



普通高等教育**电子通信类**国家级特色专业系列规划教材

光通信原理与技术

(第二版)

朱 勇 王江平 卢 麟 编著
李玉权 主审



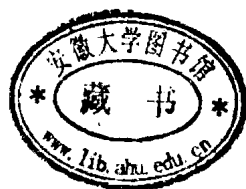
科学出版社

普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材

光通信原理与技术

(第二版)

朱 勇 王江平 卢 麟 编著
李玉权 主审



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及所涉及的关键技术的概要介绍,第2~3章介绍光纤及无源光器件的原理和特性,第4~5章介绍光发送机和光接收机的重要器件和构成,第6~7章则讲述了光纤通信系统和光网络的相关知识,第8~10章讲述无线光通信,包括大气激光通信、星间光通信和 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、电子工程及相关专业本科生的教材,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/朱勇,王江平,卢麟编著.—2版.—北京:科学出版社,2011

(普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材)

ISBN 978-7-03-032194-7

I. ①光… II. ①朱…②王…③卢… III. ①光通信-高等学校-教材
IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 174479 号

丛书策划:匡敏 潘斯斯

责任编辑:潘斯斯 张丽花/责任校对:李影

责任印制:张克忠/封面设计:迷底书装

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>

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011年7月第 二 版 印张:23 1/4

2011年7月第六次印刷 字数:555 000

印数:8 001—11 500

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

《光通信原理与技术》一书第一版于2006年6月在科学出版社出版,至今已有5年,承蒙读者厚爱,5年间本书曾多次重印,并被评为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。根据使用本书教师的反馈和作者自身的教学体会,今在第一版基础上调整章节结构、增减讲述内容,形成第二版。

第二版内容如下。

1. 为避免冗长的理论推导,将第一版中第2、3章的内容合并,缩减成一章(第2章),减少了电磁场基础理论方面的讲述,增加了光纤光缆制造的内容。

2. 第一版将有源光器件和无源光器件在同一章中讲授,考虑到无源光器件的应用越来越多且与有源光器件在原理上有很大的差异,第二版对其进行了区分,专列第3章讲述无源光器件,并增加了光隔离器、光环行器和光纤光栅等内容。

3. 为加强教学内容中的关联性,将有源光器件(包括光源、光放大器和光电检测器)的内容分别放在第4章和第5章中,与光端机一同介绍。

4. 在光纤通信系统一章(第6章)中增加了线路编码内容。

5. 在光网络一章(第7章)中,为加强教学中对光网络总体的把握,新增对光网络的概念的综述,考虑到APON已无实际应用和发展,删除了光接入网小节中对APON的详细介绍。

6. 近年来对紫外日盲波段的大气散射光通信研究较热,因此在大气激光通信一章(第8章)中,增加了紫外散射光通信的相关内容,主要包括对散射信道模型的介绍和对紫外光通信中常用的光检测器的介绍。

7. 在星间激光通信一章(第9章)中,在PAT子系统小节中增加了跟踪残差与等效光功率损耗及发送天线优化内容,增加了短时可用性性能评估方法一节,这些内容是作者近年来在卫星光通信方面的研究成果。由于作者认为振动对卫星光通信的影响不能简单地通过误码性能考察,故本书删除了通信子系统一节中关于振动对系统性能影响的介绍。

本书第二版的第1、2章由李玉权执笔改写,第3~5章由卢麟执笔改写,第6、7章由王江平执笔改写,第8~10章由朱勇执笔改写,其中紫外散射光通信相关内容由徐智勇执笔完成。作者所在单位的教师苏洋和研究生孙晓霞、刘晔等对本书修改也有颇多贡献,在此一并感谢。

本书涉及的学科和基础知识颇广,作者一隅之得,不免偏颇,其中不妥乃至错误之处,敬请广大读者提出宝贵意见。

作 者

2011年6月

第一版序

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

第一版前言

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、微波理论与技术等多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
2006年4月

目 录

第二版前言

第一版序

第一版前言

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	4
1.3.1 光纤	5
1.3.2 光源和光发送机	7
1.3.3 光检测器和光接收机	8
1.3.4 空间光通信系统中的光学系统	9
1.3.5 光电集成和光集成技术	9
1.4 光通信技术发展展望	10
小结	11
思考题与习题	11
第 2 章 光纤传输原理与传输特性	12
2.1 光纤概述	12
2.1.1 光纤的结构	12
2.1.2 光纤的分类	12
2.2 光纤传输的几何光学分析方法	13
2.2.1 光线在不同媒质分界面上的反射和折射	14
2.2.2 阶跃光纤中光线的传播	14
2.2.3 梯度光纤中光线的传播	17
2.3 阶跃光纤的模式理论	19
2.3.1 光纤波导中的电磁场方程	19
2.3.2 阶跃光纤中的电磁场解	20
2.3.3 传播模式分类	22
2.3.4 模式的截止参数和单模传输条件	23
2.3.5 传播模的色散曲线	26
2.3.6 导波模的场形图	26
2.3.7 LP 模	28
2.3.8 传播模式的一般特性	30
2.4 单模光纤	32
2.4.1 单模条件和截止波长	32

