

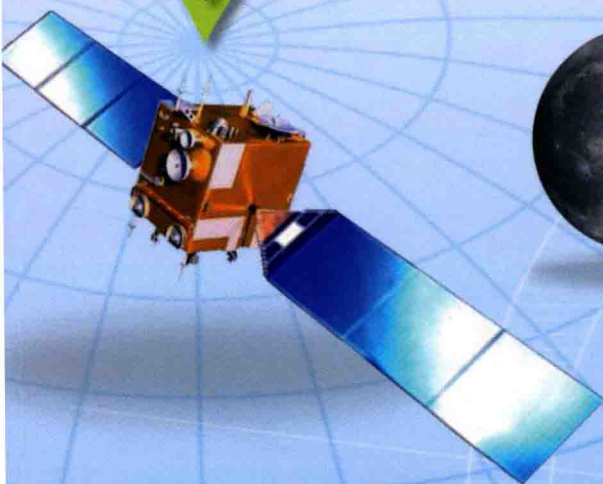


测绘地理信息科技出版资金资助
CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

嫦娥一号 激光高度计数据 不确定性及整体平差

Uncertainty Analysis and
Global Adjustment of Chang'e-1
Laser Altimeter Data

胡文敏 邸凯昌 著



测绘出版社

江苏高校优势学科建设工程
测绘地理信息科技出版资金资助

嫦娥一号激光高度计数据不确定性 及整体平差

Uncertainty Analysis and Global Adjustment of Chang'e-1
Laser Altimeter Data

胡文敏 邸凯昌 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 中国矿业大学环境与测绘学院 中国科学院遥感与数字地球研究所 2016
所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 简 介

本书围绕我国探月工程中嫦娥一号激光测高数据的不确定性及平差处理方法展开研究,对嫦娥一号获取的全月面激光高度计数据的不确定性来源、大小和检测方法进行了系统讨论,研究了全月范围内的交叉点及交叉点不符值计算方法,建立了基于交叉点分析的嫦娥一号激光测高数据的不确定性分析方法,构建了激光高度测量过程中的系统误差改正模型与随机误差平差模型,并依此构建局部区域与全月球范围内的交叉点平差模型,提出了局部地形约束的激光高度计数据平差处理方法,生成了高精度的局部区域与全月球范围内的数字高程模型。

本书可作为测绘、遥感、深空探测等研究人员的参考用书,也可作为相关研究机构或高等学校研究生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

嫦娥一号激光高度计数据不确定性及整体平差 / 胡敏, 邸凯昌著. —北京: 测绘出版社, 2016.8

ISBN 978-7-5030-3974-4

I. ①嫦… II. ①胡… ②邸… III. ①月球探测器—应用—月面测量—研究 IV. ①V476.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 185314 号

责任编辑	贾晓林	执行编辑	王佳嘉	封面设计	李 伟	责任校对	吴晓娟	责任印制	陈 超
出版发行	测绘出版社	电 话	010—83543956(发行部)						
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010—68531609(门市部)						
邮政编码	100045		010—68531363(编辑部)						
电子信箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com						
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司	经 销	新华书店						
成品规格	169mm×239mm								
印 张	5.25	字 数	103 千字						
版 次	2016 年 8 月第 1 版	印 次	2016 年 8 月第 1 次印刷						
印 数	001—800	定 价	24.00 元						

书 号 ISBN 978-7-5030-3974-4

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

在月球探测任务中,轨道器激光高度计(laser altimeter, LAM)是获取月面全局地形的重要载荷,其获取的数据是制作月球数字高程模型的重要数据来源,能够为轨道器影像月面测绘提供高程控制基准,为重力场研究和地质科学研究提供基础地形数据。如何对其数据进行处理以生成高精度的月球地形模型是月球探测任务中和后续科学应用的一个重要课题。由于激光高度计数据受测控误差、轨道误差、测量误差、计算误差等系统和随机误差因素的影响,数据中存在着相邻轨道不一致、与同卫星搭载的立体相机电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)立体影像生成的数字高程模型(digital elevation model, DEM)不一致,以及不同轨道交叉点处地形高度不一致等诸多不一致的现象,都影响着激光高度计数据的精度和有效使用。为获取更高精度的 DEM,为其他科学研究提供数据支持,对月球激光高度计数据进行分析和平差处理研究是非常有必要的。

本书对嫦娥一号激光高度计获取的月面地形数据的不确定性与平差处理方法进行了系统研究。从数据不确定性分析、交叉点分析与平差、带地形约束的激光高度计数据平差处理方法,以及数据处理精度评价等四个方面展开研究,具体内容如下:

