

姜会林 佟首峰 等编著

空间激光通信 技术与系统

THE TECHNOLOGIES AND SYSTEMS OF
SPACE LASER COMMUNICATION



国防工业出版社

National Defense Industry Press

空间激光通信 技术与系统

**The Technologies and Systems of
Space Laser Communication**

姜会林 佟首峰 张立中 等编著
宋 路 王晓曼 李洪祚

国防工业出版社

·北京·

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评

审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海			
副主任委员	宋家树	蔡 镭	程洪彬	
秘书长	程洪彬			
副秘书长	邢海鹰	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波

序

信息获取和传送是人类社会得以形成和发展的重要因素。早期的信息传送载体主要是声音和光,与声音相比,光通信具有传播速度快,传送距离远和承载信息量大的特点,其发展大体经历了三个阶段。

第一阶段是简易光通信。在军事上的应用已有三千多年的历史,可以追溯到公元前 1184 年希腊攻陷特洛伊城后用夜间点燃的篝火链向 600km 外的国王传送胜利消息。中国在西周王朝期间(公元前 1027 年—公元前 771 年)也已建立烽火告警通信网,遂有史书上周幽王“烽火戏诸侯”的故事并导致西周王朝于公元前 771 年的灭亡。现存遍布我国北方和西北的历代烽火台遗址,实际上就是军事光通信站。后来人们发展了旗语联络,还在江河、港口安置航标灯,用灯光明暗变化速率传递信息等,其中有些延续使用至今。所有这些,都是在人眼的视觉范围内来传递信息,人眼就是光信号的接收器。

第二个阶段是有线光通信(即光纤通信)。1960 年美国科学家梅曼(Meiman)首先发明了红宝石激光器,激光器的问世,为光通信提供了一种理想的通信光源。1966 年,英籍华裔科学家高锟博士发表了《用于光频的光纤表面波导》的文章,提出了用光纤代替电缆,用光波导传输光信息的思想和理论,奠定了光纤通信的基础。1970 年美国康宁公司研制成功低传输损耗石英光纤,加上半导体激光器、高速光接收器件和微电子技术的发展,使光纤通信走向实用化。从此光纤通信迅速发展,现已形成了适应不同用途需要的光通信网络。至 2008 年,我国光缆总长约 577.2 万 km,耗用

光纤 10781 万 km,长途传输网的光纤化比重超过 90%,建成了八纵八横主干光纤网,覆盖全国 85% 以上的县市。

第三个阶段是无线光通信(即空间激光通信)。20 世纪 60 年代以来,随着激光技术以及固体成像、光存储与处理、光学设计与工艺、精密跟踪等技术的发展,出现了宽带、远距离的空间激光通信。已经成功进行了卫星与卫星、卫星与地面、卫星与飞机、飞机与飞机、飞机与地面的空间激光通信演示验证。其中,最具代表性的是 2001 年 11 月实现了法国 SPOT-4 卫星(轨道高度 822km)与欧洲 ARTEMIS 卫星(轨道高度 36000km)之间的激光通信,信息传输速率 50Mb/s,通信距离大于 40000km,2006 年 12 月又实现了 ARTEMIS 卫星与飞机的激光通信,上述卫星激光通信均属世界首次。

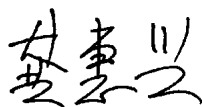
目前,空间激光通信正朝着更宽带宽(5.6Gb/s)、更远距离、更高跟踪精度(微弧度量级)、更窄的激光通信波束方向发展。建立卫星与卫星、卫星与地面以及卫星与飞机之间的激光通信系统,是当今无线光通信技术发展的主要推动力量。与无线电通信相比,空间激光通信具有通信容量大,隐蔽性好不易被截获,方向性好不易被干扰的特点。随着高分辨力对地观测图像信息的星间中继传输和实时对地传输需求的增长,建立星间测控和通信链路以实现卫星组网和在全球范围内的可控运行,以及对飞机远程作业的实时监控和获取信息经卫星中继传输等,迫切需要发展空间激光通信技术并建立相应的运行系统。

