



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

WAVEFORM RETRACKING OF
SATELLITE RADAR ALTIMETER AND APPLICATIONS

郭金运 常晓涛 孙佳龙 高永刚 著

卫星雷达测高波形 重定及应用



测绘出版社

TN959. 74
06

014004415

测绘地理信息科技出版资金资助

卫星雷达测高波形重定及应用

Waveform Retracking of Satellite Radar Altimeter and Applications

郭金运 常晓涛 孙佳龙 高永刚 著



测绘出版社



北航

C1691833

TN959.74
06

©郭金运 常晓涛 孙佳龙 高永刚 2013

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。

内容提要

卫星测高技术采集了大量海洋和陆地资料,为大地测量学、地球物理学和海洋学等研究提供了基础数据,但是在近海、冰面和陆地上的测高数据质量却严重下降,波形重定技术是测高数据质量改善的重要方法之一。本书介绍了卫星测高原理和数据处理方法,给出了国内外已经执行和计划执行的卫星测高任务,分析了卫星雷达测高波形,给出了近海、湖泊、沙漠等典型波形特征,对测高波形进行了分类,讨论了陆地和自动增益控制对测高波形的影响,阐述了测高波形重定算法,开发了测高波形重定软件,并将测高数据应用于沿海重力异常和大地水准面模型精化、湖泊水位变化监测及其与 ENSO 的关系、地转流速解算等研究,给出了相应实例。

本书可供大地测量、地球物理、海洋学、遥感等有关学科的高等院校师生和相关科技工作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

卫星雷达测高波形重定及应用 / 郭金运等著. — 北京: 测绘出版社, 2013. 6

ISBN 978-7-5030-2824-3

I. ①卫… II. ①郭… III. ①卫星载雷达—测高雷达
IV. ①TN959. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 052939 号

责任编辑 贾晓林 封面设计 李 伟 责任校对 董玉珍 责任编制 喻迅

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	三河市世纪兴源印刷有限公司	经 销	新华书店
成品规格	169mm×239mm	彩 插	4
印 张	12.25	字 数	235 千字
版 次	2013 年 6 月第 1 版	印 次	2013 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—1200	定 价	39.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-2824-3/P·645

审 图 号 GS(2013)1884 号

本书如有印装质量问题,请与我社联系调换。

前言

卫星测高是随着卫星遥感测量技术而发展起来的一种空间大地测量技术,它利用低轨卫星上搭载的测高计,测量卫星至地面(包括海面)的高度、海洋有效波高和后向散射系数,通过数据处理和分析,开展大地测量学、地球物理学和海洋学等研究。早在 20 世纪 70 年代,随着 SKYLAB、GEOS-3 和 SEASAT 计划的顺利实施,卫星测高数据在一些专题上得到应用。到了 20 世纪 80 年代,随着 GEOSAT 计划的实施,卫星测高应用范围逐渐扩大,多学科相互渗透,逐渐成为一种独立的空间大地测量方法和技术。在 20 世纪 90 年代,随着 ERS-1/2、TOPEX/Poseidon、GFO 等计划的逐步实施,卫星测高显示出了在多学科多领域的应用潜力。进入 21 世纪,随着 Jason-1/2、ENVISAT、ICESAT、CRYOSAT、HY-2 等计划的相继执行,卫星测高技术展示了强大的生命力,并逐步走向成熟。

在 1979 年召开的第 17 届国际大地测量与地球物理学联合会(the International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG)大会上,美国代表在其提交的国家报告中指出:在 1975 年至 1979 年期间,大地测量领域里最惊人的成就就是在 GEOS-3 和 SEASAT 卫星上安装了精密雷达测高计,进行海面地形的全球测量。从那以后,国际上逐渐开展了卫星测高及其应用研究。卫星测高技术具有快速和全球覆盖能力,能够实时或准实时提供地球的重要信息。卫星测高数据不仅可用于海洋的重力异常、大地水准面、海面地形、海潮、风浪场和海洋动力学研究,还可用于研究海底地形、海底构造、海冰等。同时,卫星测高还采集了大量的陆地资料,用于陆地水域水面变化、陆地动力学、冰川质量平衡和异常气候影响等研究。

卫星测高数据质量是其应用的基础,测高卫星精密定轨、测高计硬件延迟、对流层和电离层延迟、海况偏差、地球物理改正和逆气压效应等是影响测高数据精度的重要因素。经过 40 多年的发展,对这些影响测高数据质量因素的研究逐步完善,测高数据精度达到了厘米量级。因此,卫星测高在开阔深海海域获得了良好应用。但是,在近海和陆地上,由于地形、地球物理环境和硬件响应等的影响,测高数据质量还有待于进一步改善,主要方法就是波形重定。我国于 2011 年 8 月发射了首颗测高卫星 HY-2, HY-2 不仅对开阔海域进行观测,也采集了大量陆地数据。

