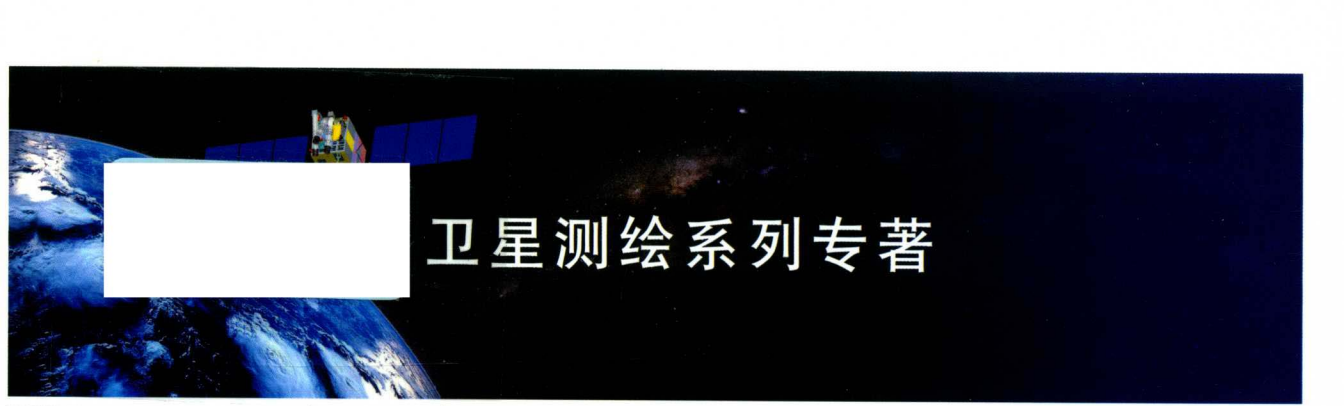
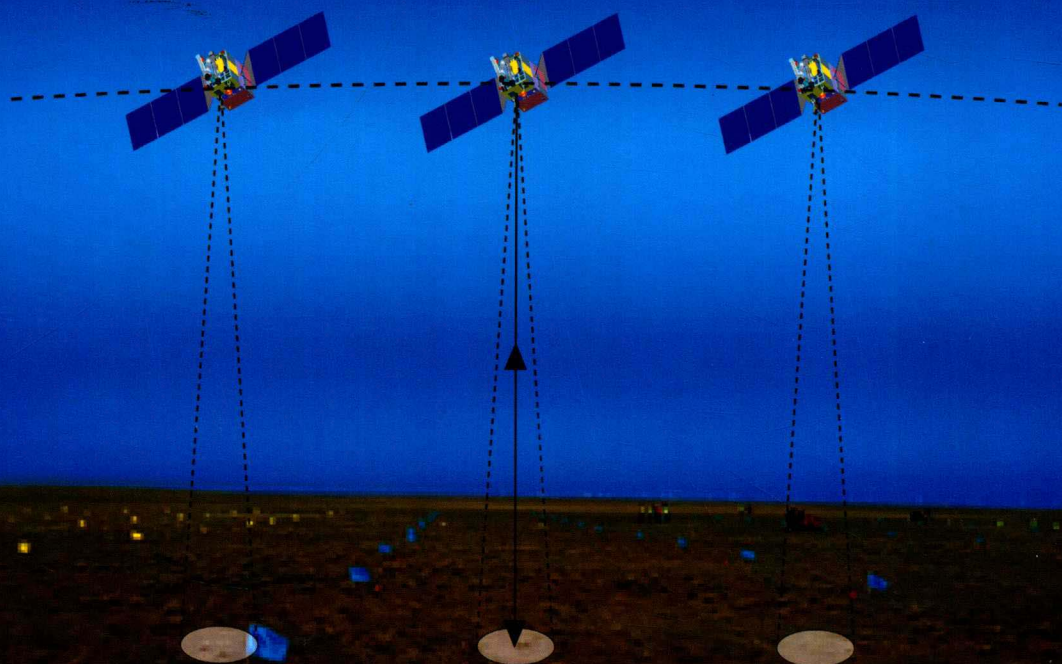




卫星测绘系列专著

对地观测卫星激光测高 数据处理方法与工程实践

唐新明 李国元 / 著



科学出版社

卫星测绘系列专著

对地观测卫星激光测高 数据处理方法与工程实践

唐新明 李国元 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书分析卫星激光测高的现状及发展趋势,重点论述对地观测卫星激光测高数据处理技术,研究国产卫星激光测高仪在轨几何检校方法,提出广义激光高程控制点自动提取算法,开发对地观测卫星激光测高数据处理系统,开展激光测高数据在航天摄影测量、林业树高生物量测量、极地冰盖监测等方面的应用研究,并对下一代单光子激光测绘卫星进行展望。

