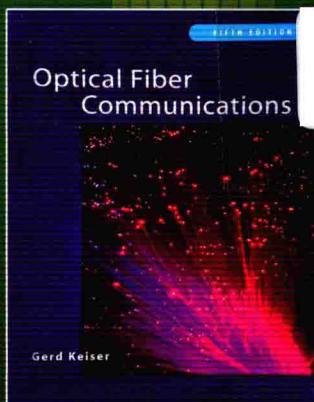


国外电子与通信教材系列

Mc
Graw
Hill
Education

光纤通信 (第五版)

Optical Fiber Communications
Fifth Edition



[美] Gerd Keiser 著

蒲涛 徐俊华 苏洋 译

李玉权 审校



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>

国外电子与通信教材系列

光纤通信

(第五版)

Optical Fiber Communications

Fifth Edition

[美] Gerd Keiser 著

蒲涛 徐俊华 苏洋 译

李玉权 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了光纤通信的各方面知识。全书共14章,内容涵盖光纤传输原理和传输特性,半导体光源和光检测器的工作原理与工作特性,数字光纤通信系统和模拟光纤通信系统,光放大器的工作原理和性能,WDM系统原理与器件,光网络与光交换,光纤通信系统的性能测量及管理。与前一版相比,新增了高级光调制格式、100 Gbps和400 Gbps链路、光纤的非线性效应、光子晶体光纤、高速通信中的前向纠错、光载射频(ROF)及光缆铺设等新内容。

本书特别适合作为通信工程及相关专业高年级本科生、研究生的光纤通信课程的教材,对于从事光纤通信设备设计制造、系统运营管理的工程技术人员也是一本很好的参考书。

Gerd Keiser

Optical Fiber Communications, Fifth Edition

9789814575690

Copyright©2015 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry. This edition is authorized for sale in China Mainland.

Copyright©2016 by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和电子工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权©2016由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与电子工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权合同登记号 图字:01-2014-7563

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信:第5版/(美)凯泽(Keiser,G.)著;蒲涛,徐俊华,苏洋译。—北京:电子工业出版社,2016.3

书名原文:Optical Fiber Communications, Fifth Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-27746-7

I. ①光… II. ①凯… ②蒲… ③徐… ④苏… III. ①光纤通信-高等学校-教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第288400号

策划编辑:杨博

责任编辑:杨博

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:34 字数:871千字

版次:2002年7月第1版(原著第3版)

2016年3月第3版(原著第5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

由于 Gerd Keiser 教授的 *Optical Fiber Communications* 一书的世界性影响, 2002 年我们将本书的第三版翻译成中文, 受到了国内同仁及相关专业学生的欢迎。转瞬间, 十几个年头过去了, 光纤通信领域在这十多年间取得了许多新的进展, 而 Gerd Keiser 教授也将本书的第五版奉献给了读者。为方便国内读者学习, 我们又提供了新版的中译本以飨读者。

在作者所写的前言中已详细列出了第四版和第五版新增加的内容。在诸多新内容中我们认为读者需要关注如下热点:

1. 关于光子晶体光纤、少模光纤和多芯光纤的结构及工作原理, 光子晶体光纤有可能为多种光子器件的设计带来革命性的变革, 基于少模/多芯光纤的模分复用技术具有重要的潜在应用价值。
2. 与超高速传输相联系的内容, 例如 QPSK 调制、相干检测、前向纠错、突发模式接收等, 当前已实现的单波长 100 Gbps 及更高速率的相干传输技术尤其引人注目。
3. 非线性效应及其影响, 近年来基于光纤的非线性效应实现光信号处理是极为活跃的前沿研究课题。
4. 光载射频 (ROF) 技术及微波光子学, 这是一个光子学与微波毫米波技术相结合的新兴交叉领域, 极具活力。
5. IP over WDM、光以太网、光纤到驻地 (FTTP) 无源光网络等技术与无线接入技术相结合, 将产生重大影响。

另外, 新增加的有关国际标准、光缆铺设等内容对于读者, 尤其是从事系统设计和工程建设的工程技术人员也是极有帮助的。

本书第五版主要由蒲涛、徐俊华、苏洋翻译, 译者所在教研室的研究生刘颖、魏志虎、孙帼丹、陈寅芳、刘双、叶振新、熊锦添、孟楠、陈大雷参与了部分章节的翻译工作, 全书由李玉权审校。在此对于他们所付出的辛勤劳动致以衷心的感谢。

受译者学识水平所限, 加之本书篇幅浩大, 多人参与翻译工作, 译文中出现不妥乃至错误之处在所难免, 热望读者不吝赐教。

译 者

2015.12 于南京

前 言

本书的目标

自1983年本书第一版问世以来,光纤通信历经了令人神往的发展历程。特别值得一提的是,高锟(Charles Kuen Kao)以其超越时代的洞察力,发现可以使用玻璃纤维作为数据传输媒介,其执着的后继工作带来了低损耗光纤的进一步发展,这使得他荣获2009年诺贝尔物理学奖。第一根超纯光纤在高锟预言之后的第4年,即1970年研制成功。这一突破导致与光纤相关的系列技术的发展。最初人们仅关心传输链路技术,随后很快转移到越来越复杂的网络技术。许多新器件和通信技术加入光纤通信中。其中有的技术获得极大成功,也有的技术因为实现过于复杂而被淘汰,还有的技术由于过于超前在经历一段时间的冬眠期后再次出现。基于光纤技术的现代大容量电信网络已成为社会不可分割的一部分。这些先进网络的应用领域从简单的网页浏览到电子邮件交互再到健康诊断、网格和云计算及复杂的商业交换。由于网络对于日常生活如此重要,我们越来越期望通信服务能够永远在线并功能合理。要满足这一近乎苛刻的需求,需要对从器件发展到系统设计安装和网络运行维护的所有技术方面进行仔细的工程化考量。