本书第 1 章主要介绍卫星测高发展与应用以及波形重定发展,第 2 章介绍卫星测高原理和测高数据处理,第 3 章介绍已经执行和计划执行的卫星测高任务,第 4 章介绍卫星雷达测高波形,第 5 章介绍测高波形重定算法,第 6 章介绍测高数据的应用,第 7 章介绍作者开发的雷达测高波形重定软件。

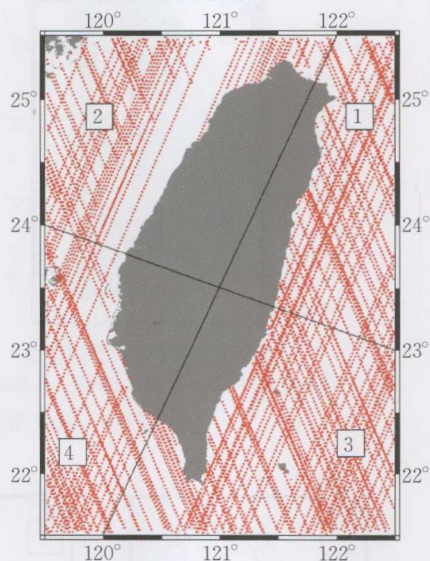
本书成果是国家自然科学基金资助的“提高卫星测高数据分辨率及在中国海的应用研究”(40174001)和“陆地卫星测高关键技术研究”(40774009),国家“863”计划资助的“基于卫星定位的沙尘暴源区综合卫星监测技术研究”(2006AA12z303)和“海岛(礁)测绘技术集成与示范”(2009AA121405),国家测绘地理信息局对地观测技术重点实验室基金资助的“联合卫星测高和卫星重力任务的中国近海海面地形研究”(200801)和“基于雷达卫星测高的中国区域后向散射系数时空分布研究”(K201103),中国科学院动力大地测量学重点实验室基金资助的“基于DORIS的HY-2卫星精密定轨模拟研究”(L09-01)等课题的部分研究成果总结。

本书由山东科技大学郭金运教授、国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心常晓涛研究员、淮海工学院孙佳龙博士和福州大学高永刚讲师著。在研究过程中得到了武汉大学李建成院士、台湾交通大学黄金维教授、中国测绘科学研究院胡建国研究员、河海大学岳建平教授、山东科技大学卢秀山教授和于胜文教授等的大力支持和无私帮助,山东科技大学博士生孔巧丽、硕士生秦建、杨红、杨磊、张凯华、胡志博等帮助搜集了部分资料和分析处理了部分数据,特此表示衷心感谢。

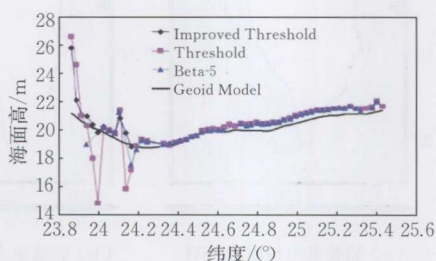
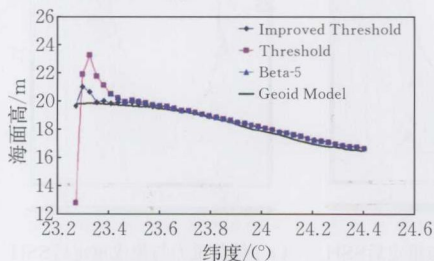
本书内容只是近年作者的研究成果总结,还有待于进一步深入研究,加之作者水平有限,经验不足,书中难免有不足和谬误之处,恳请专家及广大读者不吝赐教。



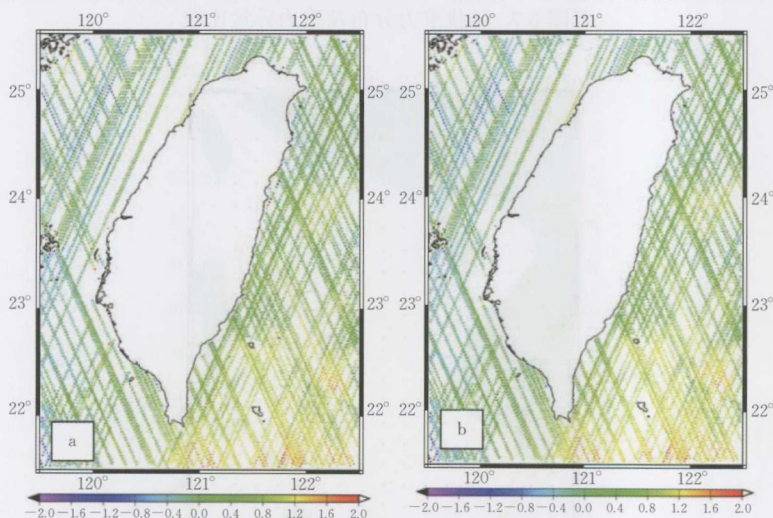
彩图 5.13 台湾岛周边海域 GEOSAT/GM 地面轨迹分布及 ITR 重定后的 SSH 与原始 GDR 的 SSH 比较



