

光纤通信系统

L·G·卡佐夫斯基 S·贝勒迪多 A·威尔勒 著

张肇仪 张梓华 徐安士 等译 吴德明 校



人民邮电出版社

光纤通信系统

L.G.卡佐夫斯基

S.贝勒迪多

著

A.威尔勒

张肇仪 张梓华 徐安士 等译

吴德明

校



965985

人民邮电出版社

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信系统/(L.G.卡佐夫斯基著;张肇仪等译.北京:人民邮电出版社,1999.10
ISBN 7-115-07940-4

I.光… II.①卡…②张… III.光导纤维通信系统 IV.TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 45786 号

内 容 提 要

本书是光纤通信领域的一本重要译著,内容包括基本光纤通信部件、基本强度调制/直接检波系统、相干检测、光放大器、光孤子、多信道系统等。本书既讲清了光纤通信的基本原理,又介绍了光通信领域的最新进展。

本书内容丰富,图文并茂,适合于大学通信专业师生和通信工程师阅读。

光纤通信系统

-
- ◆ 著 L·G·卡佐夫斯基 S·贝勒迪多 A·威尔勒
译 张肇仪 张梓华 徐安士 等
校 吴德明
责任编辑 陈万寿
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
北京鸿佳印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销
- ◆ 开本:787×1092 1/16
印张:30.75
字数:758 千字 1999 年 10 月第 1 版
印数:1-5 000 册 1999 年 10 月北京第 1 次印刷
著作权合同登记 图字:01-98-2542 号
ISBN 7-115-07940-4/TN·1513
-

定价:48.00 元

版权声明

本书为阿尔泰克出版社(美)独家授权的中文译本。本书的专有出版权属人民邮电出版社。未经原版出版者和本书出版者的书面许可,任何单位和个人不得复印、复制、摘录或以其他任何形式使用本书的部分或全部内容。

©1996

本书原版版权属阿尔泰克出版社(Artech House)

版权所有,侵权必究

本书原版书名 Optical Fiber Communication Systems

作者 Leonid Kazovsky, Sergio Benedetto, Alan Willner

译者序言

自 1970 年光纤的损耗性能和半导体激光器性能取得重大突破之后,光纤通信进入实用化时代。从 1974 年到现在短短 20 多年中主要是随着光纤制造技术、半导体激光器制造技术的发展,光纤通信系统的发展已经经历几个时代,速率从 1976 年的 44 Mbit/s,传输距离约 10km 发展到目前的数十至数百 Gbit/s,传输距离达数千 km。光纤传输业已成为当前通信,特别是干线通信的主要手段。光纤通信也已成为大学通信专业的一门重要课程。为满足需要,国内已经出版了许多有关光纤通信的书籍和教材,由于光纤通信涉及多个学科,各书难以在各个方面都作详尽论述。我们读过 L.G.卡佐夫斯基等人合著《光纤通信系统》一书后,感到该书别具特色,它特别着重进述光纤通信系统的问题,对光纤通信中的其他问题也均有介绍,特别是给以较严格的数学描述,同时也包含光通信系统方面许多新的进展,如波分复用、相干光通信、光纤放大器和孤子通信,每章结尾都附有习题,可供利用。它确实是光纤通信方面的一本好教科书,同时亦可供光纤通信系统科技工作者参考。

我们特此将它翻译出来介绍给国内读者。翻译工作是由北京大学“光纤区域网及新型光通信系统”国家实验室组织、北京邮电大学光通信中心的同仁参与进行的。具体分工如下:徐安士译第一章;吴德明译前言和第二章;张肇仪译第三章;宋航、张梓华译第四章;张梓华译第五、六章和索引;陈章渊、熊桂生译第七章和附录。由吴德明进行总校对。由于全文系多人译出,虽经校对仍难免在名词和语气上有不统一之处,正像原书那样由于书中相应章节出自不同的作者,不同章节各具风格,希望不要给读者造成困难。

