

海洋监测技术研究丛书

高度计海洋遥感 研究与应用

何宜军 陈戈 郭佩芳 王海瑛 著



科学出版社

2002

海洋监测技术研究丛书

高度计海洋遥感研究与应用

何宜军 陈 戈 郭佩芳 王海瑛 著

科学出版社

2002

内 容 简 介

本书是《海洋监测技术研究丛书》之一。书中主要讨论了卫星高度计的发展历史和海洋应用的现状,高度计资料在海洋潮汐方面的应用,高度计海面风速反演及其应用,介绍卫星高度计资料在海浪方面和在重力场与大尺度海底地形方面的应用。

本书适合从事地理信息系统和海洋渔业领域的科技工作者、研究生、大学生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

高度计海洋遥感研究与应用/何宜军等著. —北京:科学出版社,2002
(海洋监测技术研究丛书)

ISBN 7-03-010011-5

I. 高… II. 何… III. 卫星遥感-遥感仪-应用-海洋监测 IV. P716

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 001097 号

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>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2002年6月第一次印刷 印张:15

印数:1—1 000 字数:350 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

海洋监测技术研究丛书

编辑委员会

主 任：李启虎

副主任：郑立中 袁业立

委 员：惠绍棠 施 平 韩士鑫 殷忠斌 曹红杰
周成虎 田纪伟 王小如 赵进平 余宙文
孙 赢 孙仲汉 吴世才 潘增弟 康寿岭
于厚隆 潘 峰 王长红 张春华 郑一鸣
曹文熙 丁永耀 张 杰 何宜军 潘德炉
刘建强 侯一筠 杨崇俊 邵全琴 郑元甲
沈新强 景贵飞 孙 洪

序 一

全球海洋面积约占地球表面面积的 71%,是地球四大圈层的交汇地带,在全球气候和环境变化中起着极其重要的作用。例如,海洋每年大约吸收人类活动向大气释放 CO_2 的 $1/3 \sim 1/2$,而大气水分的 86% 来自于海洋;同时海洋也是全球生命支持系统的重要组成部分。最近发现表明,海洋生物能在海底高压、高温条件下,依赖化学合成作用而生存。这极大地丰富和加深了人类对生命起源与演化规律的认识。

我国是一个海洋大国,大陆海岸线 18 000 多公里,海岛 7 000 多个,管辖海域 300 多万平方公里,并有大片国际公海可供利用。这些富饶的蓝色国土是中华民族生存和发展的新空间。我们目睹了 20 世纪海洋科学技术的进步与发展,体验到新世纪海洋开发的巨大潜力与需求。而海洋资源的开发与环境保护需要依靠最先进的科学技术的支持,如海洋油气勘探、开采、集输技术,海洋养殖优良品种与种苗生产、生态优化及生物制品开发技术。

海洋监测高技术是海洋高技术的重要组成部分,具有重要的政治、军事、经济和科学意义。全球海洋观测系统(GOOS)计划的提出和发展,标志着全球海洋观测已成为全人类共同发展的目标,世界各国也都在抓紧开展本国的海洋监测技术研究和系统建设,如美国的 C-MAN、ARGOS 系统,德国的 MERMAID 计划,挪威的 Seawatch 系统等。

与发达的海洋大国相比,我国海洋监测技术还存在较大的差距。因此,在“九五”期间,国家将海洋监测技术纳入高技术研究发展计划,并设立了“海洋监测技术研究主题(863-818)”,着重开展海洋环境自动监测技术、水声遥测技术、卫星遥感应用技术等方面的研究。经过 3 年多时间努力,主题研究取得了重大的进展:高频地波雷达对海观测成功,合成孔径声纳获得了满意的水下影像,船用多功能声学多普勒海流剖面仪、声相关测流仪、高精度 CTD 剖面仪的样机通过严格的指标测定,海平面高程反演、水下地形反演、赤潮监测等海洋遥感应用技术取得突破,海洋渔业信息服务系统的应用从近海走向远洋,以上海为中心的综合集成系统投入试运行。同时一批年轻人才茁壮成长,取得了一系列创新研究成果。

这套《海洋监测技术研究丛书》较系统地介绍了该主题的研究成果。我相信这套丛书的出版,将对我国海洋监测技术的研究和发展起到极大的推动作用。祝愿我国海洋监测技术在新世纪腾飞发展。

李 强

2000 年 11 月

· i ·

ABK 99/07

序 二

我国是一个发展中的海洋大国,大陆海岸线长 18 000 多公里,海岛 7 000 多个。根据 1994 年 11 月 16 日生效的《联合国海洋公约法》,划归我国管辖的海域有 300 多万平方公里,利用和开发海洋是我国在世纪之交的重要任务。海洋高技术的发展直接与我国国家利益密切相关,包括海洋权益、减灾防灾、资源探测、环境保护等。