彩图 6.4 台湾岛周边海域 GEOSAT/GM 轨迹分布及其测试区域划分

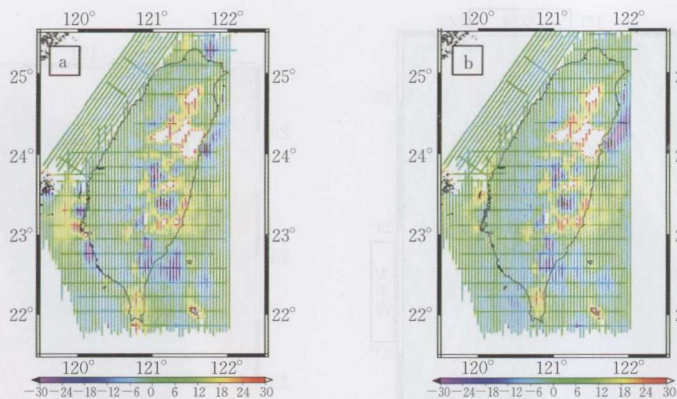


彩图 6.3 GEOSAT/GM 轨迹 85206 和 85282 的重定 SSH 和大地水准面高比较



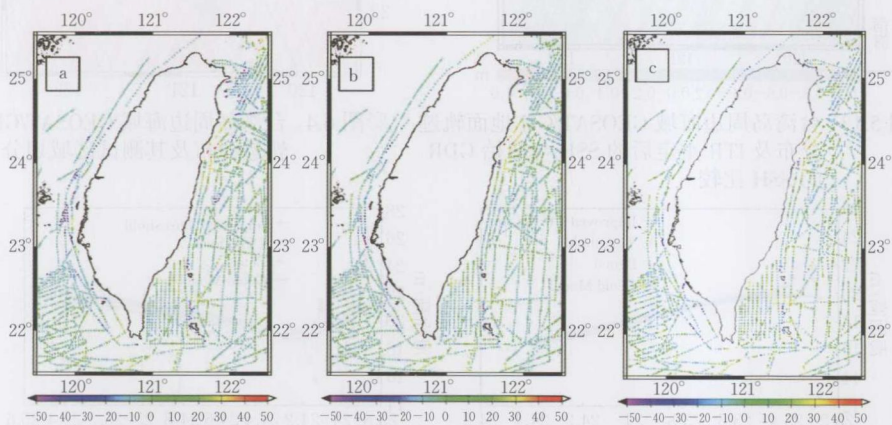
(a) 原始 GDR 给出的 SSH 与大地水准面高之差分布 (b) ITR 重定 SSH 与大地水准面高之差分布