由于译者水平所限,译文可能有不周之处,欢迎广大读者批评指正。最后译者感谢人民邮电出版社对本书翻译工作的大力支持。

译者
1999 年 3 月
于北京

引 言

20 世纪 60 年代,在美国和其它发达国家中,电话网络工程师遇到了要求增加中心局之间通信容量的问题。在那时,局间或干线业务常使用 1962 年推出的所谓 T-载波方法传输^[1]。T-载波方法应用数字化声频信道,每一声频信道具有 64kbit/s 比特率。24 个数字化声频信道时分复用成一个复合的 1.544Mbit/s 数字流,即 DS-1。DS-1 信号用安装在街道下面的管道中的双绞线传输;为了抑制干扰和整形,这些信号必须每 2km 中继一次。

声频业务的增加用尽了双绞线的容量;许多情况下管道中也没有空间来增加线路。因此,需要一种新的更大容量的传输介质。为获得这种介质,人们考虑和研究过许多方案,有几种已得到几乎完善的发展。由于玻璃光纤对于光信号传输有很低的衰减和色散,这些优越性能使纤维光学这一技术在诸方案中占主导地位。其它一些,如同轴电缆和微波技术今天还在应用,大多数候选方案已被放弃。

因此,早期发展的光纤通信技术主要解决在 2km 的短距离上 1.5Mbit/s 比特率运行时干线流量拥挤的问题。从这个具体问题开始,强有力的光纤通信新技术已经发展起来,性能已经远远超过初始应用的水平。当前,在跨太平洋和跨大西洋光纤通信系统中,已经在数千公里的距离上传输数 Gbit/s 的流量。这些系统中用光纤放大器代替电中继器。光纤系统还应用于传送电视节目、计算机互连以及许多其它方面。

光纤通信技术的巨大发展是举世无双的,只有计算机这个领域可与其匹敌。这一成功的基础归因于玻璃极低的固有衰减(小于 0.2dB/km)等基本物理学因素和发展这一技术的杰出人才、杰出的物理学家和通信工程师群体。

一旦光纤通信成为广泛应用的重要技术(事实上,在许多应用中已选择了这一技术),就需要在大学中开设这一领域的课程。许多好书可以用作该课程的教材^[1-7]。大多数现有教材沿着至今惯用的思路,基本上重复着光纤通信领域技术发展的历史。过去,一本典型的教材可能用 4 章深入地讲述光纤,用 3~5 章讲述激光器和 LED、用 4 章讲述光检测器和接收机,仅用 1~2 章讲述系统。新近出版的一些教材(包括老教材的新版本)增加了近年来发展的新技术的内容,如光放大、相干检测和孤子传输。这样内容的安排使得教材更适合于器件和物理学方向的学生使用。然而,社会又迫切要求培养更多的通信系统方向的学生,他们应具有光纤通信方面的知识,并掌握先进的技术,而不是将他们转变为器件科学家。

考虑到当前更倾向于系统方面的研究和发展,上述需要促使我们写这本教材。这一教材主要适合电气工程方面的学生使用,因而相对以前的教材有关器件方面的内容有所压缩,以便使用更多的篇幅讲述系统方面的内容,特别是相干检测、光放大器、光孤子和多信道系统与网络等更新的内容。本书的初稿写于 1990 年,那时 L.G. 卡佐夫斯基(Leonid G. Kazovsky)离开 Bell-core 进入斯坦福大学成为电气工程教授。他在斯坦福大学开设了“光纤通信导论”和“现代光纤通信”两门新的课程。前者是一门跨本科生和研究生的课程,每年大约有 50 名高年级本科

