

深空光通信

(美) Hamid Hemmati 编

北京跟踪与通信技术研究所 组织翻译

王平 孙威 译

张纪生 校



清华大学出版社

深空光通信

(美) Hamid Hemmati 编

北京跟踪与通信技术研究so 组织翻译

王平 孙威 译

张纪生 校

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书共 7 章。第 1 章概述了喷气推进实验室(JPL)研发深空光通信技术的历史。第 2 章介绍了深空光通信链路及系统设计要求,分析了影响光通信系统设计的参数。第 3 章介绍了星地光通信链路中大气信道的影响,讨论了层覆盖统计、大气透过率、背景光和天空辐射、激光束通过湍流大气层传播和影响地面接收站选址的大气因素。第 4 章介绍了深空光通信的调制和编码。第 5 章介绍了飞行终端各子系统。第 6 章介绍了地面终端体系结构。第 7 章对深空光通信技术发展及其应用进行了展望。

本书主要面向从事深空探测、空间光通信研究的科研人员、项目管理者,也可作为相关专业研究生的教学参考资料。

Hamid Hemmati

Deep Space Optical Communications

EISBN: 0-470-04002-5

Copyright © 2006 by John Wiley & Sons, Inc.

Original language published by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved. No part of this 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.

Simplified Chinese translation edition is published and distributed exclusively by Tsinghua University Press under the authorization by John Wiley & Sons, Inc., within the territory of the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由美国约翰·威立父子公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经许可之出口视为违反著作权法,将受法律之制裁。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2007-2718

本书封面贴有 Wiley 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

深空光通信/(美)赫马提(Hemmati, H.)编;王平,孙威译. —北京:清华大学出版社,2009.12

(JPL 深空通信与导航丛书)

书名原文:Deep Space Optical Communications

ISBN 978-7-302-21060-3

I. 深… II. ①赫… ②王… ③孙… III. 深空激光通信系统 IV. TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 168081 号

责任编辑:石磊 赵从棉

责任校对:刘玉霞

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153×235 印 张:34.5 字 数:577 千字

版 次:2009 年 12 月第 1 版 印 次:2009 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:98.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:026616-01

JPL 深空通信与导航丛书

编译委员会

主任 于志坚

委员 匡乃雪 董光亮 孙 威

李海涛 李 平

丛书译序

进入 21 世纪以来,随着美国机遇号、勇气号火星探测器成功登陆火星,卡西尼号探测器飞抵土星并成功释放惠更斯号探测器着陆土卫六,深空探测越来越成为全球关注的焦点。美国宣布将在 2015 年前后将宇航员重新送上月球,在那里建立永久性基地;在 2030 年之后,美国宇航员将前往遥远的火星探险。随着人类探索外太空活动的深入,深空探测正逐步成为航天活动的新热点。

我国于 2000 年发布的《中国的航天》白皮书中指出,深空探测是指对太阳系内除地球外的行星及其卫星、小行星、彗星等的探测,以及太阳系以外的银河系乃至整个宇宙的探测。它是继卫星应用、载人航天之后的又一航天技术发展领域。

月球探测和火星探测将是 21 世纪空间探测的重点领域。我国探月工程计划的启动是中国走向深空探索的第一步,标志着我国深空探测的开始,也是未来进行更远深空探测的必然要求。随着我国经济和科技实力的不断增强,进一步开展深空探测,展开对火星、小行星和其他太阳系内行星的探测将是我国未来深空探测的目标。

北京跟踪与通信技术研究所在我国测控领域的技术总体单位,广大科技人员长期跟踪国际深空测控领域的技术动态和发展方向,并对深空测控通信技术进行了预先研究。此次我所组织翻译的“JPL 深空通信与导航丛书”是美国国家航空航天局(NASA)喷气推进实验室(JPL)编著的一套关于深空探测器测控通信技术的专著,该套丛书总结了美国 NASA 近 50 年来深空测控通信工程技术的经验,是从总体上了解和掌握深空测控通信技术不可多得的教材。同时,书中提供的参考文献为读者进一步深入研究和學習提供了帮助。相信该丛书的翻译出版不仅对深空测控领域的科研、工程 and 教学人员具有较高的参考价值,而且对于我国未来深空测控通信系统的总体设计和建设以及相关技术的研究都具有一定的指导意义。

