

信息科学技术学术著作丛书

光信道编码

Djordjevic Ivan
William Ryan 著
Bane Vasic

白成林 冯 敏 罗清龙 译



科学出版社

信息科学技术学术著作丛书

光信道编码

Djordjevic Ivan

William Ryan 著

Bane Vasic

白成林 冯 敏 罗清龙 译



科学出版社

北 京

图字:01-2013-3265

内 容 简 介

本书系统地阐述了当前为光通信信道所用和正在研究使用的各种编码,主要包括线性分组码、循环码、turbo 码、LDPC 码、受限编码、级联码和乘积码等。在此基础上结合光通信的具体应用环境详细讲解了光信道编码在单模光纤、多模光纤、光纤网络及自由空间等具体信道的应用,给出了利用先进的编码调制技术、多载波技术、均衡技术实现大速率、长距离、高性能的光信号传输的实例。为下一代光通信系统的发展以及与其他通信系统的融合提供了很好的参考与借鉴。全书共 11 章,第 1~3 章主要介绍光通信系统的基本原理;第 4~11 章为光信道编码的具体应用。

本书可作为编码理论及光通信工程领域工作人员的参考读物,也可作为光通信相关专业高年级本科生和研究生的教材。

Translation from the English language edition;

Coding for Optical Channels by Ivan Djordjevic, William Ryan, and
Bane Vasic Copyright ©Springer Science+Business Media, LLC 2010

All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

光信道编码/(美)德约杰维奇(Djordjevic, I.)等著;白成林,冯敏,罗清龙译. —北京:科学出版社,2013

书名原名:Coding for Optical Channels

(信息科学技术学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-037476-9

I. 光… II. ①德… ②白… ③冯… ④罗… III. 光通道-信道编码
IV. TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 099717 号

责任编辑:魏英杰 杨向萍 王晓丽 / 责任校对:刘小梅

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 5 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 5 月第一次印刷 印张:24 1/4

字数:465 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

Djordjevic Ivan: 美国亚利桑那大学电气与计算机工程系助理教授, 指导该校光通信系统实验室(OCSL)的工作。他曾发表了 100 多篇期刊论文和 100 多篇会议论文。Djordjevic 博士和 William Shieh 博士同为爱思唯尔 2009 年出版的 *OFDM for Optical Communications* 一书的作者。他当前的研究方向包括光网络、差错控制编码、受限编码、编码调制、turbo 均衡、OFDM 应用和量子纠错。他同时还是 *Research Letters in Optics* 和 *International Journal of Optics* 的副主编。

William Ryan: 美国亚利桑那大学电气与计算机工程系教授。他在主要的期刊和学术会议上发表了大量通信理论和信道编码方面的论文。他和林舒撰写的研究生教材 *Channel Codes: Classical and Modern* 于 2009 年由剑桥大学出版社出版。他的研究领域是应用于数据存储和通信中的编码和信号处理。

Bane Vasic 博士: 在塞尔维亚尼什大学获得学士、硕士和博士学位, 目前是亚利桑那大学电气、计算机和数学领域的教授, 曾就职于贝尔实验室。他是 IEEE Transactions on Magnetics 编委, 曾为 IEEE CTW 2003 和 2007 DIMACS、Theoretical Advances in Information Recording 2004、Applications of Statistical Physics to Coding Theory 2004 LANL、Communication Theory Symposium within ICC 2006 等若干工作组和学术会议的主席或技术主席。他发表了大量的期刊、会议论文和出版物, 主编三本图书, 他的专利已被贝尔实验室的芯片采用。他的研究方向为编码理论、通信理论、受限系统和数字通信及记录。

《信息科学技术学术著作丛书》序

21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代,一场以网络科学、高性能计算和仿真、智能科学、计算思维为特征的信息科学革命正在兴起。信息科学技术正在逐步融入各个应用领域并与生物、纳米、认知等交织在一起,悄然改变着我们的生活方式。信息科学技术已经成为人类社会进步过程中发展最快、交叉渗透性最强、应用面最广的关键技术。