本书是作者近年来在对地观测卫星激光测高数据处理与应用方面的研究成果总结,适合从事测绘、遥感、大地测量专业及其他相关专业的科学和工程技术人员参考使用,也可作为高等院校相关专业的教学和研究资料。

图书在版编目(CIP)数据

对地观测卫星激光测高数据处理方法与工程实践/唐新明,李国元著. —北京:科学出版社,2019.2

(卫星测绘系列专著)

ISBN 978-7-03-060473-6

I. ①对… II. ①唐… ②李… III. ①激光测地卫星-数据处理 IV. ①V474.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 017417 号

责任编辑:杨光华/责任校对:湛 莉

责任印制:彭 超/封面设计:黄华斌

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>

武汉精一佳印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2019 年 2 月第 一 版 印张:12 1/2

2019 年 2 月第一次印刷 字数:293 000

定价:158.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

1917年爱因斯坦提出了一套全新的技术理论——光与物质相互作用。即在组成物质的原子中,有不同数量的粒子(电子)分布在不同的能级上,在高级能级上的粒子受到某种光子的激发,会从高级能级跳(跃迁)到低能级上,这时将会辐射出与激发它的光相同性质的光,而且在某种状态下,能出现一个弱光激发出一个强光的现象。这就叫做“受激辐射的光放大”,简称激光。1958年,美国科学家肖洛和汤斯发现了一种神奇的现象:当他们将氖光灯泡所发射的光照在一种稀土晶体上时,晶体的分子会发出鲜艳的、始终会聚在一起的强光。根据这一现象,他们提出了“激光原理”,即物质在受到与其分子固有振荡频率相同的能量激发时,都会产生这种不发散的强光——激光。汤斯因此获得1964年的诺贝尔物理学奖。1960年5月15日,美国加利福尼亚州休斯研究实验室的科学家梅曼宣布获得了波长为 $0.6943\text{ }\mu\text{m}$ 的激光,这是人类有史以来获得的第一束激光,梅曼因而也成为世界上第一个将激光引入实用领域的科学家。1962年,人类发明半导体二极管激光器,这是今天小型商用激光器的支柱。

半个多世纪以来,激光技术取得了飞速发展,目前激光已经广泛用于激光加工(包括切割、焊接、表面处理、打孔、热处理等)、激光医学(如激光生命科学研究、激光诊断、激光治疗)、激光成像、军事武器、动力推进、激光通信、激光测量、激光材料等广阔的应用领域。

在激光测量领域,1969年激光被用于遥感勘测,通过射向美国阿波罗11号放在月球表面的反射器的激光,测得的地月距离误差在几米范围内。1971~1972年间,美国登月计划中的阿波罗15号、16号和17号均搭载激光测高仪,使用的氙灯泵浦的机械调Q红宝石激光器是最早的激光测高系统,星载激光雷达技术开始起步。2007年10月我国首颗探月卫星嫦娥一号(CE-1)发射成功,中国成为世界上第五个发射月球探测器的国家和地区,实现对月球全球性与综合性的环绕探测。嫦娥一号激光测高仪是我国第一个星载激光测高仪,获取了月球大量的高程信息。

在对地观测方面,2003年美国发射了ICESat卫星,卫星上搭载了地球科学激光测高系统GLAS,首次实现对地球进行高精度的激光测高,在全球高程控制点测量、极地冰盖高程变化监测、森林碳储量估算等方面得到了较好的科学应用,受到广泛关注。2016年5月30日,我国的资源三号02星成功发射,卫星搭载了国内首台对地观测的激光测高仪,开始了我国自主对地观测技术的新尝试。

《对地观测卫星激光测高数据处理方法与工程实践》一书就是作者在卫星激光测高技术方面多年来的凝练和总结。他们在卫星激光测高的原理、数据处理方法、激光几何检校

以及激光与光学影像联合平差方面进行了有益的尝试。作者提出了卫星激光严密几何模型,分析了国产卫星激光测高存在的问题,并创造性地提出了两步法检校的思路,在激光测高仪存在较大的系统误差和卫星 24 小时预报的前提下,成功地在地面捕捉到 500 km 高空发射到地面的激光光斑,首次对我国激光测高载荷进行了几何检校,修正了系统存在的指向误差,大幅度提高了我国卫星激光测高的精度。我国首颗卫星激光测高仪的高程精度达到 0.8 m 以内。虽然这个激光测高仪是一个简易的载荷,但它对提高卫星的测图精度,特别是高程精度是非常重要的。通过这些年不懈地努力,他们不仅建立了激光测高数据处理系统,处理了大量激光测高数据,建立了激光高程点数据库,还全面提振了我国自主设备研制的信心,为后续业务化应用的载荷研制奠定了坚实的基础。