彩图 6.5 波形重定结果比较



(a) 航空重力与原始SSH导出的重力异常之差 (b) 航空重力与重定后的SSH导出的重力异常之差

彩图 6.6 航空重力航迹分布及重力异常差异

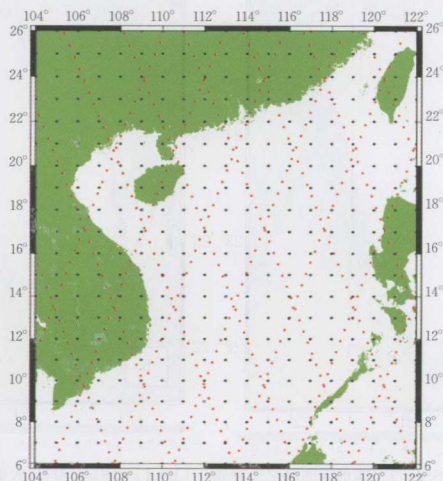


(a) 船载重力与原始SSH导出的重力异常

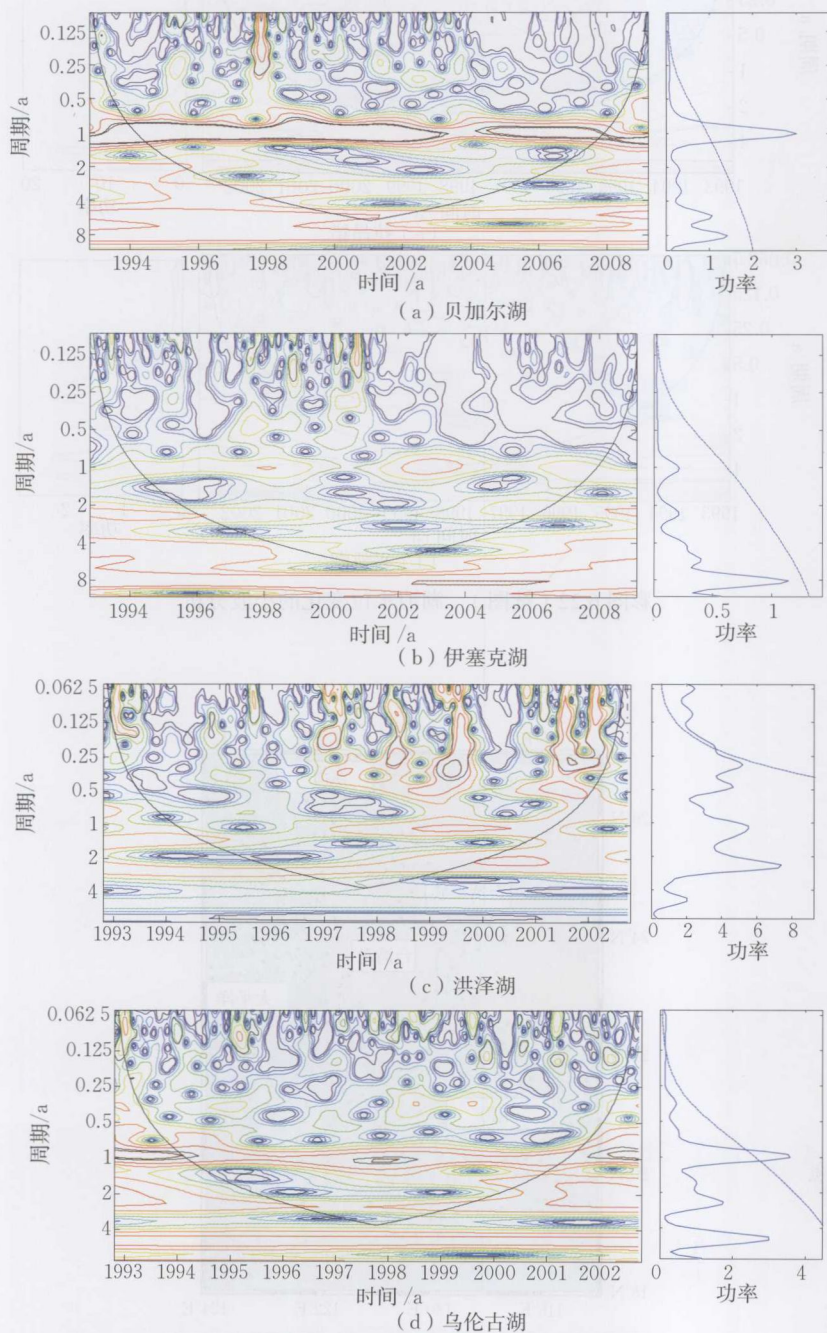
(b) 船载重力与重定后SSH导出的重力异常

(c) 船载重力与集成重定后SSH和航空重力导出的重力异常

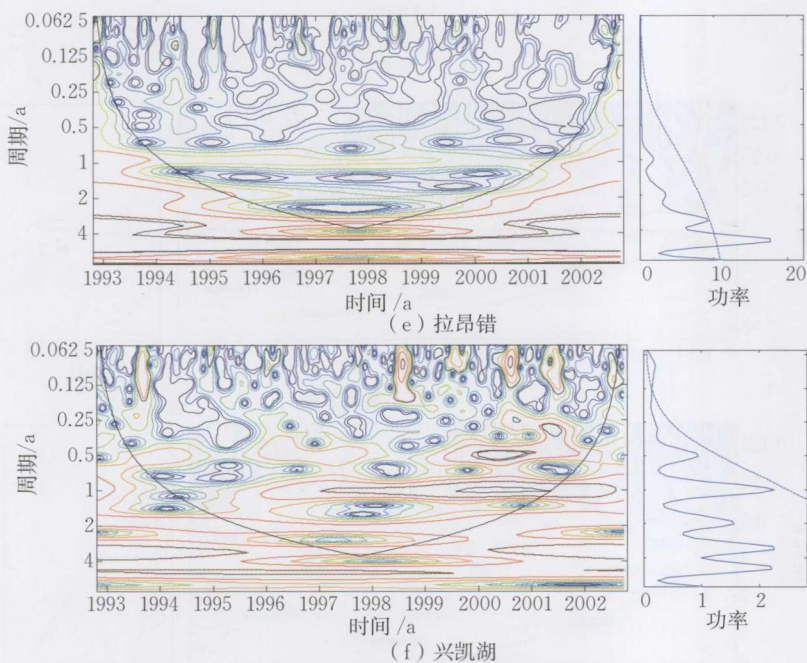
彩图 6.7 船载重力分布及重力异常比较



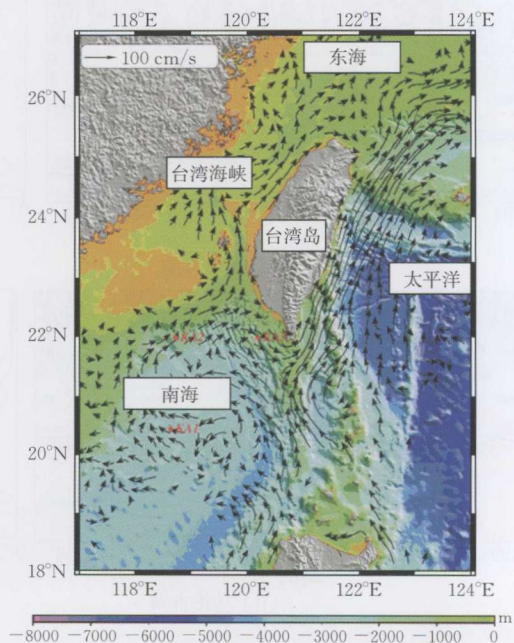
彩图 6.11 卫星测高轨迹与潮汐分析网格点



彩图 6.22 湖泊水位变化的小波分析



彩图 6.22 (续图) 湖泊水位变化的小波分析



彩图 6.27 台湾岛周边海域平均洋流流速



北航

C1691833

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 卫星测高发展	1
1.2 卫星测高应用	4
1.3 卫星雷达测高波形重定	10
第 2 章 卫星雷达测高原理及数据处理方法	12
2.1 卫星雷达测高计基本构成	12
2.2 卫星测高基本原理	14
2.3 卫星测高误差分析	18
2.4 卫星测高数据时空基准统一	30
2.5 交叉点平差	32
2.6 共线平差	34
第 3 章 主要测高卫星任务	37
3.1 SKYLAB、GEOS-3 和 SEASAT	37