为了突出上述技术的成就与现状,本书第五版力求展现基本原理,以利于理解光纤技术并更广泛地将其应用于现代通信网。本书的系列论述将带领读者系统地领略光纤链路中器件及其相互间影响的根本原理,讲述复杂光链路和网络的架构与性能特征,了解网络安装与维护中需要的基本测量技术。通过理解、掌握这些基本问题,读者不仅可以从事器件、通信链路或者设备的设计,还能够预见未来网络技术的发展方向。

本书的内容

为达到上述目标,本书第1章给出了光纤通信系统的概述。其内容包括采用光纤的原因和好处,所使用的频带,波分复用如何提高光纤的传输容量,采用的标准和仿真工具。

第2章至第11章描述了光链路中主要元器件的性能特征。这些元器件包括光纤、光源、光检测器、无源光器件、光放大器,以及用于多波长网络中的有源光电器件。光纤是光链路中最为重要的器件。第2章和第3章给出了各类光纤的物理结构、所用材料、损耗特性、光传播机理以及信号畸变特性。第3章还介绍了光纤制造方法和几种常用光缆。这两章的新增内容包括有关光子晶体光纤的讨论,以及它对模式效应和脉冲展宽性能的改善。

第4章论述了光通信中所用光源的结构、发光原理和使用特性。此外还论述了直接调制和外调制技术、温度效应、器件寿命和线路编码方法。在第5章中描述了如何有效地将光源发射光束耦合进光纤,以及如何将两段光纤以功率损耗最小的方式连接起来。

光接收机的任务是检测到达光信号并将其转换为可被后继电接收机处理的电信号。第6章内容包括光检测器的结构与响应特性。第7章描述了光接收机的原理和功能。这一章中的新

内容包括光接收机的简化数学描述、信号检测的统计概念、眼图测量方法，以及用于无源光网络中的突发模式接收机简介。

第8章和第9章分别介绍了数字和模拟链路的设计方法。第8章包括链路功率预算和带宽限制的讨论。新内容包括功率代价、基本相干检测方案和数字信号差错控制方法。第9章增加了在光纤中传输微波射频模拟信号的概念。射频光传输技术的一个扩展应用是室外和大楼内移动终端的宽带光载射频(ROF)网络。

第10章论述了波分复用(WDM)的原理，介绍了普通WDM链路的功能，讨论了不同WDM方案的国际标准。本章的新内容包括有源和无源WDM器件的描述和应用举例，例如光纤布拉格光栅、薄膜滤波器、阵列波导光栅、衍射光栅和可调光衰减器等。

第11章描述了实现光放大的不同方法。其中有半导体光放大器、掺杂光纤放大器和新型的拉曼放大器。除了传统掺铒光纤放大器(EDFA)的论述，还有用于S波段的掺铊光纤放大器(TDFA)和用于L波段的增益移位EDFA的新结构。

第12章至第14章展示了如何将各个元器件组合构成链路和网络，给出了评估光器件和链路性能的测量方法。第12章的新内容包括光纤中非线性过程的来源与影响。许多非线性效应会导致系统性能劣化，必须予以控制，另外一些(如受激拉曼散射效应)则可以加以利用。

第13章扩展了有关长途、城域、局域和接入光网络的内容。重点增加了当前已实现的单波长100 Gbps、不远的未来能够达到400 Gbps和1 Tbps传输的相干链路技术。还增加了光分插复用器和光交叉连接的概念，波长路由，光分组交换，光突发交换，无源光网络，IP over WDM，光以太网，以及减小高速网络传输损伤的技术等。

最后一章(第14章)讨论了性能监测。论题包括国际认可的测量标准，光纤链路的基本测试仪表，光纤的建模方法，通过眼图测量评估链路性能。特别要强调的是对WDM链路的评估。这一章的新内容包括眼图模版、压力眼图测试、误码率眼图轮廓等概念；另一个新内容是光性能监测，这已成为光通信网络(特别是与误码监测、网络运行维护和故障管理相关的光通信网络)的基本功能。

本版新增内容

本书第四版和第五版新增内容如下：

- 光纤通信的频谱划分；
- 描述了光子晶体光纤，一种通过内部微结构增加控制纤维中光的又一个维度的光纤；
- 回顾了光纤光缆在包括室内管线到海底链路等各种环境中的铺设方法；
- 描述了用于与光波相互作用，以便控制、管理光信号的特种光纤；
- 讨论了以各种国际标准，规范不同类别的光纤的参数，从而保证工业领域的兼容性；
- 举例说明了商用收发器组件的特性与封装；
- 举例说明了商用光纤连接器的特性与封装；
- 讨论了用于无源光网络的突发模式光接收机的特性；
- 扩充了传输链路的功率代价；
- 扩充了工作于100 Gbps或更高速率的单模光纤链路；
- 新增了相干检测，相对于直接检测方式，相干检测可以提高谱纯度、提高抗色散性能；

