



卫星 测高数据 处理的理论与方法

翟国君 黄漠涛 谢锡君 欧阳永忠 著

测绘出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

卫星测高数据处理的方法与理论

翟国君 黄漠涛 谢锡君 欧阳永忠 著

测绘出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书是论述卫星测高数据处理理论、方法及其应用的专著。全书共分十章。第一章介绍了卫星测高发展的历史、数据处理进展以及在各领域的应用情况。第二章至第四章系统地研究了测高卫星的误差模型及其径向轨道误差的时域特征和空域特征。第五章讨论交叉点平差和共线平差的方法及秩亏现象。第六章介绍了整体求解法的解算原理。第七章阐述了卫星测高数据在地球重力场计算中的应用。第八章讨论了卫星测高数据在计算大洋环流、大洋潮汐和海面风浪场中的应用。第九章介绍了卫星测高数据在检测海山和反演无图海域水深中的应用。第十章介绍了 Topex/Poseidon 测高卫星数据结构及其计算海平面时的取权问题。

本书体系完整、内容充实、理论与实际并重,可供大地测量学、地球物理学和海洋学等专业人员和有关院校专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

卫星测高数据处理的理论与方法/翟国君等著. —北京:测绘出版社, 2000. 4

ISBN 7-5030-0965-9

I. 卫… II. 翟… III. 卫星测量法: 高程测量-数据处理 IV. P228

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 52089 号

测绘出版社出版

社址: 北京宣武区白纸坊西街 3 号 邮编: 100054

E-mail: ceph@public.bta.net.cn

北京通州区次渠印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 4 月第 1 版·2000 年 4 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16·印张: 15

字数: 342 千字·印数: 0001—2000

定价: 42.00 元

前言

80年代以来,随着计算机技术和空间技术的高速发展,地球科学在宏观和微观上的研究进入了一个迅速发展和深入探索的时期。在此期间,地球科学各分支学科出现了大量的新的学科生长点,提出了许多新学科、新概念、新技术。卫星测高学就是在这种形势下随着卫星遥感遥测技术的应用而发展起来的新型边缘学科,它利用卫星上装载的微波雷达测高仪、辐射计和合成孔径雷达等仪器,实时测量卫星到海面的距离、有效波高和后向散射系数,并通过数据处理和分析,来研究大地测量学、地球物理学和海洋学方面的问题。

虽然卫星测高技术发展至今经历了二十多年的历史,出现了两次大的研究热潮,但时至今日,研究热潮有增无减,甚至可以说是方兴未艾。卫星测高的研究和应用目前在国内外已成热门课题,每年为卫星测高召开的学术讨论会国外便有两次,至今出版的卫星测高研究专辑已达5~6种。由于我国在这一领域的研究起步较晚,到目前为止,国内这一领域出现的研究论文和报告数量非常之少。直到1993年以前,我国从事的这方面的研究基本上都属于跟踪研究,其最主要的原因是国内没有发射自己的测高卫星,又没有收集到国外的测高数据。但最近几年,我国在卫星测高领域的研究活动日益高涨,发表的学术论文也日见多起来,尽管如此,与国外相比仍有不小的差距。面对这种情况,我们认为根据自己的研究成果,再结合国内外最近几年发表的有关文章,编写一部关于卫星测高数据处理理论与方法的专著,具有重大的学术意义和实际意义。

在撰写本书时,我们力求使本书具有较高的学术水平,但又不失其系统性和实用性。本书取材直到1998年底。因此取材具有先进性和较高的学术水平,此外,本书在卫星测高数据处理方面自成体系,从卫星测高原理入手,系统地介绍了卫星测高数据处理中遇到的几乎所有的主要理论和方法。与此同时,本书还着重介绍了卫星测高数据在有关领域的应用。本书理论与实际并重,不仅适用于从事卫星测高数据处理的读者,也适用于从事卫星测高数据应用研究的读者。

为了便于读者使用本书,这里对全书的内容和结构进行简要介绍。

第一章首先对卫星测高的发展概况进行了系统地介绍,内容包括卫星测高产生的渊源以及迄今为止各主要测高卫星的简介。接着,详细地论述了自70年代初至今卫星测高数据处理的进展。通过阅读本节,读者可以对卫星测高研究在各阶段的发展历程和特点有一个清晰的了解,并有目的地选择自己的研究方向。为了方便从事卫星测高应用研究的读者开展研究工作,绪论中还对卫星测高数据在大地测量学、海洋学,地球物理学以及海洋测绘中的应用进行了论述,归纳了研究内容以及所取得的成果。最后,绪论对本书所包括的研究内容和意义进行了扼要介绍,以方便读者了解本书的内容和结构。

第二章主要介绍了卫星测量原理及影响测量精度的各种误差源,目的是为了更方便读者对卫星测高有一个完整的概念,也为了给读者阅读本书后续章节打下理论基础,本章首先简明扼要地介绍了卫星轨道线性摄动理论,研究了倾角函数和偏心率函数的计算。本章在给出星下点位置计算和海平面计算模型后,分析了各种误差源,给出了卫星测高的数学模型,详细地研究了整体求解法的优劣,提出了使用整体法求解的一些有益建议。