生和研究生听课。后者是研究生的高级课程,每年大约有 15 名学生听课。L.G. 卡佐夫斯基为这两门课程编写的讲稿成为本教材的基础。

本书由三位作者共同编写,所用材料来源于每一位作者在他们各自的学校中讲授光纤通信课程时编写的讲稿。最后完成的教材是为专攻通信系统工程方向的电气工程专业的学生使用的。本教材可以用于一学期、两学期或连续两季的光纤通信课程。

导论性课程可以覆盖第一章(基本光纤通信部件)和第三章(基本强度调制/直接检波系统)的全部以及第四章(相干检测)、第五章(光放大器)、第六章(光孤子)和第七章(多信道系统)的几节。我们建议对于导论性课程可以用第四至七章的下述部分:第四章的前 6 节以及 5.1、5.2、5.4、6.1、6.2、7.1 和 7.2 各节。如果学生具有随机变量和随机过程的基本知识,课程中就不必包括第二章。如果没有这方面的知识,则在开始第三章前,导论性课程应包括 2.1、2.2、2.3、2.4 和 2.8 各节。

导论性课程是高级课程的先行课。高级课程可以集中讲授相干系统、光放大器、光孤子和多信道系统。我们建议高级课程可以讲授第四至七章的下述各节:4.7~4.13、5.2、5.3、5.5、5.6、6.3~6.16 和 7.2~7.8。如果学生具有随机变量和随机过程的基本知识,课程中就不必包括第二章。如果没有这方面的知识,则高级课程应包括 2.5、2.6 和 2.7 各节。

在采用季节制(而不是学期制)的学校中,上述建议必须改变以便建立一些较短的课程。根据讲课教师的兴趣也可以删除一、两个高级章节(第四至七章)。

每一章都列出许多习题,它们可用作家庭作业和考试题。现在还没有给出习题解答。

本书第一版无疑会有一些缺点,作者将非常感谢读者指正,有何评论请寄给出版者。

因为这是一本教材,而不是一本专著,书中绝大多数结果、图和其它材料已首次发表在各种文章、会议发言和其它书籍中。我们将对它们的作者表示感谢。有些情况下,材料是“经典”的,即很难归因于任何单一的来源。在这一情况下,我们试图在书中指出哪些教材包含类似的讨论和图表。任何可能的遗漏都不是有意的,如果被发现,将在今后的版本中修正。

没有许多天才的科学家和工程师的工作(很遗憾,由于太多,不可能在这儿一一列出)和很多的朋友、同事和研究生的交流与帮助,这本书是不可能问世的。

L.G. 卡佐夫斯基(Leonid G. Kazovsky)特别要感谢在 Bellcore 和斯坦福大学的朋友们和同事,特别是 BellCore 的 P. 凯泽, N. 程, T.P. 李和 J. 杰姆莱特,斯坦福大学的 J. 古德曼和 B. 巴耶。没有空军(Air Force)、ONR、远景研究规划局(ARPA)、国家科学基金(NSF)、弹道导弹防御办公室(BMDO)和系统开发部门(SDC)等美国政府机构的朋友们的大力帮助,本著作也不可能问世。其中特别重要的是 B. 汉德里克逊(Air Force 和 ARPA)、B. 惠和 B. 莱尼(ARPA)、L. 劳姆(BMDO)、M. 麦库赖和 K. 帕萨克(SDC)以及 K. 戴维斯和 R. 玛登(ONR)的帮助和合作。AT&T Bell 实验室的 L. 莫兰诺尔(Linn Mollenauer)曾审阅了本书第六章的初稿,提出了有价值的建议,并提供了他的几篇文章的重印本或预印本。和斯坦福大学的研究生的交流以及他们的帮助也是很重要的,特别应提到 T. 冯、M. 哈凯、R. 卡尔曼、P. 普杰奥里尼、F. 杨、A. 卢、T. 霍夫麦斯特、D. 梅维斯特、S. 阿格拉沃、S. 萨文和 S. 杰梅洛斯。M. 威廉斯, J. 贝尔特若和 L. 亨德斯曼,他们为准备出版稿做了很多工作。最后但并非最少, L.G. 卡佐夫斯基要感谢他的妻子艾拉娜和他的女儿盖莉特,他们的爱和支持使得他能够在百忙中完成这本书。作为斯坦福大学的教授,他要负责很多别的工作:许多研究计划的主要研究人、教师、顾问、几个杂志的副主编,作者和户主。