(1)根据激光高度计测高的原理与嫦娥一号数据特点,系统分析了激光高度计数据的不确定性来源与大小,建立了不确定性对测高影响的数学模型,同时采用数值仿真方法对不确定性来源造成的测高影响进行了分析,建立了各类误差的检测与处理机制,并提出了采用交叉点不符值大小对测高数据整体不确定性进行检测与处理的方法,对测高数据不确定性的大小进行了定量评定。

(2)以最小二乘平差原理为基础,提出利用多项式模型对嫦娥一号激光高度计交叉点数据进行平差处理,并与其他三种交叉点不符值模型的结果进行对比,对平差方法进行了验证,实验结果表明了该方法的有效性,提高了平差处理后激光高度计数据的精度。

(3)在交叉点分析与平差基础上,提出了局部地形约束的激光高度计数据平差处理方法。该方法结合局部地形先验信息与交叉点平差的整体优势,利用局部平坦区域内的虚拟控制点,建立地形约束条件,对交叉点平差整体解算过程进行约束。在月面 DEM 条带现象明显的区域,该方法可以有效抑制交叉点平差过程中由于交叉点数量较少而出现的高程纠正幅度过大的问题,生成的 DEM 具有更高的地形一致性。

(4)根据交叉点不符值残差变化对激光高度计数据处理结果进行精度评价,根据处理前后数据与美国国家航空航天局(NASA)月球 LRO 任务中的 LOLA 及日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)月球 KAGUYA 任务中的 LALT 等同类型月面激光高度计数据的对比分析,对其外符合精度进行了评价,并且通过影像获取的地形数据与处理前后激光高度计数据的配准分析,从应用的角度对其进行了精度评价,评价结果均表明本书方法的可行性与有效性。

全书分为 5 章。第 1 章引言,主要叙述本书的研究目的与意义,以及研究领域的相关研究现状,包括月球与行星探测中激光高度计的应用现状,激光高度计数据不确定性和数据平差处理的研究现状。第 2 章嫦娥一号激光高度计数据不确定性分析,论述激光高度计测高原理,根据已有的嫦娥一号发布数据与数值仿真结果对卫星轨道位置与姿态、仪器、计时、地形起伏以及 DEM 生成等不确定性来源和影响大小进行分析,并根据其特点和整体不确定性的构成,对不确定性进行检测与处理的方法进行论述。第 3 章基于轨道交叉点的嫦娥一号激光测高数据不确定性分析,论述数据的时空分布特性、交叉点计算方法、交叉点分布及其随时间变化的特点。第 4 章局部地形约束的嫦娥一号激光高度计数据平差方法,论述对交叉点最小二乘平差的原理进行论述,分析交叉点不符值的平差模型与平坦区域虚拟控制点的提取方法,对基于局部地形约束的数据处理方法与过程进行论述。第 5 章嫦娥一号激光高度计数据平差处理与精度评价,论述数据处理的基本流程,对局部范围与全月范围内数据处理结果及 DEM 效果进行分析与精度评价。

本书的撰写得到了刘召芹副研究员、吴立新教授、平劲松研究员、岳宗玉副研究员的指导与帮助,在此表示深深的感谢!同时感谢遥感所行星制图与遥感研究室诸多同学们的帮助和建议,感谢国家天文台月球与深空探测科学应用中心提供嫦娥探月影像及激光高度计数据。本书出版得到江苏高校优势学科建设工程(测绘科学与技术)和国家测绘地理信息局测绘地理信息科技出版基金的资助。

本书涉及的内容属于深空探测领域的研究热点之一,由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请专家和读者批评指正。

作者

2015 年 11 月

目 录

第 1 章 引 言	1
1.1 研究目的及意义	1
1.2 研究现状	4
1.3 研究内容	10
1.4 研究结果	11
第 2 章 嫦娥一号激光高度计数据不确定性分析	14
2.1 激光高度计测高原理	14
2.2 激光高度计数据不确定性来源	15
2.3 嫦娥一号激光测高数据不确定性数值仿真	23
2.4 嫦娥一号激光测高数据不确定性检测与处理	27
2.5 本章小结	32
第 3 章 基于轨道交叉点的嫦娥一号激光测高数据不确定性分析	33
3.1 激光高度计数据时空分布特性分析	33
3.2 激光高度计数据交叉点计算	35
3.3 交叉点检核条件	37
3.4 交叉点数据时空分布特性	38
3.5 本章小结	41
第 4 章 局部地形约束的嫦娥一号激光高度计数据平差方法	42
4.1 交叉点最小二乘平差方法	42
4.2 基于平坦虚拟控制点的激光高度计数据高程平差	46
4.3 基于平坦区地形约束的交叉点平差处理	47
4.4 全月分块处理策略	49
4.5 本章小结	50
第 5 章 嫦娥一号激光高度计数据平差处理与精度评价	52
5.1 数据处理流程	52
5.2 嫦娥一号激光高度计数据平差结果与内符合精度评价	53