从 1996 年 7 月起,科技部把海洋领域列入国家 863 计划。海洋监测技术作为一重要课题开始启动,参加这一工作的有来自全国各地(包括香港特别行政区)的专家学者,特别是吸引了一批年轻的科技骨干。在科技部有关领导、863 计划联合办公室、海洋领域办公室的领导下,经过近 4 年的努力,海洋监测技术主题取得了一系列重要进展,某些项目的研究成果已经在国民经济发展和保障国家安全方面发挥重要作用。其中重大项目“海洋立体监测技术及上海示范区建设”也已取得重大进展。

为了及时总结近 4 年来所取得的可喜成果,我们组织从事本课题研究计划的专家编写了这套丛书,借以展示 863 计划海洋监测技术主题研究的进展情况,同时也可从一个侧面看到我国在该领域的发展水平。这对检阅我国海洋监测技术领域的学术成果和探索未来海洋高技术发展的方向无疑会起到很好的作用。

本套丛书的编辑出版得到了科技部的有关领导、863 联合办公室、海洋领域办公室、海洋监测技术主题办公室的大力支持和帮助,我们在此表示衷心地感谢。

同时也对为本丛书撰写学术论文、技术报告的专家表示敬意。亲身参加由邓小平同志批准的国家 863 计划的研究工作本身就是一件值得自豪的事。这套丛书虽然不能反映工作的全貌,但由此也可以看出 4 年来辛勤奋斗、无私奉献所取得的喜人成果。

我们期望得到读者的批评与指正。

李启虎

2000 年 11 月

前 言

在 818 专家组的指导下,来自中国科学院海洋研究所、青岛海洋大学、国家海洋局第一海洋研究所和中国科学院武汉测量与地球物理研究所等 4 个单位的 20 多名科研人员,经过近 4 年时间的努力工作,完成了 863 海洋领域海洋监测技术主题“卫星高度计遥感信息应用技术研究”项目的多项工作,取得了大量成果。

本书为科研人员几年来辛勤劳动的工作总结。全书共分五章:第一章为绪论,主要讨论卫星高度计的发展历史和海洋应用的现状,由何宜军、王海瑛、陈戈完成;第二章为高度计资料在海洋潮汐方面的应用,由何宜军、方国洪、左军成、魏泽勋等编写;第三章为高度计海面风速反演及其应用,由陈戈和潘家祯执笔;第四章讲述卫星高度计资料在海浪方面的应用,由郭佩芳、侯一筠、钱成春等编写;第五章介绍卫星高度计资料在重力场和大尺度海底地形方面的应用,由王海瑛等完成。全书由何宜军统稿,方国洪研究员审阅了部分内容。

在课题的立项阶段及实施过程中,得到了 818 专家组以及课题承担单位的大力支持。本项目原负责人为赵进平研究员,负责到 1998 年 6 月。他对本项研究自始至终倾注了大量心血。818 负责本课题的责任专家施平研究员、田纪伟教授和周成虎研究员对项目非常关心,并领导项目的研究工作。818 办公室的殷忠斌、曹红杰等也给予了大力支持和帮助,在此表示衷心地谢意。

卫星高度计遥感信息应用技术研究课题组

课题负责人:何宜军、陈戈

原课题负责人:赵进平

课题责任专家:周成虎、田纪伟

潮汐负责人:何宜军

风场负责人:陈戈

浪场负责人:郭佩芳

重力场负责人:王海瑛

主要科技人员

中国科学院海洋研究所:何宜军、方国洪、侯一筠、魏泽勋

国家海洋局第二海洋研究所:赵进平

青岛海洋大学:陈戈、郭佩芳、左军成、钱成春

国家海洋局第一海洋研究所:潘家祎、赵仲祥

中国科学院武汉测量与地球物理研究所:王海瑛

课题管理:彭放英

科技管理人员:殷忠斌、曹红杰

作者

2001年12月

目 录

序 一

序 二

前 言

第一章 绪论	(1)
第一节 卫星高度计的发展与现状	(1)
第二节 海洋潮汐应用	(6)
第三节 海面波浪场分析和预报	(11)
第四节 海面风速反演	(14)
第五节 海面高度及其应用	(21)
第二章 高度计潮波反演及应用	(27)
第一节 卫星测高数据潮波分析	(27)
第二节 渤黄东海潮汐数值模式	(37)
第三节 潮汐同化方法与应用技术	(51)
第四节 南海潮汐正交潮响应法分析	(64)
第三章 高度计海面风速反演及其应用	(79)
第一节 高度计海面风速模式函数的改进与发展	(79)
第二节 高度计海面风速模式函数的应用研究	(111)
第三节 高海况下海面垂直后向散射的物理模型	(131)
第四节 高度计风速反演经验算法之二	(139)
第四章 卫星高度计资料应用于海面浪场的分析和预报	(145)
第一节 波高资料的质量控制	(145)
第二节 海浪的非线性分析	(148)
第三节 海面波浪信息提取技术	(156)
第四节 海面波高统计分析	(165)
第五章 卫星高度计数据的大比例尺海底地形反演	(195)
第一节 卫星高度计数据的重力异常反演	(196)
第二节 中国区域局部重力场模型的改进	(204)
第三节 卫星高度计数据的海底地形反演	(211)
主要参考文献	(217)