第三章详细研究了测高卫星径向轨道误差的时域特征,推导出了一组测高卫星径向轨道误差的时域表示形式,并同时给出了摄动元素与径向轨道摄动两者之间的频率对应关系,揭示了频率之间量的对应关系和质的对应规律,得出了部分前所未有的 12 条重要结论(其中 10 条结论为作者所得)。

第四章详细研究了测高卫星径向轨道误差的空域特征,所得结论主要有:各次径向轨道误差的空域表示都可分成两部分,一部分是升弧段与降弧段所共有的大小相等符号相同的量,这一部分径向轨道误差在交叉点平差中是不可观测的;另一部分是依赖于升降弧段的大小相等符号相反的量,这一部分径向轨道误差在交叉点平差中是可观测的。同时,本书还得出任意次的径向轨道误差的空域表示形式都是完全相似的结论,并分析了 Topex 测高卫星径向轨道误差可观测部分与不可观测部分所占的比例大小。

第五章给出了一组新的计算交叉点位置和时间的公式,这组公式利用测高卫星精密重复轨道的特点,不需要从星历表中读取每个弧段在赤道上的位置及穿越赤道的时间。本书还研究了不同轨道倾角的卫星所产生的交叉点的分布特点,以及交叉点平差与共线平差的秩亏现象。

第六章对整体求解法的优越性及其存在的问题进行了较深入的分析,对大尺度的海流条件作为近岸时的约束条件的可行性进行了探讨,本书认为整体求解法作为一种理论固有其优越性,但作为一种实用方法,仍有很大局限性。本章还研究了整体求解法时的基准的统一和未知数的排序,以及测高数据处理时权的选取等内容。

第七章主要介绍了卫星测高数据在确定地球重力场中的应用及其相应的数据处理方法,主要内容包括海洋大地水准面的求定,海域重力异常的反演以及地球重力场模型的改善。

第八章主要介绍了卫星测高数据在海洋学中的应用及其相应的数据处理方法,主要内容包括环流的确定、大洋潮汐的计算以及海面浪场、风场等内容的确定。

第九章主要介绍了卫星测高数据在海洋测绘中的应用及其相应的数据处理方法,主要内容包括海山海沟的检测以及无图海域的水深预测。

第十章作为一个数据处理实例,对 Topex 数据处理的全过程进行了介绍,目的是为了读者了解测高数据的格式编码、编辑标准和处理方法。

本书主要以翟国君同志的博士论文为基础,由翟国君、黄谟涛、谢锡君、欧阳永忠四位同志补充修改而成,管铮、凌勇二位同志参加了部分内容的讨论和研究。

在本书撰写工作中,得到了武汉测绘科技大学宁津生院士、晁定波教授、管泽霖教授,

国家测绘局陈俊勇院士，中国科学院测量与地球物理研究所王广运研究员，海军大连舰艇学院梁开龙教授等人的指导和帮助，在此深表谢意。

由于作者学术水平有限，加之收集的参考文献还不够齐全，疏漏之处在所难免，敬希读者批评指正。

作 者

1999 年 11 月于天津

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 卫星测高发展概况	(1)
§ 1.2 卫星测高数据处理进展及评述	(4)
§ 1.3 卫星测高数据的应用.....	(10)
§ 1.4 本书主要内容.....	(13)
第二章 卫星测高原理及各种误差分析	(15)
§ 2.1 引言.....	(15)
§ 2.2 卫星轨道线性摄动理论.....	(16)
§ 2.3 卫星测高原理.....	(25)
§ 2.4 卫星测高误差分析.....	(35)
§ 2.5 卫星测高数学模型.....	(37)
§ 2.6 关于整体求解法的进一步讨论.....	(41)
§ 2.7 本章小结.....	(44)
第三章 测高卫星径向轨道误差的时域特征	(45)
§ 3.1 引言.....	(45)
§ 3.2 Kaula 线性解	(46)
§ 3.3 卫星的径向摄动.....	(49)
§ 3.4 低阶次的卫星径向摄动.....	(51)
§ 3.5 频率组合.....	(67)
§ 3.6 径向轨道误差的频谱.....	(69)
§ 3.7 单一位系数误差对径向误差的影响.....	(75)
§ 3.8 本章小结.....	(79)
第四章 测高卫星径向轨道误差的空域特征	(81)
§ 4.1 引言.....	(81)
§ 4.2 径向摄动的时域表示.....	(81)
§ 4.3 径向误差空域表示的预备公式.....	(82)
§ 4.4 零次径向误差的空域表示.....	(85)
§ 4.5 一次径向误差的空域表示.....	(90)
§ 4.6 二次径向误差的空域表示.....	(95)
§ 4.7 径向轨道误差的空域特点.....	(96)
§ 4.8 本章小结	(103)
第五章 交叉点平差与共线平差	(105)