北京跟踪与通信技术研究所

于志望

2005 年 3 月

丛书序

1998年,美国国家航空航天局(NASA)在加州理工学院的喷气推进实验室(JPL)成立了深空通信和导航系统精英中心(DESCANSO)。DESCANSO负责管理和促进能够满足未来深空探测对通信和导航技术需求的创新和改革。

DESCANSO的目标是实现在任何时间、任何地点的连续通信和精确导航。为了支持这一目标,DESCANSO努力探寻和提倡新概念、新系统和新技术;培养关键的技术人才;主办报告会、专题讨论会和论坛,实现互动和思想交流。

“JPL深空通信与导航丛书”由在各自领域有多年经验的科学家和工程师撰写,通过交流关键技术领域的最新技术知识为创新奠定基础。该丛书归纳了JPL在几十年的深空探测研究过程中获得的基本原理和实践经验,同时还介绍了值得赞美的成果和应该吸取的教训。该丛书将作为新一代从事本领域研究的科学家和工程师的指南。

Joseph H. Yuen
(DESCANSO 负责人)

前 言

行星探测航天器日益增加的资料需求,促使通信频率从射频频段向光和近红外波段发展。这种变迁可使数据传输率比传统射频链路提高1~2个数量级。美国国家航空航天局(NASA)早期的航天器通信基本都采用S波段,10多年后增加了X波段,20多年后在深空任务中开始采用Ka波段。在光波段,正处于技术逐步成熟和演示阶段,有望在一系列令人信服的技术演示验证成功之后,光通信进入实现阶段。

本书旨在总结和记载自20世纪70年代后期“自由空间光通信组”成立以来喷气推进实验室(JPL)所取得的光通信研究成果。书中概述了JPL光通信组研究人员以及全球其他光通信研究人员20余年来完成的研究和研制工作。这些研究的重点一直是深空光通信。最近几年,也研究了不少近地通信技术,研究了航天器载收发机、地面接收机和上行链路发射机技术。

25年来,部件和子系统研究经历了频繁调整,以跟上激光器、探测器、探测器阵列和光纤技术的快速发展。因此,研究组的相当一部分研究集中于应对这种挑战。本书旨在带领新人进入这一崭新领域,并为希望了解光通信现状的人提供丰富的情报。作为一种情报资料,应能帮助本领域人员增进基础知识并掌握多种重要设计方案及其关键差异。本书还希望能提供有关部件及子系统技术、基本限制、最新水平的信息及研究和广泛探索新技术的途径。

本书分7章,第1章是深空光通信技术和JPL深空光通信技术开发史。第2章介绍链路及系统设计驱动因素、影响光通信系统设计的参数以及本书所讨论的相应链路参数的链路控制表。第3章介绍大气信道,讨论云覆盖区统计、大气透射比、背景光和天空辐射率、激光束穿过湍流大气层传播和影响地面接收站址选址的大气因素。第4章是调制和编码,包括被检测光场的统计模型、调制形式、调制约束带来的数据传输率限制、各种不编码光学调制方案的性能、光信道容量、光调制的信道代码以及各种编码光调制的性能。第5章是构成飞行终端的各子系统。5.1节是捕获、跟踪和瞄准子系统。跟踪和瞄准功能一直并仍然是深空光通信技术的最大挑战,本节