3.2 GEOSAT 和 GFO-1	40
3.3 ERS-1、ERS-2 和 ENVISAT	42
3.4 TOPEX/Poseidon、Jason-1、Jason-2 和 Jason-3	45
3.5 ICESAT	48
3.6 CRYOSAT-1/2	50
3.7 HY-2	51
3.8 其他测高卫星任务	52
第 4 章 卫星雷达测高波形	57
4.1 足迹	57
4.2 平均回波波形	60
4.3 波形自适应跟踪	62
4.4 回波模型	65
4.5 波形特征分析	68
4.6 陆地和 AGC 对近海波形影响分析	77
第 5 章 卫星测高波形重定方法	87
5.1 概述	87
5.2 OCOG 算法和 Threshold 算法	88

5.3	β 参数算法	93
5.4	基于波形分类的重定方法	96
5.5	参数模型算法	101
5.6	面体散射重定算法	104
5.7	其他波形重定方法	109
5.8	波形重定距离改正和重定结果评判	111
5.9	波形重定实例	112
第 6 章	卫星雷达测高数据应用	118
6.1	基于卫星测高的近海重力异常计算	118
6.2	基于卫星测高的海洋垂线偏差计算	130
6.3	基于卫星测高的潮汐模型精化	133
6.4	呼伦湖水位变化的卫星测高监测	142
6.5	测高监测的湖泊水位变化与 NINO 海面温度之间的相关性	147
6.6	基于交叉点的台湾岛东部黑潮流速计算	156
第 7 章	卫星雷达测高波形重定系统设计与开发	163
7.1	软件功能和运行环境	163
7.2	软件使用	163
7.3	命令行格式的软件操作	168
参考文献		169
附录 中英文术语对照		183