第一章 绪 论

随着地球上陆地资源的日益匮乏,人类为维持其可持续发展,开始把目光投向海洋,因此,需要对海洋更全面、更深刻地了解。以往,对于占全球总面积 70% 以上海洋的研究只能依靠测量船、验潮站和浮标等观测的数据。虽然这些数据在揭示海洋以及气候变化等方面起到了重要的作用,但由于测量数据稀疏、重复周期长、花费较大等缺陷,限制了更进一步的研究。随着空间科学技术的进步、地球轨道卫星的出现,人们研究海洋和认识海洋的手段已有了突飞猛进的发展。海洋遥感正是这种人类需求和科技进步的产物,它已经成为观测海洋和认识海洋的重要手段。地球轨道卫星所携带的各种遥感仪器,使我们在不同时空尺度同步观测海洋成为可能。各种专用的有源或无源的海洋遥感仪器的使用导致了一门新兴学科——卫星海洋学的迅速发展。与传统的海洋观测相比,卫星遥感具有投资少、监测能力强、覆盖面积大、全天候、全天时的特点,正在成为海洋探测与监测的重要手段。而卫星高度计则是这其中的一种。目前,它已发展成为海洋观测卫星的基本观测仪器之一。

卫星高度计是一种主动式微波测量仪,它具有独特的全天候、长时间历程、观测面积大、观测精度高、时间准同步、信息量大的能力和特点。卫星高度计以海面作为遥测靶,它的回波信号携带有十分丰富的海面特征信息,可以测量出瞬时海面至卫星之间的距离、电磁波海面后向散射系数及回波波形。如何从回波信号中提取、反演海面形状的信息,获得我们所需要的真实的物理场,构成了卫星高度计遥感应用的关键技术,成为卫星高度计研究的必要基础。20 多年来,人们在此领域不断探索、不断研究,获得很大发展,迄今已得到比较成熟的信号提取和反演技术,为其应用研究奠定了必要的基础。由于高度计是非成像传感器,星上存储器可以满足全球观测的要求,因而可以获得全球尺度及准实时的观测数据,这对于海洋及海洋气象预报意义重大。

由于卫星高度计能在全球范围内全天候、多次重复地准确提供海洋表面的高程变化的测量值,因此,无论是在大地测量和地球物理学的海洋大地水准面、海洋岩石圈结构、地球重力场模型研究中,还是在物理海洋学的海洋潮波系统、区域及全球尺度流场分布、中等尺度海洋环流和典型洋流(如黑潮)的变异特征、海面动力起伏以及海洋风浪场反演等研究中,或者在全球气候变化、海平面变化以及厄尔尼诺现象研究中,卫星测高都起到了举足轻重的作用。它的应用范围几乎囊括了物理海洋学的各个范畴,是海洋遥感中最有能力、最有潜力、最有前途的仪器之一。

第一节 卫星高度计的发展与现状

卫星测高研究计划最早可追溯到 1969 年在威廉斯敦召开的固体地球和海洋物理大会(Kaula et al., 1970)。自从这次会议后,卫星高度计先后安放在 Skylab(美国, 1973)、

Geos-3(美国,1975)、Seasat(美国,1978)、Geosat(美国,1985)以及目前正在运行的 ERS-1(欧洲空间局,1991)、Topex/Poseidon(美/法,1992)、ERS-2(欧洲空间局,1995)和 GFO(美国,1998)等专业海洋卫星上,其测量精度由最初的米级提高到目前的 3cm。但在 Geosat 卫星以前,由于尚没有一颗测高卫星的连续观测时间超过 1 年,因此,卫星测高资料的应用还处于探索、开拓阶段,研究工作也以定性研究为主。进入 20 世纪 90 年代以来,卫星测高资料越来越丰富,测量精度越来越高,因此,研究工作也越来越精细、深入及模式化,并重在定量地解决问题。

美国科学家在 20 世纪 60 年代中期提出利用窄脉冲雷达从卫星轨道高度上测量海平面变化的设想。根据这一科学设想研制出来的雷达高度计原型样机于 1973 年在美国天空实验室(Skylab)上进行了概念验证性实验。实验结果表明,这种技术完全可行,并达到了测高精度 1~2m 的水平。随后,在 1975~1978 年间,美国宇航局(NASA)又将一部 Ku 波段(13.9GHz)雷达高度计装载在 Geos-3(Geodynamics Experimental Ocean Satellite)卫星上,进行了长达 3 年的实验。Geos-3 高度计的测高精度达到 50cm 的量级,最初的目的是利用雷达高度计测量全球海洋大地水准面、重力场以及地球结构等以往由于缺乏数据而难以深入了解的基本地球物理和海洋学要素。但 NASA 的海洋学家对 Geos-3 高度计数据进行了分析研究之后认为,高度计完全有潜力测量海面动力高度,从而可以对海洋的动力过程进行定量测量与研究,实现这一目标的关键是提高高度计的测高精度。Geos-3 卫星的成功发射和正常运行为后续测高卫星的发射奠定了坚实的基础。