空间激光通信系统的研制,涉及轻量化空间光学系统、大功率长寿命半导体激光器,窄波束激光光束的形成,对目标卫星的搜索捕获和精确跟踪,信标光和通信光的隔离,背景光和杂散光的抑制,弱光信号的接收和处理等技术。由于激光通信光束的宽度仅为微弧度量级,卫星平台的姿态稳定水平约几十微弧度/秒,因此,克服平台晃动的影响,对实现两颗高速运动卫星之间连续稳定的激光信息传输至关重要。相信,随着研究工作的深入,我国必将建立自己的空间激光通信系统,并推动我国空间技术和通信技术的

进一步发展。

长春理工大学从事空间激光通信技术研究已有 30 余年历史,经历了从低速率到高速率、从地面到空间、从室内到野外、从静态到动态、从民用到军用的研究和发展历程,形成了研究团队,积累了丰富的知识,取得了许多技术突破。本书是他们在这一新兴技术领域的研究总结,具有理论与实践结合和多学科交叉融合的特点,一定程度上反映了我国在空间激光通信领域取得的科技进步。

本书对从事空间激光通信研究的科技工作者具有参考价值,可供高等学校的研究生、本科生作为学习资料,也可供涉及这一技术的管理人员查阅。



2010 年 10 月 16 日

前 言

由于空间激光通信系统具有宽带、高速、抗截获能力强、抗干扰能力强和轻小型等突出优点,使其非常适合深空、星际、星地、空空、空地等链路通信,因而掀起了空间激光通信研制热潮。经过近30年的快速发展,国际上先后突破了系统的诸多关键技术,研制了多种平台的原理样机,并成功开展了多个链路的演示验证,而且在不断提高系统的工程性能和应用可行性的同时,系统的主要性能指标也在不断提高。此领域所取得的科研成果也促进和推动了相关技术和学科快速发展,使空间激光通信技术成为适应信息社会需求而迅速发展的光电技术学科中一门新兴交叉学科。

本书内容主要建立在编著者及所在科研团队长期从事空间激光通信理论探索、项目研究与研究生教学基础上,对快速发展的空间激光通信技术和复杂的空间激光通信系统进行归纳、分析和总结,不仅重点阐述空间激光通信系统中的基本原理和关键技术,而且比较全面地介绍空间激光通信最新的发展动态与趋势。

全书共分为9章。第1章为绪论,主要阐述空间激光通信系统内涵、特点、研究意义与国内外发展现状,使读者对空间激光通信技术和系统有一个宏观和大致了解;第2章主要对空间激光通信系统各种外界约束条件进行分析,这些内容是确定空间激光通信系统的性能指标和总体设计的前提,它也是区别于光纤通信系统的特点和难点所在,后面几章的分系统设计都需要考虑这些因素影响,包括空间特性、平台特性、背景光特性、信道特性等;第3章重点阐述空间激光通信系统总体设计,并以某一星际激光通信系统为例,对系统性能指标、结构组成、内部重要参数、链路功率等

进行分析,其中包括基本原理和设计原则等,对于其他链路设计具有指导意义;第4章重点对空间激光通信系统中的光学分系统设计进行论述,包括光学总体与系统设计、基台设计、质量评价与装调检测等;第5章重点讨论通信发射与接收分系统的总体技术,包括通信接收模式、编解码技术、调制解调技术、光复用技术等;第6章重点阐述通信发射与接收分系统设计,包括激光光源、调制器、光放大器、探测器、信号处理及通信质量评价等;第7章重点讨论捕获、跟踪、对准分系统中的总体技术,包括快速、高概率捕获技术和高精度、动态跟踪技术;第8章重点对粗精复合轴控制系统进行详细论述,包括粗跟踪伺服转台、粗跟踪成像、粗跟踪伺服控制、精跟踪成像、精跟踪伺服和精跟踪伺服控制等;第9章介绍国外较为成功的3个空间激光通信系统,包括欧空局的SILEX系统、日本的ETS-VI系统和美国的STVR-II系统。这3个系统分别代表不同的国家、不同的链路和不同的外界约束条件,所以在性能指标、系统组成等方面具有较大差异,有助于对前面各章基本理论和系统设计的深入理解。