5.3	与国外已有月面 DEM 数据对比精度	59
5.4	CCD 影像与激光高度计数据配准精度分析	61
5.5	本章小结	68
参考文献		69

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Research purpose	1
1.2	Research status	4
1.3	Research contents	10
1.4	Research achievement	11
Chapter 2	Uncertainty analysis of Chang'e-1 laser altimeter data	14
2.1	Altimetric theory of laser altimeter data	14
2.2	Uncertainty resources of laser altimeter data	15
2.3	Chang'e-1 laser altimetry data uncertainty numerical simulation	23
2.4	Detection and process of Chang'e-1 laser altimetry data uncertainty	27
2.5	Summary	32
Chapter 3	Uncertainty analysis of Chang'e-1 laser altimeter data using orbit crossovers	33
3.1	Spatial and temporal distribution of laser altimeter data	33
3.2	Crossover and crossover calculation with Chang'e-1 laser altimeter data	35
3.3	Crossover check	37
3.4	Spatial and temporal distribution of crossovers	38
3.5	Summary	41
Chapter 4	Adjustment of Chang'e-1 laser altimeter data with local topographic constraint	42
4.1	Least-squares adjustment of crossover	42
4.2	Adjustment with local planar topographic points	46
4.3	Crossover adjustment with local topographic constraint	47

4.4	Blocking processing in lunar global area	49
4.5	Summary	50

Chapter 5 Adjustment process and precision evaluation of Chang'e-1 laser

	altimeter data	52
5.1	Process flow	52
5.2	Results of adjustment and inner precision	53
5.3	Comparison with LOLA and LALT DEM	59
5.4	Registration accuracy of CCD imagery and laser altimeter data ...	61
5.5	Summary	68

References	69
-------------------------	-----------

第1章 引言

1.1 研究目的及意义

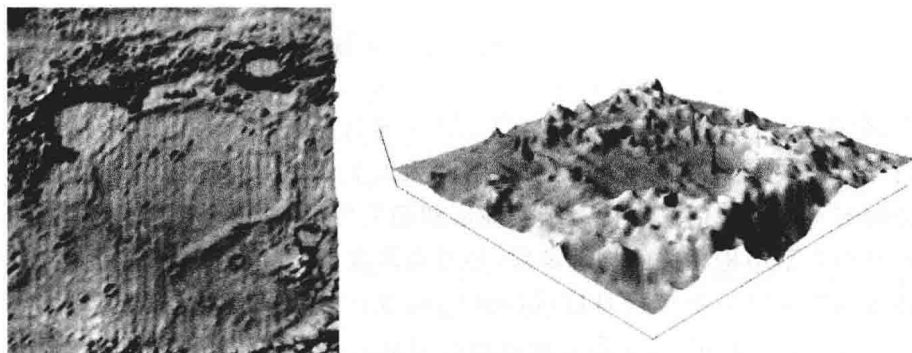
在深空探测中,月球一直是人类的主要探测目标之一。月球地形是描述月球基本特征的重要参数,月球地形测绘与制图为人类研究月球起源和地质成因等提供了基础的地形地貌信息支持。结合地形和相关数据,辅以合理的地质假设,可求解出与月球内部结构相关的物理参数,如月亮厚度、弹性厚度、月亮和月幔密度等,这些参数有助于进一步解析月球的内部结构及其热演化历史(欧阳自远,2004a; Fok et al,2011)。其中,大小和形状是描述月球的基本参数,所以在质心参考系中对月球地形进行测绘是非常有必要的(Smith et al,1997)。

激光高度计(laser altimeter,LAM)数据和轨道器影像是提供月球地形基本参数的数据源。其中通过激光高度计测量卫星到月表星下点的距离,结合卫星轨道参数和卫星姿态数据,可以获取卫星星下点月表地形高度信息,为光学成像探测系统的立体成图提供修正参数(欧阳自远,2004a)。月表地形高度信息不仅为制作月球表面数字高程模型(digital elevation model,DEM)提供数据,也是进行月球重力场研究的重要数据来源,同时为月球地质科学研究提供基准数据。