- 新增了用于超过 100 Gbps 速率传输链路的数字四相移键控(DQPSK)方法;
- 新增了数字差错检测和纠错方法,包括采用多项式编码与前向纠错(FEC)技术;
- 新增了用于无线接入网、室内环境无线服务、家庭个域网络连接的光载射频技术;
- 扩充了用于波分复用的光子器件内容;
- 新增了拉曼光放大器技术,扩展了掺饵光纤放大器技术;
- 新增了一章(第 12 章),讲述光纤中的非线性效应的影响;
- 大大扩展了光网络的内容,包括高速光链路,光分插复用器,光交换,WDM 网络举例,IP over WDM,光以太网,用于光纤到驻地(FTTP)的无源光网络应用;
- 修改了性能测试与监测的相关内容,包括眼图测试,光性能监测(OPM)功能,性能测试功能,以及包括误码率(BER)、光信噪比(OSNR)、 Q 值、光调制幅度(OMA)和定时抖动在内的性能测试。

本书的使用

本书第五版提供了有关光纤通信技术的理论和应用的基本材料,可用于高年级或研究生课程。本书还可用作工作参考书,为从事光纤通信系统相关器件、传输设备、测试仪表设计开发和光缆工厂的应用工程师服务。学习本书,应具有高年级工科学生的理论基础,包括电磁场理论、微积分与微分方程、光学基础。本书的正文部分也对光学概念、电磁理论和半导体物理学基础等几方面的主要基础知识进行了简明的回顾。许多涉及进一步知识的章节(如麦克斯韦方程组在圆柱介质波导中的应用)用星号标注,可以跳过而不失连续性。为了帮助读者学习和设计实践,本书提供了 160 个例题和 79 个训练题,并收集了 267 道习题,帮助检测读者对本书所覆盖和延伸内容的理解。授课教师可通过邮箱 te_service@phei.com.cn 获得这些习题的解答。

每章的末尾都提供了大量的参考文献作为深入学习所涉及专题的起点。由于光纤通信将多个科学和工程学科领域的研究与开发力量汇聚在一起,各章所涉内容相关的文献有数百篇。参考文献虽然无法列出全部文章,但是选择了对纤维光学领域具有重要贡献的文章,以作为所涉领域的良好导引。有关最新发展的参考文献可以在专业教材和许多会议论文集中找到。

为帮助读者理解和使用本书,书中给出了相关物理常数及其单位。附录 A 至附录 D 给出了国际单位制、完成习题所需数学公式等。附录 E 至附录 G 提供了本书所用的缩写术语、拉丁文符号和希腊文符号。

计算机建模与仿真工具为制造原型机之前帮助分析设计光器件、电路和网络提供了有效的途径。本书网址(www.mheducation.asia/olc/keiser)提供了关于仿真模块的简单可交互演示版的介绍。这些仿真模块可以从三个仿真工具公司网址下载。简化版含有超过 100 个预先定义的模块和链路配置用于交互式的概念演示。尽管配置是固定的,用户仍然可以通过参数设置或开关来看到不同效应的系统性能。

本书网址

我们还提供网络连接,用于学习和下载交互式仿真演示,网址(www.mheducation.asia/olc/keiser)提供本书相关新技术发展和最新参考资料信息,还可以为授课教师提供家庭作业系统解答,以及部分教学 PPT 和图。授课教师可以通过邮箱 te_service@phei.com.cn 获得这些内容。

目 录

第1章 光纤通信概述	1	2.2.2 反射和折射	28
1.1 光通信的发展动力	2	2.2.3 光的偏振分量	30
1.1.1 光网络的发展历程	2	2.2.4 偏振敏感材料	31
1.1.2 光纤的优点	3	2.3 光纤模式和结构	32
1.2 光频谱带	4	2.3.1 光纤分类	32
1.2.1 电磁能量	4	2.3.2 光纤结构的变化	34
1.2.2 工作窗口和光频带	6	2.3.3 光射线和模式	35
1.3 分贝单位	6	2.3.4 阶跃折射率光纤结构	35
1.4 网络信息速率	8	2.3.5 射线光学描述	36
1.4.1 电信信号复用	8	2.3.6 介质平板波导中的波动 描述	37
1.4.2 SONET/SDH 复用体系	10	2.4 圆波导的模式理论	39
1.5 光信道复用	11	2.4.1 模式概述	40
1.5.1 WDM 概述	11	2.4.2 关键的模式概念的归纳	41
1.5.2 偏振复用	11	2.4.3 麦克斯韦方程组*	43
1.5.3 模分复用	11	2.4.4 波导方程式*	43
1.5.4 多芯光纤	12	2.4.5 阶跃折射率光纤中的波动 方程*	45
1.6 光纤通信系统的关键组件	12	2.4.6 模式方程*	46
1.7 光通信网络的演进	14	2.4.7 阶跃折射率光纤中的 模式*	47
1.8 光纤通信标准	15	2.4.8 线偏振模*	50
1.9 仿真与建模工具	16	2.4.9 阶跃折射率光纤中的 光功率流*	53
1.9.1 仿真工具的特征	16	2.5 单模光纤	54
1.9.2 图形编程语言	17	2.5.1 结构	54
1.9.3 学生使用的程序举例	17	2.5.2 模场直径	55
1.10 总结	18	2.5.3 单模光纤中的传播模	56
习题	19	2.5.4 有效折射率	57
习题解答(选)	19	2.6 梯度折射率光纤的结构	57
参考文献	20	2.6.1 纤芯折射率结构	57
第2章 光纤:结构、导波原理和 制造	23	2.6.2 梯度折射率光纤的数值 孔径	57
2.1 光的性质	23	2.6.3 梯度折射率光纤的截止 条件	58
2.1.1 线偏振	24		
2.1.2 椭圆偏振和圆偏振	26		
2.1.3 光的量子特性	27		
2.2 基本的光学定律和定义	28		
2.2.1 折射率	28		

