



中国科学院电子信息与通信系列规划教材

光通信原理与技术

李玉权 朱 勇 王江平 编著



科学出版社
www.sciencep.com

TN929.1

9

中国科学院电子信息与通信系列规划教材

光通信原理与技术

李玉权 朱 勇 王江平 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统讲述了光通信的基本原理和关键技术,包括光纤通信和无线光通信两部分内容。第1章是对光通信系统的构成以及所涉及的关键技术的概要介绍;第2~6章讲述光纤通信所涉及的主要器件的工作原理及工作特性、光纤通信系统和光通信网络;第7~9章讲述无线光通信,包括大气激光通信、卫星间激光通信和 underwater 激光通信中的关键技术及系统构成。每章后附有小结、思考题与习题。

本书可作为通信工程、电子工程以及相近专业本科生的教材,也可作为通信类硕士研究生或工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光通信原理与技术/李玉权,朱勇,王江平编著. —北京:科学出版社, 2006

(中国科学院电子信息与通信系列规划教材)

ISBN 7-03-016639-6

I. 光… II. ①李…②朱…③王… III. 光通信-教材 IV. TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 150651 号

责任编辑:匡 敏 余 江 潘继敏 / 责任校对:李奕莹

责任印制:张克忠 / 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>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年6月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006年6月第一次印刷 印张: 28 1/4

印数: 1—3 000 字数: 528 000

定价: 36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

《中国科学院电子信息与通信系列规划教材》

编 委 会

顾 问：保 铮 中国科学院院士 西安电子科技大学
刘永坦 两院院士 哈尔滨工业大学
陈俊亮 两院院士 北京邮电大学

主 任：谈振辉 教授 北京交通大学

副主任：任晓敏 教授 北京邮电大学
梁昌洪 教授 西安电子科技大学
冯正和 教授 清华大学
张文军 教授 上海交通大学
林 鹏 编审 科学出版社

委 员：(按姓氏汉语拼音排序)

段哲民 教授 西北工业大学
顾学迈 教授 哈尔滨工业大学
洪 伟 教授 东南大学
焦李成 教授 西安电子科技大学
李少谦 教授 电子科技大学
毛军发 教授 上海交通大学
沈连丰 教授 东南大学
唐朝京 教授 国防科技大学
王成华 教授 南京航空航天大学
王文博 教授 北京邮电大学
徐安士 教授 北京大学
姚 彦 教授 清华大学
严国萍 教授 华中科技大学
杨建宇 教授 电子科技大学
张宏科 教授 北京交通大学
张晓林 教授 北京航空航天大学

秘 书：段博原 编辑 科学出版社

丛 书 序

信息技术的高速发展及其广泛应用,使信息技术成为当今国际竞争中最重要
的战略技术。信息技术对经济建设、社会变革、国家安全乃至整个国家的发展起到
关键性的作用,它是经济发展的“倍增器”和社会进步的“催化剂”,是体现综合国力
的重要标志。在人类历史上,没有一种技术像信息技术这样引起社会如此广泛、深
刻的变革。在 20 世纪末和 21 世纪前半叶,信息技术乃是社会发展最重要的技术
驱动力,可以说,21 世纪人类已经步入了信息时代。信息产业在世界范围内正在
由先导产业逐步变为主导产业。从微观上看,表现为单位产品的价格构成中,能源
和材料的消耗减少而信息技术和信息服务的比重上升;从宏观上看,表现为国民生
产总值(GDP)中信息产业所占的比重增加。一个国家信息产业的发展水平将是衡
量该国社会经济总体发展和现代化程度的重要标志之一。

目前,信息科学已成为世界各国最优先发展的科学之一。党的十六大提出了
“加速发展信息产业,大力推进信息化,以信息化带动工业化”的发展战略,以及“优
先发展信息产业,在经济和社会领域广泛应用信息技术”的基本国策,使我国信息
产业得到了前所未有的重视,信息产业呈现出飞速发展的势头。信息产业的发展
离不开信息化人才,信息化人才建设将是信息产业可持续发展的关键。然而,有关
调查表明,我国国家信息化指数为 38.46,而信息化人才资源指数仅为 13.43。据
权威机构预测,从 2005 年到 2009 年,中国信息行业将以 18.5% 的年复合增长率
高速增长,中国信息市场将迎来又一个“黄金年代”。在信息化发展势头的带动下,
我国信息化人才缺乏已经成为制约信息产业发展的重要因素。