S. 贝勒迪多(Sergio Benedetto)由衷地表示对 P. 珀季奥里尼(Pierluigi Poggiolini)的感谢,他

是都灵技术学院的研究人员,他在 1989 年发表的论文是在电子学系建立一个新的光通信组的起点。与研究生的有成效的交流在本书的写作过程中是重要的,其中特别要提到与 A. 卡瑞那、V. 库芮和 R. 高迭诺的讨论,他们也提供了某些数值例子并画出了相关的图。E. 卡沙西亚仔细阅读了某些章的初稿,并提出了有用的改进意见。他也帮助绘制了第二和第四章中大部分图。L. 布瑞诺绘画了其余的图。S. 贝勒迪多深深地感激他的妻子芙南达、他的女儿玛瑞亚奇亚娜和塞斯里亚和他的儿子季奥瓦尼,他们的支持、爱和理解大大帮助了这一计划的实现。

正如《我们父亲的伦理学》一书所述,“谁是一个智慧的人?他就是向每个人学习的人”。正是在这样的思想指导下,阿兰·E. 威尔勒(Alan E. willner)非常感谢许多帮助和鼓励本书写作的人。几位博士生和一位博士后曾给予许多关于光通信的见解并帮助完成书稿,他们是:I. 海依、Dr. S-M. 黄、Dr. J. 莱特、Dr. D. 诺特、Dr. E. 帕克、Dr. W. 希尔和 Dr. X. 周。此外,听过他的课的许多研究生也帮助完善讲述这门课的方法。对本书给予关键性鼓励的人当然是阿兰的良师益友:Prof. 奥斯古德、Dr. I 卡米诺和 Dr. T. 厉。如果没有慷慨的经费支持,在写作本书的同时仍能开展有力的研究工作是不可能的,这些支持来自于 NSF(国家科学基金)资助的总统的教学人员奖和青年研究者奖(克劳福德、哈维和奥太加等博士),D.&L. 帕卡德科学与工程基金奖,ARPA(惠、利海尼和扬等博士)和 BMDO&AFOSR(克莱和劳姆博士)。南加州大学的环境是非常有帮助的。阿兰要感谢他的同事们和南加州大学的成员,特别是 M. 蒙特莱格罗。他还要特别感谢 J. 戴维斯,他对这一手稿的完成给予了不懈的帮助。阿兰希望这本书带给他的双亲,G. 和 S. 维尔勒,快乐和骄傲,祝他们长寿(例如,120 岁)和幸福。最后并且是最重要的,阿兰对他的妻子 Dr. M. F. G. 威尔勒在准备本书期间所给予的支持、爱、力量、见识和惊人的理解表示深深的谢意。

L. G. 卡佐夫斯基,美国斯坦福大学
S. 贝勒迪多,意大利都灵技术学院
A. E. 威尔勒,美国南加州大学(洛杉矶)
1996 年 10 月

参 考 文 献

- [1] Personick, S. D., Optical Transmission Systems, New York: Plenum Press, 1981.
- [2] Jones, W. B., Introduction to Optical Fiber Communication Systems, New York: Holt, Rinehart & Winston, 1988.
- [3] Keiser, C., Optical Fiber Communications, 2d Ed., New York: McGraw-Hill, 1991.
- [4] Palais, J. C., Fiber Optic Communications, 2d Ed., Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1992.
- [5] Gower, J., Optical Communication Systems, 2d Ed., London: Prentice-Hall International, 1991.
- [6] Senior, J., Optical Fiber Communications: Principles and Practice, 2d Ed., London: Prentice-Hall International, 1992.
- [7] Agrawal, G. P., Fiber-Optic Communications Systems, New York: John Wiley & Sons, 1992.