在多学科与实用需要推动下,NASA 很快研制出新一代雷达高度计,其特点为雷达脉冲采用了高压缩比的脉冲压缩技术。这种新型雷达高度计于 1978 年装载在 Seasat(Sea Satellite)卫星上进行飞行,其测高精度达到 10cm 量级。十分可惜的是,由于电源故障,因此其有效飞行时间仅有 3 个月。然而 Seasat 卫星携带的高度计、合成孔径雷达、多波段微波辐射计等遥感仪器却给人们提供了大量的有关海面地形、风速、风向、海面有效波高以及海面温度的数据。利用这些高质量的数据,人们可以检测大尺度海洋环流和中尺度涡旋,探测出以前从未发现过的海山、海沟,获得了全球范围的洋区重力异常、海洋潮汐、风浪场以及极地冰盖的信息。Seasat 成功的实验结果对雷达高度计遥感技术的发展有决定性意义。此后,美国和法国相继开始研制高精度雷达高度计,发射专门的高度计卫星用于全球海洋观测。

在美国,继 Seasat 高度计之后,美国海军于 1985 年 3 月 12 日发射了 Geosat 卫星,该星装载的惟一传感器为一部 Ku 波段(13.5GHz)雷达高度计。该星的使命为军民两用,以军用为主。美国发射该卫星的军事目的在于获得高密度的全球高精度数据,用于改进现有的地球重力场以及海洋大地水准面,以满足海军对高精度测地资料的需要。这种资料对提高潜艇发射的弹道导弹的命中精度是必不可少的。因此,Geosat 卫星的首要军事使命(Geodetic Mission)是提供全球海洋各向均匀的高密度的中长波长重力数据库,用于:①改进现有大地水准面高度、垂直偏差以及飞行中重力的制图补偿;②确定需船舶进行详查的特定地球物理/地质区域;③发现可能的水下航行水深突变灾害区。这些军事使命经过 18 个月飞行,于 1986 年 9 月 30 日得以圆满完成。期间,共获得全球海域内的 2 亿 km 长的卫星轨迹,约 2.7 亿个观测数据,其地面网格的平均间距为 4km。

此后,Geosat 卫星经过一个月的轨道调整,进入 17 天精确重复轨道,开始执行民用科

学研究使命(Exact Repeat Mission)。Geosat 高度计的科学研究使命为测量全球海面高度,探测中尺度海洋特征,通过时间系列分析,研究全球海洋动态变化。Geosat 卫星共运行了 5 年时间(1985~1989)。如果包括前 18 个月的军事任务期的海面高度变化测量值,连同后来 3 年半精确重复轨道数据,组成的时间连续的数据集是当时最长的全球海面高度连续观测资料,有十分重要的科学价值。美国不同单位的科学家分别对 Geosat 高度计的数据的精度进行过多次对比验证,得出的结论大致相同。其中,NOAA 科学家利用热带太平洋 14 个海岛验潮站测得的海面高度数据为标准,与 Geosat 测得的海面高度数据进行了对比,确定出两者的月平均值偏差为 3.5cm,这是较具代表性的结论。与以前的星载雷达高度计相比,可以说有实质性的突破。这些数据已经达到可供实用的水平。Geosat 高度计的数据产品已经商品化,任何单位或个人都可购买。

欧洲空间局(ESA)经过 10 年的准备,在 1991 年 7 月 17 日发射了欧洲第一颗遥感卫星 ERS-1(European Remote Sensing Satellite)卫星。它和现仍在运行中的其后续卫星 ERS-2(1995 年 4 月 21 日)上均装载有 Ku 波段(13.8GHz)雷达高度计,ERS-1/2 高度计的测高精度大约为 3cm 量级,其用途与 Geosat 高度计大致相同。但由于它们的数据只提供经批准的用户使用,因此,所产生的应用成果及其影响范围均大受限制。