本书由长春理工大学“空地激光通信技术国防重点学科实验室”全体科研人员集体创作而成。由姜会林教授、佟首峰教授编著;张立中、宋路、王晓曼、李洪祚、刘智、刘云清、付跃刚、杨华民等教授参与了编写工作;尹福昌教授、王志坚教授和梁柱教授提出了宝贵的意见和建议;在文字录入、图表绘制和计算机仿真等工作中得到了赵义武、娄岩、韩成、胡贞、丁莹、胡源、宋延嵩、董科研、唐雁峰、李锐、孟立新、母一宁等博士的大力协助;在此,编著者向他们表示衷心的感谢。本书编著过程中得到许多同行专家的热情鼓励与支持,中国科学院上海技术与物理研究所龚惠兴院士、中国科学院长春光学精密机械研究所王家骥院士和中国科技大学副校长王东进教授在百忙之中为本书审阅和直接指导,龚惠兴院士还特意本书作序,对此表示最诚挚的谢意。最后,感谢国防科技图书出版基金评审委员会的各位委员的大力支持,对国防工业出版社领导及同志们在本书出版中所付出的辛勤劳动表示崇高的敬意。

空间激光通信涉及光学、通信、光电子与控制等多学科领域的基础理论和专业知识,而且发展日新月异,由于作者学识有限,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

2010年10月于长春

目 录

第1章 绪论	1
1.1 空间激光通信内涵	1
1.2 空间激光通信特点	2
1.2.1 空间激光通信的优点	2
1.2.2 空间激光通信的缺点	4
1.3 空间激光通信主要应用领域及研究意义	5
1.4 空间激光通信发展历史、现状与趋势	9
1.4.1 空间激光通信发展历史	9
1.4.2 空间激光通信国外发展现状	10
1.4.3 空间激光通信国内发展现状	20
1.4.4 空间激光通信发展趋势	21
第2章 空间激光通信系统外界约束条件分析	23
2.1 空间激光通信系统描述	23
2.2 搭载平台	24
2.2.1 地球同步轨道卫星	24
2.2.2 低地球轨道卫星	25
2.2.3 临近空间平台	26
2.2.4 航空平台	26
2.2.5 地面/水面平台	26
2.3 平台振动特性分析	27
2.3.1 振动对空间激光通信影响分析	27
2.3.2 振动源特性描述	28

2.3.3	抑制平台振动的有效方法	30
2.4	平台运动特性分析	30
2.4.1	初始对准方式	30
2.4.2	工作死区	31
2.4.3	链路距离及跟踪角度范围	32
2.4.4	相对运动角速度和角加速度	34
2.4.5	提前量范围	36
2.4.6	多普勒频移	37
2.5	天空背景光特性分析	39
2.5.1	背景光模型	39
2.5.2	背景光辐射谱	41
2.5.3	主要点辐射源	41
2.5.4	主要面背景光	43
2.6	大气信道特性分析	46
2.6.1	大气吸收	46
2.6.2	大气散射引起光功率平均衰减	47
2.6.3	大气散射多路径效应	51
2.6.4	大气湍流散斑	51
2.6.5	大气湍流闪烁	52
2.7	云层特性分析	54
2.8	空间环境特性分析	55
2.8.1	空间温度与气压分布	55
2.8.2	空间辐射	59
2.9	空间激光通信链路特性分析	61
2.9.1	星际激光通信	62
2.9.2	星地激光通信	63
2.9.3	星空激光通信	63
2.9.4	空空/空地/地面激光通信	64

第3章 空间激光通信系统总体设计	65
3.1 空间激光通信光端机系统构成	65
3.1.1 光学机械分系统	66
3.1.2 通信分系统	66
3.1.3 捕获、跟踪、对准分系统	67
3.1.4 总控分系统	68
3.2 空间激光通信光端机工作原理	68
3.3 空间激光通信系统工作流程	71
3.3.1 初始指向	72
3.3.2 快速捕获	73
3.3.3 粗、精跟踪	74
3.3.4 动态通信	74
3.4 空间激光通信系统主要任务指标	74
3.4.1 通信距离	75
3.4.2 通信误码率	75
3.4.3 通信速率	76
3.5 空间激光通信系统主要参数优化选取	77
3.5.1 波长	77
3.5.2 光学口径	78
3.5.3 通信束散角	78
3.6 空间激光通信系统链路功率分析	81
3.6.1 通信链路传输方程模型	82
3.6.2 粗跟踪/捕获链路功率分析	88
3.6.3 精跟踪链路功率分析	90
第4章 光学分系统设计	92
4.1 光学分系统总体分析	92
4.1.1 使用要求	92
4.1.2 结构形式确定	92