如何进一步推动我国信息科学技术的研究与发展;如何将信息技术发展的新理论、新方法与研究成果转化为社会发展的新动力;如何抓住信息技术深刻发展变革的机遇,提升我国自主创新和可持续发展的能力?这些问题的解答都离不开我国科技工作者和工程技术人员的求索和艰辛付出。为这些科技工作者和工程技术人员提供一个良好的出版环境和平台,将这些科技成就迅速转化为智力成果,将对我国信息科学技术的发展起到重要的推动作用。

《信息科学技术学术著作丛书》是科学出版社在广泛征求专家意见的基础上,经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播网络科学和未来网络技术,微电子、光电子和量子信息技术、超级计算机、软件和信息存储技术,数据知识化和基于知识处理的未来信息服务业,低成本信息化和用信息技术提升传统产业,智能与认知科学、生物信息学、社会信息学等前沿交叉科学,信息科学基础理论,信息安全等几个未来信息科学技术重点发展领域的优秀科研成果。丛书力争起点高、内容新、导向性强,具有一定的原创性;体现出科学出版社“高层次、高质量、高水平”的特色和“严肃、严密、严格”的优良作风。

希望这套丛书的出版,能为我国信息科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时,欢迎广大读者提出好的建议,以促进和完善丛书的出版工作。

中国工程院院士

原中国科学院计算技术研究所所长



译者序

近年来,因特网应用的不断增长和宽带接入网的迅速普及,极大地促进了密集波分复用(DWDM)网络由过去的每信道 10Gb/s 升级为频谱效率更高的每信道 40Gb/s 或 100Gb/s,甚至更高。但由于各种信道损耗,如信道内和信道间光纤的非线性、非线性相位噪声及偏振模色散(PMD)等因素的影响,在高速率情况下,光纤传输系统的性能明显下降,从而制约了光网络向更高的传输能力/速率、更长的传输距离、更灵活的波长转换及路由选择能力方面的发展。为了克服上述信道损耗带来的负面影响,人们需要在调制、检测、编码及信号处理方面研发更先进的技术,而本书则对当前这些领域的最新进展进行了讨论和总结。

本书作者 Djordjevic Ivan 博士、William Ryan 博士和 Bane Vasic 博士,在非线性和光纤通信系统领域论著颇丰。《光信道编码》是他们合作推出的一本系统介绍光信道调制、编码及信号处理的新作,其主要内容包括光通信的基本原理、各种信道损耗和噪声源、光信道中的编码及信号处理、适用于下一代高速光传输的各种类型的图形编码、自由空间光信道编码和光接入网络、光信道容量以及受限编码、编码调制和 turbo 均衡等研究热点问题。同时,作者还对相关技术的发展趋势以及应用前景做出了展望。纵观全书,其内容系统完整、理论体系严谨,但又深入浅出,是一本不可多得的好书。

本书由白成林负责翻译前言、第 1 章至第 3 章、第 7 章、第 8 章和第 10 章,罗清龙负责翻译第 4 章至第 6 章,冯敏负责翻译第 9 章和第 11 章,全书由白成林和罗清龙统稿。研究生房文敬、孙伟斌、张帅、贺菲菲协助完成了第 4 章、第 7 章、第 10 章和第 11 章部分章节的初译工作。在此特向他们致以深切的谢意。

感谢 Djordjevic Ivan 博士、William Ryan 博士和 Bane Vasic 博士对于本书的出版给予的合作,感谢上海交通大学的胡卫生教授的热情帮助,感谢科学出版社对翻译工作的大力支持。本书的出版得到了“区域光纤通信网与新型光通信系统”国家重点实验室开放课题的资助。由于本书内容涉及多学科专业知识,译著者水平有限,不妥之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

前 言

近年来人们对光通信领域信道编码表现出异乎寻常的兴趣,这一点可以从不断增长的出版物数量和许多重要学术会议发布的引人注目的验证实验报道中得到证明。光通信中信道编码发展的主要推动力是:①近年来迅速增长的因特网应用,如 IPTV、VoIP 和 YouTube 等对网络带宽提出了更高要求;②基于硅的信号处理能力的迅速提高。目前,局域网和广域网中的 100Gb/s 以太网(100GbE)已经实现了标准化,而 400Gb/s 和 1Tb/s 则被看做 100Gb/s 之后下一步努力的方向,并引起了广大研究者的浓厚兴趣。不过与高速传输相伴随的是更多的挑战,如由不同线性和非线性信道损耗引起的信号质量降低、不断增加的安装费用等。为了应对信道损耗,人们在调制、检测、编码和信号处理等方面研发了多种新技术。本书将对这些新技术进行详细介绍。