高分七号即将发射,之后陆地生态系统碳监测卫星也将升空,后续的激光测高卫星也在不断探索之中。希望他们继续努力,为我国自主的卫星激光测高系统的建设作出更大的贡献。

中国工程院院士



2018 年 11 月

前 言

激光测高卫星是指采用激光手段主动获取全球地表及目标三维信息的遥感卫星,能为快速获取包括境外地区在内的高程甚至三维控制点以及立体测图提供服务,同时在极地冰盖测量、植被高度及生物量估测、云高测量、海面高度测量以及全球气候监测等方面都可以发挥重要作用。

激光测高卫星是对地观测卫星体系中的有机部分,更是我国测绘卫星系列的重要成员,在国务院制定的发展规划中均得到明确体现。其中,《国务院办公厅关于促进地理信息产业发展的意见》(国办发〔2014〕2号)指出:用5至10年时间,使我国地理信息获取能力明显提升。发展测绘应用卫星、高中空航摄飞机、低空无人机、地面遥感等遥感系统、加快建设航空航天对地观测数据获取设施,形成光学、雷达、激光等遥感数据获取体系,显著提高遥感数据获取水平。加强遥感数据处理技术研发,进一步提高数据处理、分析能力。国务院已经批复的《国家地理信息产业发展规划(2014—2020年)》指出:要加快产业发展基础设施建设,加快我国卫星遥感基础设施建设,尤其是光学立体测图卫星、干涉雷达卫星、激光测高卫星等的建设。在国家测绘地理信息局2016年发布的《卫星测绘“十三五”发展规划》中明确指出:建立基于激光测高数据的全球广义高程控制点库,支撑国家基础地理信息快速更新和全球三维地理信息的获取,同时要加快推进单光子激光测高卫星等新型测绘遥感卫星的指标论证与立项实施。

美国在2003年成功发射冰星ICESat(ice, cloud and land elevation satellite),卫星上搭载了GLAS(geo-sciences laser altimeter system)地球科学激光测高系统,是世界上首颗对地观测的激光测高卫星,ICESat卫星已于2009年停止工作,但在极地冰盖高程变化监测、全球高程控制点获取、全球森林生物量估算等多个领域取得了重要的突破,在国际上影响显著。美国计划在2018年发射搭载了更先进的单光子探测的激光测高载荷ATLAS(advanced topographic laser altimeter system)的ICESat-2卫星以及国际空间站上用于全球生态系统动力学调查的GEDI(global ecosystems dynamics investigation)激光测高载荷,高精度激光地形测量卫星LIST(lidar surface topography)也正在预研之中。

我国在2007年发射的“嫦娥一号”探月卫星上搭载了激光测高仪,实现了对月球的激光探测,完成了三维月球表面模型的制作。但对地观测领域,国产卫星激光测高一直处于空白状态,与对月探测相比,激光受大气环境、复杂地形地物影响更大,数据处理难度更大、精度要求更高。国内对对地激光测高的研究以GLAS产品数据开展应用研究为主,

由于原始数据源的缺失,对于高精度的对地观测卫星激光测高数据几何处理理论与方法基本很少涉及。鉴于卫星激光测高的高精度数据获取和应用能力,迫切需要系统性地开展数据处理理论研究,形成相应的技术体系,支撑后续国产对地观测的激光测高卫星发展。

2016年5月30日我国成功发射了资源三号02星。卫星上搭载了我国首台对地观测的卫星激光测高试验性载荷,笔者和原国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心的同事一起联合武汉大学、黑龙江测绘地理信息局、陕西测绘地理信息局、内蒙古自治区测绘地理信息局、中国科学院安徽光学精密机械研究所(简称中科院安光所)、中国空间技术研究院(中国航天科技集团公司五院)、北京市遥感信息研究所以及苏尼特右旗人民武装部等多家单位,开展了资源三号02星激光测高仪在轨几何检校与数据处理工作,成功实现了地面对卫星发射的微弱激光脉冲信号的有效捕捉以及激光数据的业务化处理,取得了国内在该领域的技术突破,首次实现了我国对地观测激光测高仪的高程数据处理,为未来国产高分七号卫星、陆地生态系统碳监测卫星的激光测高数据处理奠定了坚实基础。

