



CRC CRC Press
Taylor & Francis Group

近地激光通信

Near-Earth Laser Communications

[美] 哈密德·荷马提 (Hamid Hemmati) 主编

佟首峰 刘云清 娄岩 译

张立中 刘智 王天枢 校



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

近地激光通信

Near - Earth Laser Communications

[美] 哈密德·荷马提 (Hamid Hemmati) 主编

佟首峰 刘云清 娄岩 译

张立中 刘智 王天枢 校

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2012-012号

图书在版编目(CIP)数据

近地激光通信/(美)哈密德·荷马提(Hamid Hemmati)主编;佟首峰,刘云清,娄岩译.
—北京:国防工业出版社,2017.5

书名原文:Near-Earth Laser Communications

ISBN 978-7-118-11054-8

I. ①近… II. ①哈… ②佟… ③娄… III. ①激光通信 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第284157号

Near-Earth Laser Communications by Hamid Hemmati

ISBN 978-0-8247-5381-8

Copyright© 2009 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

本书原版由Taylor & Francis出版集团旗下CRC出版公司出版,并经其授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

National Defense Industry Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版经授权由国防工业出版社独家出版,并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有Taylor & Francis公司防伪标签,无标签者不得销售。

※

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100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本710×1000 1/16 印张21 字数368千字

2017年5月第1版第1次印刷 印数1—2500册 定价80.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

译者序

Near - Earth Laser Communications 一书是美国罗切斯特大学著名光学专家 Thompson 教授主编的“光学工程”丛书之一,其英文原版于 2008 年面世。本书主编由 JPL 激光通信技术和系统开发组组长 Hamid Hemmati 博士担任。他已经发表了 150 余篇论文,拥有 7 项发明专利,被授予 3 项 NASA 董事会奖,而且还长期在 California 州立大学从事空间激光通信的教学工作,在空间激光通信领域具有极高的知名度。该书的参编人员皆来自国际上从事空间激光通信研究的著名机构——美国 NASA 的 JPL 实验室、欧空局(ESA)的欧洲空间研究与技术中心、美国 BALL 航天技术公司、日本空间通信集团等机构,他们均为这些机构的一线研发人员,具有较高的学术声望。

原著具有两个显著的特点:一是创新性强,重点阐述相干通信、无信标跟踪等当前空间激光通信的最新技术成果;二是内容系统翔实,全面阐述了系统总体,捕获、对准、跟踪,通信发射与接收,光机结构设计,编码与调制,大气信道、地面站,系统可靠性和链路组网等全部内容。

该书由 Taylor&Francis 集团的 CRC 出版社发行。感谢国防工业出版社第一时间给我们提供了该书的原版和电子版,不仅使我们迅速地了解空间激光通信的最新发展动态和技术前沿,而且让我们萌生了将此书翻译成中文使其与中国的广大读者见面的想法,以发挥其最大的社会效益。感谢国防工业出版社白天明编辑的大力支持和热心帮助,使得该译著获得“装备科技译著出版基金”资助,在此表示诚挚谢意。

全书的翻译是空地激光通信技术国防重点学科实验室(依托单位长春理工大学)的全体研究人员共同努力的结果。结合实验室的学科分布和研究内容,佟首峰教授会同刘云清教授、韩成副教授、于林韬副教授、陈存毅副教授、胡源博士、宋延嵩博士、娄岩博士、付强博士、丁莹博士完成本书的翻译工作;张立中教授、刘智教授、王天枢教授完成本书的校译工作;另外,娄岩博士还完成了全书图表、目录、参考文献编译和全书的统稿工作;国防重点学科实验室的宋路教授、李洪祚教授、王晓曼教授、付跃刚教授、杨华民教授,特别是姜会林院士对译著提出了许多宝贵的意见和建议。译者谨对所有曾给予过支持和提供帮助的同事表示深深的谢意。

由于空间激光通信技术发展迅速,译者对书中最新研究成果的理解不一定十分确切,加之时间仓促、能力有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

