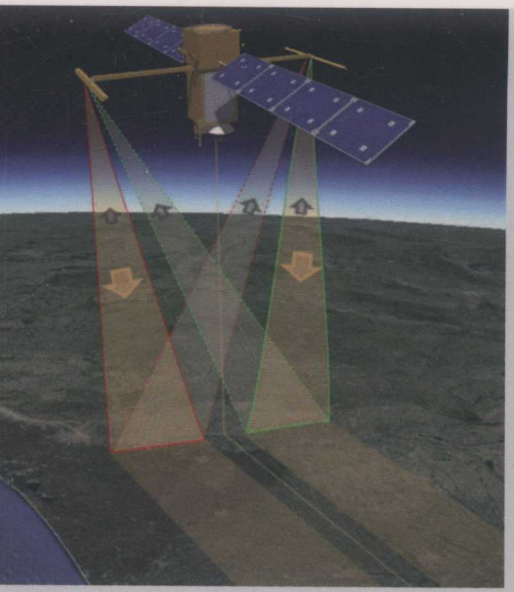
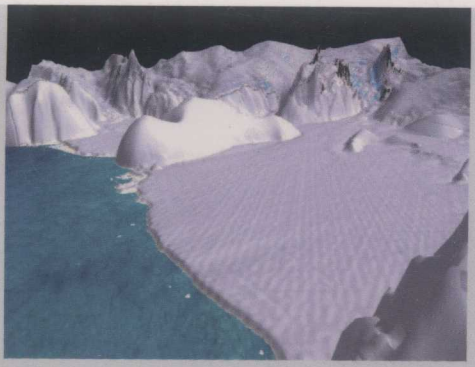
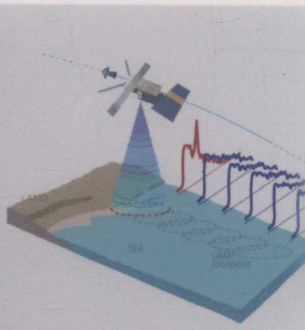
地球观测与导航技术丛书

星载雷达高度计数据处理及陆地应用

廖静娟 著











科学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

地球观测与导航技术丛书

星载雷达高度计数据处理及陆地应用

廖静娟 著

安徽理工大学 藏書 图書馆

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从分析星载雷达高度计发展概况及趋势入手，论述星载雷达高度计的应用领域及研究现状，介绍星载雷达高度计原理和测高数据处理方法，展示星载雷达高度计数据在湖泊水位监测、冰盖高程变化监测等方面的应用，探讨包括天宫二号三维成像雷达高度计和合成孔径干涉雷达高度计等新型星载雷达高度计数据的处理及应用，并展望星载雷达高度计在陆地领域的应用前景。

本书适合微波遥感、全球变化、水文、测绘等方面的专家、学者和高校师生阅读，也可作为遥感、测绘、地理信息系统等专业的科研院所研究人员、高等院校师生的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

星载雷达高度计数据处理及陆地应用 / 廖静娟著. —北京：科学出版社，2020.2

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-063979-0

Ⅰ. ①星… Ⅱ. ①廖… Ⅲ. ①卫星载雷达-卫星高度计-数据处理-研究 Ⅳ. ① P228.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 300144 号

责任编辑：朱 丽 李秋艳 吴春花 / 责任校对：樊雅琼

责任印制：吴兆东 / 封面设计：图阅社

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

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020 年 2 月第 一 版 开本：787 × 1092 1/16

2020 年 2 月第一次印刷 印张：10 1/4

字数：250 000

定价：98.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

“地球观测与导航技术丛书”编委会

顾问专家

徐冠华　龚惠兴　童庆禧　刘经南　王家耀
李小文　叶嘉安

主　编

李德仁

副主编

郭华东　龚健雅　周成虎　周建华

编　委（按姓氏汉语拼音排序）

鲍虎军　陈　戈　陈晓玲　程鹏飞　房建成
龚建华　顾行发　江碧涛　江　凯　景贵飞
景　宁　李传荣　李加洪　李　京　李　明
李增元　李志林　梁顺林　廖小罕　林　珲
林　鹏　刘耀林　卢乃锰　闾国年　孟　波
秦其明　单　杰　施　闯　史文中　吴一戎
徐祥德　许健民　尤　政　郁文贤　张继贤
张良培　周国清　周启鸣

