10 章将主要关注利用新颖的基于相位调制格式的相干和自相干光波系统, 第 11 章将重点介绍全光信号处理, 特别强调波长转换和光再生。总之, 本书的内容反映了截止到 2010 年世界光波系统的现状。

本书的主要目的是作为光通信领域研究生的教科书, 因此试图尽可能多地包括最新的素材, 以使學生能接触到这个令人激动的研究领域的新进展。除此之外, 本书还能作为已经进入或正希望进入光纤通信领域的研究人员的参考书。与一般教科书相比, 本书在每章后面列出的参考文献详尽得多, 这些最新的研究论文对选择本书作为参考书的研究人员应该非常有用。同时, 如果学生在完成布置给他们的作业时需要阅读原始的研究论文, 他们也能从书后列出的丰富的文献中获益。本书每章后面都包含一组习题, 这对教师和学生都有帮助。尽管本书主要是针对研究生的, 但它也能作为相关专业高年级本科生的教科书使用。另外, 本书的部

分内容还能用在其他的相关课程中，例如，第2章能用做光波导方面的课程，第3章和第4章对光电子学方面的课程非常有用。

美国和其他国家及地区的许多大学都开设了光通信课程，它作为电子工程、物理学或光学专业课程的一个组成部分。我从1989年就对罗切斯特大学光学研究所的研究生讲授光通信这门课程，本书确实是在我多年的光通信讲义的基础上完成的。我知道本书被全世界的许多教师用做教科书——这让我深感欣慰；我还清醒地意识到问题所在——修正版本篇幅变大带来的副作用，教师怎么才能将全部这些素材适合光通信一个学期的课程？我也纠结于同样的问题。实际上，在一个学期内是不可能覆盖整本书的，最好的解决方案是提供两个学期的课程，其中将第1章至第6章安排在第一个学期，其他章节安排在第二个学期，然而，能为光通信提供两个学期课程的大学并不多。如果教师做一些适当的取舍，本书是能为光通信提供一个学期的课程使用的。例如，如果学生已经学过激光器的课程，则第3章可以直接跳过；如果为学生一睹光纤通信系统的最新进展而只涵盖本书第7章至第11章的部分内容，本书还是适合为高年级本科生或研究生提供的一个学期的课程的。

为便于本书读者的学习，Optiwave公司提供了最新的软件包OptiSystem 8.0。这个软件包可以用来设计现代光波系统，附录D给出了有关详细说明。我希望这个软件包能帮助培养学生，并为他们今后从事相关的产业工作做好准备。

有许多人对本书做出直接或间接的贡献，在此不可能一一提到他们的名字。我要感谢我的研究生和选修我的光通信系统课程并通过他们的问题和评论改进我的课堂笔记的学生。我还要感谢众多的教师，他们不仅选用本书作为他们的课程的教科书，而且还指出了前几个版本中的拼写错误，从而帮助我改进了书的质量。我还要感谢我在光学研究所的同事，他们不但与我进行过多次讨论，而且提供了一个亲切的和富有成效的氛围。我还要感谢Karen Rolfe的帮助，她不但面带微笑地录入了本书的初稿，而且进行了多次校对。我还要感谢众多的读者，他们给我反馈来一些有用的信息。最后但同样重要的，我要感谢我的妻子Anne，女儿Sipra、Caroline和Claire，感谢她们对我工作的理解和支持。

Govind P. Agrawal

Rochester, NY

April 2010

目 录

第1章 绪论	1
1.1 历史回顾	1
1.1.1 光纤通信的需求	1
1.1.2 光波系统的演进	3
1.2 基本概念	6
1.2.1 模拟信号和数字信号	6
1.2.2 信道复用	8
1.2.3 调制格式	9
1.3 光通信系统	11
1.4 光波系统组成	12
1.4.1 作为通信通道的光纤	13
1.4.2 光发射机	13
1.4.3 光接收机	14
习题	15
参考文献	15
第2章 光纤	18
2.1 几何光学描述	18
2.1.1 阶跃折射率光纤	18
2.1.2 渐变折射率光纤	20
2.2 波的传输	22
2.2.1 麦克斯韦方程组	22
2.2.2 光纤模式	23
2.2.3 单模光纤	26
2.3 单模光纤中的色散	28
2.3.1 群速度色散	29
2.3.2 材料色散	30
2.3.3 波导色散	31
2.3.4 高阶色散	32
2.3.5 偏振模色散	33
2.4 色散引起的限制	34
2.4.1 基本传输方程	34
2.4.2 啁啾高斯脉冲	35
2.4.3 对比特率的限制	38
2.4.4 光纤带宽	40
2.5 光纤损耗	41