2.4.2 工作模特性	33
2.4.3 单模光纤的双折射	34
2.5 光纤的损耗	37
2.5.1 损耗的概念及其表述	37
2.5.2 石英光纤的损耗	37
2.5.3 其他类型光纤的损耗	39
2.5.4 弯曲损耗	40
2.5.5 损耗测量	40
2.6 光纤的色散	41
2.6.1 色散的概念	41
2.6.2 材料色散	43
2.6.3 波导色散	46
2.6.4 模式色散	47
2.6.5 单模光纤色散	48
2.6.6 色散对通信容量的影响	52
2.6.7 色散补偿	54
2.7 光纤的非线性特性	57
2.7.1 光纤的非线性折射率	57
2.7.2 自相位调制	58
2.7.3 四波混频	59
2.7.4 受激拉曼散射	61
2.7.5 受激布里渊散射	63
2.8 光纤的制造和光缆	64
2.8.1 预制棒的制备	64
2.8.2 光纤的拉制	65
2.8.3 光缆	67
小结	68
思考题与习题	68
第3章 无源光器件	71
3.1 光纤连接器及定向耦合器	71
3.1.1 光纤连接器	71
3.1.2 定向耦合器	74
3.2 波分复用及解复用器	76
3.2.1 光波分复用及解复用器的性能参数	76
3.2.2 复用及解复用器的原理和结构	77
3.3 光调制器与光开关	79
3.3.1 电光调制器	79
3.3.2 电吸收调制器	80
3.3.3 声光调制器	80

3.3.4 光开关	81
3.4 光隔离器和光环行器	81
3.5 光纤布拉格光栅	82
3.5.1 光纤布拉格光栅的光学特性	83
3.5.2 光纤布拉格光栅滤波器	84
3.5.3 光纤布拉格光栅色散补偿器	86
3.5.4 光码分复用编解码器	87
小结	88
思考题与习题	88
第4章 光源与光发送机	89
4.1 物质与光之间的相互作用	89
4.1.1 光的波粒二象性	89
4.1.2 原子的能级和半导体的能带	89
4.1.3 物质与光的相互作用	90
4.2 半导体发光二极管	91
4.2.1 半导体 PN 结的能带结构	92
4.2.2 发光二极管的结构	93
4.2.3 发光二极管的工作特性	94
4.3 半导体激光器	97
4.3.1 半导体激光器的基本结构及阈值条件	97
4.3.2 半导体激光器的选频单元——F-P 型光学谐振腔	98
4.3.3 半导体激光器的工作特性	101
4.3.4 窄线宽激光器	105
4.4 光放大器	106
4.4.1 半导体光放大器	106
4.4.2 掺铒光纤放大器	107
4.4.3 拉曼光纤放大器	110
4.5 光发送机的基本组成及指标	111
4.5.1 光源的调制	112
4.5.2 模拟光发送机与数字光发送机的结构	113
小结	118
思考题与习题	118
第5章 光检测器与光接收机	120
5.1 光检测器	120
5.1.1 光检测器的工作原理及特性	120
5.1.2 PIN 型光检测器	122
5.1.3 雪崩光电二极管	122
5.2 光接收机	124
5.2.1 光接收机的构成及其主要性能指标	124