作者简介

L.G. 卡佐夫斯基(Leonid G. Kazovsky)博士是斯坦福大学电气工程学教授,1947年出生于前苏联列宁格勒。他分别于1969和1972年在列宁格勒通信电气技术研究所以最优异的学业成绩获电气工程学硕士和博士学位。

1973年他移居以色列(Israel),1974~1984年(其间服兵役1年)在以色列和美国的大学任教和做研究工作。1984~1990年在新泽西州红岸城 Bellcore 从事相干和高速波分复用(WDM)光纤通信系统的研究。1990年他成为斯坦福大学的电气工程学教授。

L.G. 卡佐夫斯基博士已经在光通信、高速网、应用光学和信号处理等方面发表著作。目前他的研究兴趣是在波分复用网、光纤非线性和模拟光学系统等领域。卡佐夫斯基教授在杂志上已单独或合作发表120多篇文章和为数众多的会议文章,所写的两本书已由Wiley出版社出版。卡佐夫斯基博士已是多种IEEE和IEE学报、论文集、杂志以及基金机构(例如国家科学基金和能源研究理事会)和出版社(例如John Wiley & Sons, Macmillan)的评审员。他是,或曾经是光纤通信会议(OFC)、激光与电光会议(CLEO)、国际光电协会会议(SPIE)、全球通信会议(GLOBECOM)的技术程序委员会成员,也是《IEEE通信学报》(IEEE Transaction on Communications)、《光子技术通信》(Photonics Technology Letters)、《无线网络》等杂志的副编辑。他是IEEE和美国光学学会(OSA)的高级会员。

S. 贝勒迪多(Sergio Benedetto)1969年在意大利都灵(Torino)综合技术学院,以最优异的学业成绩获得集成电子学方面的荣誉称号。1970~1979年,在电子学与电信研究所工作,先是研究工程师而后成为副教授。1980年在巴雷(Bari)大学晋升为无线电通信教授。1981年他再次到都灵综合技术学院工作,成为电子学系数据传输理论方面的教授。1980~1981年在加州大学洛杉矶分校系统科学系做了九个月的访问教授,在新西兰坎特布雷大学做了三个月的尔斯克因(Erskine)高级研究人员。

贝勒迪多曾与他人用意大利语合著了信号理论、概率和随机变量方面的两本书及一本《数字传输理论》(Prentice-Hall, 1987),同时在重要工程杂志和会议上发表200多篇文章。他是《IEEE通信学报》的信号设计、调制和检测方面的编辑。

自1970年以来,贝勒迪多积极从事数字传输系统方面的研究工作。当前他的研究兴趣是数字通信系统的性能评估和模拟、格子码调制和串接编码方案和光纤通信系统。

贝勒迪多是IEEE的高级会员。

A.E. 威尔勒(Alan E. Willner)1982年在叶西伐(Yeshiva)大学获理学学士,1984年和1988年从哥伦比亚大学获电气工程硕士和博士学位。他曾是AT&T贝尔实验室(Crawford Hill Laboratory)技术人员中的博士后成员和Bellcore的技术成员。现在他是美国南加州大学电气工程与系统系的副教授,光子技术中心的副主任,和南加州大学国家科学基金(USC NSF)的集成多媒体系统工程研究中心的学生事务副主任。

威尔勒教授曾获由白宫颁发的、国家科学基金资助的总统教学人员奖(Presidential Faculty Fellows),David和Lucile Packard科学与工程基金奖,国家科学基金授予的年轻研究人员奖,南

加州大学/诺思若坡(Northrop)杰出青年工程师研究奖,南加州大学工程学院杰出教师奖和为哥伦比亚大学排名最高的电气工程研究生设立的阿姆斯特朗(Armstrong)基金纪念奖。他也是国家科学基金阿伦 T. 怀特曼(Alan T. Waterman)奖的最终竞争者。他是半导体研究组织高级成员和 IEEE 高级成员。