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Development of Satellite Altimetry	1
1.2 Applications of Satellite Altimetry	4
1.3 Waveform Retracking of Satellite Altimetry	10
Chapter 2 Principle of Radar Satellite Altimetry and Data Processing	12
2.1 Basic Structure of Radar Satellite Altimeter	12
2.2 Basic Principle of Satellite Altimetry	14
2.3 Analysis on Errors of Satellite Altimetry	18
2.4 Temporal and Spatial Base Unification of Satellite Altimetric Data	30
2.5 Crossover Adjustment	32
2.6 Collinear Adjustment	34
Chapter 3 Main Altimetric Satellite Missions	37
3.1 SKYLAB, GEOS-3 and SEASAT	37
3.2 GEOSAT and GFO-1	40
3.3 ERS-1, ERS-2 and ENVISAT	42
3.4 TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 and Jason-3	45
3.5 ICESAT	48
3.6 CRYOSAT-1/2	50
3.7 HY-2	51
3.8 Other Altimetric Satellite Missions	52
Chapter 4 Satellite Radar Altimetric Waveform	57
4.1 Footprint	57
4.2 Mean Returned Waveform	60
4.3 Auto Adaptive Waveform Tracking	62
4.4 Returned Waveform Model	65
4.5 Analysis on Waveform Characteristics	68
4.6 Effects of Land and AGC on Waveform over Coastal Sea	77
Chapter 5 Waveform Retracking Methods of Satellite Altimetry	87
5.1 Introduction	87

5.2	OCOG and Threshold Algorithm	88
5.3	β -Parameter Retracking Algorithm	93
5.4	Retracking Method Based on Waveform Classification	96
5.5	Parameter Retracking Method	101
5.6	Surface-Volume Scattering Retracking Method	104
5.7	Other Waveform Retracking Methods	109
5.8	Retracking Distance Correction and Judgement of Retracking Results	111
5.9	Examples of Waveform Retracking	112
Chapter 6	Applications of Satellite Radar Altimetric Data	118
6.1	Gravity Anomaly from Satellite Altimetry over Coastal Sea	118
6.2	Deflection of the Vertical over Sea from Satellite Altimetry	130
6.3	Refinement of Tide Model from Satellite Altimetry	133
6.4	Hulun Lake Level Changes Monitored with Satellite Altimetry	142
6.5	Lake Level Variations and Its Correlation with NINO SST	147
6.6	Kuroshio Speed East of Taiwan with Crossover Method	156
Chapter 7	Design and Development of Satellite Radar Altimetry Waveform Retracking System	163
7.1	Functions and Running Environment	163
7.2	Software Utilization	163
7.3	Using in Command Line	168
References		169
Appendix		183

第1章 绪论

1.1 卫星测高发展

作为一种空间大地测量技术,卫星雷达测高利用卫星上装载的微波雷达测高计(又称为高度计),实时测量卫星至海面的高度、有效波高和后向散射系数,并通过数据处理和分析,开展大地测量学、地球物理学和海洋动力学等研究。卫星测高涉及的主要内容有:海面雷达回波分析、卫星测高原理与技术、卫星精密定轨、测高数据预处理、测高数据误差分析、测高数据分析和应用,以及测高数据的检验和校准(王广运 等,1995;Fu et al, 2001)。

卫星作为一个移动平台,平台上的传感器发射雷达频域已知能量的微波脉冲至地面,脉冲遇到粗糙的地面,部分入射脉冲反射回至测高计,测高计接收地面反射回来的回波信号,计算脉冲往返卫星和地面的时间间隔,理想情况下时间间隔的一半乘以光速就得到卫星至星下点反射面的距离。

1970 年,在美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的卢森堡(Luxembourg J)领导下, NASA 将已经拟定的大地卫星计划 GEOS-1 和地球物理应用计划 GEOS-2(Douglas et al, 1972)合并为 GEOS-3 计划,目的在于发展一种新型海洋测量技术和仪器,能够以更高的精度观测海洋,以弥补原来计划的 GEOS-1 和 GEOS-2 观测数据精度不高及其用于研究地球重力场时精度较低的不足。后来,威廉姆斯(Williams)提出了利用卫星测高计采集地球信息的建议。美国 NASA 的戈达德航天中心(Goddard Space Flight Center, GSFC)首先组织力量进行了为期一年的预研工作,对卫星测高技术进行了可行性论证,对卫星测高系统、原理、技术和应用等进行了研究,得出了完全肯定的结论。1971 年末,在美国 NASA 支持下,美国沃洛普斯飞行中心(Wallops Flight Center, WFC)开始了卫星测高实施方案的可行性论证,此后全面展开搭载于 GEOS-3 上的雷达测高计研制工作。美国约翰斯·霍普金斯大学的应用物理实验室(Applied Physics Laboratory, APL)负责卫星和仪器的研制,GSFC 负责卫星的发射和控制,通用电气公司负责卫星测高计的研制。从此,卫星测高计的研制和卫星测高技术的实施就走上了正式轨道。