5.2.2	前置放大器	126
5.2.3	光接收机的噪声	127
5.2.4	光接收机的信噪比	129
5.2.5	数字光接收机的灵敏度	131
	小结	133
	思考题与习题	134
第6章	光纤通信系统	135
6.1	模拟光纤通信系统	135
6.1.1	模拟调制方式	135
6.1.2	模拟系统的主要性能指标	137
6.1.3	模拟系统设计举例	137
6.2	数字光纤通信系统的基本概念	140
6.2.1	数字光纤通信系统的构成	141
6.2.2	数字光纤通信系统的性能指标	142
6.2.3	数模转换—脉冲编码调制	142
6.2.4	数字传输体制	143
6.3	准同步数字系列	143
6.3.1	PDH 的帧结构	144
6.3.2	PDH 的速率等级	145
6.3.3	PDH 的复用技术	146
6.3.4	PDH 的码速调整	147
6.3.5	PDH 光纤传输系统的组成	148
6.3.6	PDH 的缺点	149
6.4	同步数字系列	150
6.4.1	SONET 和 SDH 的起源	150
6.4.2	SDH 的复用	151
6.4.3	SONET/SDH 帧结构	152
6.4.4	我国采用的复用结构	156
6.4.5	SDH 设备	157
6.5	线路编码	157
6.5.1	分组码	158
6.5.2	扰码	158
6.5.3	前向纠错编码	159
6.6	数字光链路设计	159
6.6.1	链路的功率预算	159
6.6.2	色散系统的上升时间预算	160
6.7	波分复用系统	162
6.7.1	波分复用系统的基本概念	162
6.7.2	SDH 与 WDM 的关系	165

6.7.3 WDM 的关键技术及其面对的主要问题	166
6.8 相干光通信系统	167
6.8.1 相干光通信的基本原理	168
6.8.2 相干系统的光调制	169
6.8.3 相干检测	170
6.8.4 相干光系统的关键技术	172
6.9 光孤子通信系统	173
6.9.1 光纤孤子及其特性	173
6.9.2 光纤损耗与能量补偿	175
6.9.3 光孤子通信系统的基本组成	177
小结	178
思考题与习题	178
第 7 章 光网络	180
7.1 光网络的基本概念及构成	180
7.1.1 光网络的基本概念	180
7.1.2 光网络的基本构成	182
7.2 SDH 传送网	183
7.2.1 SDH 传送网分层模型	183
7.2.2 SDH 传送网物理拓扑结构	185
7.2.3 SDH 传送网的保护方法	186
7.2.4 SDH 的网络结构	192
7.3 光传送网	193
7.3.1 光传送网的分层结构	194
7.3.2 光传送网的接口结构	196
7.3.3 光传送网设备	201
7.4 智能光网络	209
7.4.1 智能光网络的基本概念	209
7.4.2 ASON 网络体系结构	210
7.4.3 ASON 的传送平面技术	215
7.5 光突发交换网络	217
7.5.1 光突发交换的基本概念	218
7.5.2 光突发交换系统结构和网络模型	219
7.5.3 光突发交换网的节点结构和关键技术	221
7.6 光分组交换网络	225
7.6.1 光分组交换的概念、特点及应用	226
7.6.2 光分组交换网结构的协议参考模型	228
7.6.3 光分组的格式	229
7.6.4 光分组交换网节点的基本结构	230
7.7 光接入网	231

7.7.1 光接入网概述	231
7.7.2 基于以太网的无源光网络	234
7.7.3 GPON	237
小结	239
思考题与习题	239
第8章 大气激光通信	241
8.1 概述	241
8.1.1 大气激光通信的研究进展	241
8.1.2 大气激光通信的应用优势	243
8.1.3 大气激光通信面临的主要问题	243
8.2 激光在大气信道中的传播特性	244
8.2.1 大气的特点	244
8.2.2 大气对激光束传播的影响	244
8.2.3 大气信道模型	248
8.3 用于大气激光通信的关键器件和技术	253
8.3.1 半导体光源	253
8.3.2 光检测器	259
8.3.3 半导体光源的光学准直	260
8.3.4 窄带光学滤波器	262
8.3.5 光学天线	263
8.3.6 自适应光学技术*	268
8.3.7 Turbo 码技术*	270
8.4 调制方式	273
8.4.1 单脉冲脉位调制	273
8.4.2 差分脉位调制	274
8.4.3 多脉冲 PPM 调制	275
8.4.4 解调及比较	275
8.5 大气激光通信系统	276
8.5.1 系统框图	277
8.5.2 系统各单元功能	277
8.5.3 大气激光通信中其他问题的考虑	279
8.5.4 大气激光通信端设备实例	281
8.6 大气激光通信的应用	284
8.6.1 应用场合	284
8.6.2 组网应用	285
小结	286
思考题与习题	286
第9章 星间激光通信	288
9.1 概述	288

