

# 星地激光通信链路 原理与技术

*The Principle and Technology of the  
Satellite-to-ground Laser Communication Links*

李晓峰 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 星地激光通信链路 原理与技术

The Principle and Technology of the  
Satellite-to-ground Laser Communication Links

李晓峰 编著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

星地激光通信链路原理与技术/李晓峰编著. —北京:  
国防工业出版社, 2007. 2

ISBN 978-7-118-04926-8

I. 星... II. 李... III. 激光通信—研究  
IV. TN929.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 153952 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 11¼ 字数 284 千字

2007 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 40.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

# 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 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镛

委 员 (按姓氏笔画排序)

于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

杨星豪 李德毅 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

# 前 言

本书编著的最初目的,主要是作为电子科技大学“光信息传输、获取与处理”以及“光学工程”专业研究生的教学参考资料。从编著的内容来看,本书同时也可以为从事空间光通信领域科研的人员提供一定的参考。

本书的编著主要建立在编著者及所在科研团队于近年内承担的相应科研及研究生教学任务的基础上。

全书共分8章。其中,第1章介绍了激光通信的特点,阐述了开展星地激光通信技术研究的重要意义,还较为详细地介绍了国外空间光通信领域的发展动态。

第2章对地球大气进行了基本描述,简要分析了星地激光通信链路的关键技术。

第3章至第6章分别介绍了有关研究激光大气传输所受衰减效应、湍流效应以及偏折效应的经典理论、重要模型,同时介绍了影响星地激光通信设计理念的部分国内外重要实验情况,针对激光大气传输所受到的三大影响效应分别进行了相应理论及数值分析。同时在相应理论分析、数值分析及部分实验的基础上,提出了一些星地激光通信链路抑制或缓解大气效应影响的方案或对策。

第7章重点介绍了星地激光通信链路光束捕获、跟踪及对准系统的工作原理,重要参数定义,重要探测成像器件工作原理,系统设计方法等内容,同时对影响系统跟踪精度的多种因素进行了分析并提出了相应抑制方案。

第8章对通信调制、均衡技术及抗干扰 Turbo 信道编码的部分内容进行了简单介绍。

本书中许多内容(特别是涉及理论及理论模型描述的内容)都

节选自国内外本领域专家、学者所公开发表的参考文献,为了尽可能地有利于取得好的教学效果,不可避免地节选资料在形式和内容上进行了程度不同的取舍或修改,文中尽可能对引用的参考文献加以著录,由于种种原因的限制,也很难保证没有遗漏或错误,敬请各位有识之士不吝赐教、指正。

编著者在此感谢所有参考文献的作者,因为是他们多年辛勤及卓有成效的工作,才使编著者在近年来对星地激光通信领域的许多理论问题有了一些肤浅的认识,同时使得本书中涉及的许多问题有了答案。

本书是在国防工业出版社国防科技图书出版基金的资助下完成的,同时也得到了电子科技大学研究生教材建设基金的资助,编著者在此表示感谢。如果没有他们的热情支持和帮助,本书不可能得以顺利出版。

在编著过程中,还得到了电子科技大学各级领导的支持和许多老师的鼓励,部分仿真工作和部分初期文字录入工作得到了我的学生何俊、张强、张百雷、任瑞香、渠丽新、张波、胡凡平、亓丽梅、林密、梁吉雄等硕士的帮助,在此,编著者向他们表示真诚的感谢。

感谢电子科技大学李贤教授、胡渝教授、殷世昌教授、曾广荣高工等多位老师在“十五”相关科研工作中对我的支持和关心。在科研活动中,编著者曾与罗彤博士、邓科讲师、杨华军教授、严高师教授、朱勇高工等多位同仁进行了非常有益的讨论,这些讨论有助于形成正确的概念,在此一并向他们表示感谢。

还需要特别感谢的是我的妻子李雪女士和我可爱的女儿李雅楠,正是她们无私的爱和宽容使我能安心和老老实实在地做好本职工作。

由于编著者学识水平有限,加之星地激光通信链路研究涉及面太宽,书中不免有许多不妥和错误之处,希望相关领域的专家、学者及参阅本书的各位老师、同学不吝赐教,谢谢。

李晓峰

2006年于电子科技大学



# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 开展星地激光通信技术研究的重要意义 .....	1
1.2 激光通信的特点 .....	6
1.3 国内外研究现状和发展趋势 .....	12
1.3.1 国外研究状况 .....	12
1.3.2 国内研究状况 .....	46
<b>第 2 章 地球大气基本描述及星地激光通信链路关键技术分解</b> .....	47
2.1 地球大气的基本描述 .....	48
2.1.1 大气的范围 .....	48
2.1.2 大气的组分 .....	49
2.1.3 大气分层 .....	52
2.1.4 大气的运动 .....	55
2.1.5 大气的电离 .....	56
2.2 大气模式 .....	57
2.2.1 标准大气的定义 .....	57
2.2.2 美国标准大气 1976 .....	57
2.2.3 国际参考大气 CIRA 1986 .....	59
2.2.4 我国制订的大气模式 .....	61
2.3 常用大气辐射传输计算模型介绍 .....	62
2.3.1 高分辨力大气传输计算模型 FASCODE .....	62