随着国内外月球探测卫星有效载荷和数据质量的显著提高,激光高度计能够获取全月范围内的地形数据,精度也越来越高。中国第一颗月球探测卫星嫦娥一号(Chang'e-1,CE-1)获取了月面电荷耦合器件(charge-coupled device,CCD)影像和激光高度计两种载荷的地形数据。其中,嫦娥激光高度计有两个科学目标:①测量卫星到月球表面星下点的距离;②提供月球表面 DEM 径向高度数据(欧阳自远,2004a;平劲松 等,2008)。

目前,我国已经发布了由嫦娥一号激光高度计数据生成的全月球数字高程模型,填补了我国在月球探测活动中的空白。但是对这些数据处理的精度和精细度还不够,基于全月球尺度,还没有对激光测高数据进行平差处理以产生更精细的地形。激光高度计数据由于受测控误差、轨道误差、测量误差、计算误差等系统和随机误差诸多因素的影响,数据中存在着相邻轨道不一致、与 CCD 立体影像生成的 DEM 不一致,以及不同轨道交叉点处地形高度不一致等诸多不一致现象,都影响着激光高度计数据的精度和有效使用。同时,在采用激光测高数据进行 DEM 制作的过程中,DEM 在局部区域的地形还带有很多误差,尤其在比较平坦的区域,

由于轨道与测量的误差,插值后的地形会出现与实际地形不符的条带现象,类似的DEM结果也表明数据中存在明显的条带现象(蔡占川等,2010),如图1.1所示。在激光高度计数据中,不同时间的轨道在对月面同一位置进行高度测量时,其轨道交叉点处的高度值也存在着不一致现象(Fok et al,2011;Hu et al,2011),即轨道间的不一致没有得到消除。



(a) 激光高度计数据生成虹湾区DEM (b) 文献(蔡占川等,2010)中生成的局部DEM

图 1.1 DEM 生成时的条带现象

我国的无人探月工程“嫦娥计划”分为“绕、落、回”三期(欧阳自远,2004b),分别为环月探测、月面软着陆探测与月球车月面巡视勘查、月面自动采样返回三个阶段。已经圆满完成的嫦娥一号与嫦娥二号绕月探测工程实现了对月球全球性的整体探测(欧阳自远等,2010)。2013年发射的嫦娥三号(Chang'e-3,CE-3)是中国发射的第一个地外软着陆探测器和巡视器(月球车),嫦娥三号于2013年12月14日成功实现了月面软着陆,根据导航相机视觉定位计算结果显示,至2014年1月17日月球车累计行驶了114.8 m(邸凯昌等,2015;Liu et al,2014),实现了月面软着陆探测与月球车月面巡视勘查目标,也实现了中国首次对地外天体的直接探测。嫦娥一号获取了月面120 m分辨率的影像(崔腾飞等,2009;李春来等,2010a),嫦娥二号可以获取月球表面1.5 m分辨率的影像(赵葆常等,2011),嫦娥三号月球车导航相机获取的图像分辨率可以达到0.02 m,覆盖半径约20 m。这些数据为月球表面、着陆区精细地形以及重要地质体目标精细地形地貌的制作提供了数据基础。

但是对嫦娥一号激光高度计数据和 CCD 影像所生成 DEM 进行对比,两者数据的差异比较大(赵双明等,2012;Di et al,2012),如图1.2为虹湾区激光高度计数据点与利用嫦娥一号 CCD 立体影像生成的 DEM 叠加显示图,可以看出两种数据存在明显的不一致现象。基于高分辨率影像的地形制图可以获取月面的精细地图,而激光高度计所获取的全月 DEM 具有较好的整体一致性,可以作为全月地形

制图的参考框架。在我国月球探测工程中,下一步计划是实现月球车着陆与巡航(欧阳自远,2004b),需要有精确的地形信息作为支撑。因此,有必要对激光高度计数据时空分布及不确定性进行分析和处理,建立全月整体平差模型,有效消除数据自身的不一致问题,为探月二期着陆器着陆和导航、月球研究提供精准的全月地形信息,为 CCD 影像地形测绘提供高程控制基准,为全月重力场研究和地质科学研究提供基准数据。