“地球观测与导航技术丛书”编写说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段，而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑，地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项；国家有关部门高度重视这一领域的发展，国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展；工业和信息化部、科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范；国家高技术研究发展计划（863 计划）将早期的信息获取与处理技术（308、103）主题，首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前，“十一五”规划正在积极向前推进，“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年规划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下，把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书，集中发布，以整体面貌推出，当具有重要意义。它既能展示 973 计划和 863 计划主题的丰硕成果，又能促进领域内相关成果传播和交流，并指导未来学科的发展，同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展，科学出版社依托有关的知名专家支持，凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了“地球观测与导航技术丛书”。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验，主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 计划相关项目以及其他国家重大相关项目，或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结，或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信，通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作，将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世，成为我国地球空间信息科学中的一个亮点，以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展！

李德仁

2009年10月

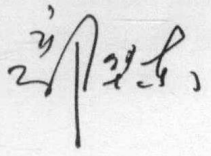
需要全本请访问 www.ertongbook.com

序

星载雷达测高技术具有全球快速覆盖能力，在海洋领域应用中取得了巨大的成功。随着对地观测技术的发展，该技术也被应用于陆地测量，在内陆水体和冰盖测量等方面正发挥着越来越重要的作用。近年来，随着合成孔径雷达和合成孔径干涉雷达技术应用于测高领域，其在海洋和陆地的应用达到新的高潮。我国在雷达测高技术的投入也在加大，除了2011年发射的海洋二号（HY-2A）卫星外，在天宫二号空间实验室上装载的三维成像微波高度计（InIRA）是世界上首次实现宽刈幅高度测量并能进行三维成像的微波高度计。这些雷达高度计的发射标志着我国雷达测高技术已达到很高水平，研究成果在不断涌现。

该书作者廖静娟于1993年获博士学位后就职中国科学院遥感应用研究所（现中国科学院遥感与数字地球研究所）开始雷达遥感研究工作，先后在雷达遥感领域发表了一系列论文和专著。近年来，她开始关注雷达测高技术在内陆湖泊水位测量的应用，在国家自然科学基金、国家重点研发计划等项目的支持下，实现了雷达测高技术应用于全球、全国和青藏高原湖泊水位变化的测量，取得了卓有成效的成果。该书是其研究团队将星载雷达测高技术应用于陆地领域的成果总结，相信对相关学者具有重要的参考价值。

展望未来雷达测高技术的发展趋势，在测高雷达系统方面将有更多的新技术得到发展并应用于海洋和陆地领域。随着多种测高卫星计划不断得以实施，星载测高海量数据不断增加，数据精度不断提高，利用卫星测高数据开展科学研究的同时，业务化应用也不断深入，因而使得卫星测高数据成为了全球变化研究和行业应用不可或缺的宝贵信息源。对星载雷达测高数据进行科学处理和信息加工，实现数据的增值应用，是科学家的任务和责任。在祝贺该书出版之际，也期待廖静娟和她的团队继续瞄准目标，潜心科研，不断取得更多高水平成果，为国家空间对地观测技术的发展助力，为国家的经济建设和可持续发展贡献力量。



中国科学院院士

2019年9月

前　言

卫星测高技术诞生于 20 世纪 60 年代末，由于其具有快速的全球覆盖能力，最初被用于海洋、大地测量和地球物理测量等领域。例如，对于海洋上的各种自然现象及其变化，卫星测高能够进行大范围、高精度、周期性地探测，具有其他观测技术无可比拟的优越性，大大提高了人类对海洋认识的广度和深度。90 年代，随着 ERS-1/2、TOPEX/Poseidon（T/P）、GFO 等卫星计划的顺利实施，卫星测高技术也逐渐应用到内陆，逐渐显示出其在湖泊水位监测和冰盖测量中的潜力。

卫星测高即利用卫星搭载的雷达/激光雷达高度计测量卫星至地球表面的高度，是空间技术与信息技术相互交叉的结晶。目前，已有的星载高度计主要有激光雷达高度计、脉冲有限高度计、合成孔径雷达（synthetic aperture radar，SAR）高度计、合成孔径雷达干涉（synthetic aperture radar interferometry，SARIn）高度计。除激光雷达高度计外，其他均是微波高度计。SAR 高度计和 SARIn 高度计是近年来出现的新型雷达高度计，SARIn 高度计将传统的一维、沿轨剖面测高过渡到二维宽刈幅干涉测高，使得空间分辨率和时间分辨率得到了巨大的提升。目前，在轨运行的有 Cryosat-2 和天宫二号三维成像微波高度计（interferometric imaging radar altimeter，InIRA），而计划于 2021 年发射的 SWOT（surface water and ocean topography）卫星，也将采用合成孔径干涉雷达技术，且已被美国国家研究委员会推荐为“未来 10 年 NASA 承担的地球科学和应用的国家重点计划”，将为星载雷达高度计的应用带来更多契机。