2.7	光纤材料	59	3.2.4	群时延	96
2.7.1	玻璃光纤	59	3.2.5	材料色散	97
2.7.2	有源玻璃光纤	60	3.2.6	波导色散	99
2.7.3	塑料光纤	60	3.2.7	单模光纤中的色散	99
2.8	光子晶体光纤(PCF)	60	3.2.8	偏振模色散	101
2.8.1	折射率导引 PCF	61	3.3	单模光纤性能	102
2.8.2	光子带隙 PCF	62	3.3.1	折射率分布	102
2.9	光纤制造	62	3.3.2	截止波长	104
2.9.1	外部汽相氧化法	63	3.3.3	色散计算	105
2.9.2	汽相轴向沉积法	64	3.3.4	模场直径	107
2.9.3	改进的化学汽相沉积法	64	3.3.5	弯曲损耗	108
2.9.4	等离子体激活化学汽相沉积法	65	3.4	国际标准	110
2.9.5	光子晶体光纤制造	65	3.4.1	G.651.1 建议	111
2.10	光缆	66	3.4.2	G.652 建议	111
2.10.1	光缆结构	66	3.4.3	G.653 建议	112
2.10.2	室内光缆	68	3.4.4	G.654 建议	112
2.10.3	室外光缆	69	3.4.5	G.655 建议	113
2.11	光缆铺设方法	69	3.4.6	G.656 建议	113
2.11.1	直埋式铺设	70	3.4.7	G.657 建议	113
2.11.2	光缆牵入管道	71	3.5	特种光纤	113
2.11.3	光缆气吹铺设	71	3.6	多芯光纤	115
2.11.4	架空铺设	72	3.7	总结	115
2.11.5	海底铺设	73	习题	116	
2.11.6	行业铺设标准	73	习题解答(选)	118	
2.12	总结	74	参考文献	118	
习题		75	第4章 光源	123	
习题解答(选)		77	4.1	半导体物理学基础	123
参考文献		78	4.1.1	能带	124
第3章 衰减和色散		82	4.1.2	本征材料和非本征材料	126
3.1	衰减	82	4.1.3	pn 结	127
3.1.1	衰减单位	82	4.1.4	直接带隙和间接带隙	128
3.1.2	吸收损耗	83	4.1.5	半导体器件的制造	129
3.1.3	散射损耗	86	4.2	发光二极管(LED)	129
3.1.4	弯曲损耗	89	4.2.1	LED 的结构	129
3.1.5	纤芯和包层的损耗	91	4.2.2	光源材料	131
3.2	光纤中的信号畸变	91	4.2.3	量子效率和 LED 的功率	135
3.2.1	色散概述	92	4.2.4	LED 的调制	137
3.2.2	模式时延	93	4.3	半导体激光器	139
3.2.3	色散起因	95	4.3.1	半导体激光器的模式和 阈值条件	140

4.3.2	半导体激光器的速率 方程	145	习题	195
4.3.3	外量子效率	146	习题解答(选)	197
4.3.4	谐振频率	146	参考文献	197
4.3.5	半导体激光器结构和辐射 场型分布	148	第6章 光检测器	201
4.3.6	单模激光器	151	6.1 光电二极管的物理原理	201
4.3.7	半导体激光器的调制	153	6.1.1 pin 光电二极管	201
4.3.8	激光器线宽	154	6.1.2 雪崩光电二极管	205
4.3.9	外调制	155	6.2 光检测器噪声	208
4.3.10	温度特性	156	6.2.1 噪声源	208
4.4	光源的线性特性	158	6.2.2 信噪比	211
4.5	发射机封装	160	6.2.3 噪声等效功率	212
4.6	总结	161	6.3 检测器响应时间	213
习题	162	6.3.1 耗尽层光电流	213	
习题解答(选)	165	6.3.2 响应时间	213	
参考文献	165	6.3.3 双异质结光电二极管	216	
第5章 光功率发射和耦合	168	6.4 雪崩倍增噪声	216	
5.1 光源至光纤的功率发射	168	6.5 InGaAs APD 结构	218	
5.1.1 光源的输出分布	168	6.6 温度对雪崩增益的影响	219	
5.1.2 功率耦合计算	170	6.7 光检测器比较	220	
5.1.3 发射功率与波长的关系	173	6.8 总结	220	
5.1.4 稳态数值孔径	174	习题	221	
5.2 改善耦合的透镜结构	174	习题解答(选)	224	
5.2.1 非成像微球	175	参考文献	224	
5.2.2 半导体激光器与光纤的 耦合	176	第7章 光接收机	226	
5.3 光纤与光纤的连接	177	7.1 接收机工作的基本原理	226	
5.3.1 机械对准误差	179	7.1.1 数字信号传输	227	
5.3.2 光纤相关损耗	183	7.1.2 误码源	228	
5.3.3 光纤端面制备	184	7.1.3 前置放大器	230	
5.4 LED 与单模光纤的耦合	185	7.2 数字接收机性能	232	
5.5 光纤接头	186	7.2.1 误码率	232	
5.5.1 连接方法	187	7.2.2 接收机灵敏度	236	
5.5.2 单模光纤的连接	188	7.2.3 量子极限	238	
5.6 光纤连接器	188	7.3 眼图	239	
5.6.1 连接器的类型	189	7.3.1 眼图的特征	239	
5.6.2 单模光纤连接器	192	7.3.2 BER 和 Q 因子测量	240	
5.6.3 连接器回波衰减	192	7.4 突发模式接收机	241	
5.7 总结	194	7.5 模拟接收机	243	
		7.6 总结	246	
		习题	247	