复杂的电子数字信号处理(DSP)、相干检测和编码技术的使用从根本上改变了光网络的现状。DSP 对无线通信是至关重要的,它的存在使得软件无线电(SDR)成为可能。在光通信中,由于最近相干检测技术的复活和传输速率超过 100Gb/s 的动态重构光网络的驱动,DSP 和前向纠错(FEC)正在变得越来越重要。不管数据的目的地怎样,一个光传输系统(OTS)必须提供预定义的 BER 性能。而且为了实现目标 BER,未来的 OTS 还应能够根据光信道情况动态地调整 FEC 强度。这样一种技术将会实现软件光传输(SDOT),从而使得发射机和接收机能够自适应于或重构于多个标准、多种调制格式或多种码率,其概念与 SDR 类似。

信道编码对光信道意义重大,并已成为超高速光传输的引领技术,但是对于很多光学工程师来说,FEC 十分陌生。光学工程师虽然意识到 FEC 在解决光网络所面临的众多问题中的重要性,但却苦于编码技术的复杂。本书试图对信道编码的基本原理和光通信的 DSP 技术进行全面而又清晰的阐述,其目的是使该书适用于三类研究人员:①对光学理论十分熟悉,且对应用编码理论和 DSP 感兴趣,但又对基本的编码概念不熟悉的光通信工程师;②能够熟练地使用 DSP 和编码技术,但又无法将光通信和射频(RF)通信紧密联系起来的无线通信工程师;③对光通信感兴趣的编码专家。本书每一章尽量保持相对独立性,同时又保持了章与章之间的联系和流畅。

全书共 11 章,涉及光信道的调制、DSP 和编码,既包括了光通信的基本原理、主要的信道损耗、噪声源,又包括了 DSP、编码及各种各样的具体应用,如单模光纤传输、多模光纤传输、自由空间光系统和光接入网络等。本书讨论了信道编码、

受限编码、编码调制和 turbo 均衡等新兴领域的研究热点,并初步探讨了未来人们对光信道编码感兴趣的问题。本书的主要目的是:①对目前光通信中使用的 FEC 方案进行介绍;②对下一代高速光传输中引人关注的各类图形编码进行研究;③讨论如何将多级调制和信道编码有机地结合在一起;④如何在 turbo 均衡中实现均衡和软译码的协调工作。

著者对其同事和学生表示衷心的感谢,特别是在光信道编码课题中共同合作的 H. G. Batshon、L. L. Minkov、M. Arabaci、A. R. Krishnan、S. K. Planjery、L. Xu、T. Wang、M. Cvijetic、F. Kueppers、S. Denic、M. Ivkovic、M. A. Neifeld、J. Anguita、T. Mizuochi、X. Liu、I. Gabitov、N. Alic、G. T. Djordjevic 和 S. K. Turitsyn,他们对本书的完成直接或间接地作出了贡献。同时还要感谢国家自然科学基金(NSF)、美国 NEC 实验室以及 Opnext 对有关编码理论和光信道编码研究活动的支持。

最后,特别感谢 Springer 出版社的 Charles Glaser 和 Amanda Davis,正是由于他们的辛勤努力才使本书得以顺利出版。

目 录

《信息科学技术学术著作丛书》序

译者序

前言

第 1 章 导论	1
1.1 光通信的发展历史	1
1.2 光传输和光网络	3
1.3 光通信的发展趋势	8
1.3.1 向 100Gb/s 以太网演进	8
1.3.2 动态重构网络的出现	8
1.3.3 软件光传输	10
1.3.4 数字信号处理和相干检测	11
1.3.5 光通信中的 OFDM	12
1.4 光通信和网络中的前向纠错	14
1.5 本书的篇章结构	17
参考文献	19
第 2 章 光通信基础	23
2.1 引言	23
2.2 主要的光学器件	24
2.2.1 光发射机	27
2.2.2 光接收机	31
2.2.3 光纤	33
2.2.4 光放大器	35
2.2.5 其他光器件	39
2.3 直接检测调制方案	42
2.3.1 非归零码	43
2.3.2 归零码	43
2.3.3 信号交替反转码	44
2.3.4 双二进制调制格式	44
2.3.5 载波抑制归零码	45
2.3.6 NRZ-DPSK 信号	46