佟首峰
2016年8月

前 言

随着自由空间光通信技术(也称为激光通信)的发展日益成熟,其通信速率已达到几吉比特每秒,基本能够满足飞机和卫星等通信系统的需求。尽管激光通信存在一些潜在的优势,但是由于其还有一些风险及不足,以至于尚未在太空广泛应用。然而,归因于近十多年里在地球轨道上已经成功开展光通信链路演示验证,未来激光通信技术将以更大规模应用于民用、地球与空间科学以及军事等领域。

激光通信之所以具有非常广阔的应用领域,是因为它不仅具有体积小、质量小、功耗低等特点,而且它的传输带宽比射频通信高两个量级。这些优势的取得是由于激光具有较高的工作频率,使激光通信具有窄光束发射和高光学增益。然而,激光通信还远没有达到技术的顶点,还需要进一步突破和探索。最近有些文章提出无需任何特别的努力,激光通信还具有 30dB 的链路提高潜力。

本书是多位作者大量设计经验的结晶,本书出版旨在向读者全面介绍卫星激光通信的基础知识。重点是系统设计原则、技术实现和系统优化设计等,至于有关激光通信的基本理论在早期发表的著作中已经详细论述。

本书第 1 章介绍了近地激光通信技术。客观公正地阐述了激光通信具有高速率和宽带的理由,陈述了最近成功开展的激光通信演示验证实验。第 2 章讨论了系统设计原则,系统的优化设计,分析了捕获、跟踪、对准及通信链路的链路功率预算。第 3 章详细说明了激光束的对准、捕获和跟踪过程,强调了硬件技术和具体的实施方案。第 4 章详细说明了激光通信激光通信有效载荷的发射单元,包括相干激光通信体制和 IM/DD(幅度调制/直接探测)体制。第 5 章讨论了激光通信激光通信有效载荷的光学机械组件。第 6 章讨论了为自由空间光通信调制适用的信道编码技术。第 7 章描述了适用于飞行和地面收发器的光检测器和接收器。第 8 章讨论了大气信道对激光通信的上行和下行链路激光光束传输的多种影响。第 9 章描述了地面光端机,提供了几个成功在轨试验的例子。第 10 章讨论了激光通信飞行样机中元件和子系统的质量保证,包括光学和光电子组件。第 11 章展望了互联链路和光网络的模式和结构。第 12 章简要介绍正在开展或即将开展的科研计划和活动。

我非常诚挚地感谢来自美国、欧洲、日本等国家的多位学者的突出贡献,他们在紧张的工作之余给予我们大量的帮助。另外,本书的完成还得益于以下学

者的直接或间接帮助和贡献。其中包括 JPL 光通信组的多位成员, 特别感谢 Charles 大力帮助; Biswas, Ortiz 和 Wright 博士在某些章节中提出了关键观点和建议; Weichman 对全书的一致性进行统审。我也非常感激 Farr, Lesh, Wilson, Kovalik, Ourik, Roberts, Birnbaum, Chien Chen, JimmyChen, Sanddusky, Schumaker, Rayman, Weber, Rafferty, Rush, Geldzahler, Deutsch, Townes, Pollara, Estabrook, Vilnrotter, Antsos, Davarian, Boroson, Yamakawa, Araki 和其他为自由空间激光通信技术做出突出贡献的 JPL 其他研究组的成员。最后, 对我妻子 Azita、女儿 Elita 和儿子 David 给予我的爱和默默支持表示深深感激。

Hamid Hemmati

Pasadena California

主 编 简 介

Hamid Hemmati 在美国南加州大学获物理学硕士学位,并于 1981 年在美国科罗拉多大学(科罗拉多州 Fort Collins)获物理学博士学位。1986 年加入美国加州喷气推进实验室(JPL)之前,他作为研究员在 NASA 戈达德航天中心和国家标准化与技术研究所(NIST,科罗拉多 Boulder)工作,现在是 JPL 实验室激光通信组的组长,负责行星及卫星激光通信技术和系统开发。Hamid Hemmati 博士发表了 150 多篇期刊论文和会议论文,拥有 7 项专利,先后 3 次获得美国航天奖,34 次获得美国航空航天局颁发的荣誉证书。他在加州州立大学(洛杉矶分校)讲授光通信课程,曾编著《深空光通信》一书。