本书以对地观测卫星激光测高数据处理与应用为主线,依托笔者指导的该领域涉及国产激光测高卫星数据的国内首篇博士学位论文《对地观测卫星激光测高数据处理方法与工程实践》,结合笔者多年来在该领域的研究成果,参考美国的ICESat上搭载的GLAS激光测高数据处理经验,同时结合国产资源三号02星以及后续高分七号、陆地生态系统碳监测卫星激光测高仪的实际情况,系统性地总结对地观测卫星激光测高数据处理的理论与方法,提出“两步法”在轨几何检校方案、多准则约束的广义激光高程控制点提取方法,实现了国产卫星激光数据与可见光立体影像数据的联合处理和应用,解决了资源三号卫星在无地面控制点时难以全面满足1:50 000立体测图高程精度的问题,同时为“全球地理信息资源建设”等国家重大工程项目提供重要技术支撑。

需要指出的是,由于国产对地观测的资源三号02星激光测高仪是一个简易的激光测高装置,不具备波形采样和记录功能,也无足印影像拍摄功能,而国产高分七号卫星、陆地生态系统碳监测卫星还未发射,在针对国产卫星激光测高仪的全波形数据处理方面还存在一定欠缺,还有待结合国产卫星的工程进展作进一步更深入的研究。

全书共10章,由唐新明、李国元负责编写,唐新明负责全书统稿和校对。本书编写过程中得到了谢俊峰、高小明、陈继溢、付兴科、朱广彬、唐洪钊、窦显辉、张悦等人员的支持,采用的激光地面探测器分别由武汉大学李松团队和中科院安光所郑小兵团队研制,谢俊峰博士在激光地面探测器的研制和地面几何检校方面开展了大量卓有成效的工作,项目组的崔成玲、黄朝围、张重阳、袁小棋、许艺藤、权学烽等研究生也参与了部分工作。航天五院总体部的张新伟高级工程师、上海技术物理研究所的黄庚华研究员、东北林业大学的邢艳秋教授以及武汉大学的金涛勇老师、马跃博士等为本书提供了部分图片或试验数据。

本书得到了国家自然科学基金项目(41601505,41871382)、国家国防科技工业局

高分辨率对地观测系统重大专项“高分遥感测绘应用示范系统”(AH1601)、国家基础测绘科技项目(2018KJ0204)、高分辨率对地观测系统重大专项应用共性关键技术项目(11-Y20A11-9001-17/18、11-Y20A13-9001-17/18)、国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项项目(2016YFE0205300)、国家高分辨率对地观测青年创新基金(GFZX04061502)、中国科学院主动光学重点实验室开放基金(2018-ZDKF-1)以及江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心的资助,在此一并表示感谢。

由于近几年国内外卫星激光测高技术发展较快,受时间和认识限制,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正。

唐新明

2018年11月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 卫星激光测高发展概况	1
1.2 国内外卫星激光测高发展现状	5
1.2.1 已发射的星载激光测高仪	5
1.2.2 国外计划发射的星载激光测高仪	13
1.3 卫星激光测高技术对比分析	17
1.3.1 与卫星雷达测高的对比分析	17
1.3.2 与卫星激光测距的对比分析	18
第 2 章 卫星激光测高基本原理与相关测量基准	20
2.1 卫星激光测高基本原理与系统构成	20
2.1.1 基本原理	20
2.1.2 系统构成	21
2.2 空间基准与时间基准	26
2.2.1 空间基准	26
2.2.2 时间基准	30
第 3 章 卫星激光测高严密几何模型与误差分析	34
3.1 国内外研究现状	34
3.2 卫星激光测高严密几何模型构建	35
3.3 误差分析	37
3.3.1 硬件误差	38
3.3.2 地形起伏引起的误差	41
3.3.3 光行差影响及改正	44
3.4 各类潮汐影响及改正	44
3.5 大气折射对激光的影响及改正	46
3.5.1 大气折射率的计算	46
3.5.2 平面偏移改正	50

3.5.3 距离延迟改正	52
第4章 卫星激光测高全波形数据模拟与处理	56
4.1 国内外研究现状	56
4.2 在轨回波模拟仿真	57
4.2.1 激光雷达方程	57
4.2.1 回波信号模拟	60
4.3 全波形数据处理方法	62
4.3.1 波形预处理	63
4.3.2 波形分解	64
4.3.3 特征参数提取	66
第5章 ICESat/GLAS 及资源三号 02 星激光测高系统	68
5.1 ICESat/GLAS 激光测高系统	68
5.1.1 ICESat/GLAS 载荷基本信息	68
5.1.2 ICESat/GLAS 数据处理方法及产品	72
5.2 资源三号 02 星激光测高仪	76
5.2.1 资源三号 02 星概述	76
5.2.2 资源三号 02 星试验性激光测高仪	77
5.3 资源三号 02 星激光测高理论精度分析	79
第6章 卫星激光测高仪在轨几何检校方法	82
6.1 国内外研究现状	82
6.2 卫星激光测高仪“两步法”在轨几何检校	83
6.2.1 基于地形匹配的激光指向角粗检校	83
6.2.2 基于地面探测器的精确几何检校	86
6.3 基于 GLAS 模拟数据的粗检校试验	89
6.4 资源三号 02 星激光在轨几何检校试验	92
6.4.1 资源三号 02 星激光测高数据原始精度	93
6.4.2 资源三号 02 星激光测高仪两步法在轨几何检校	96
6.4.3 检校后几何精度验证	100
第7章 卫星激光高程控制点自动提取及数据库建设	105
7.1 国内外研究现状	105