2.5.1	衰减系数	42
2.5.2	材料吸收	42
2.5.3	瑞利散射	43
2.5.4	波导缺陷	44
2.6	非线性光学效应	44
2.6.1	受激光散射	44
2.6.2	非线性相位调制	48
2.6.3	四波混频	50
2.7	光纤设计和制造	51
2.7.1	石英光纤	51
2.7.2	塑料光纤	53
2.7.3	光缆和连接器	54
	习题	55
	参考文献	56
第3章	光发射机	60
3.1	半导体激光器物理	60
3.1.1	自发辐射和受激辐射	60
3.1.2	非辐射复合	61
3.1.3	光增益	62
3.1.4	反馈和激光器阈值	63
3.1.5	纵模	64
3.1.6	激光器结构	65
3.2	单模半导体激光器	66
3.2.1	分布反馈激光器	66
3.2.2	耦合腔半导体激光器	68
3.2.3	可调谐半导体激光器	69
3.2.4	垂直腔面发射激光器	70
3.3	激光器的工作特性	71
3.3.1	连续工作特性	71
3.3.2	调制带宽	74
3.3.3	相对强度噪声	75
3.3.4	频谱线宽	77
3.4	光信号产生	79
3.4.1	直接调制	79
3.4.2	外调制	80
3.5	发光二极管	83
3.5.1	连续工作特性	83
3.5.2	调制响应	85
3.5.3	发光二极管的结构	85
3.6	光发射机的设计	87

3.6.1	光源与光纤的耦合	87
3.6.2	驱动电路	89
3.6.3	可靠性和封装	90
习题		91
参考文献		92
第4章	光接收机	98
4.1	基本概念	98
4.1.1	响应度和量子效率	98
4.1.2	上升时间和带宽	100
4.2	常用的光电探测器	100
4.2.1	p-n 光电二极管	100
4.2.2	p-i-n 光电二极管	102
4.2.3	雪崩光电二极管	104
4.2.4	MSM 光电探测器	109
4.3	光接收机的设计	110
4.3.1	前端	110
4.3.2	线性通道	111
4.3.3	判决电路	112
4.3.4	集成光接收机	113
4.4	光接收机噪声	115
4.4.1	噪声机制	115
4.4.2	p-i-n 光接收机	117
4.4.3	APD 光接收机	118
4.5	相干探测	120
4.5.1	本机振荡器	120
4.5.2	零差探测	121
4.5.3	外差探测	122
4.5.4	信噪比	122
4.6	光接收机灵敏度	123
4.6.1	误码率	123
4.6.2	最小接收光功率	125
4.6.3	光电探测的量子极限	127
4.7	灵敏度劣化	128
4.7.1	消光比	128
4.7.2	强度噪声	129
4.7.3	定时抖动	131
4.8	光接收机的性能	132
习题		134
参考文献		136