2.3.2	低分辨力大气辐射传输模型 LOWTRAN7	63
2.4	星地激光通信链路工作原理及关键技术	64
2.4.1	星地激光通信链路分类	64
2.4.2	系统组成	65
2.4.3	关键技术分析	66
2.5	星地激光通信链路方程	70
<b>第3章</b>	<b>激光传输大气衰减效应</b>	<b>76</b>
3.1	大气吸收	76
3.1.1	分子线吸收	77
3.1.2	星地大气信道的频率滤除特性	78
3.2	大气散射	80
3.2.1	瑞利散射	80
3.2.2	米氏散射	82
3.2.3	单次散射理论	83
3.2.4	多次散射	92
3.2.5	辐射传输理论	95
3.2.6	米氏散射常用模型	97
3.3	多径效应	110
3.3.1	多径传输及多径效应的基本概念	111
3.3.2	星地信道多径效应分析模型介绍	111
<b>第4章</b>	<b>激光传输大气湍流效应</b>	<b>118</b>
4.1	湍流的形成	120
4.2	大气中的折射率	121
4.2.1	湍流大气中的折射率表达式	121
4.2.2	大气折射率随机涨落的空间自相关函数	122

4.2.3	折射率起伏功率谱密度 .....	123
4.2.4	有关结构函数的基本概念 .....	124
4.3	湍流功率谱模型 .....	127
4.3.1	湍流的统计特性 .....	127
4.3.2	折射率起伏湍流模型 .....	128
4.3.3	常用湍流功率谱模型 .....	130
4.4	表征激光大气传输特性的定标参数 .....	132
4.4.1	空间相干长度和大气相干长度 .....	133
4.4.2	Fresnel 尺度 .....	137
4.4.3	Rytov 指数 .....	137
4.5	光强起伏 .....	138
4.5.1	光强起伏(光闪烁)的定义及基本描述 .....	138
4.5.2	弱起伏大气闪烁的重要研究结论 .....	139
4.5.3	中、强起伏条件下采用 Andrews 谱推导的 闪烁模型 .....	141
4.5.4	闪烁的统计特征 .....	147
4.5.5	星地激光通信链路斜程传输条件下的闪 烁模型 .....	149
4.6	源像抖动 .....	150
4.7	光束漂移 .....	154
4.8	光束扩展 .....	157
<b>第 5 章</b>	<b>缓解大气效应的星地激光通信链路解决方案</b> .....	<b>160</b>
5.1	链路波长选择方案 .....	160
5.2	星地激光通信链路信号光束宽度最优化设计 .....	164
5.3	通信链路的通信时段选择方案 .....	168
5.4	地面站选址方案 .....	175
5.4.1	星地激光通信链路地面站选址的思路 .....	176

5.4.2	海拔高度及气象、气候条件对星地激光通信链路地面站选址的影响 .....	177
5.4.3	大气湍流对星地激光通信链路地面站选址的影响 .....	179
5.4.4	背景干扰是星地激光通信链路地面站选址应考虑的因素之一 .....	181
5.4.5	卫星运行轨道设计是星地激光通信链路地面站选址应考虑的因素之一 .....	182
5.5	多地面站、多星组网的网络配置 .....	182
5.6	大孔径接收结合多孔径发射方案 .....	187
5.6.1	孔径平滑 Andrews 谱理论 .....	187
5.6.2	闪烁孔径平滑因子计算模型 .....	189
5.6.3	多孔径发射方案 .....	194
5.7	自适应光学技术方案 .....	194
5.7.1	自适应光学系统的基本工作原理 .....	194
5.7.2	自适应光学系统部分重要模块的功能 .....	195
<b>第 6 章</b>	<b>激光传输大气偏折效应及卫星轨道</b> .....	<b>204</b>
6.1	大气偏折效应 .....	204
6.1.1	大气光路方程 .....	205
6.1.2	光路曲率 .....	206
6.1.3	激光大气传输的实际路程计算 .....	207
6.2	卫星轨道 .....	209
6.2.1	卫星轨道参数 .....	209
6.2.2	轨道分类 .....	212
6.2.3	卫星运动方程 .....	215
<b>第 7 章</b>	<b>光束捕获、对准、跟踪系统原理与技术</b> .....	<b>219</b>
7.1	APT 系统基本工作原理及组成 .....	219