为了适应新世纪信息学科尤其是电子信息与通信学科的长足发展,在规模上、
素质上更好地满足我国信息产业和信息科学技术的发展需要,更好地实现电子信
息与通信学科专业人才的培养目标,推进国内信息产业的发展,中国科学院教材建
设专家委员会和科学出版社组织电子信息与通信领域的院士、专家、教学指导委
员会成员、国家级教学名师及电子信息与通信学科院校的相关领导等组成编委会,共
同组织编写这套《中国科学院电子信息与通信系列规划教材》。

本套教材主要面向全国范围内综合性院校电子信息工程、通信工程、信息工程
等相关专业的本科生。本套教材的编委会成员具有国内电子信息与通信方面的较
高学术水平,他们负责对本套教材的编写大纲及内容进行审定,可使本套教材的质
量得以保证。

本套教材主要有以下几方面的特点:

1. 适应多层次的需要。依据最新专业规范,系列教材主要根据教育部最新公
布的电子信息与通信学科相关专业的“学科专业规范”和“基础课程教学基本要求”

进行教材内容的安排与设置。同时,根据各类型高校学生的实际需要,编写不同层次的教材。

2. 结构体系完备。本套教材覆盖本科、研究生教学层次,各门课程的知识点之间相互衔接,以便完整掌握学科基本概念、基本理论,了解学科整体发展趋势。

3. 作者水平较高。我们将邀请设有电子、通信国家重点学科的院校,以及国家级、省级教学名师或国家级、省级精品课程负责人编写教材。

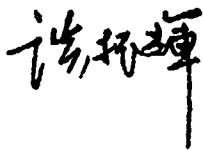
4. 借鉴国外优秀教材。编委会为每门课程推荐一本国外相关的经典原版教材,作为教师编写的参考书。

5. 理论与实际相结合,加强实践教学。教材编写注重案例和实践环节,着力于学生实际动手能力的培养。

6. 教材形式多样。本套教材除主教材外,还配套有辅导书、教师参考书、多媒体课件、习题库及网络课程等。

根据电子信息与通信学科专业发展的战略要求,我们将对本套系列教材不断更新,以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子信息与通信领域教育及教材建设的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议。

北京交通大学校长



2005年10月

序

多年来我们一直采用“现代文明”这样的说法,不过,现在对它的理解应该不再是指工业而是指信息通信文明,是继农业文明、工业文明之后的人类文明的第三个层次。

古老的通信文明建立在文字、语言、纸张和印刷术的基础之上,伴随着农业文明的建设而逐渐发展和成熟,已经有几千年的历史。近代的通信文明是随着工业文明而兴起的,它以电报、电话的发明应用和邮政网络的建立为标志,也历经 170 年了。

自从有电脑、集成电路、卫星、激光、光纤、因特网和移动通信,人类就进入了一个新的信息通信文明的建设阶段。

信息通信文明的核心内涵是信息通信技术无处不在的应用,并因此使得生产力、经济竞争力极大地提高;再者,从事信息通信技术相关职业的劳动人口将会多于工农业劳动人口之和;还有,全体社会成员,个人、家庭或单位,都将实现宽带网络连接。

虽然人类信息通信文明的建设才刚刚开始几十年,却表现出在各个方面改变社会的强大冲击力。它将把人类从简单重复的脑力劳动中解放出来,它会影响人类的思维方式,改变人类的生活习惯和经济活动方式,对于社会的组织结构乃至国际关系也会产生深远影响。

今天走进大学校门的年轻人很幸福,他们在一生中能够享受到人类信息通信文明的全部成果。

今天决心投身于信息通信技术的大学生、研究生任重道远。因为,存在的知识库已经是浩如烟海,未知的世界更是广袤无垠。相信在你们面前打开的这本书将会带你们进入信息通信的学术大厦,走进其中一个重要的殿堂。

作者李玉权教授是我国知名的光波微波通信专家,2004 年他被评为全国优秀教师,这份荣誉他当之无愧。现在他又以自己二十多年的教学经验和诸多科研成果为基础,花费一年多时间,完成这部著作,以此奉献给青年学子。这种治学态度值得我们同龄的大学教师学习;更希望年轻的读者懂得,如果愿意将信息通信技术选为终身职业,如果想要学有所成,你首先应当具备这种精神。