介绍整个太阳系内光束精密瞄准、选项、设计考虑因素和要求以及系统方案举例。5.2节是激光发射机。由于当前激光器达不到所希望的寿命,飞行激光器发射机仍然是一个高风险部件。本节还介绍对飞行激光器的要求、波长效应、候选光源、调制器、激光器效率、定时抖动和温控。5.3节介绍了光机装配件,包括一般要求和说明、光信道、设计方法、收-发隔离、杂散光控制、结构材料和光学设计实例。5.4节介绍激光器和控制器的飞行鉴定途径,包括环境要求和规程。第6章介绍地基终端体系结构。6.1.1节介绍单站下行链路接收和上行链路发射,讨论了选项和途径、站址分集、接收站设在云层上面(如气球、飞机或航天器)、上行链路信标、激光束传播安全以及大气效应的消减措施。6.1.2节介绍望远镜接收机阵列组成,包括权衡研究、实施方案和性能分析。6.2节介绍光电检测器,包括单检测单元(6.2.1节)和检测器阵列(6.2.2节),讨论对光电检测器的要求和挑战、光子计数检测器、实施选项和性能。6.3节介绍接收机电子线路,包括解调器体系结构、同步和检后滤波、各种解调器变型以及系统模型及体系结构。第7章介绍展望和应用,包括迄今为止的某些技术发展、导航跟踪和光科学应用。

Hamid Hemmati
Pasadena, California
2005年10月

致 谢

很多人对本书的工作作出了重要贡献。JPL 光通信组由 James Lesh 创立,他一直孜孜不倦地致力于规划有意义的光通信技术开发活动,并在 NASA、工业部门和其他政府组织内积极推动这项技术。Joseph Yuen 对本书眼光独具,一直在提醒作者本书的重要性,应当尽快出版。

作者要特别感谢 Joseph Katz, Don Sipes, William Marshall, Marc Rayman, Deborah Robinson, David Erickson, Kelley Cowles, Edward Kerr, Bonny Schumaker, Joseph Kovalik, Janet Wu, John Sundusky, Norman Page, Stephen Monacos, Homayoon Ansari, Juan Cenicerros, Jeffrey Charles, Vachik Garkanian, Carlos Esproles 和 Jerry Neal 对本书所述技术成果的重要贡献, Richard Matheson, William Weber, William Rafferty, Alaudin Bhanji, Kent Kellogg, Leslie Deutsch, Joseph Yuen, Stephen Townes, Fabrizio Pollara, Stephen Lichten, Ben Parvin, MiMi Aung, Samuel Zingales 作出的卓有成效的技术领导工作,还有许多其他对任务成功起着关键作用的人们。

没有多年来 NASA 基金通过 NASA 总部的非常有远见的科学家 Ramon DePaula 和 Barry Geldzahler 的大力支持,就没有这里的工作成果。

在 NASA 合同支持下,本工作在加州理工大学喷气推进实验室进行。

撰稿者简介

所有撰稿人都来自美国加州 Pasadena 的加州理工学院(Caltech)喷气推进实验室(JPL)。

Abhijit Biswas 于 1986 年在南伊利诺伊大学(Carbondale 分校)获分子科学博士学位。1992 年参加了 JPL 的光通信技术开发,前不久仍是火星激光通信验证项目的地面网系统工程师。

Chien-Chung Chen 于 1987 年在伊利诺伊大学(Urbana-Champaign 分校)获博士学位,博士论文是关于自由空间光通信。1987 年加入 JPL,从事光通信和深空射频系统开发,在深空通信链路的开发与运行两方面有着丰富的经验。Chen 博士是 JPL 火星激光通信验证项目的首席研究员。

Samuel J. Dolinar 于 1976 年在麻省理工学院(MIT)获电气工程博士学位,他的硕士和博士论文都是关于光通信。1980 年加入 JPL 之前,一直在 MIT 林肯实验室工作。过去十年来,Dolinar 博士主要研究深空信道的信道编码和信源编码,尤其是 Turbo 码和低密度奇偶校验(LDPC)码,还承担了加州理工学院的数据压缩教学工作。

William H. Farr 于 1976—1980 年间在加州理工学院学习,涉猎了化学、神经生物学、电气工程和计算机科学等多个领域,并在 7 个领域发表了著年。2001 年加入 JPL 之前,为一些工程和高技术企业工作,包括在核开发公司(Nucleonics Development Corporation)担任开发工业监视放射性同位素和光学仪器的部门主管,取得了两项专利。现在是星际网董事会 JPL 光通信技术计划的经理。