习题解答(选)	248	第9章 模拟链路	294
参考文献	249	9.1 模拟链路概述	294
第8章 数字链路	251	9.2 载噪比	295
8.1 点到点链路	251	9.2.1 载波功率	296
8.1.1 传输信号格式	252	9.2.2 光检测器和前置放大器的 噪声	296
8.1.2 系统考虑	254	9.2.3 相对强度噪声(RIN)	297
8.1.3 链路功率预算	255	9.2.4 反射对RIN的影响	299
8.1.4 展宽时间预算	257	9.2.5 极限条件	299
8.1.5 短波长带	261	9.3 多信道传输技术	300
8.1.6 单模光纤链路的损耗限制 距离	262	9.3.1 多信道幅度调制	301
8.2 功率代价	263	9.3.2 多信道频率调制	304
8.2.1 色度色散代价	263	9.3.3 副载波复用	305
8.2.2 偏振模色散代价	265	9.4 光载射频(ROF)	306
8.2.3 消光比代价	265	9.4.1 关键链路参数	306
8.2.4 模式噪声	266	9.4.2 无杂散动态范围	308
8.2.5 模分配噪声	268	9.5 光载链路射频	309
8.2.6 啁啾	269	9.5.1 ROF网络天线基站	309
8.2.7 反射噪声	270	9.5.2 多模光纤链路射频	310
8.3 差错控制	272	9.6 微波光子学	310
8.3.1 误码检测概念	272	9.7 总结	311
8.3.2 线性检错码	273	习题	311
8.3.3 多项式码	273	习题解答(选)	313
8.3.4 前向纠错	275	参考文献	313
8.4 相干检测	276	第10章 WDM概念和光器件	317
8.4.1 基本概念	277	10.1 WDM概述	317
8.4.2 零差检测	278	10.1.1 WDM的工作原理	318
8.4.3 外差检测	279	10.1.2 WDM标准	320
8.4.4 误码率比较	279	10.2 无源光耦合器	321
8.5 高级光调制格式	283	10.2.1 2×2 光纤耦合器	321
8.5.1 频谱效率	283	10.2.2 散射矩阵表示法	325
8.5.2 相移键控和IQ调制	283	10.2.3 2×2 波导耦合器	326
8.5.3 差分正交相移键控 (DQPSK)	284	10.2.4 星形耦合器	329
8.5.4 正交幅度调制(QAM)	284	10.2.5 马赫-曾德尔干涉 复用器	331
8.6 总结	285	10.3 隔离器和环形器	333
习题	286	10.3.1 光隔离器	333
习题解答(选)	288	10.3.2 光环形器	334
参考文献	289	10.4 光纤光栅滤波器	335
		10.4.1 光栅基础	335