§ 5.1	引言	(105)
§ 5.2	交叉点位置的计算	(106)
§ 5.3	交叉点分布的特点	(112)
§ 5.4	交叉点不符值的谱特征	(115)
§ 5.5	交叉点平差	(119)
§ 5.6	共线点差值的谱特征	(123)
§ 5.7	正常点计算与共线平差	(125)
§ 5.8	本章小结	(126)
第六章	整体求解法解算海面地形及减小径向轨道误差	(127)
§ 6.1	引言	(127)
§ 6.2	数学模型	(128)
§ 6.3	最小二乘求解	(135)
§ 6.4	数据格网化	(136)
§ 6.5	本章小结	(138)
第七章	卫星测高数据在确定地球重力场中的应用	(139)
§ 7.1	引言	(139)
§ 7.2	利用测高数据确定大地水准面	(140)
§ 7.3	利用测高数据确定海洋重力异常	(144)
§ 7.4	利用测高数据改善地球重力场模型	(157)
§ 7.5	本章小结	(164)
第八章	卫星测高数据在海洋学中的应用	(166)
§ 8.1	引言	(166)
§ 8.2	大洋环流的确定	(166)
§ 8.3	大洋潮汐模型的建立	(171)
§ 8.4	海面风场及波浪的确定	(177)
§ 8.5	本章小结	(180)
第九章	卫星测高数据在海洋测绘中的应用	(181)
§ 9.1	引言	(181)
§ 9.2	海山检测	(181)
§ 9.3	无图海域的水深预测	(190)
§ 9.4	本章小结	(193)
第十章	Topex/Poseidon 测高数据的分析与应用	(194)
§ 10.1	引言	(194)
§ 10.2	T/P 数据结构	(194)
§ 10.3	权的选取	(198)
§ 10.4	基准的统一与未知参数排序	(205)
§ 10.5	T/P 测高数据精度的估计	(207)

§ 10.6 数据编辑.....	(208)
§ 10.7 本章小结.....	(211)
参考文献	(212)

第一章 绪 论

§ 1.1 卫星测高发展概况

80 年代以来,随着计算机技术和空间技术的高速发展,地球科学在宏观和微观的研究上进入了一个迅速发展和深入探索的时期。在此期间,地球科学各分支学科出现了大量的新的学科生长点,提出了许多新学科、新概念、新技术。卫星测高学就是在这种形势下随着卫星遥感遥测技术的应用而发展起来的新型边缘学科,它利用卫星上装载的微波雷达测高仪,辐射计和合成孔径雷达等仪器,实时测量卫星到海面的距离、有效波高和后向散射系数,并通过数据处理和分析,来研究大地测量学、地球物理学和海洋学方面的问题。

卫星测高技术的发展至今虽然只有二十多年的历史,但大量的研究结果表明,卫星测高在研究海洋大地水准面和重力异常方面,在研究地球物理和海洋学方面,都显示出了巨大的潜力。卫星测高作为本世纪 70 年代发展起来的一项高科技测量技术,它以人造卫星作为测量仪器的载体,借助着空间技术、电子技术、光电技术和微波技术等高新技术的发展,在空间大地测量领域产生了一场深刻的变革。正如国际上著名的大地测量学家莫里兹教授 1993 年所指出的那样:“同 GPS 一样,卫星测高也在空间大地测量学领域掀起了一场革命”(Moritz,1993)。

用卫星测高技术来研究地球重力场和遥测海面地形一直是 NASA(美国国家航空与航天管理局)海洋环境计划的主要内容之一。1969 年威廉姆斯城固体地球和海洋物理学讨论会后,NASA 便开始对卫星测高技术进行研究,其着眼点正是看中了卫星测高技术具有其它技术无可比拟的优越性。这主要表现在,卫星测高技术的出现为研究全球重力场、海洋表面及内部现象、海底构造等提供了前所未有的途径。它可以从宇宙空间大范围、高精度、快速地、周期性地探测海洋上的各种现象及其变化,提高了人类对海洋认识的深度和广度。相反,传统的海测技术则是以船舶为测量仪器的载体,以水声技术和船舶定位技术构成了船载海测技术的主体,其测量对象主要是水深和海底障碍物。后来虽然又逐渐增加了重力、磁力等地球物理要素,但在浩瀚无垠的海洋上,仍有比例很大的空白区。卫星测高技术的出现,使得传统的测量技术一个世纪的工作量在几个月内就可以完成。

自 1973 年 5 月 14 日美国国家航空与航天管理局发射第一颗带有测高仪的卫星——天空实验室(Skylab)以来,至今世界上已相继发射了 7 颗这样的卫星。

由于 Skylab 卫星的径向轨道误差较大,测高仪本身存在着漂移和测高系统存在着偏差,所以,Skylab 只是一个原理性试验卫星,其数据结果意义甚微。但它却为以后的地球与海洋物理应用计划所提出的 Geos-3 和 Seasat 卫星计划奠定了基础。