北京邮电大学校长



2005 年 11 月

前 言

20 世纪 60 年代初问世的激光技术为大容量通信提供了优良的载波,直接推动了现代光通信的研究热潮。早期的激光通信系统将光信号发送到大气中传播,由于大气信道的不稳定性,系统性能受到严重影响,另外光束的视距传播特性也使其应用受到严重限制,因此与载波通信相比,光通信并无优势可言,发展也受到严重制约。直到 20 世纪 70 年代低损耗光纤的问世,光通信发展才进入快车道。得益于光纤,特别是单模光纤这种优良的传输介质,光通信理论上的优势才真正转换为现实应用中的优势。与早期的大气激光通信发展缓慢相比较,光纤通信的发展可以说是日新月异,毫无争议地成为了光通信的主流,并且在短短的二十年之后几乎完全取代了与之竞争的电缆载波通信,成为固定通信网干线中最主要的传输技术。在光纤通信取代载波通信的同时,近年来,随着有/无源光器件研究水平的提高,光通信研究人员又把目光瞄向了微波通信一直占据的宽带无线通信领域,并且注意到空间激光通信应用于宽带无线接入网、宽带星间链路和对潜水下通信等方面的可能性及其价值,推动了对空间光通信的又一轮研究热潮。光通信技术也已成为高等学校电子信息类专业最重要的专业课程之一。编著本书的目的就是要为通信工程专业及相近专业的高年级本科生提供一本系统讲述光通信基本原理和关键技术的教科书。本书的作者自 20 世纪 80 年代末以来一直在解放军通信工程学院为本科生或研究生讲授《光纤通信》、《SDH 原理与技术》、《光纤传输理论》、《非线性光纤光学》等课程,承担了多个国家自然科学基金、江苏省自然科学基金、国防预研基金等有关光通信的研究项目,取得了一些研究成果。本书就是根据作者近年的授课讲稿和部分研究成果写成的。

本书的第 1 章是对光通信的概略介绍,目的是使读者在系统、深入地学习光通信技术之前对光通信的发展历史、光通信系统的构成、主要的光通信器件及关键技术有一个大致的了解。第 2 章介绍光波导中光传播的基本原理,包括光波导的几何光学分析方法和模式理论。第 3 章介绍光纤的传输特性,包括光纤的损耗特性、色散特性以及非线性特性。第 4 章介绍光通信中所用到的主要器件,包括光源、光放大器、光检测器等有源器件和连接器、耦合器、波分复用器、调制器等无源器件。第 5 章主要介绍强度调制/直接检测光通信系统的构成、系统设计原则以及各种实际的光通信系统,包括模拟系统和数字系统。为了拓展学生的知识面,本章同时还以相当的篇幅介绍了相干光通信系统和光孤子通信系统。第 6 章介绍光网络,包括目前运行的 SDH 光传送网、WDM 光传送网以及未来的智能光网络、分组交换

光网络、光突发交换网络和光接入网。第7章介绍大气激光通信技术,包括激光束在大气中的传输特性、大气激光通信系统中常用的光器件及系统的构成。第8章介绍卫星间激光通信系统所涉及的关键技术及系统构成,重点是光学天线技术和PAT技术。第9章介绍水下激光通信技术,包括激光在海水信道中的传播特性、蓝光激光器、对潜激光通信系统等内容。

近年来国内出版的光通信教材相当多,这些著作都把注意力放在光纤通信上,很少系统地讲述空间光通信的内容。毫无疑问,这是正确的选择,因为30多年来光纤通信就是光通信的主体。最近几年无线光通信技术正在快速发展,一方面,近地的大气激光通信作为宽带无线接入手段受到业界重视;另一方面,地球外层空间光通信、对潜水下光通信也因其潜在的军事应用价值而备受关注。为了反映光通信的这一重要组成部分,本书用三章的篇幅讲述无线光通信技术的基础知识。相对于卫星间激光通信及水下激光通信技术,大气激光通信技术更为成熟,而且应用领域更宽一些,所以可以将大气激光通信技术作为教学的基本内容。卫星间激光通信及水下激光通信技术目前离实用尚有一定距离,而且主要应用领域是军事通信,尤其是水下激光通信主要是为解决对潜通信困难而提出的通信手段,这两部分内容任课教师可以根据课时情况以及教学要求选用。本书的部分内容对于本科生教学可能偏深一些,我们在标题中加上了“*”号,在课程实施中可以跳过。跳过这些带“*”号的内容,不会影响课程的连续性。