第5章 光波系统 140

5.1 系统结构 140

5.1.1 点对点链路 140

5.1.2 分配网 141

5.1.3 局域网 142

5.2 设计指南 143

5.2.1 损耗限制光波系统 144

5.2.2 色散限制光波系统 145

5.2.3 功率预算 146

5.2.4 上升时间预算 147

5.3 长途光波系统 149

5.3.1 性能限制因素 149

5.3.2 陆地光波系统 150

5.3.3 海底光波系统 152

5.4 功率代价的来源 153

5.4.1 模式噪声 154

5.4.2 模分配噪声 155

5.4.3 反射反馈和噪声 156

5.4.4 色散脉冲展宽 159

5.4.5 频率啁啾 159

5.4.6 眼图闭合度代价 160

5.5 前向纠错 162

5.5.1 纠错码 162

5.5.2 编码增益 163

5.6 计算机辅助设计 163

习题 165

参考文献 166

第6章 多信道系统 171

6.1 WDM 光波系统 171

6.1.1 大容量点对点链路 172

6.1.2 广域网与城域网 174

6.1.3 多址 WDM 网络 176

6.2 WDM 器件 178

6.2.1 可调谐光滤波器 178

6.2.2 复用器和解复用器 182

6.2.3 分插复用器和滤波器 185

6.2.4 星形耦合器 186

6.2.5 波长路由器 187

6.2.6 WDM 光发射机和光接收机 189

6.3 系统性能问题 191

6.3.1	不同波长线性串扰	192
6.3.2	相同波长线性串扰	193
6.3.3	非线性拉曼串扰	194
6.3.4	受激布里渊散射	196
6.3.5	交叉相位调制	197
6.3.6	四波混频	199
6.3.7	其他设计问题	200
6.4	时分复用	201
6.4.1	信道复用	201
6.4.2	信道解复用	202
6.4.3	系统性能	204
6.5	副载波复用	205
6.5.1	模拟和数字副载波复用系统	205
6.5.2	多波长副载波复用系统	208
6.5.3	正交频分复用	210
6.6	码分复用	211
6.6.1	时域编码	212
6.6.2	频域编码	213
6.6.3	跳频	214
	习题	215
	参考文献	217
第7章	损耗管理	226
7.1	光纤损耗的补偿	226
7.1.1	周期放大方案	226
7.1.2	集总放大和分布放大	228
7.1.3	双向泵浦方案	229
7.2	掺铒光纤放大器	230
7.2.1	泵浦和增益谱	230
7.2.2	二能级模型	231
7.2.3	放大器噪声	233
7.2.4	多信道应用	235
7.3	拉曼放大器	237
7.3.1	拉曼增益和带宽	237
7.3.2	拉曼引起的信号增益	239
7.3.3	多泵浦拉曼放大	240
7.3.4	拉曼放大器的噪声指数	242
7.4	光信噪比	243
7.4.1	集总放大	243
7.4.2	分布放大	244
7.5	电信噪比	245

7.5.1	放大自发辐射引起的电流起伏	245
7.5.2	放大自发辐射对信噪比的影响	247
7.5.3	放大器链中噪声的形成	247
7.6	接收机灵敏度和 Q 因子	248
7.6.1	误码率	248
7.6.2	Q 因子和光信噪比的关系	250
7.7	色散和非线性效应的作用	251
7.7.1	通过调制不稳定性的噪声增长	251
7.7.2	噪声引起的信号劣化	252
7.7.3	噪声引起的能量起伏	254
7.7.4	噪声引起的定时抖动	255
7.8	周期放大光波系统	256
7.8.1	数值方法	257
7.8.2	最佳输入功率	258
	习题	260
	参考文献	261
第8章	色散管理	266
8.1	色散问题及其解决方案	266
8.2	色散补偿光纤	268
8.2.1	色散补偿条件	268
8.2.2	色散图	269
8.2.3	色散补偿光纤的设计	270
8.3	光纤布拉格光栅	273
8.3.1	常周期光栅	273
8.3.2	啁啾光纤光栅	274
8.3.3	采样光栅	277
8.4	色散均衡滤波器	279
8.4.1	Gires-Tournois 滤波器	279
8.4.2	马赫-曾德尔滤波器	281
8.4.3	其他全通滤波器	282
8.5	光学相位共轭	283
8.5.1	工作原理	284
8.5.2	自相位调制的补偿	284
8.5.3	相位共轭信号的产生	285
8.6	高比特率信道	288
8.6.1	可调谐色散补偿	288
8.6.2	高阶色散管理	291
8.6.3	偏振模色散补偿	293
8.7	电色散补偿	296
8.7.1	群速度色散预补偿的基本思想	296

8.7.2	发射机处的预补偿	297
8.7.3	接收机处的色散补偿	301
习题		304
参考文献		306
第9章 非线性效应的控制		314
9.1	光纤非线性的影响	314
9.1.1	系统设计问题	314
9.1.2	半解析方法	317
9.1.3	孤子区域和伪线性区域	319
9.2	光纤中的孤子	321
9.2.1	光孤子的特性	321
9.2.2	损耗管理孤子	323
9.3	色散管理孤子	326
9.3.1	色散渐减光纤	326
9.3.2	周期色散图	327
9.3.3	设计问题	329
9.3.4	定时抖动	331
9.3.5	定时抖动的控制	333
9.4	伪线性光波系统	335
9.4.1	信道内非线性效应	335
9.4.2	信道内交叉相位调制	337
9.4.3	信道内四波混频	340
9.5	信道内非线性效应的控制	342
9.5.1	色散图的优化	343
9.5.2	相位交替技术	345
9.5.3	偏振比特交替	347
习题		348
参考文献		349
第10章 先进光波系统		355
10.1	光进调制格式	355
10.1.1	光信号的编码	355
10.1.2	振幅和相位调制器	357
10.2	解调方案	358
10.2.1	同步外差解调	359
10.2.2	异步外差解调	360
10.2.3	光延迟解调	361
10.3	散弹噪声和误码率	362
10.3.1	同步外差接收机	362
10.3.2	异步外差接收机	365