星载雷达高度计技术目前发展的最高水平为美国与法国合作于 1992 年(国际空间年)8 月 11 日发射的 Topex/Poseidon 卫星及其雷达高度计系统。Topex 为该星的美国名字,意为“海洋地形实验”(Ocean Topography Experiment),Poseidon 为法国名字,它是希腊神话中海神的名字。这颗卫星是世界上第一颗专门为研究世界大洋环流而设计的高度计卫星。首先这颗卫星的轨道与众不同。此前的高度计卫星的轨道高度均为 800km 左右,轨道倾角均接近或大于 100° 。而 Topex/Poseidon 卫星轨道高度达 1336km,轨道倾角为 66° 。轨道重复周期为 10d。这种低倾角轨道是为适应全球主要大洋在地球上的分布而设计的。其次,这颗卫星的传感器配置是史无前例的。星上装载有两部高度计:美国航天局研制的 Topex 高度计和法国空间局国家空间研究中心(CNES)研制的 Poseidon 高度计。Topex 高度计为双频高度计(13.6GHz 和 5.3GHz),对电离层散射引起的测高误差具有校正能力。该 Topex 高度计还配置了一部微波辐射计(TMR)。TMR 为三波段(18GHz,21GHz 和 37GHz)微波辐射计,用来测量大气中的水汽总量,从而用以校正高度计测量中由大气中水汽引起的误差。Poseidon 高度计为单频(13.65GHz)固态雷达高度计,体积小、重量轻、耗电更省,技术上有独到之处。Poseidon 雷达高度计虽然是单频固态高度计,但由于它的电离层校正采用的是最新的 Dorris Doppler 数据、GPS 数据和全球电离层模型(如 IRI90 模型),因此,它的大气传播影响也降低到最低程度。Topex/Poseidon 卫星发射成功之后,科学家利用多种方法对其测量精度进行了核对,结果表明,这颗精心设计的卫星果然不负重望,单次经过轨道的海面高度的测量均方根精确度,Topex 高度计系统达到 4.7cm, Poseidon 高度计系统达到 5.1cm,均比设计要求 13.7cm 高 2 倍(Tapley et al., 1994)。与赤道太平洋 17 个海岛验潮站测得的海面高度相比,在 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 空间分辨网格内,月平均值的均方根偏差为 2.3cm,这些结果都是从前星载高度计未曾达到的。而大洋中、大尺度动力过程引起的海平面变化的幅度约为 10~30cm 量级,因此,Topex/Poseidon 高度计的测量数据完全达到了定量观测对测量误差的要求。

表 1.1.1 测高卫星发射计划表

卫 星	研制单位	发射日期	卫星倾角	重复周期	跨赤道间距	频率/Hz
Geos-3	NASA	1975.4.9	115°	—	—	13.9G
Seasat	NASA	1978.6.28	108°	3,17d	160 800km	13.5G
Geosat	U.S.Navy	1985.3.15	108°	准 23d,17d	160km	13.5G
ERS-1	ESA	1991.7.17	98.5°	3,35,168d	20~80km	13.8G
Topex/Poseidon	NASA/CNES	1992.8.10	66°	10d	320km	5.3/13.6G
ERS-2	ESA	1995.4.21	98.5°	3,35,168d	20~80km	13.8G
GFO	U.S.Navy	1998.2.10	108°	17d	160km	13.5G
Jason	NASA	2000.5.18	66°	10d	320km	
Envisat	ESA	2000.5	98.5°		80km	

表 1.1.2 卫星测高精度估计表(单位:cm)

卫 星		Geos-3	Seasat	Geosat	ERS-1	Topex/Poseidon
仪 器 误 差	仪器噪声	50	10	5	3	<2
	仪器偏差	—	7	5	3~5	2
	时标偏差	—	5ms	3~5ms	1~2ms	<1ms
	总的仪器误差	50	15	7	2	2
环 境 误 差	EM 偏差	10	5	2	2	<2
	波形失真	2	1	1	1	1
	干对流层	2	2	1	1	1
	湿对流层	15	3	1.2	1.2	1.2
	电离层	2~3	2~3	2~3	2~3	1.2(2.0)
	总的环境误差	20	10	4	4	3.5
轨 道 误 差	重力场	50	25	15	15	≤2
	辐射压	—	15	10	6	≤2
	大气阻力	—	15	10	5	1
	GM 常数	—	—	—	2	1
	潮汐	—	12	5	2	<2
	对流层	—	5	4	5	1
	测站位置	—	10	5	2	1
	总的轨道误差	50	30	20	3	3.5
总的均方根误差		67	33	22	18	<5

从表 1.1.2 列出的已发射卫星的测量精度估计表中可以看出,在卫星测高中主要的误差来源是卫星的径向轨道的不确定性。但可喜的是,目前 Topex/Poseidon 卫星轨道的精度已与其他误差具有同等的量级,它代表了 20 世纪 90 年代所产生的新一代的卫星测高技术的发展趋势(Fu et al., 1994)。此外,从表 1.1.2 中我们还可以看出,非卫星资料的解算和环境校正算法是至关重要的(Cheney et al., 1994),如卫星轨道的确定(Born et al., 1988)、地球重力场模型(Nerem et al., 1994)、大地水准面模型(Rapp et al., 1990, 1991)、固体潮、海潮以及极潮模型(Schwiderski, 1980; Wahr, 1981; Le Provost et al., 1998; Andersen et al., 1995; Shum et al., 1997)、干项和湿项对流层延迟校正(Stum,