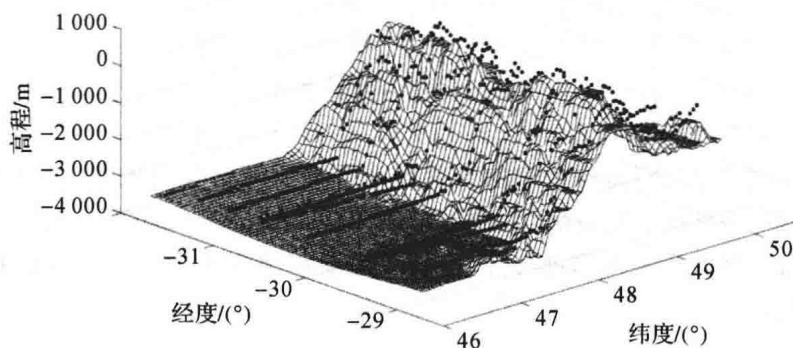


图 1.2 激光高度计数据点与 CCD 影像生成的 DEM 叠加

交叉点分析常用于对地激光测高数据的处理(翟国君,1997)。在对地观测如海平面模型和重力场模型研究中(黄谟涛等,2007;姜卫平等,2002;刘传勇等,2008;彭富清等,2003;Luthcke et al,2001;Sandwell,1992;Sirota et al,2005),对激光高度计数据采用交叉点平差处理可以消除轨道的径向误差。但是,月球卫星的轨道并不同于对地卫星的轨道,其轨道的稳定性和测控精度与地面卫星均有不同(曹建峰等,2010;黄勇,2006;李金岭等,2009;刘林等,2004;王威等,2005),所以交叉点的计算和处理也会变化。因此,为获取更高精度的 DEM,为其他科学研究提供数据支持,对月球激光高度计数据进行分析和平差处理研究是非常有必要的。

另外,交叉点分析在火星激光高度计 MOLA(Mars orbiter laser altimeter)数据、月球轨道器激光高度计 LOLA(Lunar orbiter laser altimeter)数据和日本月亮女神月球探测器 SELEVE(selenological and engineering explorer)获取的 LALT(laser altimeter)数据的处理中均有较好的效果(Goossens et al,2011;Mazarico et al,2011;Neumann et al,2001)。这些研究都是以基于改进精密定轨精度或改进重力场为出发点,但是地形的改进并不能直接体现,而且由于数据获取的分辨率与方式存在差异,其方法并不能直接应用于嫦娥一号激光高度计数据的处理。

本书根据嫦娥一号激光高度计数据的特点,采用基于交叉点分析与平差的方法对嫦娥一号激光高度计数据进行处理以生成高精度的 DEM。本书将对嫦娥一号获取的全月面激光高度计数据进行不确定性来源与检测分析、时空分布特性分析,建立激光高度测量过程中的粗差剔除方法和系统误差改正模型;利用交叉点不符值对激光高度计数据的整体不确定性进行评价;研究建立将轨道交叉点、平坦区域虚拟控制点、轨道时空分布、月球平均半径统一纳入带限制条件的全月激光高度计数据整体平差模型,优化数据处理精度;生成全月球高精度 DEM,并通过数据处理前后的自身一致性对比,以及与国外已有月球 DEM 数据的对比分析,对平差模型与方法进行验证和精度评价。

1.2 研究现状

本节围绕月球与行星探测中激光高度计数据处理及应用现状,对已有激光高度计数据的应用状况、激光高度计数据不确定性的研究现状和激光高度计数据平差处理的研究现状三个方面进行分析,论述当前深空探测中激光高度计数据应用及处理的关键问题。

1.2.1 月球与行星探测中激光高度计数据处理及应用现状

卫星测高技术是 20 世纪 70 年代出现的一项高科技测量技术。1973 年 5 月 14 日美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射的天空实验室(Skylab),是第一颗带有测高仪的卫星,其目的主要是对测高原理进行测试,数据结果意义甚微。1975 年 4 月发射的海洋实验卫星 Geos-3 则通过其搭载的雷达测高计实现了卫星与海面距离的测量,测距精度达到 0.5 m(袁树真,1979)。随后,1978 年 6 月发射的 SeaSat 卫星通过测高获得了大量的海洋信息(翟国君,1997)。1985 年 3 月美国海军发射的 GeoSat 卫星的测高数据第一次被应用求定高分辨率的海洋大地水准面(陈俊勇,2005)。20 世纪 90 年代,欧空局发射的 ERS-1(1991 年 7 月)与 ERS-2(1995 年 4 月),美国和法国合作发射的 TOPEX/Poseidon(1992 年 8 月)以及其后继卫星 T/P-Follow-On(TFO),以及 GeoSat 的后继卫星 GeoSat-Follow-On(GFO)等在地球重力测量、全球高程数据采集、海洋与极地测量等领域均有广泛应用(陈俊勇,2005;胡明城,2003;李然等,2007;刘经南等,2003)。2001 年 12 月由 NASA 与法国国家太空研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales,CNES)合作发射的 Jason-1 以及欧空局 2002 年 3 月发射的 ENVISAT 在测高精度上都有很大的改进(Beckley et al, 2007; Lombard et al, 2007; Solberg et al, 2007);2003 年 NASA 发射的 ICESat 卫星搭载了激光测高系统(geoscience laser altimeter system, GLAS)首次实现了极地冰盖