之后,NASA 于 1975 年 4 月 9 日发射的 Geos-3 (NASA Geodynamics Experimental

Ocean Satellite) 卫星,可以说是利用空间技术来研究世界范围海洋物理过程的先驱。该卫星是在继 Skylab 之后发射的最重要的测高卫星之一。其在 NASA 总部 Jerome Rosenberg 的指导下,于 1970 年开始构思。由于 Geos-3 计划是美国国家大地测量卫星计划与 NASA 地球和海洋物理应用计划之间的一种过渡,因此,Geos-3 计划包含了这两个计划所要达到的预期目标。该卫星重 345.9kg,1975 年 4 月 9 日在美国的 Vandenberg 空军基地发射,轨道平均高度为 840km,轨道倾角 115° ,工作寿命 3.5 年,重复周期 23 天,测高精度为 25~50cm。该卫星为确定海洋学和地球动力学参数提供了三年的有用数据。大量高质量的数据已使得人们注意力的重点从试验阶段转向了应用阶段,其中包括一些在原技术设计中未曾预料到的应用。当初,NASA 发射 Geos-3 的目的就是为了增进人类对下列内容的了解,即地球重力场、大地水准面的形状和大小、深海潮汐、海况、洋流结构、地壳结构、刚体地球动力学及遥测遥感技术等。在以上这些领域,人们往往因缺少观测数据而难以对其获得更多的了解,而 Geos-3 的发射证明了人类的确可以从空间通过对测高仪回波信号的波形和结构的分析,利用经过各项误差改正后的测高数据,直接测量或推求大地测量学、海洋学及地球物理等参数。

Geos-3 的成功发射和正常运行,为后续卫星的发射奠定了坚实的基础。1978 年 6 月 28 日发射的海洋卫星 Seasat(Sea Satellite)测高卫星可以说是遥测遥感技术用于海洋学研究的一个里程碑。该卫星的轨道高度平均为 800km,轨道倾角为 108° ,工作寿命为 106 天。该卫星前期的重复周期为 3 天,后期的重复周期为 17 天,测高精度为 20~30cm。NASA 发射 Seasat 的目的就是要证明遥测遥感技术可以在全球范围内以适当的精度测量洋面温度、风、流、潮汐等水文要素。尽管 Seasat 经过三个多月近乎完美的飞行后因电源故障于 1978 年 10 月 10 日过早地夭折了,但其携带的测高仪、合成孔径雷达、多频道微波扫描探测仪等仪器,却给人们提供了大量的有关海面风速、风向、有效波高、波谱、海面温度、大气含水量、海冰、海面地形等信息,为研究海洋环境提供了大量高质量的数据,人们利用这些数据探测出许多以前未曾发现过的海山、海沟;推估了广大洋区范围的重力异常;研究了大洋潮汐;反演了地球深部构造等,并取得了大量的研究成果。这些成果表明,卫星测高在研究海洋大地水准面、海面地形和海洋重力异常方面,在研究海底地形、地球内部构造,在研究地球物理和海洋学方面,具有巨大的潜力。

为了更有效地发挥卫星测高在确定地球重力场中的作用,详细了解大地水准面的形状,弥补 Seasat 寿命太短,获取资料太少之不足,美国海军又于 1985 年 3 月 12 日发射了大地测量卫星 Geosat(US Navy Geodetic Satellite)。该卫星轨道的平均高度为 800km,轨道倾角为 108° ,重复周期为 17 天,工作寿命为 4 年多。其上携带的雷达测高仪的工作频率为 13.5 GHz,本身的测距精度在 2m 的有效波高时为 3.5cm,实际卫星测高精度为 10~20cm。该卫星的首要任务就是精确确定密集的覆盖全球的地球重力场,以 10cm 的精度确定平均海面形状,并使其分辨率达到 20km 左右。从发射到 1986 年 9 月 30 日,共完成了 18 个月的大地测量任务(GM),地面轨迹格网的平均间距为 4km,位于全球海洋范围内的轨迹共长 2 亿公里,观测数据达 2.7 亿个。这期间的数据除了南极洲附近的测高数据已经公开外,其余数据仍属于保密的数据。18 个月后,Geosat 轨道被调整为每 17 天重复一次的冻结轨道(frozen

orbit), 执行所谓的 ERM(Exact Repeat Mission) 任务, 约 17.05 天即 244 圈覆盖全球一次。同时, 对 Geosat 卫星的轨道进行定期调整, 以使卫星的地面共线轨迹保持在几百米的重复带之内。Geosat 执行 ERM 任务期间的地面轨迹模式与 Seasat 的地面轨迹模式相同, 所以这期间的数据的精度不会比 Seasat 卫星有大的提高, 数据也不存在保密问题。人们利用 Geosat 卫星的测高资料, 对地球重力场、海山海沟检测、海潮、海面地形等内容进行了极其广泛的研究, 取得了前所未有的历史性成果, 进一步证明了高精度的卫星测高资料在研究全球大地水准面形状、重力异常、重力扰动、建立高阶地球重力场模型, 研究海底地形、海底地质构造、固体地球物理、海洋学, 研究海潮、洋流、海况、海风以及极区冰川地貌及其变化等方面具有更广泛的应用。