斯坦利(Stanley et al, 1972)首次成功研制了 S-193 雷达测高计,并搭载在 SKYLAB-2/3/4 上进行了多次实验,获得了大量的实验数据,进行了大尺度范围

的大地水准面起伏计算,首次建立了空间大地几何水准面概念(McGoogan, 1975),为 GEOS-3 和 SEASAT 计划奠定了基础。1975 年 4 月, NASA 在西部空军实验基地成功发射了 GEOS-3 卫星,该卫星一直工作到 1978 年 12 月,历时 3 年,对太平洋、大西洋、印度洋、阿拉伯海等进行了多次重复观测,采集了丰富的海洋资料(Stanley, 1979)。利用这些资料在研究海洋大地水准面、重力异常、海面地形和海洋深层结构等方面都取得了良好结果,但是其工作范围和测量精度还不能完全满足精密测地的要求。1978 年 6 月, NASA 又发射了 SEASAT 卫星,继续完成从空间对全球海洋动力学特征的探测(Marsh et al, 1982)。由于卫星电源发生故障,于 1978 年 10 月停止工作。这几个月采集的数据在数量和质量上都大大地超过了 GEOS-3 卫星 3 年所采集的数据,为大地测量学、地球物理学和海洋动力学等研究作出了重要贡献。

1985 年 3 月,美国海军发射了只搭载有雷达测高计的专用卫星 GEOSAT,其开始的 18 个月执行大地测量任务(geodetic mission, GM),从 1986 年 11 月开始执行精密重复任务(exact repeat mission, ERM)。GEOSAT 采集了大量的海洋资料,在研究大地水准面起伏、重力异常、海底地质构造、固体地球物理、海洋动力学、海潮、洋流、海况、海面风速以及极区冰盖及其变化等方面已经得到了广泛的应用。

随后,美国、法国和欧洲空间局(European Space Agency, ESA)发射了多颗测高卫星,如 ERS-1/2、TOPEX/Poseidon(T/P)、GFO、ENVISAT、ICESAT、Jason-1/2、CRYOSAT-2 等,我国于 2011 年 8 月成功发射了第一颗测高卫星 HY-2。ERS-1/2 具有较大的轨道倾角,能够对高纬度极区进行观测。T/P 携带有两台测高计,其中 TOPEX 测高计是双频测高计,频率为 5.3 GHz 和 13.6 GHz,用于测量海面高度、海风和波高,并提供电离层改正;Poseidon 测高计是实验性单频固态测高计,频率为 13.65 GHz,用于测量卫星距海面的高度、海风和波高。T/P 是目前公认的测高精度最好的卫星任务之一。ICESAT 是第一颗激光测高卫星,于 2003 年 1 月由美国 NASA 负责成功发射。ICESAT 上搭载了美国 GSFC 研制的地学激光测高系统(geoscience laser altimeter systems, GLAS)代替传统的雷达测高计,主要用来测量冰盖高程、冰床质量平衡、云、浮尘高度、地貌以及植被特征等。CRYOSAT-2 是 ESA 负责的合成孔径雷达测高卫星,搭载有 SAR 干涉测量雷达测高计(SAR/interferometric radar altimeter, SIRAL)代替了传统的雷达测高计,实现地球上大陆性冰盖的厚度及海冰覆盖测量,同时研究由于全球气候变暖引起的北极冰层变薄及其预测。HY-2 卫星是中国首颗测高卫星,其主要使命是监测和调查海洋环境,获得包括海面风场、浪高、海流、海面温度等多种海洋动力环境参数,直接为灾害性海况预警预报提供实测数据,为海洋防灾减灾、海洋权益维护、海洋资源开发、海洋环境保护、海洋科学研究以及国防建设等提供支撑服务。

表 1.1 给出了国内外已经执行的测高卫星任务基本情况。

表 1.1 卫星测高任务

卫星	机构	执行时间	轨道高度 /km	轨道倾角 /(°)	周期/d
SKYLAB	美国 NASA	1973-05-14	425	50	—
GEOS-3	美国 NASA	1975-04-09	840	115	23
SEASAT	美国 NASA	1978-06-28	800	108	17
GEOSAT	美国海军	1985-03-12	800	108	3,17
ERS-1	ESA	1991-07-17	800	98	3,35,176
T/P	美国 NASA 和法国 CNES	1992-08-10	1336	66	10
GFO	美国海军	1998-02-10	880	108	17
ERS-2	ESA	1995-04-21	800	98	35
Jason-1	美国和法国	2001-12-07	1336	66	10
ENVISAT	ESA	2002-03-01	800	98	35
ICESAT	美国 NASA	2003-01-13	600	94	8,183
Jason-2	美国和法国	2008-06-20	1336	66	10
CRYOSAT-2	ESA	2010-04-08	720	92	—
HY-2	中国	2011-08-16	971	99	14,168
SARAL	印度 ISRO 和法国 CNES	2013-02-25	781	98.5	—