Hamid Hemmati 研究的领域包括:光电系统设计,特别是针对空间光通信的系统设计;固态激光器,特别是脉冲光纤激光器和微片激光器;光电系统及元件的航天环境质量体系认证;低成本的大口径地面光学望远镜设计;主动自适应光学;新型变型镜;短距离星地自由空间激光通信系统;相干光通信;光束捕获、跟踪和对准等。

撰稿者简介

(1) Adolfo Comerón

信号理论与通信系,加泰罗尼亚技术大学,巴塞罗纳,西班牙

(2) Bruce Moision

喷气推进实验室,美国国家航空航天局,加州理工学院,帕萨迪纳,加州

(3) Jon Hamkins

喷气推进实验室,美国国家航空航天局,加州理工学院,帕萨迪纳,加州

(4) Sabino Piazzolla

喷气推进实验室,美国国家航空航天局,加州理工学院,帕萨迪纳,加州

(5) Hamid Hemmati

喷气推进实验室,美国国家航空航天局,加州理工学院,帕萨迪纳,加州

(6) Klaus Pribil

纽科姆,弗赖恩斯泰因,瑞士

(7) Marcos Reyes García - Talavera

技术部,加那利天文物理研究所,特内里费岛,西班牙

(8) Nikos Karafolas

欧洲航天局,欧洲空间研究技术中心,诺德惠克,荷兰

(9) Zoran Sodnik

欧洲航天局,欧洲空间研究技术中心,诺德惠克,荷兰

(10) Walter R. Leeb

通信和射频工程学院,维也纳科技大学,维也纳,奥地利

(11) Morio Toyoshima

空间光通信组,新一代无线通信研究中心,国家信息和通信技术研究所,东京,日本

(12) Robert G. Marshalek

Ball 航空技术公司,波德,美国科罗拉多州

(13) Peter J. Winzer

贝尔实验室,阿尔卡特朗讯,霍姆德尔,新泽西州

目 录

第1章 绪论	1
1.1 简介	1
1.2 激光通信的应用	2
1.2.1 点对点链路	3
1.2.2 点对多点/星座与网络	6
1.2.3 行星链路	8
1.2.4 反向调制链路	8
1.3 子系统技术	9
1.3.1 信号探测器	9
1.3.2 激光发射单元	11
1.3.3 激光束瞄准和稳定	12
1.3.4 星载光端机的光机结构组件	14
1.3.5 地面站的光机组件	16
1.4 技术验证	20
1.4.1 最近验证	20
1.5 结论	21
参考文献	22
第2章 系统工程和设计原则	25
2.1 光束对准误差分配	28
2.1.1 对准误差构成	29
2.1.2 跟踪残差	30
2.1.3 无随机扰动条件下接收功率和误码率	31
2.1.4 随机扰动条件的接收功率和平均误码率	31
2.2 链路功率预算分析	33
2.2.1 信号光链路功率分析	34
2.2.2 跟踪光链路功率分析	34
2.2.3 空一空最优链路设计实例	36

2.2.4 w_0/σ 与平均误码率之比的优化	37
2.3 天—地激光通信链路设计	39
2.3.1 平均误码率	39
2.3.2 光学通信信道	41
2.3.3 光学跟踪信道	42
2.3.4 多光束增益	43
2.3.5 孔径平滑增益	44
2.3.6 地—空最优链路设计实例	45
参考文献	48
第3章 对准、捕获和跟踪	51
3.1 简介和内容概述	51
3.2 系统描述和 PAT 概述	52
3.3 PAT 的一般性需求	56
3.4 PAT 概念发展	58
3.5 PAT 的硬件开发与集成	69
3.6 PAT 的性能特点	73
3.7 小结	77
参考书目	78
第4章 激光发射单元:相干探测和直接探测	81
4.1 激光发射单元:相干探测体制	81
4.1.1 结构	84
4.1.2 激光光源	86
4.1.3 调制器	96
4.1.4 光放大器	98
4.1.5 发射机控制电路	103
参考文献	104
4.2 激光发射单元:直接探测体制	105
4.2.1 概述	105
4.2.2 激光发射单元	106
4.2.3 自发辐射	113
4.2.4 调制	113
4.3 小结	114
参考文献	116