1994)、电离层延迟校正 (Imel, 1994)、海况偏差校正 (Rodriguez and Martin, 1994; Fu and Glazman, 1991)、高度计的系统偏差校正 (Tapley and Rosborough, 1985; Menard et al., 1994; Christensen et al., 1994)、逆气压校正 (Cheney et al., 1991) 等等。采用不同的处理方法, 所得到的研究成果可以大不相同。因此, 只有进行适当的数据预处理, 才能使淹没在大量噪声中的信息被提取出来, 使卫星测高资料成为可供海洋大地测量学、地球物理学和海洋动力学研究所用的三维时空序列。

卫星测高的发展历史不过 20 几年的时间, 但其研究和应用几乎遍布了与海洋高度有关的一切领域, 特别是近 10 年来, 随着卫星测高资料的不断丰富, 最新成果不断出现, 研究和应用领域不断拓宽和深化, 图 1.1.1 描述了卫星高度计的应用。但归根到底, 卫星高度计的应用都是基于其三个基本观测量: ①时间延迟——高度计发射脉冲到接收海面回波信号的时间间隔——从中获取海面高度的信息, 并由此反演海洋重力场、海洋大地水准面、海洋潮波系统等; ②海面回波波形的前沿斜率——从中可以获取海面有效波高的信息; ③海面回波波形强度——从中获取海面风速的信息。