7.2	多参数多准则约束的激光高程控制点自动提取方法	106
7.2.1	基于公开地形数据的激光足印点粗差剔除	106
7.2.2	激光测距属性参数约束的粗粒度筛选	108
7.2.3	回波波形特征参数约束的精细化提取	109
7.3	全球广义激光高程控制点数据库设计	111
7.3.1	广义激光高程控制点	111
7.3.2	数据库总体设计	112
7.3.3	广义激光高程控制点库结构设计	114
7.4	精度验证与分析	116
第8章	卫星激光测高数据与光学卫星影像联合处理	118
8.1	国内外研究现状	118
8.2	卫星激光测高数据与立体影像联合平差方法	119
8.2.1	基于严密几何模型的联合平差解算	120
8.2.2	基于有理函数模型的联合平差解算	123
8.2.3	激光与影像的有效配准	125
8.3	试验分析	126
8.3.1	GLAS激光测高数据与资源三号影像联合平差	126
8.3.2	资源三号02星激光测高数据与影像联合平差	128
8.3.3	分析与总结	138
第9章	软件设计与工程应用	139
9.1	卫星激光测高数据产品体系设计	139
9.2	软件系统开发	142
9.2.1	需求分析	142
9.2.2	功能介绍	142
9.3	卫星激光测高数据工程化处理	146
9.3.1	GLAS激光测高数据处理	146
9.3.2	资源三号02星激光测高数据处理	148
9.4	卫星激光测高数据的应用	155
9.4.1	在林业树高参数提取中的应用	155
9.4.2	在冰盖监测中的应用	159
9.4.3	在航天摄影测量中的应用	162

第 10 章 卫星激光测高系统展望	165
10.1 国产高分七号卫星激光测高系统	165
10.2 国产陆地生态系统碳监测卫星激光测高系统	169
10.3 美国 ATLAS 先进地形激光测高系统	170
10.4 对后续国产激光测高卫星发展的几点思考	174
参考文献	175
后记	185

第 1 章 绪 论

卫星激光测高技术起源于 20 世纪 70 年代,被誉为 21 世纪对地观测领域的三大核心技术之一。本章对卫星激光测高的发展进行综述,重点对卫星激光测高系统的发展现状与趋势进行系统性梳理,并对卫星激光测高、卫星雷达测高以及卫星激光测距三种不同的技术进行对比分析,凸显卫星激光测高技术的特点。通过分析卫星激光测高对地观测与地外星球观测的区别,说明后续开展严密几何模型构建、大气改正、潮汐改正、在轨几何定标、高程控制点提取等关键技术研究的必要性。

1.1 卫星激光测高发展概况

激光雷达技术与成像光谱、合成孔径雷达一起被列为对地观测系统(Earth observing system, EOS)计划中三大核心的信息获取与处理技术(唐新明 等, 2017a; 刘经南 等, 2003)。按平台划分,可分为卫星激光雷达、机载激光雷达、车载激光雷达、地面激光雷达等。卫星激光雷达总体上包括:用于测 CO_2 等大气微量和痕量气体含量的差分吸收激光雷达、测风场的多普勒激光雷达、测云层与气溶胶的后向散射激光雷达以及测高激光雷达,美欧已经发射了相应的星载激光载荷,如正交偏振云-气溶胶激光雷达(cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization, CALIOP)、空间激光雷达试验项目(lidar in-space technology experiment, LITE)中的星载差分吸收激光雷达(differential absorption lidar, DIAL)、后向散射光雷达(atmosphere LIDAR, ATLID)和多普勒测风激光雷达 ALADIN 等(朱孟真 等, 2012; 李然 等, 2007)。

严格来说,卫星激光测高属于卫星激光雷达的一个子类。卫星激光测高具备主动获取目标三维信息的能力,能快速获取全球高精度控制点数据以及三维地形,同时在对地观测领域的极地冰盖测量、植被高度及生物量估测、云高测量、海面高度测量以及全球气候监测等方面都可以发挥重要作用。本书重点研究卫星激光测高技术,也简称 SLA (satellite laser altimetry),其中的字母 A 也可代表测高仪(altimeter)。