2.3.7 RZ-DPSK 信号	47
2.4 相干检测调制系统	48
2.4.1 光混合器和平衡接收机	53
2.4.2 主要相干检测噪声源	55
2.4.3 零差相干检测	58
2.4.4 相位分集接收机	59
2.4.5 偏振控制和偏振分集	60
2.4.6 偏振复用和编码调制	61
2.5 总结	62
参考文献	62
第3章 信道损伤和光通信系统设计	65
3.1 噪声源	65
3.1.1 模态分配噪声	65
3.1.2 反射噪声	66
3.1.3 相对强度噪声和激光相位噪声	66
3.1.4 模式噪声	68
3.1.5 量子散粒噪声	68
3.1.6 暗电流噪声	69
3.1.7 热噪声	69
3.1.8 自发辐射噪声	69
3.1.9 噪声差拍分量	70
3.1.10 串扰分量	71
3.2 信道损伤	72
3.2.1 光纤衰减	72
3.2.2 插入损耗	72
3.2.3 色度色散和单模光纤	73
3.2.4 多模色散和多模光纤	80
3.2.5 偏振模色散	83
3.2.6 光纤的非线性	85
3.3 传输系统性能估计与系统设计	92
3.3.1 光电探测的量子限	94
3.3.2 散粒噪声和热噪声限	95
3.3.3 带有光前置放大器的接收机的接收灵敏度	96
3.3.4 光 SNR	96
3.3.5 消光比带来的功率代价	96

3.3.6 强度噪声带来的功率代价	97
3.3.7 定时抖动造成的功率代价	97
3.3.8 GVD 引起的功率代价	98
3.3.9 信号串扰带来的功率代价	98
3.3.10 累积效应	98
3.3.11 系统设计	99
3.3.12 光性能监测	101
3.4 总结	101
参考文献	102
第 4 章 光通信中的信道编码	104
4.1 信道编码的预备知识	104
4.2 线性分组码	109
4.2.1 线性分组码的生成矩阵	110
4.2.2 线性分组码的校验矩阵	111
4.2.3 线性分组码的距离特性	112
4.2.4 编码增益	113
4.2.5 伴随式译码和标准阵	115
4.2.6 重要的编码限	118
4.3 循环码	119
4.4 BCH 码	124
4.4.1 Galois 域	125
4.4.2 BCH 码的结构及译码	126
4.5 里德-所罗门码、级联码和乘积码	132
4.6 线性分组码的网格图表示和维特比算法	135
4.7 卷积码	139
4.7.1 卷积码的距离特性	144
4.7.2 卷积码 BER 界	146
4.8 总结	147
参考文献	148
第 5 章 基于图形的编码	151
5.1 基于图形的编码概述	151
5.2 卷积 turbo 码	152
5.2.1 并行和串行 turbo 码的性能特点	153
5.2.2 PCCC 迭代译码器	155
5.2.3 SCCC 迭代译码器	160