本书的第1~3章由李玉权执笔,第4~6章由王江平执笔,第7~9章由朱勇执笔。全书由李玉权统校。闻传花、苏洋帮助绘制了本书的部分图表,对他们所付出的辛勤劳动,在此向他们致以深切的谢意。

北京邮电大学校长、国际著名的光通信专家林金桐教授在百忙中为本书写序,对此向林教授致以最诚挚的谢意。

光通信技术涉及通信理论、光学、半导体物理与器件、微波理论与技术等学科领域的基础理论和专业知识。本书的作者尽管有多年从事电磁场理论、微波技术、光波导理论、光纤通信、通信网络等领域的教学科研工作经历,但毕竟学识有限,书中必有不妥乃至错误之处,敬请广大读者提出宝贵意见。

作 者

目 录

丛书序

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 光通信发展的技术背景	1
1.2 现代光通信技术的产生和发展	2
1.3 光通信系统的构成及其关键技术	5
1.3.1 光纤	6
1.3.2 光源和光发送机	8
1.3.3 光检测器和光接收机	9
1.3.4 空间光通信系统中的光学系统	11
1.3.5 光电集成和光集成技术	11
1.4 光通信技术发展展望	12
小结	13
思考题与习题	13
第 2 章 光纤传输原理	14
2.1 电磁场理论基础	14
2.1.1 电磁场基本方程	14
2.1.2 电磁场边界条件	15
2.1.3 波动方程和亥姆霍兹方程	17
2.1.4 均匀平面电磁波	18
2.1.5 平面电磁波的偏振状态	19
2.1.6 平面波的反射和折射	19
2.2 电磁波理论的短波长极限——几何光学理论	21
2.2.1 几何光学的基本方程——Eikonal 方程	21
2.2.2 光线传播的路径方程	22
2.3 光纤中光信号传输的几何光学解释	24
2.3.1 阶跃光纤中光线的传播	24
2.3.2 梯度光纤中光线的传播	28
2.4 阶跃光纤中的矢量模	31

2.4.1 光纤波导中的电磁场方程	32
2.4.2 阶跃光纤中的电磁场解	33
2.4.3 传播模式分类	37
2.4.4 模式的截止参数和单模传输条件	38
2.4.5 传播模的色散曲线	41
2.4.6 导波模的场形图	42
2.5 阶跃光纤中的 LP 模	43
2.5.1 线偏振模场解	43
2.5.2 线偏振模的特征方程及截止参数	44
2.5.3 LP_{mn} 模与矢量模之间的对应关系	45
2.5.4 LP_{mn} 模的场分布及功率分布	46
2.6 传播模式的一般特性	48
2.6.1 传播模式数量	48
* 2.6.2 理想波导中模式的正交性和完备性	49
* 2.6.3 非理想波导中模式的耦合	49
2.7 单模光纤	50
2.7.1 单模条件和截止波长	51
2.7.2 工作模特性	51
2.7.3 单模光纤的双折射	53
小结	57
思考题与习题	57
第 3 章 光纤的传输特性	60
3.1 光纤的损耗	60
3.1.1 石英玻璃光纤的损耗	61
3.1.2 其他类型光纤的损耗	63
3.1.3 弯曲损耗	63
3.1.4 损耗测量	64
3.2 光纤的色散	65
3.2.1 色散机理	65
3.2.2 材料色散	68
3.2.3 波导色散	71
3.2.4 模式色散	73
3.3 单模光纤的色散及单模光纤的分类	74
3.3.1 色散系数	74
3.3.2 单模光纤分类	75