9.1.1	卫星通信系统简介	288
9.1.2	星间激光通信的提出及其优势	289
9.1.3	星间激光通信的发展现状	289
9.1.4	星间激光通信系统构成	291
9.2	星间激光链路的种类	292
9.2.1	GEO-LEO 激光链路	292
9.2.2	GEO-GEO 激光链路	293
9.2.3	LEO-LEO 激光链路	293
9.2.4	星地激光链路	293
9.3	光学天线	294
9.3.1	自由空间损耗	294
9.3.2	光学天线增益	294
9.3.3	星间激光通信中的光学天线	295
9.3.4	卡塞格伦式光学天线分析	296
9.4	PAT 子系统	299
9.4.1	光束发散角	299
9.4.2	瞄准误差与天线增益的关系	300
9.4.3	星间激光通信中的 PAT 子系统	300
9.4.4	PAT 中的误差检测器件	302
9.4.5	PAT 中的光束方向调整装置	305
9.4.6	PAT 子系统的工作原理	306
9.4.7	PAT 子系统的性能参数	309
9.4.8	跟踪残差与等效光功率损耗	310
9.4.9	跟踪残差与发送天线的优化	313
9.4.10	一种典型的 PAT 子系统结构	314
9.5	通信子系统	315
9.5.1	通信子系统构成	315
9.5.2	IM/DD 系统性能分析	316
9.5.3	相干光通信系统性能分析	319
9.6	卫星光通信中的“短时可用性”性能评估方法	320
9.6.1	误码率评估方法存在的局限	320
9.6.2	基于“短时可用性”的系统性能评估方法	320
9.6.3	系统“短时可用性”的估计	322
9.6.4	短时可用性评价结论和 BER 评价结论之间的对比	329
9.7	多普勒效应的影响	329
9.7.1	光波的多普勒频移	329
9.7.2	星间激光链路的多普勒频移分析	330
9.7.3	对系统的影响及对策	332
9.8	两种星间激光通信系统简介	334

9.8.1 SILEX	334
9.8.2 ETS-VI/LCE	337
小结.....	340
思考题与习题.....	340
第10章 水下激光通信	341
10.1 概述.....	341
10.1.1 水下光通信的提出	341
10.1.2 对潜激光通信的研究进展.....	341
10.2 海水信道.....	342
10.2.1 海水的透射光谱特性	342
10.2.2 海水对激光束传播的影响.....	342
10.2.3 海水信道特性	344
10.3 光源技术.....	346
10.3.1 对光源的基本要求	346
10.3.2 固体蓝光激光器	347
10.4 对潜蓝绿激光通信系统.....	352
10.4.1 三种对潜激光通信方案	352
10.4.2 陆基系统.....	353
10.4.3 天基系统.....	353
10.4.4 空基系统.....	353
小结.....	354
思考题与习题.....	354
参考文献	355

第 1 章 绪 论

光通信是 20 世纪 70 年代以后发展起来的通信技术。光通信技术的诞生被认为是通信发展史中一次革命性的进步,对人类由工业化社会向信息化社会的演进有着不可估量的推动作用。光通信技术主要涉及光信号的产生、光信号的传输与处理、光信号的检测及组网技术。本章简要介绍光通信产生的技术背景、构成光通信系统的基本单元和光通信技术的发展展望。

1.1 光通信发展的技术背景

通信的发展历史总是与人类文明的发展历史紧密相关。可以认为,人类早期的长途通信手段——烽火台报警通信就是光通信。烽火台通信是现代接力通信的雏形,每个烽火台就是一个通信中继站。当边关有战事时,烽火台点起烽烟,一级接一级地往下传,很快即可将信息送达目的地。当然,这种光通信并非现代意义上的光通信,可以称其为目视光通信。这种通信方式的优点是快速,主要缺点是能传输的信息量太小,烽火无法表达边关战事的具体情况。到了中世纪,这种烽火台通信又得到了改进,人们用不同颜色的烽烟组合来传递较为复杂的信息。目视光通信在 19 世纪达到了它的顶峰。18 世纪末,法国人切普(Chappe)发明了扬旗式通信机(又称为旗语通信机,还有人称其为机械电报机)。在这种通信方式中,每隔数千米设置一塔,塔上装有三块可活动的木板,木板以不同的运动姿态代表不同的信息,各站以接力方式将信息传到目的地,这种通信方式是现代编码通信技术的雏形。扬旗通信在拿破仑时代达到了鼎盛时期,在欧洲架设了数千千米的线路。到了 19 世纪中叶,由于电通信技术的出现,以扬旗通信为代表的目视光通信因其固有的缺点而迅速退出了历史舞台。

1837 年,美国人莫尔斯发明了电报,标志着人类进入了电通信时代。此后,贝尔发明了电话,马可尼、波波夫发明了无线电通信,于是电通信即成为最主要的通信方式。可以说,直到 20 世纪 60 年代,电通信在通信领域都居于绝对主导地位。