第5章 载荷光机分系统	117
5.1 引言	117
5.2 通用要求	118
5.3 光学设计考虑因素	119
5.3.1 望远镜的选择	120
5.4 背景光消除及滤波	122
5.4.1 太阳光消除	123
5.5 发射/接收隔离	123
5.6 装配公差	124
5.7 光学系统的稳定性和轻小型化	124
5.8 望远镜材料	125
5.9 机械执行机构	127
5.9.1 精密指向镜	127
5.9.2 粗跟踪装置	127
5.9.3 束散角控制装置	128
5.10 清洁控制	128
5.11 机械装调	129
5.12 主动与被动的机械隔振	130
参考文献	131
第6章 自由空间光通信的编码与调制	133
6.1 简介	133
6.2 光信道模式	134
6.2.1 脉冲位置调制	134
6.3 光学信道容量	135
6.3.1 泊松 PPM 信道的容量	135
6.3.2 峰值和平均功率限制	138
6.3.3 死区时间的影响	139
6.3.4 次优的 PPM	140
6.4 衰落	141
6.4.1 相干时间和衰减深度	143
6.4.2 衰减损耗	143
6.4.3 信道交织减少损耗	144
6.5 时延抖动	146

6.5.1	容量	147
6.5.2	信道似然估计	148
6.5.3	抖动损耗	148
6.6	纠错码	150
6.6.1	RS 编码	151
6.6.2	迭代软判决码	152
6.6.3	比较	153
	参考文献	154
第7章	光电探测器和接收单元	157
7.1	需求与挑战	157
7.2	光电探测过程	160
7.2.1	平方律光电检测	160
7.2.2	外差过程	160
7.2.3	探测噪声	161
7.3	器件	165
7.3.1	光电二极管	165
7.3.2	光子计数探测器	172
7.3.3	光学滤波器	173
7.3.4	光前置放大器	174
7.3.5	本振激光器	176
7.4	光接收机:结构、实现与优化	176
7.4.1	光接收机分类:综述	176
7.4.2	光接收机性能指标	177
7.4.3	直接探测接收机	179
7.4.4	APD 接收机	180
7.4.5	相干接收机	180
7.4.6	光前置放大接收机	185
7.4.7	调制类型	186
7.4.8	相干探测与光前置放大直接探测	188
7.5	背景辐射	189
7.5.1	背景辐射功率的测定	189
7.6	小结与展望	193
	参考文献	194

第8章 大气信道	198
8.1 引言	198
8.1.1 大气湍流的统计描述	198
8.1.2 折射率结构常数模型	200
8.1.3 湍流大气中的传输	202
8.1.4 闪烁指数	204
8.1.5 闪烁统计	205
8.1.6 孔径平均因子	206
8.1.7 强湍流下的闪烁模型	207
8.1.8 相位统计	208
8.1.9 光束效应	213
8.2 大气传输损耗和背景光噪声	216
8.2.1 吸收和散射	216
8.2.2 背景光辐射和天空辐射	220
8.3 结论	222
参考文献	222
第9章 光学地面站:要求及设计、双工链路模型及特性	225
9.1 概述	225
9.2 地面终端的要求	225
9.2.1 光学地面站选址	226
9.2.2 光学地面站望远镜	226
9.2.3 光学地面站设备	227
9.3 光学地面站设计实例	230
9.3.1 建筑设施和望远镜	231
9.3.2 焦平面光学系统主要特性	232
9.3.3 焦平面控制的设计	234
9.4 激光光束大气湍流传输性能预测模型	244
9.4.1 下行链路动力学模型	244
9.5 实验方法	250
9.5.1 湍流参数测量	251
9.5.2 风速测量	252
9.5.3 消光比	252
9.6 实验结果	253