欧洲空间局经过 10 年的准备, 于 1991 年 7 月 17 日发射了欧洲第一颗遥感卫星 ERS-1 (The first European Remote-Sensing Satellite)。该卫星的轨道平均高度为 785km, 轨道倾角为 98.5° , 绕地球运行一周约 100 分钟, 设计运行寿命为 3 年。发射后的前 3 个月每 3 天覆盖全球一次。该卫星具有改变轨道高度的能力, 能改变自身的运行周期。3 个月后的大部分时间内重复周期为 35 天左右, 最后调整到 168 天(Tziavos, 1994)。该卫星获得的信息有: 全球海浪的动态情况、海面风场及其变化、大洋环流、两极冰山及全球海平面的变化、海洋及陆地的卫星影像、海洋大地水准面及海面地形、海面温度以及海面水蒸汽等。

为了以更高的精度来研究海洋表面以及大洋环流和大洋潮汐, 也是为了庆祝国际空间年, 美国国家航空与航天管理局(NASA)与法国空间局(CNES)联合于 1992 年 8 月 10 日, 在位于南美洲东北海岸的法属 Guiana 空间中心, 用法国的 Ariane42P 运载火箭, 发射了海神号海洋地形试验卫星 Topex/Poseidon(USA/France Ocean Topography Experiment Satellite)。卫星轨道高度为 1336km, 轨道倾角为 66° , 这就保证了全球海洋的 90% 可以得到覆盖。10 天(127 圈)的重复周期保证了每年可有 35 组测高重复数据, 使得科学家们能够研究海洋变化, 进而解释海洋作为人类生存的主要载体所起的重要作用。发射 Topex/Poseidon 的主要目的是从空间监测全球海面高, 以使得科学家们可以计算海洋环流以及海洋环流对环境的影响。海洋里的热交换不仅影响到气候、全球变暖及海面上升, 还可能影响到有待发现的其它现象。Topex/Poseidon 所执行的任务已经与许多国际海洋和气候项目取得了协调, 这些项目包括世界大洋环流试验(WOCE)和热带海洋与全球大气项目(TOGA), 这两个项目都由世界气候研究项目(WCRP)小组负责牵头。Topex/Poseidon 的测高资料为这些项目采集到的现场数据的解释提供了全球佐证。反过来, 这些项目与测高资料相结合又可提供对全球海洋环流模式的科学描述。Topex/Poseidon 的主要科学目的就是至少在 3 年内精确测定海面形状, 从而在本质上提高人类对全球海洋现象的认识。这些测高数据可用于: 大洋环流及其变化的确定; 计算风生洋流的能力的检测; 海洋动力学的特性描述; 海洋中热量传递、质量迁移、食物含量及盐含量的计算等; 海洋潮汐的计算; 海洋与波浪交互作用的研究等等。对海面的观测还有助于海洋地球物理工作者对海洋大地水准面的改善, 以及对岩石圈和地幔活动的认识。从 Topex/Poseidon 地面轨迹交叉点不符值(海面高)来看, 99% 的交叉点不符值的绝对值小于 0.50m, 最大不符值 2.30m, 最小不符值为 -1.62m, 不符值的均方根为 $\pm 0.12\text{m}$ 。该卫星是迄今为止测高精度以及定轨精度最高的测高卫星之一。

需要指出的是,虽然 Seasat 卫星和 Geosat 卫星早已停止了运行,但并不意味着这两颗卫星获得的测高数据便随之丧失了生命力,相反,随着地球重力场模型精度的不断提高,人们利用这些新的地球重力场模型又重新计算了 Seasat 和 Geosat 的轨道,计有 GEM-T1 轨道、GEM-T2 轨道、GEM-T3 轨道和 JGM 轨道等。目前,已可使这两颗测高卫星的径向轨道精度达到 25cm 左右,大大提高了这两颗测高卫星所获得的海平面高度的精度。

鉴于卫星测高数据对大地测量学、海洋学和地球物理学的重要意义,ERS-1 的后续卫星 ERS-2 已于 1995 年 4 月发射,Geosat 的后继卫星 Geosat-Follow-On(GFO)也已于 1998 年 2 月发射,T/P 也将有后继卫星 T/P-Follow-On(TFO),2000 年 5 月还计划发射 ENVISAT。可见,从 1986 年 10 月开始的卫星雷达测高飞跃发展的势头还将继续下去。目前和今后都有大量卫星测高数据等待我们去处理和研究(胡明城,1996)。

关于几个主要的测高卫星的情况,可归纳成表 1.1。

表 1.1 测高卫星概况

卫星名称	Skylab	Geos-3	Seasat	Geosat	ERS-1	Topex/Poseidon
国名	美国	美国	美国	美国	欧洲	美国/法国
发射日期	1973. 5. 14	1975. 4. 9	1978. 6. 28	1985. 3. 12	1991. 7. 17	1992. 8. 10
轨道高度(km)	425	840	800	800	785	1336
轨道倾角(°)	50	115	108	108	98. 5	66
工作寿命(a)	0. 25	3. 5	0. 3	4	3	4
重复周期(d)		2. 3	3. 17	17	3, 35, 168	10
测高精度(cm)	85~100	25~50	20~30	10~20	10	6
目的用途	原理试验、大地水准面	水准面、风速、波浪、冰层、洋流	水准面、风速、波浪、洋流	水准面、海面地形、海况	海面地形、海况、环流、海冰	水准面高、海面地形、大洋环流