电通信是以射频电磁波作为信息载体的通信方式。电通信的容量几乎与所使用的载波频率成正比。随着生产和科学技术的发展,人们对通信容量的要求越来越高,这就促使人们不断地开发利用频率更高的电磁波频段。20 世纪 50 年代,微波通信技术的发展,尤其是 60 年代以后,卫星通信和移动通信的发展将电通信技术推到了一个崭新的阶段。工作于微波频段的卫星通信技术是人类通信史上一个巨大的进步,但微波频段毕竟只有有限的可用频带,它已远远不能满足人类对通信容量的要求,因而开发利用毫米波、亚毫米波,甚至远红外波段就成为通信技术发展的自然趋势。令人遗憾的是,在开发毫米波、亚毫米波,甚至更高频段的电磁波作为信息载体时,人们遇到了一些难以逾越的困难。首先是由于地球周围大气层中的水汽对毫米波、亚毫米波的强烈吸收,大气电磁参数的不稳定,导致毫米波和亚毫米波难以作为信息载体而被有效地利用。其次是亚毫米波乃至更高频段电磁波的产生在理论上和

技术上都有许多难题,不易解决。在毫米波和亚毫米波作为信息载体应用遇到困难的同时,人们很自然地将注意力又聚焦到了光波上。光波频率比毫米波要高得多,利用光波作为信息载体,其潜在的通信容量是传统的电通信手段所无法比拟的。当然,现代意义上的光通信绝对不是先前意义的光通信。

1.2 现代光通信技术的产生和发展

现代意义的空间光通信可以追溯到贝尔研制的光电话。1881年,贝尔发表论文《利用光线进行声音的复制与产生》,该论文介绍了他在1880年研制成功的光学电话。他利用弧光灯作为光源,调制器直接采用话筒的振动膜,将声音转化为光强的变化,调制后的光经大气传输到接收端,由抛物面镜会聚到光电池上,产生强度变化的光电流,驱动听筒发声。贝尔认为这是他最重要的发明。但是,这种光电话因其诸多缺点而没有像他发明的电话一样得到相应的发展。

现代意义的光通信系统,首先必须对光波进行高速调制,使其承载高速数据信息;其次要采取有效措施使之能够长距离传输,在接收端还必须将其准确再现。显然,要实现现代意义上的光通信必须解决两个最为关键的问题,一是可以高速调制的相干性很好的光源,二是光波的长距离可靠传输。直至20世纪50年代,人们所使用的光源都是非相干光源,这种光源所发出光波的频谱极宽,相位和偏振态都是随机的,因而难以对其进行高速调制。1958年,第一台激光器问世,激光器是基于光的受激辐射放大机理制成的相干性极好的光源,这种光源发出的相干光束即可成为高速信息数据的载体。自从激光器问世以后,利用激光束作为信息载体实现宽带通信就成了人们追求的目标。1970年,美国贝尔实验室研制成功在室温下可以连续工作的半导体激光器,为光通信提供了实用化的光源。以大气为传输介质的激光通信技术受到了很多人的关注。但是,光波在大气中传播会受到大气中水汽的强烈吸收,这是人所共知的。光波波长极短,在空间直线传播,任何比光波波长线度大的障碍物都会遮挡光的传播,所以采用类似于无线电波那样的传播方式实现光通信,除了对星间通信系统以外,要在地面上实现长距离传输问题极多,因而大气激光通信技术未能成为主流技术。曾经有人建议,将光波通信系统转入地下,在地下修建光通信线路,光路转弯用反射镜实现,而光束的扩散则用透镜聚焦约束。这种方案原则上是可行的,但其建造成本极高,难以形成实用线路而无实用价值。最好的解决措施就是将光波注入透明的光波导中传输,这种光波导可以由透明介质制成的极细的光学纤维。这种构想早在20世纪初即已由德拜提出,但很可惜的是直到20世纪60年代,用当时最好的光学玻璃制成的光学纤维的损耗高达1000dB/km,用这样的光学纤维显然无法实现光信号的长距离传输。1966年,华裔科学家高锟在他的著名论文中解决了石英光纤损耗的理论问题,指出了研制低损耗光纤的可能性。1970年,美国康宁公司根据高锟的理论研制成功第一根低损耗光纤,从此阻碍光通信发展的两大困难相继得以解决。20世纪70年代以后,光纤通信技术成为主流技术,人类进入了光通信时代。为了褒奖其对人类文明的巨大贡献,高锟无可争议地获得了2009年的诺贝尔物理学奖。

20世纪70年代,由于制约光通信发展的两个主要问题都相继得到了解决,光通信技术即以异乎寻常的速度发展。到20世纪90年代,除了用户线,光纤传输已完全取代了传统的