在星载雷达高度计的陆地应用中，湖泊水位监测和冰盖测量是其中最主要的应用。对于湖泊水位监测，传统的水文站观测方式虽然能够获取连续、高精度的水位数据，但由于水文站点分布的有限性和湖泊区域的复杂性，特别是在自然条件恶劣和复杂的区域，水文站点测量基本难以进行。同时，近年来全球水文站数量在不断减少，加之很多国家的湖泊水文观测数据并不公开，这些因素都给监测全球及区域湖泊的水位变化造成了阻碍。因此，通过水文站测量方式难以实现对全球及区域湖泊水位的持续、有效观测。作为替代方法的卫星测高技术，经过数十年的发展，已经在湖泊水位变化监测等领域取得重要应用。近年来，卫星测高技术进一步发展，星载雷达高度计数据反演湖泊水位的精度日益提升。在冰盖测量应用上，卫星测高技术能克服环境恶劣、地处偏远、地形复杂和缺少足够的地面控制点等局限，为冰盖高程的监测提供有效手段。针对这两方面的应用，作者所在的研究团队在相关项目的支持下，利用多源星载雷达高度计数据开展了湖泊水位监测和冰盖高程测量的研究。本书是作者近年来在该领域最新研究成果的阶段性总结。

第 1 章主要论述星载雷达高度计发展概况、应用领域及发展趋势；第 2 章和第 3 章介绍星载雷达高度计原理和测高数据处理方法；第 4 章和第 5 章探讨星载雷达高度计数据在湖泊水位监测、冰盖高程变化监测等方面的应用；第 6 章介绍新型星载雷达高度计

数据的处理及应用，包括天宫二号 InIRA 数据和 Cryosat-2 SARIn 数据。

本书相关研究工作得到了国家自然科学基金（41871256、41590855）、国家重点研发计划（2016YFB0501501）、中国科学院对地观测与数字地球科学中心主任创新基金（Y2ZZ17101B）等项目的支持。参加研究与撰写工作的人员还有薛辉、高乐博士，赵云、陈嘉明、黄卫东、闫强等硕士。研究中，多种星载雷达高度计数据由欧洲空间局提供，天宫二号 InIRA 数据由中国科学院国家空间科学中心和载人航天空间应用数据推广服务平台提供，地面测量水位数据由青海省水文和水资源勘测局、水利部黄河水利委员会和中国科学院青藏高原研究所提供。在此一并表示衷心的感谢。

卫星测高技术的发展方兴未艾，一些原理和技术还在不断探索，在湖泊水位监测、冰盖测量等陆地应用中显示出了巨大潜力。本书仅反映了作者的部分研究成果和思想，限于作者水平，疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作　者

2019 年 7 月

目　录

“地球观测与导航技术丛书”编写说明
序
前言
第 1 章　绪论 …… 1
1.1　星载雷达高度计发展概况 …… 1
1.2　卫星雷达测高技术的应用 …… 11
1.3　卫星雷达测高技术的发展趋势 …… 13
1.4　卫星雷达测高技术存在的难点 …… 14
1.5　本章小结 …… 15
参考文献 …… 15
第 2 章　星载雷达高度计原理 …… 18
2.1　星载雷达高度计后向散射强度 …… 18
2.2　星载雷达高度计测高原理 …… 21
2.3　卫星测高的误差来源 …… 25
2.4　本章小结 …… 33
参考文献 …… 33
第 3 章　星载雷达高度计数据处理 …… 35
3.1　回波模型 …… 35
3.2　回波波形分析 …… 42
3.3　波形重跟踪方法 …… 43
3.4　数据概况 …… 48
3.5　距离估计 …… 50
3.6　本章小结 …… 50
参考文献 …… 51
第 4 章　星载雷达高度计内陆湖泊水位监测 …… 52
4.1　星载雷达高度计监测青藏高原湖泊水位变化 …… 52
4.2　星载雷达高度计监测全国主要湖泊水位变化 …… 63
4.3　星载雷达高度计监测全球主要湖泊水位变化 …… 86
4.4　本章小结 …… 92
参考文献 …… 92
第 5 章　星载雷达高度计冰盖高程变化监测 …… 95
5.1　概述 …… 95
5.2　冰盖高程测量 …… 96