§ 1.2 卫星测高数据处理进展及评述

卫星测高技术作为研究地球重力场和大洋环流的一种新的手段,在空间大地测量领域产生了一场深刻的变革,与之相应的卫星测高数据处理也经历了从经验到理论,从粗略简单到精细完善,从简化到严密的发展过程。

1.2.1 70 年代初期

在本世纪 70 年代初期,卫星测高的思想已经产生,方案已经形成,Skylab 测高卫星即将升空。这个时期,虽然还没有测高数据可供利用,但一些研究者早已根据将要升空的测高卫

星的轨道形状和飞行参数及预计的测高精度等进行了一系列模拟性的开拓研究,具有代表性的是 Isner 博士和 Gopalapillai 博士以及 Rapp 博士,其研究的主要内容之一是由卫星测高数据来反求海洋范围内重力异常,另一个内容则是采用卫星测高数据来研究海底地壳密度构造。前一研究内容随着后来测高卫星的发射升空,测高数据的获得而得以实现,并取得了很大进展,为占地球表面 70% 的海洋区域提供了高分辨率的重力场信息,填补了这一长期以来留下的重力资料空白,使高阶($n=360$)重力场模型得以迅速发展,以致于近年来几乎所有的高阶地球重力场模型的建立都使用了卫星测高资料(李建成,1993;Rapp,1990;Smith,1996)。第二个研究内容因数据精度的限制从而在很长的时间里停滞不前,取得的进展不大。

在这一时期,首先是 Rapp(1974)提出了采用最小二乘配置理论由卫星测高数据来推求海洋范围内的重力异常。这一研究的历史意义就在于它首先提出了卫星测高数据用于确定地球外部重力场的问题,并给出了实现这种应用的理论和方法。以后很长时期以来,这方面的应用除了精度有所提高外,方法上的创新并不显著,无非就是采用 Stokes 反解公式或稍加变形而已,而且 FFT(Fast Fourier Transform)的方法尚未在这方面得到应用(Farely,1991;Jekeli,1980;Lelgemann,1976;Rapp,1974,1977,1979,1983,1985,1992;Zhang,1995)。自从 1985 年以后,FFT 和 FHT(Fast Hartley Transform)被相继引入到物理大地测量学领域(Sideris,1985;Strang van Hees,1990;Guan 和 Li,1992;Li 和 Siders,1992;李建成,1993),使得物理大地测量学中很多计算量很大的问题迎刃而解,从而也大大推动了利用卫星测高数据来推求海洋范围内重力异常或重力扰动这一研究课题(Farely,1991;Zhang 和 Blais,1993)。

1.2.2 70 年代中期—80 年代中期

从 70 年代中期到 80 年代中期短短 10 年左右的时间里,大量的测高数据已经出现,研究卫星测高数据处理的活动达到第一个高潮。在这一时期,人们不仅探讨了如何减小测高卫星径向轨道误差,而且更深入地研究了卫星测高数据在大地测量学和海洋学以及在海洋岩石圈研究中的应用。限于当时卫星定轨的条件和技术,测高卫星径向轨道误差指标还不很理想,采用何种方法和技术加以减小卫星的径向轨道误差便成为人们研究的一个重要课题。此外,由于人们在这个时期获得了几乎所有海区的海洋大地水准面数据,这就重新唤起了人们对在海洋地球物理学中应用重力信息的关注,并促使人们对海洋岩石圈和上地幔的若干研究,其中包括对火山链和孤立海山、对称扩张脊、断裂带以及被动大陆边缘的研究。在卫星测高大水水准面数据用于海洋地球物理研究方面,当时主要有两种途径:(i)研究海洋岩石圈的流变及其热演化;(ii)无图海域的海洋测深预报。人们根据局部大地水准面异常与海山之间存在很强的相关性,即可研究板块的弯曲刚度和弹性厚度的最佳估值,又可检测海山海沟。

在这一时期,对于卫星测高研究的内容则是更多地集中在如何减小测高卫星径向轨道误差、研究海平面形状、研究大洋环流模式等方面。与此同时,新型数据和新的数据组成结构又提出了新的边值问题,人们已经开始研究测高-重力混合边值问题(Sacerdote and Sanso,1983;Sanso,1985;Mainville,1986;Svensson,1983)。由于卫星测高在海洋范围内可高精度地

给出大地水准面高而在陆地区域内却无能为力,而重力观测则在陆地范围内具有高精度的重力异常,但在海洋范围内只有数量有限且精度不太高的重力异常,这就给人们提出了测高-重力混合边值问题,即如何利用海洋范围内的卫星测高数据和陆地范围内的重力观测值来确定全球的大地水准面高。测高-重力混合边值问题首先由 Holota(1980)提出,Holota 采用一般方法,对其线性解进行了研究(Holota,1980;1982),而且证明了,假定陆地面积足够小时(此时陆地球冠半径不能大于 2.26°)混合边值问题解的存在性和唯一性。Svensson(1983)则根据拟微分算子理论进一步证明了一般情况下测高-重力混合边值问题解的存在性和唯一性,此时陆地球冠半径可达到 62.6° ,这是一个明显的进步。后来,Mainville(1987)博士则采用球函数解法对测高-重力混合边值问题进行了研究,他把球函数作为原始基函数,进行 Gram-Schmidt 正交化,得到新的基函数,从而给出了测高-重力混合边值问题在球形地球表面上的数值解。