10.4.2	光纤布拉格光栅	336	11.6.3	前置放大器	380
10.4.3	FBG的应用	338	11.6.4	多信道放大	381
10.5	介质薄膜滤波器	339	11.6.5	在线放大器增益控制	383
10.5.1	标准具理论	339	11.7	拉曼放大器	383
10.5.2	TFF的应用	341	11.7.1	拉曼增益	383
10.6	基于相位阵列的 WDM		11.7.2	泵浦激光器	385
	器件	342	11.8	宽带光放大器	386
10.7	衍射光栅	345	11.9	光纤激光器	386
10.8	有源光器件	346	11.10	总结	387
10.8.1	MEMS 技术	346	习题		389
10.8.2	可变光衰减器	347	习题解答(选)		392
10.8.3	可调谐光滤波器	348	参考文献		392
10.8.4	动态增益均衡器	349	第 12 章 非线性效应		396
10.8.5	光分插复用器	350	12.1	非线性效应概述	396
10.8.6	偏振控制器	350	12.2	有效长度与有效面积	397
10.8.7	色度色散补偿器	350	12.3	受激拉曼散射	398
10.9	可调谐光源	351	12.4	受激布里渊散射	400
10.10	总结	353	12.5	自相位调制	402
习题		353	12.6	交叉相位调制	403
习题解答(选)		356	12.7	四波混频	403
参考文献		357	12.8	减小四波混频	405
第 11 章 光放大器		361	12.9	波长变换	406
11.1	光放大器的基本应用和		12.9.1	光门波长转换器	406
	分类	361	12.9.2	波混频波长转换器	407
11.1.1	一般应用	361	12.10	孤子	408
11.1.2	放大器的类型	362	12.10.1	孤子脉冲	408
11.2	半导体光放大器	364	12.10.2	孤子参数	410
11.2.1	外部泵浦	364	12.10.3	孤子宽度和间隔	411
11.2.2	放大器增益	365	12.11	总结	412
11.2.3	SOA 的带宽	367	习题		413
11.3	掺铒光纤放大器	368	习题解答(选)		414
11.3.1	放大机理	368	参考文献		414
11.3.2	EDFA 的结构	370	第 13 章 光网络		417
11.3.3	EDFA 的功率转换效率		13.1	网络概念	417
	及增益	371	13.1.1	网络术语	418
11.4	放大器噪声	374	13.1.2	网络分类	418
11.5	光信噪比	377	13.1.3	网络层次	420
11.6	系统应用	378	13.1.4	光层	421
11.6.1	功率放大器	379	13.2	网络拓扑	422
11.6.2	在线放大器	379			

13.2.1	无源线形总线的性能	423	13.11.3	偏振模色散补偿	466
13.2.2	星形结构的性能	427	13.11.4	光放大器增益瞬变	467
13.3	SONET/SDH	428	13.12	总结	467
13.3.1	传输格式和速率	428	习题		468
13.3.2	光接口	430	习题解答(选)		472
13.3.3	SONET/SDH 环	432	参考文献		472
13.3.4	SONET/SDH 网络	434	第 14 章 性能测量与监控		479
13.4	高速光链路	435	14.1	测量标准	480
13.4.1	10 Gbps 光链路	435	14.2	基本测试设备	481
13.4.2	40 Gbps 光链路	437	14.2.1	测试用光源	482
13.4.3	100 Gbps 链路	438	14.2.2	光谱分析仪	482
13.4.4	400 Gbps 以上速率 链路	438	14.2.3	多功能光测试仪	483
13.5	光分插复用器	438	14.2.4	光衰减器	483
13.5.1	OADM 的结构	439	14.2.5	光传送网(OTN) 测试仪	483
13.5.2	可重构 OADM	440	14.2.6	可视故障指示仪	484
13.6	光交换	443	14.3	光功率测量	484
13.6.1	光交叉连接	444	14.3.1	光功率的定义	484
13.6.2	波长变换	445	14.3.2	光功率计	485
13.6.3	波长路由	447	14.4	光纤特性参数	485
13.6.4	光分组交换	448	14.4.1	折射近场法	485
13.6.5	光突发交换	448	14.4.2	传输近场法	486
13.7	WDM 网络实例	450	14.4.3	损耗测量	486
13.7.1	宽带长途 WDM 网络	450	14.4.4	色散测量	488
13.7.2	窄带城域 WDM 网络	452	14.5	眼图	493
13.8	无源光网络	453	14.5.1	模板测试	494
13.8.1	基本的 PON 架构	453	14.5.2	压力眼图	495
13.8.2	有源 PON 模块	454	14.5.3	眼图轮廓	495
13.8.3	业务流量	456	14.6	光时域反射仪(OTDR)	495
13.8.4	GPON 特性	457	14.6.1	OTDR 轨迹	496
13.8.5	WDM PON 架构	459	14.6.2	损耗测量	497
13.9	DWDM 直接承载 IP	460	14.6.3	OTDR 盲区	498
13.10	光以太网	461	14.6.4	光纤故障定位	499
13.10.1	基本的光以太网方案	461	14.6.5	光回波衰减	499
13.10.2	EPON/GE-PON 架构	462	14.7	光性能监测	500
13.10.3	城域光以太网	463	14.7.1	管理构架和功能	500
13.11	降低传输损伤	464	14.7.2	光层管理	501
13.11.1	色度色散补偿光纤	464	14.7.3	OPM 功能	503
13.11.2	布拉格光栅色散 补偿器	465	14.7.4	网络维护	503
			14.7.5	故障管理	504

14.7.6 OSNR 监视	505	参考文献	514
14.8 光纤系统性能测量	505	附录 A 国际单位制	518
14.8.1 误码率测试	506	附录 B 常用数学关系式	519
14.8.2 光信噪比评估	507	附录 C 贝塞尔函数	522
14.8.3 Q 因子评估	508	附录 D 分贝	524
14.8.4 光调制幅度(OMA) 测量	510	附录 E 缩写	525
14.8.5 定时抖动测量	510	附录 F 拉丁文符号	528
14.9 总结	511	附录 G 希腊文符号	530
习题	512		
习题解答(选)	514		