Andrew A. Gray 于 2000 年在南加州大学(洛杉矶)获电气工程博士学位,2004 年获工商管理硕士学位(MBA)。1998 年加入 JPL 之前,在 NASA 戈达德航天飞行中心工作了三年。他是通信体系结构和研究部门的组长,该小组的主要工作是开发通信和雷达系统的最新原型,拥有三项专利。Gray 博士还是华盛顿大学(华盛顿州西雅图)的客座教师。

Jon Hamkins 于 1990 年在加州理工学院获电气工程学士学位,1996 年在伊利诺伊大学(Urbana-Champaign 分校)获电气工程博士学位。1996 年

加入 JPL, 是研究光通信、信息论、信道编码、数据压缩与同步的信息处理小组的组长。

Hamid Hemmati 在南加州大学获得物理学硕士学位, 1981 年在科罗拉多州立大学(科罗拉多州 Fort Collins)获物理学博士学位。1986 年加入 JPL 之前, 作为研究员在 NASA 戈达德航天中心和国家科技研究所(NIST, 科罗拉多 Boulder)工作, 现在是深空与卫星通信的激光通信技术和系统开发的 JPL 光通信组的组长。拥有七项专利, 并在加州大学洛杉矶分校讲授光通信课程。

Chi-Wung Lau 于 1996 年在加州大学伯克利分校获物理学学士学位, 2001 年在南加州大学获电气工程硕士学位。1996 年加入 JPL, 参与了深度撞击、光学阵列接收机和远程通信预测预报工具等项目。现从事量子通信应用研究。

Shinhak Lee 于 1997 年在华盛顿大学获电气工程博士学位并加入 JPL, 在捕获、跟踪与指向(ATP)技术方面作出了贡献。Lee 博士是通信研究部光通信小组技术委员会委员。

James R. Lesh 于 1976 年在加州大学洛杉矶分校获电气工程博士学位, 1971 年加入 JPL。他历任多种技术和管理职位, 包括光通信计划主管, 现在是星际网董事会技术计划的首席专家和经理。拥有三项专利, 在加州理工学院讲授通信论、信息论、信道编码和信号处理。Lesh 博士是 IEEE 和 SPIE 的会员。

Bruce E. Moision 于 1999 年在加州大学圣迭戈分校获电气工程博士学位, 2000 年加入 JPL。主要从事光通信链路的纠错编码和调制方案的设计与实现工作, 是通信研究部门的信息处理小组成员。

Gerardo G. Ortiz 于 1997 年在新墨西哥大学获光电子工程博士学位, 1987 年加入 JPL。对用于深空射频通信的高电子迁移率功效晶体管(HEMT)超低噪声放大器、用于主干网的多波长垂直腔面发射激光器阵列和用于自由空间光通信的 ATP 技术开发作出了贡献。Ortiz 博士是光通信组委员会的高级委员。

Sabino Piazzolla 于 1997 年在南加州大学获电气工程博士学位, 2004 年加入 JPL 至今, 主要从事光通信研究。Piazzolla 博士也是加州大学洛杉矶分校的兼职教师。

William T. Roberts 于 2001 年在亚利桑纳大学获光科学博士学位, 同年加入 JPL 至今。Roberts 博士主要研究深空光通信激光器、通信终端部

件的飞行鉴定和大型天文望远镜转化为深空光通信接收机。

Meera Srinivasan 于 1990 年在加州理工学院获学士学位,1996 年在伊利诺伊大学(Urbana-Champaign 分校)获电气工程博士学位,1996 年加入 JPL 至今。她的研究兴趣包括光通信、无线和扩频通信系统、阵列信号处理和检测与估计理论。

Victor A. Vilmrotter 于 1978 年在南加州大学获电气工程博士学位,专业是光通信,1979 年加入 JPL 至今,开展了深空光学信道中的光通信和量子通信,通过焦平面信号处理对深空射频天线进行电子补偿,利用焦平面探测器阵列减弱大气湍流效应,以及基本光学阵列接收机概念的开发和验证等方面的研究。