威尔勒教授现在是 IEEE 激光和电子光学学会(LEOS)的技术事务副主席和 LEOS 光网络技术委员会主席,曾是 LEOS 光通信技术委员会的主席。他也是美国光学学会(OSA)技术咨询委员会光通信组的副主席。他曾是 IEEE LEOS'95 关于全球信息基础设施(Global Information Infrastructure)技术夏季专题会议的总联合会主席之一,OFC'96 和 OFC'97、'96 光放大器专题会议、'97 激光和电子光学会议、LEOS'96 宽带光网络夏季专题会议等会议程序委员会的成员。他是 IEEE 威廉-斯特瑞佛尔(William Streifer)成就奖评奖委员会成员,《IEEE/OSA 的光波技术》杂志(JLT)副编辑和《JLT/SAC 的多波长技术》和《网络专辑》客座编辑。他是国家科学基金(NSF)光学科学和工程讨论会(OSE'94, OSE'95)信息和通信分会的主席。他已列入马奎斯(Marquis)的美国名人录。

威尔勒教授的研究工作是在大容量光通信方面。现在正从事波分复用(Wavelength-Division Multiplexing, WDM)、光放大、全光 WDM 网和 WDM 光互联方面的研究。他已发表 150 多篇著述,其中包括 32 篇邀请报告、三个专利、一本专著和两本合著。

目 录

第一章 基本光纤通信器件	1
1.1 引言	1
1.2 光纤	2
1.2.1 折射率和反射、折射定律	2
1.2.2 全内反射	3
1.2.3 阶跃折射率光纤及条形光波导:射线理论	4
1.2.4 在条形光波导中的麦克斯韦方程组	6
1.2.5 偶传输模式	8
1.2.6 奇传输模式	12
1.2.7 模的数量和单模光纤	13
1.2.8 相速度	16
1.2.9 群速度	17
1.2.10 衰减和色散	19
1.2.11 色散位移光纤和色散平坦光纤	25
1.2.12 保偏光纤和单偏振光纤	25
1.3 光源	26
1.3.1 发光二极管	26
1.3.2 激光器	34
1.4 光检测器	50
1.4.1 PIN 光电二极管	50
1.4.2 雪崩二极管(APD)	51
习题	52
参考文献	60
精选书目	61
第二章 光纤通信的数理基础	63
2.1 引言	63
2.2 概率和随机变量	63
2.2.1 概率论	63
2.2.2 随机变量	65
2.3 某些重要的概率分布	68

2.3.1 二项式分布	68
2.3.2 泊松分布	69
2.3.3 高斯分布	69
2.3.4 X -方分布	70
2.3.5 瑞利和莱斯分布	71
2.4 信号与系统	72
2.4.1 连续-时间信号与系统	72
2.4.2 离散时间信号和系统	73
2.5 随机过程	74
2.5.1 连续-时间随机过程	74
2.5.2 离散时间随机过程	79
2.6 频谱分析	80
2.6.1 确定性信号	80
2.6.2 平稳随机过程	80
2.6.3 非平稳随机过程	81
2.7 窄带信号和系统	84
2.7.1 窄带信号和复包络	85
2.7.2 带通系统及其低通表征	89
2.8 检测理论基础	89
2.8.1 加性噪声中的一个信号	89
2.8.2 加性噪声上的 M 个信号	93
2.9 由光到信号	95
习题	98
参考文献	100
第三章 二进制光通信系统	101
3.1 引言	101
3.2 系统主要部件	102
3.2.1 发射机	102
3.2.2 光纤	106
3.2.3 接收机	108
3.3 光纤的物理限制	109
3.3.1 衰减的限制	109
3.3.2 色散限制的直观推断	111
3.3.3 光纤色散引起的功率代价	112
3.3.4 衰减和色散的综合限制	116
3.3.5 在光放大链路中衰减和色散的限制	118
3.4 接收机特性	121
3.4.1 接收机灵敏度的量子极限	123
3.4.2 检测信号和散粒噪声	124