10.3.3	带有延迟解调的接收机	366
10.4	灵敏度劣化机制	368
10.4.1	激光器的强度噪声	368
10.4.2	激光器的相位噪声	369
10.4.3	信号偏振起伏	371
10.4.4	光放大器加入的噪声	372
10.4.5	光纤色散	373
10.5	非线性效应的影响	375
10.5.1	非线性相位噪声	375
10.5.2	光纤色散效应	377
10.5.3	非线性相位噪声的补偿	378
10.6	最新进展	381
10.6.1	采用 DBPSK 格式的系统	381
10.6.2	采用 DQPSK 格式的系统	383
10.6.3	采用 QAM 和相关格式的系统	383
10.6.4	采用正交频分复用的系统	385
10.7	极限信道容量	387
	习题	388
	参考文献	389
第 11 章	光学信号处理	395
11.1	非线性技术和器件	395
11.1.1	非线性光纤环形镜	395
11.1.2	参量放大器	399
11.1.3	半导体光放大器中的非线性效应	403
11.1.4	双稳光器件	406
11.2	全光触发器	408
11.2.1	半导体激光器和半导体光放大器	409
11.2.2	耦合半导体激光器和半导体光放大器	410
11.3	波长转换器	411
11.3.1	基于交叉相位调制的波长转换器	412
11.3.2	基于四波混频的波长转换器	414
11.3.3	无源半导体波导	417
11.3.4	基于半导体光放大器的波长转换器	418
11.4	超快光交换	420
11.4.1	时域解复用	420
11.4.2	数据格式转换	424
11.4.3	包交换	426
11.5	光再生器	426
11.5.1	基于光纤的 2R 再生器	427
11.5.2	基于半导体光放大器的 2R 再生器	431

11.5.3 基于光纤的 3R 再生器 432

11.5.4 基于半导体光放大器的 3R 再生器 434

11.5.5 相位编码信号的再生 435

习题 438

参考文献 439

附录 A 单位系统 448

附录 B 缩写词 449

附录 C 脉冲展宽的一般公式 453

附录 D 软件包 455

中英文术语对照 457

第1章 绪 论

通信系统的功能是从一个地方到另一个地方传输信息，可以是几千米的距离，也可以是跨洋距离。信息通常是用频率从几兆赫兹到几百太赫兹的电磁载波携带的，而光通信系统利用的是电磁波谱的可见光或红外区的高载波频率(大约 100 THz)，有时称为光波系统，以与微波系统区别，而微波系统的载波频率一般要小 5 个数量级(大约 1 GHz)。光纤通信系统是指采用光纤传输信息的光波系统，自 1980 年以来，这样的光波系统就在全世界部署，并导致了电信领域的革命。确实，光波技术和微电子技术一起，共同导致了“信息时代”在 20 世纪 90 年代的到来。本书全面介绍光纤通信系统，虽然强调基础知识，但也讨论一些相关的工程问题。在绪论中，将给出光纤通信系统的基本概念和背景材料。1.1 节给出光通信系统发展的历史回顾。1.2 节介绍诸如模拟信号和数字信号、信道解复用和调制格式等基本概念。1.3 节讨论各种光波系统的相对优点。1.4 节重点介绍光纤通信系统的构成模块。

1.1 历史回顾

如果泛泛地解释光通信，那么光用于通信目的可以追溯到古代^[1]，大部分文明社会使用镜子、烽火或烟信号来传达单一信息(如战争胜利的消息)。这种思想实际上直到 18 世纪末还在使用，如信号灯、旗帜和其他旗语设备。在 Claude Chappe 于 1792 年提出利用中继站[用今天的语言就是再生器或中继器(regenerator 或 repeater)]来长距离(大约 100 km)传输机械编码的消息后^[2]，这种思想得到进一步的延伸，图 1.1 给出了其基本思想的示意图。1794 年 7 月，首个这样的“光电报”在巴黎和里尔(法国的两个城市，相距大约 200 km)之间投入使用；1830 年，网络扩展到整个欧洲^[1]。在这些系统中，光的作用只是简单地使编码信号可见，这样就能通过中继站截听。19 世纪的光-机械通信系统固有很慢，用今天的术语，这些系统的有效比特率不到 1 bps($B < 1$ bps)。

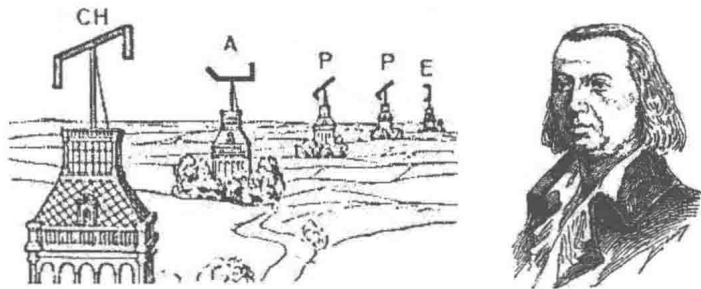


图 1.1 光电报的示意图和它的发明者 Claude Chappe^[2] (经© 1944 American Association for the Advancement of Science授权引用)

1.1.1 光纤通信的需求

19 世纪 30 年代，电报的出现使电代替了光，开始进入电通信时代^[3]。利用新的编码技术