此外,还有人对卫星测高数据的谱特性进行了研究(Eren,1980)。Eren 博士开创性地研究了 Goso-3 测高数据的分辨率问题,并提出了频域内的最小二乘法配置理论,成功地应用到了由 Geos-3 测高数据恢复重力异常课题中。遗憾的是,这一开创性的研究并没有起到抛砖引玉的作用,未形成研究测高数据处理活动的一个热点。

由于这一时期,卫星测高数据大量出现,研究活动和研究成果都特别引人注目。归纳起来有这么几个方面。

1. 研究如何选取合适的误差函数以用于交叉点平差。初期时由于缺乏内存大、速度快的计算机,故这方面的进展很缓慢。另一个原因是人们对测高卫星径向轨道误差的时域特性了解得还很不够,基本上是靠经验选取交叉点平差时的误差函数。这一时期最典型最普遍采用的误差函数有两种,一种是偏差型误差函数,另一种是偏差-倾斜型误差函数。前者一般用于小范围的区域平差,后者则用于大范围的区域平差或全球平差(Liang,1983;Rapp,1982;Rowlands,1981)。

2. 研究如何进行交叉点平差以及如何联合两种不同的测高卫星数据进行交叉点平差,研究内容包括如何进行全球平差和分区平差以及后来从理论上加以研究但在测高数据处理中未付诸实现的自由网平差技术等。当时主要由于计算条件的限制,其次是由于人们本身在新技术方面突破不大的限制,这方面的研究一直进展不大,至今情况仍是如此,其原因是除了上面提到的两点限制以外,由于目前测高卫星定轨精度大大提高了(Haines,1990,1995; Nerem,1994; Tapley,1994; Wakker,1995),主要为了消除测高径向轨道误差而进行的交叉点平差的必要性就不再为人们所重视了。

3. 研究如何由测高数据反求海洋范围的重力异常。这一研究内容是前一阶段研究的继续,主要研究领域是测高数据在反求海洋范围重力异常时的具体应用,并未出现什么新的技术或者理论。只是在 80 年代中期之后,才出现了一些新的计算技术,主要是 FFT 和 FHT 的引入(Zhang,1993,1995;李建成,1993;Li 和 Sider,1992;Strang Van Hees,1990;Sideris,1985)。

4. 研究利用卫星测高数据确定 SST(Sea Surface Topography)的方法。这一阶段,除了在求取格网化的平均值时,方法有所改善,重力场模型精度有所提高外,没有出现其它什么

新的方法,仍是利用传统的方法,即简单地从平均海面中减去大地水准面从而得到海面地形,然后利用最小二乘法或者利用球谐函数正交化方法,求出海面地形的球谐表示而已(Engelis,1983,1985;Tai,1984;Tapley,1988)。

5. 开始研究测高卫星径向轨道误差的时域特征,文章极少,没有形成一个较大的研究活动。其研究的方法比较单一,结论也很单薄,但可喜的是,这种研究为在交叉点平差时选择合适的误差函数提供了一种理论上的支持(Wagner,1985;Tapley,1985),它首次明确地证明了测高卫星径向轨道误差的长波特性,并且证明了测高卫星径向轨道误差具有显著的lcpr(每转一周)特征。不过,后来我们就会看到,这方面的研究在80年代中期以后得到了更深入系统的研究,出现了许多前人未曾得出的结论(Engelis,1987;Rosborough,1986,1990;Wagner,1987;Mazzega,1986;Moore 和 Rothwell,1990;Schrama,1989;Smith,1994;翟国君,1996)。

6. 研究海面形状和海面变化以及大洋环流模式。有了精密重复轨迹后,使这一研究内容可能变成了现实,并且取得了大量研究成果(Apel,1983;Bernard 等人,1983;Blaha 等人,1985,1986;Cheney 和 Marsh,1982,1983;Douglas 等人,1984;Marsh 等人,1982,1984,1986;Zlotnicki,1984)。

1.2.3 80年末期—现在

这一时期涌现出来的一般学术文章和博士论文数量最多,反映了这一时期的研究方向。归纳起来,可以有这么几点:

1. 开始从理论上深入系统地研究测高卫星径向轨道误差的时域特征与空域特征,具有代表性的研究工作是 Engelis (1987)、Rosborough (1986)、Wagner (1987, 1989)、Moore (1990)、Schrama (1989, 1992)、Haines 等人 (1994)、翟国君 (1995, 1996) 等人作出的。这些成果为人们选取合适的误差函数提供了理论上的支持,使人们对测高卫星径向轨道误差特性有了一个比较明确清醒的认识。这一时期的不足之处是对测高卫星径向轨道误差的空域特性的研究比较少,而这一点对于研究测高卫星径向轨道误差在交叉点平差中的可观测性是很有用的。早在80年代中期,人们就已经开始研究测高卫星径向轨道误差的时域特征,而在此之前,这方面的研究基本上尚处于空白阶段。研究之初,由于方法的局限,人们得到的结论比较单一,这已在1.2.2里面进行了评述,那时,人们只是简单地从 Kaula 线性解公式出发,采用的公式非常近似(Engelis,1987),得到的公式结果及结论并无规律可循(Wagner,1985;Engelis,1987)。然而在80年代中期之后,有关测高卫星径向轨道误差的时域表示方面取得了很有意义的成果,不仅出现了用 Fourier 级数表示的时域形式,而且还出现了规律性较强的时域表示式,同时,不仅研究了重力场源误差引起的测高卫星径向轨道误差,而且还研究了非重力场源误差引起的测高卫星径向轨道误差(Rosborough,1986;Engelis,1987;Moore,1990;Schrama,1992;翟国君,1995,1996)。