4.1.3	口径计算	93
4.1.4	发散角和视场角计算	94
4.2	光学分系统光学设计	96
4.2.1	材料性能与选择	96
4.2.2	卡式系统设计	98
4.2.3	中继光学系统设计	98
4.2.4	系统消杂光设计	100
4.2.5	激光束整形与扩束	102
4.3	光学分系统基台设计	109
4.3.1	主望远镜的结构设计	109
4.3.2	分光系统的布局 and 结构设计	115
4.3.3	发热组件的散热结构	116
4.4	光学分系统质量评价	116
4.5	光学分系统装调与检测	122
4.5.1	卡式系统的装调和检验	122
4.5.2	激光发射、接收子系统调校	126
4.5.3	光轴平行度调校	127
4.5.4	宽距离光束的多轴平行性检测	131
第5章	空间激光通信发射与接收总体技术	134
5.1	空间激光通信体制	134
5.1.1	直接探测技术	136
5.1.2	相干探测技术	137
5.2	编解码技术	143
5.2.1	信源编码	143
5.2.2	加密编码	147
5.2.3	信道编码	148
5.3	调制解调技术	154
5.3.1	光调制技术分类	154

5.3.2	直接探测系统的调制解调技术	156
5.3.3	相干探测系统的调制解调技术	159
5.4	光复用技术	162
5.4.1	光波分复用技术	162
5.4.2	光时分复用技术	163
第 6 章	空间激光通信发射与接收分系统	167
6.1	激光通信发射与接收分系统方案	167
6.1.1	800nm 波段的激光收发系统	168
6.1.2	1550nm 波段的激光收发系统	168
6.2	通信发射单元的激光光源	169
6.2.1	空间激光通信对半导体激光器的要求	170
6.2.2	半导体激光器的工作特性	172
6.2.3	通信用典型的半导体激光器	176
6.3	通信发射单元的调制器	181
6.3.1	直接调制器	182
6.3.2	间接调制器	184
6.4	通信发射单元的光放大器	192
6.4.1	掺铒光纤放大器	192
6.4.2	半导体激光放大器	195
6.5	通信接收单元的探测器	197
6.5.1	空间激光通信对探测器的要求	197
6.5.2	主要的探测器类型	197
6.5.3	探测性能分析	200
6.6	通信接收单元的信号处理	206
6.6.1	前置放大器	206
6.6.2	线性放大单元	207
6.6.3	时钟提取与数据判决	207
6.7	通信系统的性能评价	208

6.7.1	眼图	208
6.7.2	误码率	211
第7章	空间激光通信 APT 技术	215
7.1	空间激光通信 APT 分系统概述	215
7.1.1	空间激光通信系统 APT 的基本概念	215
7.1.2	空间激光通信系统对 APT 分系统的要求	216
7.1.3	空间激光通信 APT 分系统工作原理	216
7.1.4	空间激光通信 APT 分系统组成	219
7.1.5	空间激光通信 APT 分系统类型	223
7.2	空间激光通信系统快速、高概率捕获技术	225
7.2.1	空间激光通信系统捕获机理	226
7.2.2	视轴指向的数据导引方式	227
7.2.3	开环捕获模式	228
7.2.4	扫描方式	230
7.2.5	捕获单元性能指标分析	233
7.3	空间激光通信系统高精度、动态跟踪技术	241
7.3.1	空间激光通信 APT 分系统性能分析	241
7.3.2	空间激光通信 APT 分系统特点	247
7.3.3	复合轴 APT 分系统先进控制算法	249
7.3.4	复合轴 APT 系统的性能分析和优化设计	254
第8章	空间激光通信 APT 分系统	257
8.1	粗跟踪伺服单元	257
8.1.1	粗跟踪伺服转台	258
8.1.2	粗跟踪探测单元	264
8.1.3	粗跟踪伺服单元控制设计	266
8.2	精跟踪伺服单元	277
8.2.1	精跟踪光束伺服单元	277
8.2.2	精跟踪探测单元	282