欧美发达国家特别是美国,经过几十年的发展,在卫星激光测高方面已经积累了丰富的经验和应用成果。在 20 世纪,1971 年美国的阿波罗 15 号所载的激光测高仪是目前具有资料可考的最早的星载激光测高仪(Sjogren et al., 1973);1994 年,美国在 Clementine 探月计划中通过搭载的激光测高仪获取了月球表面的高精度地形数据(Smith et al., 1997);1996 年和 1997 年美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)先后两次在航天飞机上搭载了激光测高仪,即 SLA-01(Shuttle Laser Altimeter-01)和 SLA-02(Shuttle Laser Altimeter-02),建立了基于 SLA 的全球控制点数据库,获取了高精度全球控制点信息(Garvin et al., 1998);1996 年 11 月 MOLA

(Mars orbiter laser altimeter)搭载在美国国家航空航天局戈达德空间飞行中心(Goddard Space Flight Centre, GSFC)研制的火星全球勘探者号(Mars global surveyor, MGS)宇宙飞船上,历时两年到达火星,获得了大量火星表面的特征数据(Smith et al., 2001);1996年激光测高仪 NLR(NEAR laser range finder)搭载在近地小行星交会探测器尼尔(near Earth asteroid rendezvous, NEAR)上对 Eros 小行星进行地形观测(Cole, 1998)。

21 世纪初,美国于 2003 年将 GLAS 激光测高仪搭载在 ICESat 对地观测卫星上,用于观测极地冰川和海冰的高程及厚度变化,该卫星是美国 EOS 计划中的一个重要部分,也是资源三号 02 星之前唯一一颗对地观测的激光测高卫星,已于 2009 年停止工作(Wang et al., 2011; Schutz et al., 2005)。2006 年发射的水星激光测高仪(Mercury laser altimeter, MLA)是水星表面形貌、空间环境、星体化学及测距计划(Mercury surface, space environment, geochemistry, and ranging, MESSENGER)的有效载荷(Cavanaugh et al., 2007),于 2011 年 7 月到达水星轨道并开始获取数据;2006 年日本发射的月亮女神 SELENE(selenological and engineering explorer)探月卫星也搭载了激光测高仪(laser altimeter, LALT),日本利用所获测高数据建立了包括两极地区的精准月球全球地形图,同时分析月球重力和地形数据(Kase et al., 2003);2007 年中国在“嫦娥一号”月球探测卫星上搭载激光测高仪,成功实现对月球的高程测量(平劲松等, 2008; 欧阳自远, 2004);2008 年 10 月印度发射的“月船一号”(Chandrayaan-1)上搭载了激光测距仪(lunar laser ranging instrument, LLRI),用于提供探测器距离月球表面的精确高度,测量月球全球地形(Vighnesam et al., 2010);2009 年 7 月第一个空间多光束激光测高仪(lunar orbiter laser altimeter, LOLA)搭载在月球轨道飞行器(lunar reconnaissance orbiter, LRO)上升空,用于帮助人类探索月球时选择合适的着陆点(Smith et al., 2010)。

最近几年,欧美国家在地外星系探测中大量使用激光测高仪。其中,美国在 2016 年 9 月 8 日发射的用于探测小行星 Bennu 的源光谱释义资源安全风化层辨认探测器(origins spectral interpretation resource identification security-regolith explorer, OSIRIS-Rex)上搭载了激光测高仪(OSIRIS-REx laser altimeter, OLA),用于获取贝努小行星的地表模型和采样区的高精度地形^①;欧洲空间局(European Space Agency, ESA)的水星探测器(Mercury planetary orbiter, MPO)也将搭载 BELA(bepiColombo laser altimeter)激光测高仪(Thomas et al., 2007),原计划于 2016 年发射后被推迟到 2018 年发射升空,用于研究水星星体地貌;欧洲空间局还计划在 2022 年发射用于探测木卫三 Ganymede 的 JUICE(Jupiter Icy Moons Explorer)探测器上搭载激光测高仪 GALA(the Ganymede laser altimeter),用于木卫三的地形信息获取,目前该计划正在紧锣密鼓进行中(Hussmann et al., 2014)。

除计划在地外星球探测中大量使用激光测高仪外,美国在未来 5 年也部署了至少三个搭载激光测高仪的对地观测计划,将于 2018 年在国际空间站(International Space

^① 引自: LAURETTA D S, 2015. OSIRIS-REx Asteroid Sample-Return Mission. The University of Arizona. NASA Goddard Space Flight Center. Lockheed Martin.