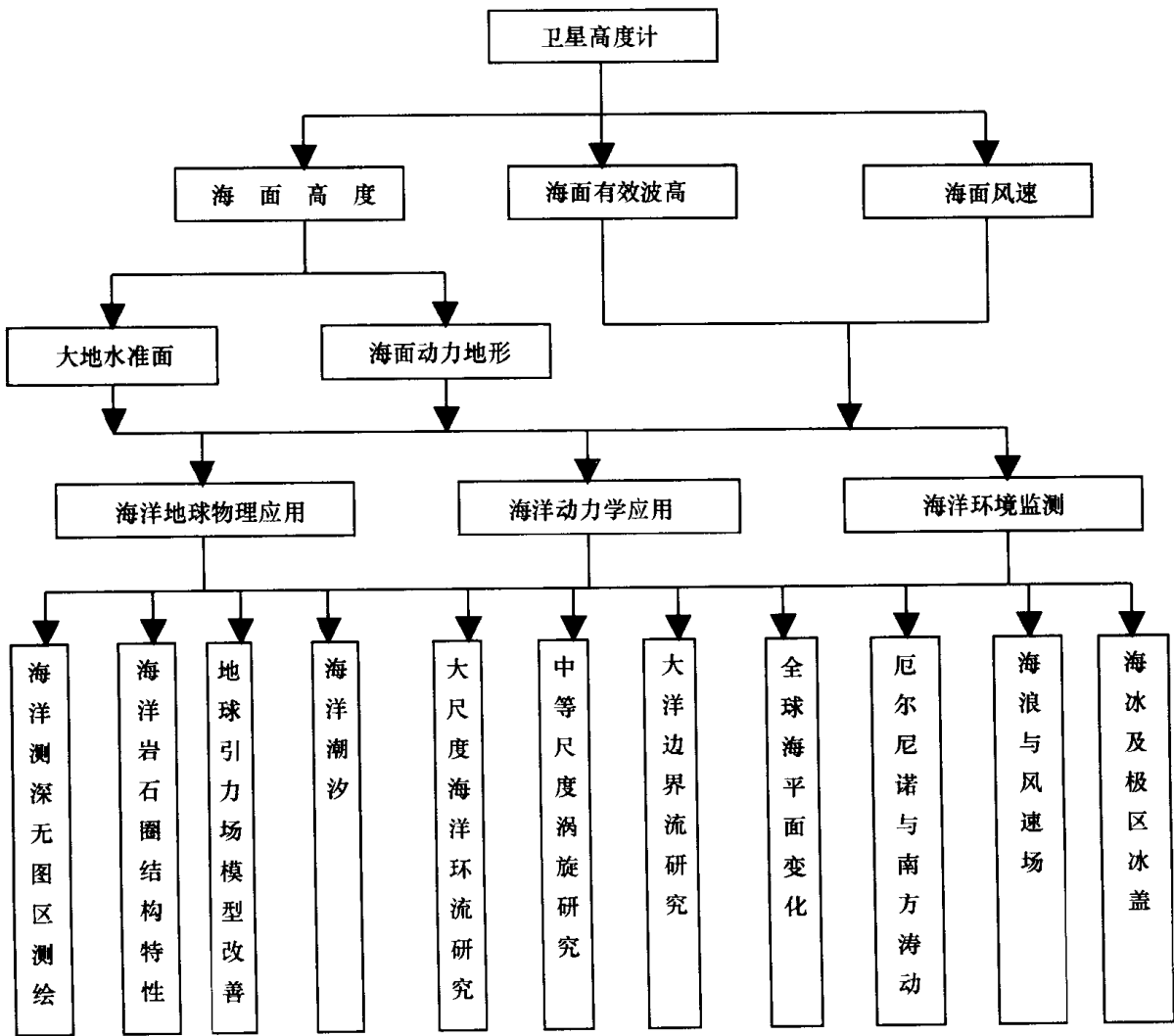


图 1.1.1 卫星测高研究与应用领域

第二节 海洋潮汐应用

潮汐一直是古今海洋学家所关注的研究课题。历史上潮汐测量仅靠在沿岸或岛屿的潮汐观测站和几百米深海底的压力仪。20 世纪 70 年代后期卫星高度计的产生使得深海潮汐测量成为可能。那时,最具代表性,也是精度最高的海洋潮汐模式 Schwidlerski (1980)用验潮资料和水动力方程同化推导出来。尽管该模式包含了分米级甚至更大的误差,但它在海洋学和地球物理学方面发挥了十分重要的作用。Cartwright 和 Ray(1991)利用 Geosat 资料对该模式进行了修正,得到了更加精确的全球潮汐模型。进入 20 世纪 90 年代,随着 ERS-1 卫星和 T/P 卫星的发射升空,潮汐模式获得长足的发展,精度越来越高。目前潮汐模式有十几种之多,这些新模式大多很类似,这是因为它们都是同一资料来源,但它们都有一定的差异。表 1.2.1 列举了十几种全球潮汐模型。

表 1.2.1 目前的全球海洋潮汐模型

模 式	时间	水动力假设	资 料		分潮数	覆盖范围	分辨率	方 法
			高度计	验潮				
Schwidlerski	1980	线性	无	有	11+5 ^a	全球	1×1	观测资料逆
Cartwright and Ray	1990	无	Geosat	无	60 ^b	±69	1×1.5	正压潮
Grenoble	1994	非线性	无	有	8+5 ^a	全球	0.5×0.5	有限元
Le Provost	1998	非线性	T/P	有	8+18	全球	0.5×0.5	有限元
Mazzega	1994	无	T/P	有	8	±66	0.5×0.5	逆
Egbert 等	1994	线性	T/P	无	8+9 ^a	-80,70	0.58×0.7	全球逆
Ray 等	1994	无	T/P	无	60 ^b	±65	1×1	正压潮 Proudman 函数
Sanchez and Pavlis	1994	无	T/P	无	8	-77,69	2×2	Proudman 函数
Schrama and Ray	1994	无	T/P	无	5	±65	1×1	调和和分析
Eanes, CSR	1994	无	T/P	无	60 ^b	±66	1×1	正压潮
Andersen	1995	无	T/P, ERS-1	无	60 ^b	±82	0.75×0.75	正压潮
Andersen	1995	非线性	T/P	有	8+5 ^a	全球	0.5×0.5	正压潮
Knudsen	1994	无	T/P	无	4	±65	1×1.5	球调和
Desai and Wahr	1994	无	T/P	无	60 ^b	±66	1×1	正压潮
Rapp, Ohio	1994	无	T/P	无	4	±65	1×1.5	球调和

a. 表示其他分潮利用导纳导出。

b. 表示对于正压潮情形包含在潮汐势中的分潮数。

下面将简单介绍这些模式。

1) Schwiderstki 动力插值逆模式

该模式是动力插值模式,同化了从潮汐表中得出的调和常数,其精度为分米级,是当时最具影响力的模式,它在海洋学和地球物理学的研究上应用 10 多年。

2) Cartwright 和 Ray 模式

Cartwright 和 Ray (1990)采用响应法对 Geosat 高度计第一年资料分析了大洋潮汐,得到了大洋潮汐的全日和半日潮的估计值。大地水准面通过第 34.1d 的共线差消去,网格为 $1^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 。

3) Grenoble 模式

Grenoble 模式由 Le Provost 等 (1994)提出,该模式为纯动力学模式。他们利用非线性动力学方程模拟了全球许多海区,包括北极和南极。模拟了 8 个主要分潮 $M_2, S_2, N_2, K_2, 2N_2, K_1, O_1$ 和 Q_1 , 另外 5 个分潮 $M_{u_2}, N_{u_2}, L_2, T_2$ 和 P_1 也由导纳法推得。Le Provost (1998)利用数据同化方法将该模式进行了改进。同化资料为早期 Egbert 等 (1994)模式解的 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 抽样。该模式应用到了大西洋、印度洋和太平洋,其空间网格为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 包含了 26 个分潮,其中 8 个主分潮 $K_1, O_1, Q_1, M_2, S_2, N_2, K_2, 2N_2$ 由该模式直接得到。除了 K_2 和 $2N_2$ 之外,其余都经过同化修正,另外 18 个分潮由导纳法推得。

4) Mazzega 模式

Mazzega (1994a)利用一年 T/P 资料及岸站验潮资料对亚洲半封闭海进行了潮汐分析,获得了 8 个主要分潮的同潮图。后来 Mazzega (1994b)利用一年 T/P 资料以及岸站和深海潮汐站资料分析获得全球除威德尔海和北冰洋之外各海区 8 个分潮的调和常数,其空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