3.3.3 偏振模色散	78
3.4 色散对通信的影响及对策	79
3.4.1 色散对通信容量的限制	79
* 3.4.2 色散补偿	81
3.5 单模光纤的非线性特性	85
3.5.1 光纤的非线性折射率	85
3.5.2 自相位调制	86
3.5.3 四波混频	88
3.5.4 受激拉曼散射	90
3.5.5 受激布里渊散射	93
小结	94
思考题与习题	94
第4章 光通信器件	97
4.1 物质与光之间的相互作用	97
4.1.1 光的波粒二象性	97
4.1.2 原子的能级和半导体的能带	97
4.1.3 物质与光的相互作用	98
4.2 半导体发光二极管	100
4.2.1 半导体 PN 结的能带结构	100
4.2.2 发光二极管的结构	102
4.2.3 发光二极管的工作特性	104
4.3 半导体激光器	107
4.3.1 半导体激光器的基本结构及阈值条件	107
4.3.2 半导体激光器的选频单元——F-P 型光学谐振腔	108
4.3.3 半导体激光器的工作特性	112
4.3.4 窄线宽激光器	117
4.4 光放大器	118
4.4.1 半导体激光放大器	118
4.4.2 掺铒光纤放大器	120
4.4.3 拉曼光纤放大器	123
4.5 光检测器	124
4.5.1 光检测器的工作原理及特性	125
4.5.2 PIN 型光检测器	127
4.5.3 雪崩光电二极管	128
4.6 光纤连接器及定向耦合器	130

4.6.1 光纤连接器	130
4.6.2 定向耦合器	132
4.7 波分复用、解复用器	135
4.7.1 光波分复用、解复用器的性能参数	135
4.7.2 复用、解复用器的原理和结构	136
* 4.8 光调制器	139
4.8.1 电光调制器	139
4.8.2 电吸收调制器	140
* 4.9 光滤波器、光开关和光隔离器	140
4.9.1 光滤波器	140
4.9.2 光开关	142
4.9.3 光隔离器	143
小结	143
思考题与习题	144
第5章 光纤通信系统	146
5.1 光发送机	146
5.1.1 光发送机的基本组成及指标	146
5.1.2 光源的调制	147
5.1.3 模拟光发送机与数字光发送机的驱动电路	149
5.2 光接收机	154
5.2.1 光接收机的构成及其主要性能指标	154
5.2.2 前置放大器	155
5.2.3 光接收机的噪声	157
5.2.4 光接收机的信噪比	160
5.2.5 数字光接收机的灵敏度	162
5.3 系统设计	165
5.3.1 数字光纤通信系统构成	166
5.3.2 数字系统的设计	168
5.3.3 模拟系统的设计	171
5.4 PDH 光通信系统	175
5.4.1 PDH 的帧结构	175
5.4.2 PDH 的信号速率等级	176
5.4.3 PDH 的复用技术	178
5.4.4 PDH 的码速调整	179
5.4.5 PDH 光纤通信系统的组成	180

5.4.6 PDH 的缺点	181
5.5 SDH 光通信系统	182
5.5.1 SONET 和 SDH 的起源	182
5.5.2 SDH 的复用	183
5.5.3 SONET/SDH 帧结构	185
5.5.4 我国采用的复用结构	190
5.5.5 SDH 设备	190
5.6 波分复用系统	191
5.6.1 波分复用系统的基本原理	191
5.6.2 SDH 与 WDM 的关系	195
5.6.3 WDM 的关键技术	196
*5.7 相干光通信系统	198
5.7.1 相干通信技术的基本原理	199
5.7.2 相干系统的光调制	200
5.7.3 相干解调	201
5.7.4 相干光系统的关键技术	204
*5.8 光孤子通信系统	205
5.8.1 光纤孤子及其特性	205
5.8.2 光纤损耗与能量补偿	206
5.8.3 光孤子通信系统的基本组成	209
小结	210
思考题与习题	211
第 6 章 光网络	212
6.1 SDH 传送网络	213
6.1.1 SDH 传送网分层模型	213
6.1.2 SDH 传送网物理拓扑结构	215
6.1.3 SDH 传送网的保护方法	216
6.1.4 SDH 的网络结构	224
6.2 WDM 光传送网	225
6.2.1 光传送网络模型	225
6.2.2 光传送网的分层结构(G.872)	227
6.2.3 光传送网的层间适配	229
6.2.4 WDM 光传送网的波长路由机制	231
6.2.5 WDM 光传送网的节点功能和结构	232
*6.3 光分组交换网络	238