5.3 分组 turbo 码	162
5.4 LDPC 编码	164
5.4.1 矩阵表示	165
5.4.2 图形表示	165
5.4.3 LDPC 码的构造方法	166
5.4.4 LDPC 译码算法	167
5.4.5 降低复杂度的译码器	170
5.5 总结	172
参考文献	172
第 6 章 编码调制	174
6.1 多级调制系统	174
6.2 单载波编码调制系统	177
6.3 多维编码调制方案	183
6.4 光纤通信系统编码正交频分复用	188
6.4.1 直接检测光纤通信系统中的编码 OFDM	188
6.4.2 相干检测光纤通信系统中的编码 OFDM	195
6.5 总结	206
参考文献	206
第 7 章 光纤通信系统中的 turbo 均衡	210
7.1 信道均衡预备知识	210
7.2 直接检测光纤通信系统中的 turbo 均衡	216
7.2.1 LDPC 编码的 turbo 均衡器	217
7.2.2 大周长 LDPC 码	220
7.2.3 利用 LDPC 编码的 turbo 均衡抑制信道内非线性效应	223
7.2.4 色度色散补偿	225
7.2.5 PMD 补偿	226
7.3 相干检测光纤通信系统中的多级 turbo 均衡	229
7.3.1 多级 turbo 均衡器简介	229
7.3.2 利用基于多级 BCJR 算法的 LDPC 编码的 turbo 均衡缓解信道内非线性	233
7.3.3 偏振复用多级调制中基于 turbo 均衡的 PMD 补偿	234
7.4 总结	237
参考文献	237
第 8 章 光通信中的受限编码	241
8.1 引言	241
8.2 受限系统的基本原理	242

8.3 有限态编码器的结构	245
8.4 受限编码的译码器	249
8.5 在光通信中的应用	253
8.5.1 受限编码的使用	253
8.5.2 受限和差错控制混合编码	258
8.5.3 故意错误插入	259
8.6 总结	260
参考文献	261
第9章 自由空间光信道编码	263
9.1 大气湍流信道建模	263
9.1.1 零内尺度	264
9.1.2 非零内尺度	264
9.1.3 时间相关 FSO 信道模型	266
9.2 编码 MIMO FSO 通信	267
9.2.1 LDPC 编码 MIMO 的概念和空时编码	267
9.2.2 比特交织 LDPC 编码的脉冲幅度调制	271
9.2.3 比特交织 LDPC 编码的脉冲位置调制	276
9.3 FSO-OFDM 传输系统	277
9.4 混合光网络中的 OFDM	285
9.4.1 混合光网络	285
9.4.2 接收机和传送分集方法的介绍	288
9.4.3 混合光网络的性能评价	290
9.5 时间相关 FSO 信道的 Raptor 编码	292
9.6 总结	295
参考文献	296
第10章 光信道容量	299
10.1 信道容量初步	299
10.2 通过 BCJR 算法前向递归计算信息容量	305
10.3 直接检测光纤通信系统的信息容量	308
10.4 相干检测多级光纤通信系统的信息容量	312
10.5 ASE 噪声占主导情况下光 OFDM 系统的信道容量	314
10.5.1 功率可变自适应码率的偏振复用相干编码 OFDM	314
10.5.2 基于 GI-POF 链路的自适应编码 OFDM 通信	317
10.5.3 RoF 技术的自适应编码 OFDM	319
10.6 混合自由空间光无线信道的信道容量	321

10.6.1 混合的 FSO 无线系统	322
10.6.2 自适应调制与编码	324
10.7 光 MIMO 多模光纤系统的信道容量	330
参考文献	334
第 11 章 光信道编码的未来研究方向	339
11.1 大周长的二进制 QC-LDPC 码	340
11.1.1 大周长 LDPC 码的构造	340
11.1.2 大周长 LDPC 码的 FPGA 实现	342
11.2 非二进制 QC-LDPC 码	344
11.3 高于 100Gb/s 传输的非二进制 LDPC 编码调制	347
11.4 自适应非二进制 LDPC 编码调制	351
11.5 自适应 LDPC 编码 OFDM	355
11.6 广义 LDPC 编码	358
11.7 LDPC 编码混合频率/幅度/相位/偏振调制	361
11.8 结束语	365
参考文献	366

第 1 章 导 论

人们生活在一个被称为信息时代的社会中,它与互联网技术息息相关,并呈现出对较高信息容量永不满足的特点^[1]。光传输链路已在全球范围内建立起来,并从全球骨干网向接入网扩展,进而延伸到路边、建筑物、家庭甚至桌面^[1-9]。尽管在 2000 年初出现了互联网泡沫,但是互联网业务仍以每年 75%~125% 的惊人速度增长^[6]。随着最近互联网业务、IPTV 和 VoIP 的增长,很显然当前 10Gb/s 的以太网已经不能满足未来对带宽的需求。例如,两年前 Internet2 组织已经宣布要将它的下一代 IP 网络的传输能力从 10Gb/s 提高到 100Gb/s^[7]。根据一些业内专家的观点,到 2009 年底需要 100Gb/s 的传输能力,而到 2012~2013 年则需要将 1Tb/s 纳入传输的标准^[7]。