Keith E. Wilson 于 1980 年在南加州大学获博士学位。1988 年加入 JPL 之前,在休斯研究实验室、联盟公司、Litton 制导与控制公司从事激光器研究。是加利福尼亚州立综合大学(加州 Pomona)的教师。Wilson 博士管理了 JPL 成功同航天器进行光通信的验证实验,是 JPL 通信体系结构和研究部的首席工程师。

Malcolm W. Wright 于 1992 年在新墨西哥大学(新墨西哥州 Albuquerque)获物理学博士学位。1998 年加入 JPL 之前,在空军研究实验室(AFRL)研究高功率激光器。当前主要从事开发下行链路和上行链路的高能光纤激光器、半导体和光纤激光器的空间鉴定,以及实验室和外场不同自由空间光链路演示的通信性能等方面的研究。

目 录

第 1 章 绪论	James R. Lesh	1
1.1 增强通信能力的诱因		1
1.2 JPL 光通信活动的历史		4
1.3 关键组件/子系统和技术		5
1.3.1 激光发射机		6
1.3.2 航天器载望远镜		7
1.3.3 捕获、跟踪与瞄准(ATP)		8
1.3.4 探测器		9
1.3.5 滤光器		11
1.3.6 纠错编码		11
1.4 飞行终端开发		13
1.4.1 光学收发组件		13
1.4.2 光通信验证设备		14
1.4.3 激光通信的测试评估站		16
1.4.4 X2000 飞行终端		16
1.4.5 国际空间站飞行终端		18
1.5 接收系统和网络研究		19
1.5.1 地面望远镜的成本模型		19
1.5.2 深空光学接收天线		20
1.5.3 深空中继卫星系统研究		21
1.5.4 地面天线技术研究		22
1.5.5 先进通信系统优势研究		23
1.5.6 地球轨道光学接收终端研究		24
1.5.7 EOORT 混合研究		24
1.5.8 球形地面主望远镜		25
1.5.9 天基和地基接收权衡		25
1.6 大气透射		28

1.7	背景光的影响	30
1.8	分析工具	30
1.9	系统级研究	31
1.9.1	金星雷达测绘任务研究	31
1.9.2	合成孔径雷达-C 自由飞行器	31
1.9.3	ER-2 到地面研究	33
1.9.4	千天文单位距离航天任务和恒星际任务研究	33
1.10	系统级验证	34
1.10.1	“伽利略”光学实验	34
1.10.2	补偿式地-月-地后向反射器激光链路	35
1.10.3	地面/轨道器激光通信验证实验	37
1.10.4	地-地验证实验	39
1.11	其他通信功能	41
1.11.1	光学测轨导航	42
1.11.2	光科学测量	42
1.12	前景	43
1.12.1	光通信望远镜实验室	43
1.12.2	无人机—地面验证实验	44
1.12.3	自适应光学系统	44
1.12.4	光学接收机和动态探测器阵列	45
1.12.5	其他形式地面接收系统	46
1.13	火星激光通信验证实验	47
	参考文献	48
第2章	链路与系统设计	Chien-Chung Chen 68
2.1	深空激光通信链路概述	70
2.2	通信链路设计	71
2.2.1	链路方程和接收信号功率	73
2.2.2	光学接收机灵敏度	74
2.2.3	链路设计的综合考虑	80
2.2.4	通信链路预算	81
2.2.5	链路可用性问题	82
2.3	光束瞄准与跟踪	87