表面特征、冰层厚度变化,海冰高程、粗糙度、厚度以及表面发射率等的观测(Abdalati et al, 2010; Abshire et al, 2005; Kwok et al, 2009; Schutz et al, 2005); 2005年9月欧空局发射的 CryoSat-1 与 2010年8月发射的 CryoSat-2 也是用于大陆架冰层变化的观测(Dibarboure et al, 2012; Labroue et al, 2011; Wingham et al, 2006)。对地卫星测高的应用主要为监测海平面的变化,测定高分辨率海洋重力场,尤其是大地水准面和重力异常,测定海面地形,监测洋流、海冰等的变化。目前,卫星高度计已经成为海洋遥感卫星装备的基本观测仪器之一。

激光高度计第一次被搭载在卫星上对月球进行探测是在美国的阿波罗 15 号月球探测任务中(Kaula et al, 1973; Sjogren et al, 1973)。从此,激光高度计成为了测量月球与行星大小和形状的主要载荷。在阿波罗 15~17 号月球探测任务中,激光高度计光束宽为 $300\ \mu\text{rad}$,月面光斑直径大约为 $300\ \text{m}$,测距范围为 $30\sim 43\ \text{km}$,垂直方向精度大约为 $\pm 2\ \text{m}$ (Kaula et al, 1973; Sjogren et al, 1973)。由于充电时间的限制,对月球地形的观测覆盖范围有限,在这三次任务中,仅获取了 7 080 个距离观测值(Smith et al, 1997)。Sjogren 等(1973)通过对阿波罗 15 号和阿波罗 16 号激光测高点的解算,获取了月球的半径为 $1\ 737.17\ \text{km}$ 。阿波罗 17 号后,通过对激光高度计数据的解算,月球半径被确定为 $1\ 737.7\ \text{km}$,质心位于 $25^\circ\text{E}-2.55\ \text{km}$ 位置(Kaula et al, 1974)。Davies 等(1987)通过对阿波罗 11~17 号所有影像数据的解算,构建了月球正面控制网。考虑到激光测高数据覆盖的范围有限,激光高度计获取的数据主要作为影像解算的距离约束参数(Kaula et al, 1972)。在阿波罗地形解算任务中,主要以影像数据为主,共确定了月球表面 5 325 个特征点的坐标,对 1 244 幅影像中的超过 51 000 个观测值进行了解算。由于激光高度计数据具有较高的高程观测精度而作为距离约束条件,协方差分析显示有 90% 的点其水平和垂直坐标误差在 $45\ \text{m}$ 以内(Kaula et al, 1972; Light, 1972b)。

由于月球的自转和公转周期相当,早期的观测多局限于月球正面或沿阿波罗号跟踪的赤道区域,得到的区域性地形模型绝对精度和空间分辨率均较差。1994 年美国发射的 Clementine 月球探测卫星,利用搭载的激光高度计激光雷达(light detection and ranging, LIDAR),第一次对月球表面进行了为期两个多月的全球尺度绝对高程测量,轨道高度为 $400\sim 450\ \text{km}$,得到了 284 个周期共 72 548 个有效激光测距值(数据覆盖为 $79^\circ\text{S}\sim 81^\circ\text{N}$)(Smith et al, 1997)。利用这些激光测高数据,第一个基于 Clementine 激光测高的全月球模型(goddard lunar topography model-2, GLTM2)为 72 阶次球谐函数展开模型,该模型绝对径向测量精度约为 $100\ \text{m}$,空间分辨率约为 2.5° ,局部区域数据覆盖不全(Smith et al, 1997)。日本月亮女神测月学研究团组利用 Clementine 提供的内插到 0.25° 的格网数据产品,采用最小二乘拟合算法,得到了 180 阶次球谐函数展开模型 NLT180A(Ping et al, 2003)。基于 Clementine 数据的全月地形与重力场模型改进了对月球形状、内部