6.3.1 光分组交换的概念、特点及应用	238
6.3.2 光分组交换网络结构的协议参考模型	241
6.3.3 光分组的格式	243
6.3.4 光分组交换网节点的结构与分类	244
* 6.4 智能光网络	251
6.4.1 智能光网络的基本概念	251
6.4.2 ASON 网络体系结构	253
6.4.3 ASON 控制平面结构	259
6.4.4 ASON 控制平面协议和功能模块的实现	262
6.4.5 ASON 的管理平面技术	267
6.4.6 ASON 的传送平面技术	268
6.4.7 ASON 的发展展望	273
* 6.5 光突发交换网络	273
6.5.1 光突发交换的基本概念	274
6.5.2 光突发交换系统结构和网络模型	275
6.5.3 光突发交换网的节点结构和关键技术	278
6.6 光接入网	284
6.6.1 光接入网概述	285
* 6.6.2 基于 ATM 的无源光网络 APON	289
* 6.6.3 基于以太网的无源光网络 EPON	295
* 6.6.4 基于 GSR(gigabit service requirements)的无源光网络 GPON	300
小结	306
思考题与习题	307
第 7 章 大气激光通信	309
7.1 概述	309
7.1.1 大气激光通信的研究进展	309
7.1.2 大气激光通信的应用优势	311
7.1.3 大气激光通信面临的主要问题	311
7.2 激光在大气信道中的传播特性	312
7.2.1 大气的特点	312
7.2.2 大气对激光束传播的影响	312
* 7.2.3 大气信道模型	315
7.3 用于大气激光通信的关键器件和技术	319
7.3.1 半导体光源	320
7.3.2 半导体光源的光学准直	327

7.3.3 窄带光学滤波器	329
7.3.4 光学天线	331
*7.3.5 自适应光学(AO)技术	336
*7.3.6 Turbo 码技术	340
7.4 调制方式	343
7.4.1 单脉冲脉位调制	343
7.4.2 差分脉位调制	344
7.4.3 多脉冲 PPM 调制	345
7.4.4 解调及比较	346
7.5 大气激光通信系统	346
7.5.1 系统框图	347
7.5.2 系统各单元功能	348
7.5.3 大气激光通信中其他问题的考虑	351
7.5.4 大气激光通信端设备实例	352
7.6 大气激光通信的应用	356
7.6.1 应用场合	356
7.6.2 组网应用	357
小结	358
思考题与习题	358
第 8 章 星间激光通信	360
8.1 概述	360
8.1.1 卫星通信系统简介	360
8.1.2 星间激光通信的提出及其优势	361
8.1.3 星间激光通信的发展现状	361
8.1.4 星间激光通信系统构成	364
8.2 星间激光链路的种类	365
8.2.1 GEO-LEO 激光链路	365
8.2.2 GEO-GEO 激光链路	366
8.2.3 LEO-LEO 激光链路	366
8.2.4 星地激光链路	367
8.3 光学天线	367
8.3.1 自由空间损耗	367
8.3.2 光学天线增益	368
8.3.3 星间激光通信中的光学天线	368
8.3.4 卡塞格伦式光学天线分析	370

8.4 PAT 子系统	373
8.4.1 光束发散角	373
8.4.2 瞄准误差与天线增益的关系	374
8.4.3 星间激光通信中的 PAT 子系统	375
8.4.4 PAT 中的误差检测器件	377
8.4.5 PAT 中的光束方向调整装置	380
8.4.6 PAT 子系统的工作原理	381
8.4.7 PAT 子系统的性能参数	385
8.4.8 一种典型的 PAT 子系统结构	387
8.5 通信子系统	389
8.5.1 通信子系统构成	389
8.5.2 IM/DD 系统性能分析	390
*8.5.3 相干光通信系统性能分析	392
*8.5.4 卫星振动对系统性能的影响	393
*8.6 多普勒效应的影响	396
8.6.1 光波的多普勒频移	396
8.6.2 星间激光链路的多普勒频移分析	397
8.6.3 对系统的影响及对策	399
*8.7 两种星间激光通信系统简介	402
8.7.1 SILEX	402
8.7.2 ETS-VI/LCE	405
小结	409
思考题与习题	409
第9章 水下激光通信	411
9.1 概述	411
9.1.1 水下光通信的提出	411
9.1.2 对潜激光通信的研究进展	412
9.2 海水信道	412
9.2.1 海水的透射光谱特性	412
9.2.2 海水对激光束传播的影响	413
9.2.3 海水信道特性	414
9.3 光源技术	417
9.3.1 对光源的基本要求	417
9.3.2 固体蓝光激光器	418
*9.4 对潜蓝绿激光通信系统	425