7.1.1	APT 系统基本工作原理 .....	219
7.1.2	星地激光通信链路 APT 系统组成 .....	226
7.2	复合轴控制结构跟踪系统关键模型 .....	226
7.2.1	粗跟踪系统 .....	226
7.2.2	精跟踪系统 .....	235
7.3	APT 跟踪伺服系统设计 .....	241
7.3.1	跟踪伺服系统的数字控制 .....	242
7.3.2	精对准控制器的设计 .....	243
7.3.3	系统重要模型 .....	244
7.4	APT 关键器件及工作原理 .....	247
7.4.1	4QD .....	248
7.4.2	PSD .....	251
7.4.3	CCD .....	254
7.4.4	APT 精跟踪系统常用执行单元器件 .....	261
7.5	振动分析 .....	262
7.5.1	卫星振动源分类 .....	264
7.5.2	典型的卫星平台振动功率谱密度 .....	265
7.5.3	卫星姿态稳定技术 .....	268
7.5.4	抑制振动方法 .....	270
7.6	机械轴系晃动影响跟踪精度的分析 .....	275
7.7	星地激光通信链路光斑位置算法 .....	280
7.7.1	采用 CCD 的空间光通信光斑位置算法 .....	280
7.7.2	基于空间域的空间光通信系统接收信标 光斑图像平滑处理 .....	283
<b>第 8 章</b>	<b>星地链路信息传输、接收、探测及处理</b> .....	<b>288</b>
8.1	星地激光通信链路传输光场 .....	289
8.1.1	发送光场 .....	289

8.1.2	高斯光束在均匀介质中的传输特性 .....	292
8.1.3	接收光场描述 .....	295
8.2	光电探测模型及直接探测接收 .....	301
8.2.1	光电探测模型 .....	301
8.2.2	直接探测接收 .....	306
8.3	星地激光通信链路中的均衡技术 .....	312
8.4	调制与编码 .....	315
8.4.1	光数字调制 .....	315
8.4.2	PPM .....	316
8.4.3	星地信道抗干扰编码 .....	320
<b>参考文献</b> .....		326

# Contents

<b>Chapter 1</b>	<b>Summarize</b>	1
1.1	The significance of research of the satellite-to-ground laser communication links	1
1.2	The characteristics of optical communication	6
1.3	The status and developing trends in china and overseas	12
1.3.1	The research status overseas	12
1.3.2	The research status in china	46
<b>Chapter 2</b>	<b>Basic description of earth atmosphere and key technologies of satellite-to-ground laser communication links</b>	47
2.1	The basic descriptions of earth atmosphere	48
2.1.1	The ranges of the atmosphere	48
2.1.2	The constituents of the atmosphere	49
2.1.3	The layers of the atmosphere	52
2.1.4	Atmospheric motion	55
2.1.5	Atmospheric ionization	56
2.2	The models of the atmosphere	57
2.2.1	The definition of standard atmosphere	57
2.2.2	The model of the American standard atmosphere 1976	57

2. 2. 3	The model of the international reference atmosphere CIRA 1986 .....	59
2. 2. 4	The atmospheric models of china .....	61
2. 3	The introduction of calculation models which usually used in propagation through atmospheric channel .....	62
2. 3. 1	FASCODE model .....	62
2. 3. 2	LOWTRAN7 model .....	63
2. 4	The principle and key technologies of the satellite-to-ground laser communication links .....	64
2. 4. 1	The classification of the satellite-to-ground laser communication links .....	64
2. 4. 2	System composition of the satellite-to-ground laser communication links .....	65
2. 4. 3	The analysis of key technologies of the satellite-to-ground laser communication links .....	66
2. 5	The equation of the satellite-to-ground laser communication links .....	70

**Chapter 3 The attenuating effect in propagation through atmospheric channel .....** 76

3. 1	Atmospheric absorption .....	76
3. 1. 1	Line absorption of molecule .....	77
3. 1. 2	Character of frequency filtration in the channel of the satellite-to-ground laser communication links .....	78
3. 2	Atmospheric scattering .....	80
3. 2. 1	Rayleigh scattering .....	80



3.2.2	Mie scattering .....	82
3.2.3	The theory of single scattering .....	83
3.2.4	Multiple scattering .....	92
3.2.5	The theory of radiant propagation .....	95
3.2.6	The Normal models of Mie scattering .....	97
3.3	Multipath propagation effect .....	110
3.3.1	The basic conception of multipath propagation effect .....	111
3.3.2	The normal models of multipath propagation effect .....	111

**Chapter 4 The effect of turbulence in propagation through atmospheric channel .....** 118

4.1	Formation of turbulence .....	120
4.2	Refractive index in the atmosphere .....	121
4.2.1	The expression of refractive index in the turbulent flow .....	121
4.2.2	The spacial self-correlation of random fluctuation of refractive index in propagation through atmospheric channel .....	122
4.2.3	The power spectrum density of refrac- tive index fluctuation .....	123
4.2.4	Basic concept of structure function .....	124
4.3	Power spectrum models of turbulent flow .....	127
4.3.1	The statistical characteristic of turbulent flow .....	127
4.3.2	The turbulent flow models of refrac- tive index fluctuation .....	128