第1章 光纤通信概述

自古以来,通信就是人们的基本需求之一,这种需求激励起人们的极大兴趣发明能将信息从一个地方传送到远方的通信系统。光通信是这类通信系统中人们特别感兴趣的方式。最早的光通信线路是公元前8世纪在古希腊出现的光火信号通信^①,用于报警、呼救或通知特定的事项。限于技术原因,此后改进这种光通信方式并未引起人们多大的兴趣。例如,信息传送速率受到限制,这是因为通信线路中信息传输速率受限于发送者手摆动的快慢;信息接收器是人的眼睛,这会导致接收误差;需要视距传输,这就会受到大气的影晌,像大雾、雨天就会导致传输中断。由此,人们转向寻求更为快捷、更加有效的方式,以便将信息传送建立在规范的网络上。

直到20世纪60年代早期激光器发明之前,光通信未取得明显的进展。由相干光源辐射的光频大约为 5×10^{14} Hz,所以激光通信在理论上其信息传输速率将比微波系统高出 10^5 倍。由于关注其潜在的宽阔的传输频带,基于大气光信道的光传输实验在20世纪60年代早期即已完成。这些实验表明,相干光载波能够以极高的频率予以调制。但是实现这种系统所需的高昂成本以及大气光信道的制约,例如下、雾、雪、污染等因素,使得构建这种超高速链路的经济性大打折扣。

与此同时,另一种途径,即经过光导纤维实现更可靠的传输信道引起了关注,因为这种传输信道不受环境的影响^{2,3}。早先,高达1000 dB/km的传输损耗使得光纤传输难以实用化。1966年,高锟和Hockman³指出,光纤材料的高损耗是由其中的杂质引起的,并指出只要将杂质含量降低,即可显著降低其损耗,从而制作出光纤这种传输媒质。2009年,高锟因其开创性的贡献及其在世界范围热情支持进一步研发更低损耗光纤而获得诺贝尔物理学奖。1970年,也就是在高锟预言之后仅仅4年,第一根超纯净光纤问世。在此突破以后,又有诸多制造低损耗光纤的技术出现,这就导致了1978年开始构建世界范围内实用的光通信系统。这些系统工作在电磁频谱的近红外波段(通常是在770~1675 nm范围),采用光纤作为传输媒质。

本书的目的是讲述各种技术、实现方法以及使得光通信系统能够正常工作的性能测试技术。读者也可在本书不同章节及所列参考文献中看到光纤中的光传输理论,链路和网络设计,光纤,光子器件,光纤通信系统的演进信息⁵⁻²³。

本章是全书的总揽,将给出基本的通信概念,解释光纤通信系统是如何工作的。首先,在1.1节将介绍光纤传输系统的发展动力;1.2节将定义光通信中使用的不同频带及其波长范围;1.3节解释用分贝表示光功率;1.4节给出光链路中复用的数字信息流的基本结构;1.5节描述了能够巨大扩展光链路承载信息容量的方法,这些方法包括波分复用、偏振复用、模分复用和空分复用;然后,在1.6节介绍光纤系统中关键组件的实现及功能。

1.7节介绍了许多新技术的不断引入导致光通信网络的演进和发展,这些技术包括高性能光纤、更先进的有源光器件,波分复用(WDM)概念使许多不同波长的独立光通道能够同时传输,高级调制技术提高了频谱效率,相干检测实现了多电平解调,数字信号处理(DSP)补偿了光信号的传输损伤,以及前向纠错(FEC)处理减小了对光信噪比的要求。

① 中国早在3000年前的西周就已出现烽火台通信,要早于古希腊!——译者注

保证实现全球范围无缝互联光波网络的一个种重要方面就是建立对所有器件和网络的特性参数的国家标准。1.8节介绍了参与这些标准化活动的组织,列出了与光通信器件、系统运行和安装过程相关的主要标准类别。最后,1.9节介绍了辅助设计光纤、无源和有源器件、链路和网络的建模和仿真工具。

第2~10章将介绍光链路中主要组件的用途及性能参数。这些组件包括光纤、光源、光检测器、无源光器件、光放大器和用于多波长光网络中的有源光电器件。第11~14章讲解如何将这些组件组合起来以构成链路和网络,并给出评价光器件和光链路性能的测试方法。

1.1 光通信的发展动力

1.1.1 光网络的发展历程

在1980年之前,绝大多数通信技术都属于电传输机理。电通信始于1837年Samuel F. B. 莫尔斯发明的电报。电报系统使用莫尔斯电码,它用经过编码的一系列点和线代表字母和数字。已编码符号转换成短的或长的电脉冲在铜线中传输,其速率为每秒数10个脉冲。1874年发明的Baudot系统是更先进的电报架构,其信息速率在有熟练操作员的条件下可达120 bps。此后不久,贝尔(A. G. Bell)于1876年发明了更为便捷的、能够以模拟方式传输完整话音信号的装置。

电报和模拟话音信号都采用基带传输模式。基带传输是直接将信号发送到信道中的传输技术。将模拟电话通过标准对绞线路接入最近的交换接口设备就是采用这种方式。基带传输方式广泛用于光通信中,也就是说,来自光源的光输出以开、关方式响应信息信号电压的变化。

此后的若干年,电磁频谱中更为宽阔的部分在更先进、更可靠的电信系统中得到应用,这些系统具有更大的容量将信息从甲地发往乙地。每一种新系统应用的主要改进之处表现为:(a)改进传输信号的逼真度,以减小接收端的失真和错误;(b)提高数据传输速率或通信链路的容量,以便发送更多的信息;(c)延长在线中继器或放大站之间的传输距离,这样在线路中就无须周期性地恢复信号的幅度或逼真度,可以使消息传输更远。为达到此目标,催生了多种通信系统,例如具有大容量、长距离的陆地和海底光缆线路、无线射频、微波、卫星链路等。