Station,ISS)上搭载 GEDI 激光测高载荷用于全球植被生物量测量,研究碳循环和全球气候变化等,GEDI 激光器工作重频为 242 Hz,波长 1 064 nm,发射激光将通过光学衍射单元被分成 14 束,每个激光足印大小为 25 m,垂轨方向足印相隔 500 m,扫描宽度总和为 6.5 km(Guo et al.,2015)。美国的 ATLAS 是计划于 2018 年发射的 ICESat-2 卫星上搭载的新一代激光测高仪,目的是用于继续执行 ICESat 未完成的观测任务,主要用于长期研究海冰变化及森林冠层覆盖的科学研究,ATLAS 激光工作频率为 10 kHz,沿轨间隔约 0.7 m,将采用先进的光子计数技术(Abdalati et al.,2010);除 ICESat-2 之外,美国国家研究委员会(National Research Council,NRC)还提出了未来的高精度地形测量计划 LIST,主要用于获取全球 5 m 格网大小和 10 cm 高程精度的地形信息,以及森林植被、湖泊水系、极地冰盖等的高程变化量等,目前仍在论证中,预计在 2020 年之后发射(崔成玲 等,2015;Yu et al.,2011)。表 1.1 列出了当前已有或计划发射的卫星激光测高系统的平台及发射时间等有关信息,表 1.2 中详细列出了目前能查阅到的相关具体参数。

表 1.1 已有或计划发射的卫星激光测高系统基本信息表

时间	国家或组织	平台/载荷名称	探测目标	用途	备注
1971~1972 年	美国	阿波罗 15 号、16 号、17 号	月球	月球形状测量、辅助影像测图	
1994 年	美国	Clementine/LIDAR	月球	月球表面地形信息获取	
1996 年	美国	航天飞机/SLA-01	地球	全球高程控制点获取	
1997 年	美国	航天飞机/SLA-02	地球	全球高程控制点获取	
1996 年	美国	MGS/MOLA	火星	火星地形测量	
1996 年	美国	NEAR/NLR	小行星	Eros 小行星地形测量	
2003 年	美国	ICESat-1/GLAS	地球	极地冰盖、全球植被测量等	
2006 年	美国	Messenger/MLA	水星	水星表面地形测量	
2007 年	日本	SELENE/LALT	月球	月球全球地形图测量	
2007 年	中国	CE-1/LAM	月球	月球地形测量	
2008 年	印度	Chandrayaan-1/LLRI	月球	月球地形测量	
2009 年	美国	LRO/LOLA	月球	月球地形测量、着陆点选择	
2016 年	中国	ZY3-02/SLA	地球	高程控制点测量	
2016 年	美国	OSIRIS-Rex/OLA	小行星	地形测量、着陆点选择	
2019 年	中国	GF-7/SLA	地球	全球高程控制点测量	待发射
2020 年	中国	林业碳卫星/SLA	地球	全球植被、高程控制点测量等	待发射
2018 年	美国	ISS/GEDI	地球	全球植被测量	待发射
2018 年	美国	ICESat-2/ATLAS	地球	极地冰盖、全球植被测量等	待发射
2018 年	欧洲空间局	MPO/BELA	水星	水星表面地形测量	待发射
2022 年	欧洲空间局	Ganymede/GALA	木卫三	木卫三表面地形测量	待发射
2022 年后	美国	LIST/LIDAR	地球	高精度地形快速测量	计划中

表 1.2 国内外激光测高卫星主要技术指标

卫星名称	发射时间	国家或组织	探测方式 (线性/单光子)	激光波 束数	发射脉冲 宽度/ns	足印间隔 /m	重访 天数	足印 大小/m	高程测量 精度/m
Clementine	1994 年	美国	线性	1 波束	10	100	/	250	40
SLA-01/02	1996/97 年	美国	线性	1 波束	10	750	/	100	1.5
MGS/MOLA	1996 年	美国	线性	1 波束	5	330	/	160	10
NEAR/NLR	1996 年	美国	线性	1 波束	12	/	/	15	<6
ICESat-1/GLAS	2003 年	美国	线性	1 波束	6	170	8/183	70	0.15
Messenger/MLA	2006 年	美国	线性	1 波束	6	/	176	/	<1
SELENE/LALT	2007 年	日本	线性	1 波束	17	500	/	40	5
CE-1/LAM	2007 年	中国	线性	1 波束	5-7	1 400	/	200	5
LRO/LOLA	2009 年	美国	线性	5 波束	5	25	37	5	0.1
CE-2	2010 年	中国	线性	1 波束	10	/	/	40	5
资源三号 02 星	2016 年	中国	线性	1 波束	7	3 500	59	75	1.0
BepiColombo MPO/BELA	2018 年	欧洲空间局	线性	1 波束	10	250	/	24	1.9
高分七号	2019 年	中国	线性	2 波束	7	2 330	59	30	1.0
陆地生态系统 碳监测卫星	2020 年	中国	线性	5 波束	7	200	59	25~30	1.0
ICESat-2/ATLAS	2018 年	美国	单光子	6 波束	1	0.7	91	17.5	0.1
GEDI	2018 年	美国	线性	14 波束	10	500	/	25	1.0
LIST	2022 年后	美国	单光子	1 000 波束	0.96	0.7	/	5	0.1