2. 开始出现所谓的整体求解法或称联合求解法(Integral Approach; Simultaneous Solution; Joint Method),在原来的简单求解的基础上前进了一步。前面已经指出,过去人们只是简单地从测高平均海平面中减去模型求出的大地水准面得到海面地形,然后利用最小二乘

法或者利用球谐函数正交化方法,求出海面地形的球谐展开系数而已。而在这一阶段,人们考虑到测高海平面中不仅包括了测高卫星径向轨道误差,而且还包括了地球重力场模型误差,而最主要的是包含了海面地形信息,因此,利用剩余海面高,或在进行交叉点平差的同时,有可能同时减小测高卫星径向轨道误差、求定重力场模型位系数改正数和海面地形球谐展开的系数。事实证明这种思想不仅完全可行,而且在某种程度上还优于过去的简单求解法(即相减法)。最早提出这一理论并给出其数学模型,加以模拟验证的是 Wagner(1986),接着 Engelis(1987)对整体求解法进行了更为系统的研究,后来 Engelis 和 Knudsen(1989)、Schrama(1989,1992)、Visser(1992,1993)、Hwang(1991,1995)又都相继对整体求解法进行了研究并在测高数据处理实践中进行了应用,取得了较丰富的成果。尽管经过十多年的研究,进行了不断地补充和完善,但这一方法仍有一些问题存在着,至今并没有完全得到解决。一是 SST 的基准选取问题,这一问题的出现源于 SST 之参照系统与测高卫星之参照系统的不一致。由定义可知,SST 是海平面与大地水准面之间的偏离,这其中大地水准面本身的确定还需不断提高其精度。在理想的情况下,大地水准面与海面地形都是相对于地心系统的。用卫星测高方法,SST 乃是用测高方法得到的海面高与一些重力位模型表示的大地水准面之间的差值。在整体求解法中,这一重力位模型要与卫星定轨时采用的重力位模型相一致。如果该模型不包含一阶项,那么这一模型求出的大地水准面将是相对于地心系统的。然而,由于卫星跟踪站的分布以及仪器精度等因素的影响,卫星轨道不完全是相对于地心坐标系统的,从而测高得到的海面高也不是相对于地心坐标系统的了。另外,大地水准面还有零大地水准面和平大地水准面之分。后者的问题已经澄清,前者的问题直到 90 年代初期才引起人们的注意(Hwang,1991,1995;Rapp,1989;Denker 和 Rapp,1990)。二是先验权的选取,这涉及到重力位模型系数和海面地形球谐系数先验权的确定,尽管取权方法不尽一致,而且目前也仍有人在不断探讨,但均无什么实质性的差别,而且这也不构成判断某一方法好坏的标志(Engels,1987;Hwang,1991;Nerem,1989;Schrama,1989;Visser,1992,1993)。三是测高卫星径向轨道误差与海面地形球谐展开一阶项的相关性问题。由于 SST 球谐展开的 $(1,0)$ 项与卫星的径向轨道误差存在着明显的相关性,所以整体求解法不可能单独求得此项(Denker 和 Rapp,1990)。此外,SST 的 $(1,1)$ 项与海洋学的结果也不相一致,产生这种情况的原因可能是用于卫星定轨的跟踪站的分布不均匀以及地球所产生的微少的质心漂移所致。研究结果表明,SST 的 $(1,0)$ 项与 l -cpr 频率的测高卫星径向轨道误差的相关性可达 92%,对 SST 的 $(1,1)$ 项而言,这种相关性可达 60%。这就意味着仅采用测高方法的整体求解法是难以将这些项分离出来的。解决的办法一般有两种,一种是寻找表示 SST 的其它方法,如可以不采用球谐展开的办法来表示 SST,而采用在海域范围内的正交函数来表示 SST。这是因为 SST 只在海域部分存在,而球谐函数却具有全球特性,用球谐函数表示 SST 产生的问题是,针对重力位模型的全球性特性和 SST 模型的非全球性特性,而两者都用具有全球特征的球谐函数来表示,势必要造成 SST 的一定扭曲,并且对 SST 的球谐展开式的阶方差的解释也易得出令人误解的结果,尤其是在近岸海域。当采用局部区域上定义的正交基函数而不采用具有全球性特征的球谐函数来表示 SST 时,理论上则更加复杂,而且没有得到测量学界及海洋学界普遍的认可,也没有像球谐展开那样有现成的软件,如何正确地解