结构和热演化历史的认识(Neumann et al, 1996; Zuber et al, 1994)。美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)利用所有 72 548 个 Clementine 激光测高数据点,并基于 Clementine 立体影像推算得到了 1 724 872 个极区高程数据点。激光测高数据作为基本数据源,并联合所有历史照相数据,如地基照相、阿波罗、水手 10、伽利略和 Clementine 立体照相等,根据这些照相数据得到了 272 931 个月面控制点,由此产生了 20 世纪数据覆盖最全的月球地形模型 ULCN2005(the unified lunar control network 2005)。由于在月球极区与背面数据覆盖较少,该模型在月球极区和月球背面的精度比较差(Archinal et al, 2006a, 2006b, 2007; Nozette et al, 1994)。

自 2007 年至 2009 年,国内外有 4 次典型的月球探测任务,包括中国的嫦娥一号和嫦娥二号(欧阳自远, 2010)、日本宇航中心(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)的 Selene(Kaguya)(Kato et al, 2008)、印度的 Chandrayaan-1(Goswami et al, 2009)和美国 NASA 的月球勘测轨道飞行器任务(lunar reconnaissance orbiter, LRO)(Chin et al, 2007; Zuber et al, 2010)。

2007 年,日本发射的 Selene(Kaguya)月球卫星搭载了激光高度计 LALT,其轨道高度是 100 km,测距精度为 1 m,激光点赤道轨间距 15 km,在极区激光点点距小于 2 km。在为期一年的运行过程中,获取了约 1040 万个月面点(Araki et al, 2008; Tsubokawa et al, 2002)。Araki 等(2009, 2013)根据 677 万个 LALT 测距点(2007-12-30—2008-3-31),构建了 359 阶月球球体模型 STM359_grid-02,空间分辨率优于 0.5° 。

印度 Chandrayaan-1 于 2008 年 10 月 22 日在印度空间研究组织(Indian Space Research Organization, ISRO)的萨迪什·达万航天中心(Satish Dhawan Space Centre, SDSC)发射成功。轨道运行高度是 100 km 的极圆轨道,其搭载的激光高度计(lunar laser range instrument, LLRI)主要任务为进一步理解月球全月,包括极区的地形、重力场及月球物理状态等。现有的研究中有一些关于其激光测高数据在 Clavius 和达朗伯(d'Alembert)撞击坑区域的剖面图,但是全月地形数据并没有发布(Raja et al, 2009)。

美国 LRO 于 2009 年 6 月 18 日发射升空,获取的数据可用于绘制高分辨率月球三维地形图等,其搭载的月球轨道器激光高度计主要任务是生产高分辨率的月球数字高程模型并建立大地测量框架。其轨道是运行高度为 50 km 的极圆轨道,激光束工作频率为 28 Hz,每次测距有 5 束激光,测距精度为 10 cm(Vondrak et al, 2010),获取了超过 35 亿个有效激光高度观测值。根据其发布的数据及交叉点相关处理之后的结果,DEM 分辨率可以达到径向 1 m、平面 10~15 m 的精度,是目前精度最高的月球地形模型(Rosenburg et al, 2011; Smith et al, 2011)。

在对深空其他行星的探测过程中,激光高度计同样是地形数据获取的主要载

荷。美国近地小行星(Near Earth Asteroid Rendezvons, NEAR)探测任务中,利用 NEAR 搭载的激光高度计(Near Earth Asteroid Rendezvous laser rangefinder, NLR)获取了 433 号 Eros 小行星超过 1 600 万个激光测高点,利用其重建了该小行星的地形几何模型(Cole et al, 1997; Zuber et al, 2000)。NASA 的水星 MESSENGER 任务于 2004 年 8 月 3 日发射,2011 年 3 月开始科学探测运行,根据搭载的水星激光高度计(mercury laser altimeter, MLA)获取的激光测高数据,获取了水星北半球的地形、重力场以及内部结构等数据(Smith et al, 2012; Zuber et al, 2012),在人类研究远地行星历史中又迈出了一步。火星全球勘测者(Mars Global Surveyor, MGS)任务于 1996 年发射,其运行周期为绕火星 9 年,长于以往任何一次火星探测任务。在这次任务中,根据其搭载的火星激光高度计获取的 5 000 多轨测高数据,建立了火星地形(Neumann et al, 2001)。

1.2.2 激光高度计数据不确定性研究现状

不确定性是指客观世界或实体本身就具有的变异,表现为不精确性、随机性和模糊性。不确定性的研究是实现数据生命周期各阶段数据可用性的基础,对于数据的使用和共享具有重要意义(邬伦等, 2002)。目前,空间数据的不确定性研究主要集中在由于量测技术的局限性导致的不确定性问题,包括空间数据位置不确定性、属性不确定性、时域不确定性、逻辑不一致性和数据不完整性(史文中等, 2001)。