在取得的这些进展中,一个基本趋势是先进的大容量系统必须使用更高频率。其原因是时变的基带信息信号可以加载到被称为载波的正弦电磁波上,再送进通信信道传送。在目的地,再将基带信号从载波上取下来,并进行适当的处理。由于传送的信息量正比于载波工作的频率范围,所以提高载波频率理论上就可以增加可用的传输带宽,也就是可提供更大的信息传输容量²⁴⁻²⁸。作为例子,图1.1给出了用于无线电传输的电磁频带。工作在高频(HF)、甚高频(VHF)、超高频(UHF)频段的各种无线电系统,其载波频率分别在 10^7 Hz、 10^8 Hz、 10^9 Hz量级,可以提供很高的信息容量或提升信息传输速率。所以电通信系统倾向于使用更高的频率,以提升其带宽或信息容量。

如图1.1所示,光频比电信系统所用的频段要高好几个数量级。所以在20世纪60年代早期,即激光器问世以后,利用电磁频谱中的光频段发送信息的可能性成为研究热点。特别是在大约770~1675 nm的近红外波段,正好处在石英玻璃光纤的低损耗区域,因而尤其引起关注。1970年,康宁玻璃公司成功地研制出低损耗光纤,可用于构建光传输链路,从而在光纤通信技术上取得了突破性进展²⁹。

随着技术的进步,很多制约光通信链路获取超宽带的复杂问题得到了解决。与铜缆系统相比,光纤系统具有一系列优点,其工作方式是简单的基带开-关键控模式。

第一条实际铺设的光纤线路出现于 20 世纪 70 年代末,它用于传输电话信号,速率约为 6 Mbps,传输距离约为 10 km。随着研发技术的进步,光纤通信系统的容量在 20 世纪 80 年代获得飞速提高,数据速率超过 1 Tbps,沿着传输线路长度方向,在无须进行信号整形的条件下,传输距离超过数百千米。

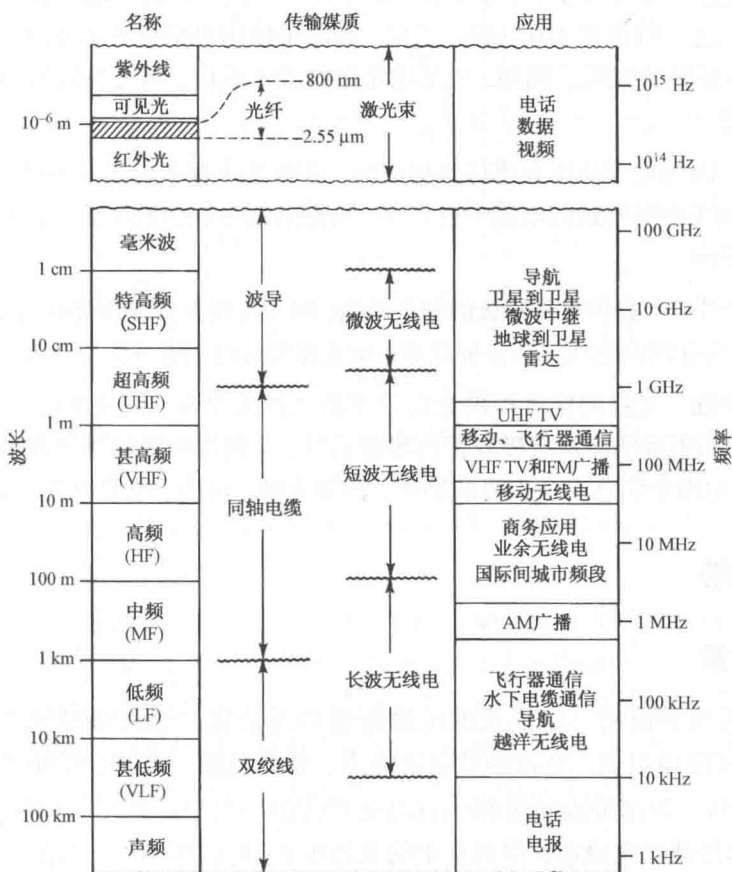


图 1.1 无线电和光纤通信使用的电磁频谱范围(经允许引用于 Carlson 的著作, ©1986)

20 世纪 90 年代伊始,一些新的宽带业务导致通信网的所谓“带宽饥饿”,这些业务包括:数据库查询;家庭购物;高分辨率交互视频;远程教育;远程医疗和电子保健;家庭视频的高质量编辑;大规模、高容量的电子科学和网格计算等。这种需求由于 PC 的快速普及,而且其存储容量、处理能力快速提高使之更加迫切。更进一步,因特网的扩展以及可随意地从远程获取程序及信息数据,使得 PC 的用途更为广泛。为适应超速增长的来自家庭 PC 用户到大企业和研究机构的高带宽业务需求,电信公司在全世界范围内极大地提升光纤线路的容量。这可以通过在单根光纤上添加独立的工作波长以及提高每个波长信道的信息传输速率来实现。

1.1.2 光纤的优点

与铜线相比,光纤具有以下优点。