激光测高仪与光学相机组合的方式,在对月球、火星等地外空间进行探测的任务中得到广泛的应用,如我国的嫦娥一号/二号同时搭载了激光测高仪(laser altimeter,LAM)和三线阵 CCD 立体相机;美国的月球侦察轨道器 LRO 上同时搭载了 5 波束的激光测高仪 LOLA 及 LROC(lunar reconnaissance orbiter camera)(Smith et al.,2010);美国的火星全球勘探者(MGS)上同时搭载了火星轨道激光测高仪(MOLA)和轨道勘测相机(Mars orbiter camera,MOC)(Smith et al.,2001)。在卫星对地观测方面,美国 2003 年发射的 ICESat-1 卫星曾经是唯一一颗用于对地观测的激光测高卫星,但该卫星并未搭载用于对地观测的光学相机。在卫星对地观测领域,资源三号 02 星是第一颗同时搭载了光学相机与激光测高仪的卫星。

此外,对地观测与月球/火星等空间探测环境有很大不同。其一是地球的外部观测环境与地外空间探测环境不一样,对地观测卫星载荷的探测环境更复杂,激光测高仪更容易受地球周围大气层、地球表面各类复杂地形地物的影响,而这在对地外空间探测时一般是可忽略的,而且对地观测处理精度要求远高于地外空间探测,因此,在激光数据处理方面

对地观测卫星远比地外星球更复杂、要求更高。其二是国产激光测高仪的硬件水平还有限,特别是重复频率不够高,目前设计主要用于影像的稀少高程控制点获取。如国产高分七号卫星轨道高度为 500 km,搭载的激光测高仪重复频率仅为 3 Hz,相当于激光足印点地面间隔为 2.5 km,在联合处理时观测值相对较少,这与地外空间探测时低轨道重复观测而形成的较为密集的激光足印点有显著区别。此外高精度在轨几何检校及激光与影像联合平差处理方法也需要结合实际情况开展研究。表 1.3 直观对比显示了对地观测与地外星球卫星激光测高的区别。

表 1.3 对地观测与其他星球卫星激光测高的对比分析

参数	对地球观测	对其他星球观测
大气	影响大且必须改正	基本可忽略
轨道高度	较高,点稀疏	较低,点相对较密
地物	影响大且必须考虑	基本不考虑
精度要求	高,亚米级甚至更高	一般,米级甚至更低
用途	高程控制、冰盖/植被测量	地形测量

目前对地观测的卫星激光测高数据一般具有地面足印光斑较大、密度较稀、高程精度较高的特点,主要用于全球高精度的高程控制点获取,以及全球森林树高反演及生物量估算、极地冰盖厚度变化监测等地学应用。因此,针对搭载在对地观测卫星上的激光测高仪,特别是国产卫星激光测高数据在航天摄影测量中的应用需求,开展激光测高数据几何处理、高精度在轨几何检校及激光与影像联合平差等若干关键技术的攻关研究非常必要,能有效填补国内相关的研究空白,也具有很好的实际应用价值。

1.2 国内外卫星激光测高发展现状

1.2.1 已发射的星载激光测高仪

1. 美国 Clementine 月球激光测高仪

1994 年 1 月 25 日,由美国国防部和美国国家航空航天局联合研制的月球探测 Clementine 系统在范登堡空军基地第四(西)发射场以 TitanII 发射升空,主要目标是检测暴露在空间环境下的传感器和航天器部件的性能以及对月球和近地小行星 1620 进行科学观测。这些观测数据用于月球和小行星表面矿物质估计、获取 60°N~60°S 范围内的月球测高数据以及确定小行星大小、形状、旋转特征、表面特性和撞击坑等。

Clementine 月球激光测高系统的主要技术参数包括:测距范围 500~640 km(极限),垂直分辨率 40 m,水平分辨率 100 m,系统重量 2.37 kg,功耗 6.8 W,激光器为全固态 Nd:YAG 激光器,工作波长 1 064 nm/532 nm,单脉冲能量 171 mJ(1 064 nm)/9 mJ(532 nm),脉宽<10 ns,光束发散角<0.5 mrad(1 064 nm)/4 mrad(532 nm),长时间连续工作时的重复频率为 1 Hz、连续工作 400 次重复频率为 8 Hz,光学发射系统为 5 倍伽利略望远镜,通光口径为 38 mm,光学接收系统与高分辨率 CCD 相机共用,数据下传速率 64 kb/s、光电