3.4.3 接收机热噪声	129
3.4.4 一种接收机的综合模型	131
3.4.5 无码间干扰情况	133
3.5 性能估算	135
3.5.1 误码概率	135
3.5.2 一个简例:没有码间干扰的误码概率	136
3.5.3 接收机灵敏度	138
3.6 高阻抗和互阻抗接收机的比较	142
3.6.1 高阻抗接收机	142
3.6.2 互阻抗接收机	144
3.6.3 灵敏度分析小结	147
3.7 数字光系统中的其它缺陷	151
3.7.1 消光比	151
3.7.2 相对强度噪声	152
3.7.3 定时抖动	152
3.7.4 模式噪声	154
3.7.5 模式分配噪声	154
3.8 一般的设计考虑	154
3.8.1 多模和单模光纤	154
3.8.2 PIN 与 APD 光电检测器	154
3.8.3 高阻抗与互阻抗接收机	155
习题	155
参考文献	161
第四章 相干光系统	163
4.1 动机和基础	163
4.1.1 初步定量了解	165
4.2 基本的接收机灵敏度:零差系统	166
4.2.1 PSK 调制	166
4.2.2 同步 ASK 调制	168
4.2.3 频移键控(FSK)调制	168
4.3 外差系统:同步检测	169
4.3.1 PSK 调制	169
4.3.2 同步 ASK 调制	170
4.3.3 同步 FSK 调制	170
4.3.4 零差还是外差?	170
4.4 外差系统:异步检测	171
4.4.1 异步 ASK	171
4.4.2 异步 FSK	173
4.4.3 FSK 双滤波器接收机	175

4.4.4 FSK 单滤波器接收机	175
4.5 外差系统:差分检测	176
4.5.1 低偏置 FSK	176
4.5.2 DPSK	178
4.6 灵敏度的小结与比较	180
4.7 光桥接器	182
4.7.1 无损耗桥接器	182
4.7.2 $\pi/2$ 桥接器	183
4.7.3 平衡接收机	184
4.8 相位噪声与线宽	185
4.8.1 激光器相位噪声的模型	185
4.8.2 激光器相位噪声对系统的影响	187
4.9 同步系统	188
4.9.1 相位误差对系统性能的影响	189
4.9.2 零差相位锁定	189
4.9.3 外差相位锁定	202
4.10 异步系统	204
4.10.1 双滤波器异步 FSK	204
4.10.2 异步 ASK	210
4.11 差分检测方式	215
4.11.1 DPSK	215
4.11.2 CPFSK	217
4.11.3 相位分集接收机	217
4.12 如何处理相位噪声:小结	222
4.12.1 同步方式	222
4.12.2 差分检测方式	222
4.12.3 异步方式	222
4.12.4 相位分集接收机	222
4.13 偏振起伏	223
4.13.1 偏振失配的影响	224
4.13.2 偏振控制系统	225
4.13.3 保偏光纤	227
4.13.4 偏振扩展	227
4.13.5 偏振分集	240
习题	241
参考文献	246
第五章 光放大器	249
5.1 引言	249
5.1.1 直接放大的优点	249