9.6.1	下行统计结果	253
9.6.2	下行通信实验结果	255
9.6.3	上行链路统计结果	257
9.7	结论	262
	参考文献	263
第 10 章	可靠性与航天质量体系管理	265
10.1	引言	265
10.2	航天产品质量测试	266
10.2.1	质量标准	266
10.2.2	测试特性方法	268
10.2.3	商用成品器件的质量测试	271
10.3	各种设备的质量测试	272
10.3.1	半导体和光纤激光器/放大器的质量测试	272
10.3.2	无源光纤和光纤连接器质量测试	273
10.3.3	无源光学器件质量测试	274
10.4	太空环境下系统的封装	274
10.5	辐射效应	275
10.5.1	辐射环境	275
10.5.2	辐射对光学器件和涂层的影响	277
10.5.3	辐射对半导体激光器的影响	278
10.5.4	辐射对光电探测器和探测器阵列的影响	278
10.5.5	辐射对光纤的影响(包括掺杂光纤)	278
10.6	加速寿命实验	279
10.7	质量测试示例	279
10.8	小结	280
	参考文献	281
第 11 章	全球卫星光传输网络	284
11.1	引言	284
11.2	卫星星座的轨道模型与物理拓扑结构	285
11.3	光网络技术	288
11.3.1	单跳光网络	290
11.3.2	多跳光网络	290
11.3.3	通信路由和光路/ISL 的确定	293

11.4	光网络技术	294
11.4.1	ISL 终端	295
11.4.2	光路路由器	295
11.4.3	波段与通信方案	296
11.4.4	发射器	297
11.4.5	波分复用/多路信号分离器	297
11.4.6	开关	297
11.4.7	串扰和噪音	299
11.5	OTN 电源考虑	299
11.6	OTN 的管理	300
11.7	交互性	301
11.8	总结	302
	参考文献	302
第 12 章	展望	305
12.1	军事应用	305
12.1.1	光射频混合链路实验通信	306
12.2	美国国家航空航天局	306
12.3	欧洲激光通信的成果	307
12.4	技术机遇	308
	参考文献	309

第1章 绪 论

1.1 简 介

当前,通过航天、航空飞行器搭载的传感器对地观测获取数据的传输速率的需求呈指数增长趋势。图 1.1 显示了无人机数据传输速率的需求随时间变化的趋势,图 1.2 说明了对地观测航天器上的数据传输速率的发展趋势^[1,2]。

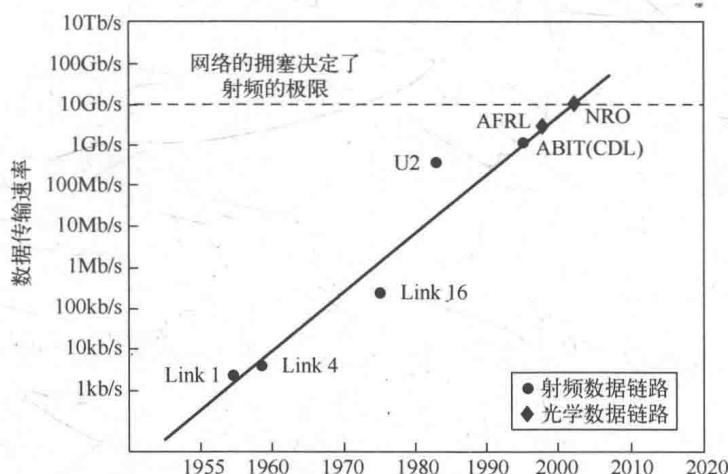


图 1.1 无人机数据传输速率的趋势

(节选自报告:无人机路线图 2000—2025,美国国防部文件第 33 页,2001 年)

激光具有传播光束窄及载波频率高等优点,不仅能满足日益增长的技术需求,同时也能提高和改善传统微波射频(RF)的通信能力。例如,具有频率重复使用(相同的波长用于多条链路)、安全、质量小(是射频的 1/2)、功耗低(是射频的 1/2)及体积小(射频天线直径的 1/10)等优点,即使在探测视场内太阳光照的条件下仍然保持跟踪和通信,与其他光电设备实现多功能复合,还可以实现精密测距^[3]。不同于 RF 射频通信的是光通信具有丰富的带宽资源,同一情况下,当射频通信带宽受到限制时,激光通信链路可不受频率制约,具有极大的应用前景。此外,激光的另一个突出优点是光束束散角小、频率可重复使用。与射频通信相比,尽管激光通信具有以上突出的技术优势,但是还存在一些技术不成熟和技术风险,成为制约激光通信在空间广泛