2.3.1	下行链路光束瞄准	87
2.3.2	上行链路光束瞄准	90
2.3.3	瞄准捕获	91
2.4	其他设计驱动因素和考虑	92
2.4.1	系统质量和功耗	92
2.4.2	对航天器设计的影响	93
2.4.3	激光安全性	93
2.5	小结	94
	参考文献	96
第3章	大气信道 Abhijit Biswas and Sabino Piazzolla	98
3.1	云覆盖区统计	99
3.1.1	国家气候资料中心(NCDC)的数据集	100
3.1.2	单站和双站分集的统计	102
3.1.3	三站分集	109
3.1.4	NCDC 分析结论	111
3.1.5	利用卫星观测数据的云覆盖区统计	112
3.2	大气透过率与天空辐射率	114
3.2.1	大气透过率	114
3.2.2	气体分子吸收与散射	115
3.2.3	气溶胶吸收与散射	118
3.2.4	天空辐射率	124
3.2.5	背景辐射点源	131
3.3	大气对光学深空网中地面望远镜站址选择的影响	137
3.3.1	光学深空网	137
3.3.2	航天任务的数据传输率/误码率(BER)	140
3.3.3	望远镜站址	141
3.3.4	网络连续性和山峰	143
3.4	激光在湍流大气的传播	148
3.4.1	大气湍流	148
3.4.2	大气“视见”效应	152
3.4.3	光学闪烁或辐射度起伏	158
3.4.4	大气湍流导致的到达角变化	163

参考文献	165
第 4 章 光学调制与编码	Samuel J. Dolinar, Jon Hamkins, Bruce E. Moision, and Victor A. Vilnrotter 171
4.1 引言	171
4.2 被检测光场的统计模型	174
4.2.1 光场的量子模型	174
4.2.2 直接检测的统计模型	178
4.2.3 统计模型小结	183
4.3 调制形式	184
4.3.1 开-关键控	184
4.3.2 脉位调制	185
4.3.3 差分脉位调制	186
4.3.4 交迭脉位调制	187
4.3.5 波长偏移键控	187
4.3.6 组合 PPM 和 WSK	187
4.4 调制约束带来的码率限制	188
4.4.1 香农容量	189
4.4.2 约束	192
4.4.3 调制编码	193
4.5 不编码光调制的性能	197
4.5.1 泊松信道中的 OOK 直接检测	198
4.5.2 PPM 的直接检测	199
4.5.3 组合 PPM 和 WSK 的直接检测	203
4.5.4 利用基于量子检测理论接收机时的调制性能	204
4.6 光学信道容量	209
4.6.1 PPM 信道的容量: 通用公式	210
4.6.2 软判决 PPM 的容量: 具体信道模型	211
4.6.3 硬判决和软判决容量比较	212
4.6.4 采用 PPM 带来的损失	213
4.6.5 量子检测二进信道的容量	214
4.7 光学调制的信道编码	216
4.7.1 Reed-Solomon 码	217

4.7.2	光学调制中的 Turbo 或类 Turbo 码	218
4.8	编码光学调制的性能	219
4.8.1	参数选择	219
4.8.2	性能估计	221
4.8.3	可达数据传输率同平均信号功率之间的关系	223
	参考文献	225
	符号	232
 第 5 章 飞行收发器 Hamid Hemmati, Gerardo G. Ortiz, William T. Roberts, Malcolm W. Wright, and Shinhak Lee 234		
5.1	光机子系统	234
5.1.1	引言	234
5.1.2	光路径	235
5.1.3	光学设计要求、设计考虑和挑战	237
5.1.4	光学设计考虑与方法	239
5.1.5	收-发隔离	240
5.1.6	杂散光抑制	241
5.1.7	发射、准直和波前质量预算	242
5.1.8	激光器到遮挡望远镜的有效耦合	243
5.1.9	结构、材料和结构分析	246
5.1.10	光纤的使用	248
5.1.11	用于捕获和跟踪的星体跟踪器光学系统	248
5.1.12	温控	248
5.1.13	光学系统设计实例	249
5.2	激光发射机	260
5.2.1	引言	260
5.2.2	要求和挑战	261
5.2.3	可用的激光发射源	265
5.2.4	用于相干通信的激光器	273
5.2.5	激光调制器	273
5.2.6	效率	274
5.2.7	对激光器定时抖动的控制	275
5.2.8	冗余	276