随着科技进步,测高计测量的卫星至海面的距离精度不断提高。美国 NASA 于 1975 年 4 月发射的 GEOS-3 卫星的点对点 1 Hz 距离测量精度只有 25 cm (Stanley, 1979), 美国 NASA 和法国国家空间研究中心 CNES (Centre National d'Etudes Spatial) 于 1992 年 8 月联合发射的 T/P 卫星搭载的 NASA 双频测高计 TOPEX 的 1 Hz 测距精度达到了 1.7 cm (Fu et al, 1994)。对于 T/P 卫星, 沿迹 100 km 的平均距离测量不确定性可降低到优于 1 cm。诸如大气折射和海况偏差等的影响距离在 100 km 量级或者更长, 采取有效算法, 这些测量误差的均方根约为 2.7 cm。测高卫星精密定轨精度也不断提高, GEOS-3 轨道高度的均方根误差约为 10 m, 而 T/P 的轨道高度误差为 2.5 cm。T/P 搭载的双频测高计的海面高测量精度约为 4 cm (Fu et al, 2001)。

卫星测高最初只能获得海面高的半定量观测, 有时很难辨别观测误差和地球物理信号。随着测高技术发展和算法改进, 卫星测高可以对海面高变化进行定量观测, 可以用于海洋动力过程等研究。

20 世纪 70 年代初期, 已经产生了卫星测高的思想, 虽然还没有实际的测高数据, 但一些研究已经根据将要升空的测高卫星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研究。主要内容之一就是由卫星测高数据来反演海洋范围内的重力异常, 另一个内容则是采用卫星测高数据来研究海底地壳密度和地质构造。测高卫星发射升空后, 获得了实际测高数据, 也解算了海洋重力异常, 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,使得高阶重力场模型得以迅速发展,因此全球高阶重力场模型的研制都使用了卫星测高数据(Rapp et al, 1990; Sandwell et al, 1997; 李建成 等, 1996)。拉普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的重力异常,首先提出了卫星测高数据用于确定地球外部重力场问题,并给出了实现这种应用的理论和方法(Rapp, 1974)。后来又引入了逆斯托克斯(Stokes)公式利用测高数据解算重力异常(Fareilly, 1991; Jekeli, 1980; Lelgemann, 1980; Rapp, 1974, 1977, 1979a, 1979b, 1983, 1985, 1992; Zhang et al, 1993, 1996)。从 1985 年以后,快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)和快速哈特利变换(Fast Hartley Transform, FHT)相继引入到物理大地测量领域(Sideris, 1985; Strang van Hees, 1990; Guan Zelin et al, 1992; Li et al, 1992; 李建成 等, 1996),黄金维(Hwang, 1998)引入逆维宁·曼尼斯公式进行基于垂线偏差的海洋大地水准面计算,大大推动了卫星测高数据在推求海洋范围内重力异常或者扰动重力的研究(Fareilly, 1991; Zhang et al, 1993; Andersen et al, 1998)。

从 20 世纪 70 年代中期到 80 年代中期,出现了大量的测高数据。在这一时期,人们不仅探讨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。限于当时卫星定轨条件和技术,测高卫星径向轨道误差还比较大,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。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,引起了人们对在海洋地球物理学中应用重力信息的关注,并促进了人们对海洋岩石圈和上地幔等的相关研究,其中包括对火山链、孤立海山、对称扩张脊、断裂带以及被动大陆边缘的研究。在卫星测高大地水准面数据用于海洋地球物理学研究方面,主要有两种途径:一是研究海洋岩石圈的流变及其热演化;二是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的很强相关性,即可研究板块的弯曲刚度和弹性厚度的最佳估值,还可检测出海山和海沟。对卫星测高的研究内容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、确定大洋环流模式等。同时,新型数据和新的数据组成结构又提出了新的大地测量边值问题,人们开始研究测高-重力混合边值问题(Sacerdote et al, 1983; Sanso et al, 1985; Mainville, 1986; Svenson, 1983, 1988)。

1.2 卫星测高应用

随着低轨卫星精密定轨精度和测高计观测精度的提高以及数据处理方法的改进,卫星测高应用范围越来越广,社会效益和经济效益也越来越显著。发射测高卫