5.1.2 基本的放大器组态	250
5.1.3 光放大器的种类	251
5.2 半导体放大器	253
5.2.1 速率方程和增益	253
5.2.2 纠正晶面反射	258
5.2.3 放大器噪声和 SNR	259
5.2.4 电等效 SNR	261
5.2.5 纠正半导体增益介质的偏振依赖性影响的方法	265
5.2.6 多信道的交叉调制和饱和感生串音	266
5.2.7 半导体放大器的应用	269
5.3 掺铒光纤放大器(EDFAs)	271
5.3.1 基本的光谱特性	272
5.3.2 功能性 EDFA 中所需的元件	274
5.3.3 增益和噪声的相关性	274
5.3.4 EDFA 的噪声	277
5.3.5 饱和特性和串话	279
5.3.6 集总式和分布式放大器的噪声	280
5.3.7 EDFA 的应用	281
5.3.8 掺铒集成波导放大器	284
5.4 SOA 和 EDFA 主要特性的比较	285
5.5 其它类型的光纤放大器	285
5.5.1 掺镨放大器	285
5.5.2 布里渊放大器和拉曼放大器	285
5.6 小结	286
习题	286
参考文献	288
第六章 孤子系统	291
6.1 引言	291
6.2 孤子的直观解释	292
6.3 孤子用于长距离传输时的优点	292
6.4 孤子的推导	294
6.4.1 非线性无色散介质	294
6.4.2 线性色散介质	295
6.4.3 非线性色散介质	295
6.5 振幅、持续时间、能量和功率	296
6.6 高阶孤子	297
6.7 孤子的定性物理解释	297
6.8 孤子所需的峰值脉冲功率的估计	298
6.9 光纤的损耗及其补偿方法	299

6.10	孤子系统中的集总式放大器	300
6.11	偏振色散	301
6.12	孤子系统中的 ASE 噪声	301
6.13	孤子系统中的误码率	302
6.14	利用循环回路进行孤子试验	305
6.15	孤子的波分复用	307
6.15.1	WDM 系统中的孤子碰撞	307
6.15.2	碰撞孤子的加速度和速度移动	308
6.15.3	WDM 的设计规则和信道数	309
6.16	孤子脉冲源	311
6.16.1	光纤环孤子激光器	311
6.16.2	法布里-珀罗光纤孤子激光器	312
6.16.3	DFB 激光器/外调制孤子源	313
6.16.4	DFB 激光器/集成调制器孤子源	313
6.17	超越哥顿-豪斯极限	314
6.17.1	频域滤波技术	314
6.17.2	时域滤波技术	315
	习题	315
	参考文献	317
第七章	多信道系统	319
7.1	引言	319
7.1.1	光纤带宽	319
7.1.2	常用的复用方式	320
7.1.3	基本拓扑结构	322
7.1.4	电路交换和分组交换	325
7.2	时分复用	327
7.3	波分复用	329
7.3.1	基本运行过程	330
7.3.2	拓扑和结构	332
7.3.3	可能的技术	333
7.3.4	系统设计指南	346
7.3.5	光放大	355
7.3.6	光纤的非线性和色散	363
7.3.7	WDM 系统的传输容量	369
7.3.8	波长变换和波长重用	370
7.4	副载波复用	375
7.4.1	调制与解调	375
7.4.2	多信道频分复用	377
7.4.3	WDM/SCM 混合系统	379

7.5 码分复用(CDM)	380
7.6 空分复用	381
7.7 网络问题	383
7.7.1 交换	383
7.7.2 网络举例	388
7.7.3 协议	390
7.8 小结	391
习题	391
参考文献	393
附录 A 信噪比 Λ_1 的一般形式的推导	401
附录 B 相位噪声 – 幅度噪声转换的统计特性	403
B.1 滤波包络的模拟	403
B.2 FOKKER-PLANCK 方程的数值求解	404
B.3 利用截断级数的解析近似	405
B.4 采用指数概率密度函数的解析近似	407
B.5 HUMBLET 解析近似	407
B.6 Z 的精确矩	407
B.7 随机变量 W 的矩	408
B.8 不同解析方法的比较	408
B.9 在 4.10 节中采用的方法	411
习题	411
参考文献	411
附录 C 由求积法求统计平均	413
C.1 高斯求积法的收敛性和准确性	414
参考文献	415
符号表	417
索引	419