5) Egbert 模式

Egbert (1994)模式利用 T/P 资料和二维线性潮汐模式建立了全球反模式。该模式为 Laplace 潮汐方程和包含测量资料的泛函的最优解,获得了全球 8 个主要分潮和 9 个次分潮的调和常数。当时仅用了 T/P 前 40 个周期的资料,其纬、经度分辨率为 $0.58^{\circ} \times 0.7^{\circ}$ 。该模式将 T/P 高度计资料同化到全球正压二维动力学模式中,对于大量的 T/P 卫星资料,该方法必须做相应调整。他们提出了一种表示器方法,该方法将大矩阵求逆化为尺度较小的矩阵计算,较大地节省了内存和计算时间。Egbert 和 Bennett (1996)和 Egbert (1997)在资料空间建立最小泛函的基础上,利用共轭梯度法获得了改进的迭代方法。改进的方法仍然使用他们在 1994 年建立的表示器(representer)方法,但对于大量资料系列必须要求更少的动力学方程解,进一步缩短了计算时间。Egbert (2000)又进一步改进了他们的方法。出发点相当简单,主要是大大提高数值模式的计算效率。Egbert (1994)的方法是先解浅水方程,然后对稳定状况解进行调和和分析。因为数值计算稳定性要求,时间步长应小于潮汐周期,因而计算时间相当长。目前,他们将动力学方程化成频域,计算逆问题仅仅是矩阵计算,计算相当快,但该方法有一问题,那就是系数矩阵非常大。

6) Ray 模式

Ray 模式是 NASA GSFC Ray 等提出的模式,该模式利用正压潮公式,既简化次分潮的计算并且能使混淆周期非常接近的分潮进行分离。Cartwright 和 Ray (1994)进行了改

进,增加了辐射势。该模式中权函数使用 Proudman 函数展开(最大有 200 个自由度),因此该模式产生了一个大的逆问题,Proudman 函数在 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格上计算。

7) Sanchez 和 Pavlis 模式

该模式也是 NASA GSFC 模式,有时称 GSFC 94A 模式,它以 Schwiderski 模式的改进为基础,利用 T/P 资料和一系列 Proudman 函数计算了 8 个主要分潮。其结果比 Schwiderski 模式有较大改进。由于网格较粗和 Proudman 函数方法本身的限制,它仅适合于深海($>250\text{m}$)。

8) Schrama 和 Ray 模式

该模式也是 NASA GSFC 模式,仅适合于水深大于 250m 深的深水模式。先估计 Schwiderski 模式的误差,并对 $3^\circ \times 3^\circ$ 网格资料进行调和分析。模式利用 2 年的 T/P 资料,获得 5 个主要分潮(M_2, S_2, N_2, K_1, O_1) $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率的调和常数。

9) CSR 模式

该模式是 Texas 大学 Eanes 等研制的,它对 Grenoble 模式(Le Provost et al., 1994)动力学方法在长波长进行调整。因此,该模式产品继承了 T/P 长波长精度和 Grenoble 模式的空间分辨率。与原有模型相比更加精确和完善,其 M_2 分潮在深海的精度达到 2cm。

10) Andersen 模式

Andersen(1995a)采用非线性水动力条件假设的正压潮模式,从 T/P 和 ERS-1 水位资料反演大洋潮波系统,空间网格为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 。主要分潮 M_2, S_2, N_2, K_1, O_1 大洋均方差分别为:2.51cm, 1.67cm, 1.58cm, 1.13cm。

Andersen(1995b)的另一个模式是 Grenoble 纯动力模式长波长的调整。其全球模式的空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,获得了 8 个主要分潮和 5 个次分潮的调和常数。

11) 其他模式

Knudsen(1994)利用球面调和分析方法获得了大洋 $1^\circ \times 1.5^\circ$ 4 个主要分潮的调和常数。Desai 和 Wahr(1995)利用 T/P 10~78 重复周期的海面高度资料对海洋潮汐进行了分析。为了分离分潮,他们利用正压潮方法。另外还有 Rapp 模式(1994), Matsumoto(1995)模式等。

以上 10 几种模式都是大洋模式,对于边缘海,这些模式必须进行调整才能获得较高精度。另外,按模式的水动力假设可分为如下三种:

无水动力假设。有如下一些模式: Cartwright 和 Ray(1990, 正压潮方法); Mazzega(1994, 反方法); Ray 等(1994, 正压潮方法, Proudman 函数展开法); Sanchez 和 Pavlis(1994, Proudman 函数展开法); Schrama 和 Ray(1994, 调和分析法); Eanes CSR(1994, 正压潮方法); Andersen(1994, 正压潮方法); Knudsen(1994, 球面调和分析法); Desai 和 Wahr(1994, 正压潮方法); Rapp, Ohio(1994, 球面调和分析法); Mazzega 和 Berge'(1994, 反方法, 半封闭边缘海模式); Woodworth 和 Thomas(1990, 正压潮方法, 边缘海模式)。