激光高度计数据是空间数据的一种类型,随着其在深空探测任务中的广泛使用,对于激光高度计数据的不确定性研究也是数据处理和应用的前提。

1.对地卫星测高数据不确定性研究现状

对地卫星测高的应用主要是测量海面高和地球重力场的研究(黄漠涛等, 2007; 姜卫平等, 2002; 彭富清等, 2003; 王海瑛等, 1996; Luthcke et al, 2001; Sandwell, 1992; Sirota et al, 2005)。测高卫星搭载的通常为微波雷达测高仪,其向海面发射微波信号,该雷达脉冲传播到达海面后,经过海面反射再返回到雷达测高仪。因此,可以获得三种观测量,分别为雷达脉冲往返时间、回波信号的波形,以及回波信号的幅度(翟国君, 1997)。第一颗载有激光测高仪的对地观测卫星 ICESat 卫星的主要任务是监测南极洲和格陵兰冰盖的高程变化,从而估算冰盖表面物质平衡变化和气候变化的季节及年际变化率(范春波等, 2005)。

由于对地观测卫星的轨道精度很高,所以海洋动力高程有几千米甚至几厘米的变化都可以被精确地测定。在对地激光测高数据的处理中,对测高数据的不确定性研究主要包括回波信号模型研究和卫星径向轨道误差的时域特征与空域特征研究,误差源主要来自于地球重力场、大气传播延迟、日光压以及跟踪站坐标误差等。在数据解算的过程中,不仅考虑了卫星径向轨道误差,还引入了地球重力场模型误差和海面地形信息等因素(翟国君, 1997; Wagner, 1986, 1987)。

2. 深空激光测高误差处理

在深空激光高度计数据的处理和应用中,对于误差源的研究主要包括卫星的轨道误差,以及激光脉冲的指向、测量目标、时间计算、距离测量精度等非轨道误差源,同时还有仪器标定等误差源。激光传播过程中的误差则依赖于所测量的行星特点,如火星有大气,激光的传播会受到其影响,而月球没有大气,则激光在传播过程中不需要考虑大气不透明度等的影响。

目前,激光测高误差的研究主要集中在卫星精密定轨问题上,包括轨道位置与姿态及星历等轨道定轨误差的研究。根据地面站测控数据的观测与处理、轨道定轨的方式、卫星受到的来自太阳或其他行星体的摄动影响等,构建卫星的精密轨道,而激光测高数据的不确定因素与卫星轨道的位置与姿态是紧密相连的。火星 MOLA 数据在处理中的误差分析即以轨道定轨的精度为前提,通过其轨道处理软件 GEODYN 可以对其星历进行拉格朗日插值并不断改进,其轨道径向误差在有重叠的情况下优于 1 m,但是在测控数据较少的情况下,径向误差会超过 10 m (Neumann et al, 2001)。

其次是激光测高数据中时间的不确定性。在 MOLA 数据打包输出时,每 140 个点进行一次打包,将其时间流跟卫星进行了对比,并提供该时间包所对应的时间,为距离观测提供校正。

对于激光高度计测距误差的分析,则以地面测试的结果为准。由于激光测距会受到地面散射模型、云层以及接收器的系统误差的影响,在地面激光测试时需确定好接收和相应的改正模型。如 MOLA 数据在处理激光脉冲的扭曲时,需根据事先测试好的接收模型进行改正 (Abshire et al, 2000)。嫦娥一号卫星搭载的激光高度计测距精度等相关参数的误差也由地面测试工作完成 (王建宇 等, 2010)。

1.2.3 激光高度计数据的平差处理研究现状

在对地测高数据的平差处理中,研究主要包括以下几个方面:选取合适的误差函数用于交叉点平差方法 (翟国君, 1997); 不同测高数据源之间的交叉点平差方法 (姜卫平等, 2002); 在考虑径向轨道误差的情况下,引入地球重力场模型的整体求解法或者联合求解法的研究 (姜卫平等, 2002); 利用测高数据解算的重力场模型来改进卫星轨道 (Kim, 1997; Sandwell, 1992; Wagner, 1987) 等。在已有的深空激光高度计数据的处理中,解算地形是激光测高数据的主要任务,月球、火星、水星以及小行星等天体的整体地形测绘是其主要目标。由于近期激光高度计观测数据的覆盖范围与观测精度都有大幅的提高,使得在利用其解算地形的同时,将求解行星重力场以及利用交叉点数据来约束轨道变成了可能。

交叉点常用于对地观测卫星中测高数据的处理,利用交叉点不符值 (或称闭合