由于各种信道损耗,如信道内和信道间光纤的非线性、非线性相位噪声及偏振模色散(PMD)等的影响,使得在高速率的情况下,光纤传输系统的性能明显下降。这些因素构成了在光网络中,为了实现更高的传输能力/速率、更长的传输距离、更灵活的波长转换及路由选择能力的限制因素。为了解决上述信道损耗,在调制、检测、编码及信号处理方面,需要研发更先进的技术,而本书会对某些重要方法进行描述。另外,本书还将详细而深入地介绍光通信的基本原理、数字信号处理及光信道编码。

在本章中,首先对光通信的历史进行回顾(1.1 节),然后介绍光通信及网络的基础知识(1.2 节)及目前光通信的发展趋势(1.3 节),同时解释了光信道编码为什么如此重要的原因(1.4 节)。在 1.5 节中,给出了本书的组织结构。

1.1 光通信的发展历史

最早的光通信系统是用火、烟、信号灯及信号旗传输信息的^[3]。例如,沿着长城的无数烽火台构成了相对复杂的古代通信系统,在这种古老的通信系统中,用烽火的数目或烟雾的颜色表示入侵敌人的规模,这是一种表示“多级”信号的粗略形式。沿着长城,烽火台有规律地间隔分布,每一个烽火台上的士兵看到前一个烽火台的信号,再用同样的模式将信号传送给下一个烽火台,在一个多小时的时间内,信息可以从长城的一端转发到另一端,传输距离超过 7300km^[9]。因此,这种古老的通信系统与今天的中继或再生系统很类似,烽火台就像中继站。在 1792 年, Claude Chappe 对中继或再生系统进行了深入研究,可使其传输编码消息超

过 100km^[3]。

在 20 世纪前半叶,电报、电话和无线通信得到了长足的发展,而光通信系统则鲜有人问津。但是到了 20 世纪末,不同的传输系统在容量和传输距离方面都趋于饱和。例如,一个速率为 155Mb/s 的典型的同轴电缆传输系统,每传输 1km 都需要进行信号再生,其运行和维护的费用都很高,因此研究能够显著提高传输容量的光通信系统成为很自然的选择。而能为发射机提供相干光源的激光器发明和实现之后,光通信得到了突飞猛进的发展^[10],剩下的唯一任务就是找到一种适合于光波传输的介质。1966 年,高锟和霍克曼^[11]提出利用光纤作为光波传输媒介的想法。尽管在当时光纤引起的损耗还是不可接受的,但是他们认为,当时光纤存在的衰减是由光纤中可去除的杂质引起的,而不是由诸如瑞利散射等一些基本的物理效应引起的。他们预言的 20dB/km 损耗的电信级光纤,在 5 年后由美国康宁公司的技术人员研制成功,这个发明为光纤通信系统的发展创造了机遇。

第一代光通信系统出现在 20 世纪 80 年代,其工作波长为 0.8 μm ,支持的速率为 45Mb/s。与同轴电缆系统相比,性能得到很大改善,中继距离可达 10km。由于使用了较少的中继器,其安装和维护的成本降低了很多。

第二代光通信系统在 20 世纪 80 年代早期得到迅速发展,其工作波长在 1.3 μm 附近,在这个波段光纤具有低损耗($<1\text{dB/km}$)和低色散的优点。通过使用 InGaAsP 半导体材料,光源和检测器得到了发展。在多模光纤(MMF)中,由于色散的影响,系统的速率被限制在 100Mb/s 以下,所以又引入了单模光纤(SMF)。到了 1987 年,工作波长为 1.3 μm ,中继距离为 50km 的第二代光通信系统的传输速率已达 1.7Gb/s。

第三代光通信系统使用波长为 1.55 μm 的光源和检测器。在此波段熔凝石英光纤的衰减最小,但色散却比较大,从而滞缓了光通信系统的发展。为了解决色散问题,提出了两种方法,第一种方法是发展单模光纤激光器,第二种方法是在 1.55 μm 波段研发色散补偿光纤(DSF)。1990 年,支持 2.5Gb/s 速率的 1.55 μm 光通信系统已经得到商用,并且在 10Gb/s 的速率下能传输 100km^[1-3]。DSF 与单模激光器相结合可使系统达到最好性能。不过这类系统的缺点是每隔 60~70km 就需要一个电中继器。为了提高接收端的灵敏度,在 20 世纪 80 年代末 90 年代初提出了相干检测的方法,然而随着光放大器的发展,这种方法一直没有得到充分的发展。

第四代光通信系统使用光放大器增加中继距离,同时利用波分复用技术(WDM)增加总的比特率。20 世纪 80 年代不需要电再生器^[1-3],而能够直接放大光信号的掺铒光纤放大器(EDFA)得到迅速发展。1991 年在没有电再生器的情况下,信号能以 5Gb/s 的速率传输 14 300km。第一个投入营运的跨越太平洋商业化系统,能以 5Gb/s 的速率将信号传输 11 300km,而其他系统也陆续进行部署^[1-3]。

利用 WDM 技术可以增加系统的容量,并可实现一个光放大器同时放大多个波长。1996 年,20 路信号能以 5Gb/s 的速率同时传输 9100km,从而提供了 100Gb/s 的总比特率和 910(Tb/s)km 的带宽距离(B-L)乘积^[1-3]。在这些宽带系统中,色散逐渐成为一个需要重点考虑的问题。

第五代光通信系统主要致力于光纤色散问题。光放大器虽然解决了光纤的损耗问题,但却因为多级放大器形成了色散的累积效应,而最终的解决方法则是利用光孤子。光孤子能在无损耗的光纤中利用光纤的非线性来抵消光纤的色散作用,从而保证在传输过程中,脉冲的形状保持不变。通过利用受激拉曼散射(SRS)实现非线性对损耗和色散的补偿,从而能使信号无中继传输 4000km^[1-3]。1989 年,EDFA 第一次被用来放大光孤子^[1-3]。到了 1994 年,通过复用 7 路 10Gb/s 信道,在总比特率为 70Gb/s 的情况下成功实现光孤子传输 9400km^[1-3]。与此同时,人们发明了用色散补偿光纤(DCF)对付色度色散的方法,并提出了各种各样的色散图^[1-3](更多细节见 1.3.4 节)。

第六代光通信系统致力于通过使用大量的波长来实现光纤系统更大的容量。这类系统被称为密集波分复用系统(DWDM)。目前波长间距为 0.8nm 的系统已经投入使用,研究者正致力于将这个间距小于 0.5nm,而保证波长的稳定性以及提高波长解复用器的性能对此项工作至关重要。目前,系统一般工作在 10Gb/s 和 40Gb/s。

目前研究的热点在于如何通过使用各种多级调制技术、不同的编码方案、偏振复用、DSP 及相干检测从而使光单波长传输速率达到 100Gb/s 或更高。对于处理色度色散和 PMD,正交频分复用技术(OFDM)是一项很好的候选技术,但是由于光纤的非线性,子载波之间对 4 波混频非常敏感。

1.2 光传输和光网络

图 1.1 给出了一个典型的 WDM 光网络及其相关的基本光学器件、概念和系统参数。在端到端的光纤传输系统中既有光信号也有电信号。光发射机负责将电信号转变为光信号,而光接收机则用来实现光信号到电信号的转变。光纤之所以被称为光纤传输系统的基础,是因为它作为一种媒介能使信号从源端传输到目的端。由于信号在光纤中传输时会被衰减,所以需要利用光放大器,如掺铒光纤放大器、拉曼放大器和参数放大器,来恢复信号的质量。不过,放大的同时也引入了加性噪声。为了更好地利用 SMF 中丰富的带宽资源,引入了 WDM 的概念,其相应的系统结构如图 1.1 所示。WDM 技术就是用相互独立的电比特流去调制不同波长的光载波,并通过同一根光纤进行传播的技术。在传输 WDM 信号时,还可以利用光分插复用器(OADM)随时增加或减少若干个波长以实现灵活通信,而光网