5.3 冰盖边缘测量 …… 105
5.4 冰盖高程变化与物质平衡 …… 107
5.5 本章小结 …… 111
参考文献 …… 111
第 6 章 新型星载雷达高度计数据处理及应用 …… 114
6.1 概述 …… 114
6.2 天宫二号 InIRA 数据应用 …… 115
6.3 Cryosat-2SARIn 数据处理与应用 …… 125
6.4 新型星载雷达高度计计划及展望 …… 147
6.5 本章小结 …… 150
参考文献 …… 151

第1章 绪 论

卫星雷达测高技术产生于20世纪60年代末，是随着空间技术的不断进步而发展起来的新兴边缘科学（王广运等，1995）。由于卫星雷达测高技术具有快速的全球覆盖能力，能够从宇宙空间大范围、高精度、周期性地探测海洋和陆地的各种现象及其变化，在研究全球地球重力场模型、精化大地水准面，以及大洋环流、海平面变化、岩石圈断裂带、大尺度海底地形、陆地湖泊、河流、冰川等方面，具有其他手段无法比拟的技术优势（蔡玉林等，2006）。经过40多年的发展和深入研究，卫星雷达测高技术已日趋成熟，应用范围不断扩大，社会效益越来越显著。

1.1 星载雷达高度计发展概况

1.1.1 星载雷达高度计发展历程

1969年，美国大地测量学家W.M.Kaula在固体地球与海洋物理大会上首次提出卫星测高（何宜军，2002）。1973年5月，美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）发射了Skylab太空站，其上搭载的S-193型测高计是世界上首台星载雷达高度计（Mcgoogan et al.，1974）。尽管该高度计存在较大测高误差，但是为后续测高卫星的发展奠定了基础（郭金运等，2013）。自此以后，各类测高卫星相继发射（表1.1），开启了卫星测高的新时代。

表1.1 星载雷达高度计发展现状（截至2018年）

卫星平台	雷达高度计	运行时间	模式	采用波段	重访周期*	轨道间距**
Skylab	S-193	1973年	脉冲有限	Ku	—	—
GEOS-3	ALT	1975～1979年	脉冲有限	Ku	23天	—
Seasat	ALT	1978年	脉冲有限	Ku	17天	—
Geosat	Radar Alt	1985～1990年	脉冲有限	Ku	17天	8km
ESR-1	RA-1	1991～1995年	脉冲有限	Ku	35天	80km
TOPEX/Poseidon	ALT/Poseidon-1	1992～2006年	脉冲有限	Ku和C	10天	315km
ERS-2	RA-1	1995～2003年	脉冲有限	Ku	35天	80km
GFO	Radar Alt	1998～2008年	脉冲有限	Ku	17天	165km
Jason-1	Poseidon-2	2001～2013年	脉冲有限	Ku和C	10天	315km
ENVISAT	RA-2	2002～2012年	脉冲有限	Ku和S	35天	80km
ICESat-1	GLAS	2003～2010年	激光雷达	1064nm和532nm	183天	15km
Jason-2	Poseidon-3	2008年至今	脉冲有限	Ku和C	10天	315km

需要全本请访问 www.ertongbook.com

续表

卫星平台	雷达高度计	运行时间	模式	采用波段	重访周期*	轨道间距**
Cryosat-2	SIRAL	2010 年至今	脉冲有限	Ku	369 天	7.5km
			SAR		子周期 30 天	
			SARIn			
HY-2A	HY-2A	2011 年至今	脉冲有限	Ku 和 C	14 天	208km
SARAL	AltiKa	2013 年至今	脉冲有限	Ka	35 天	80km
Jason-3	Poseidon-3B	2016 年至今	脉冲有限	Ku 和 C	10 天	315km
Sentinel-3A	SRAL	2016 年至今	SAR	Ku 和 C	27 天	104km
Tiangong-2	InIRA	2016～2018 年	SARIn	Ku	—	—
ICESat-2	ATLAS	2018 年至今	激光雷达	532nm	91 天	—
Sentinel-3B	SRAL	2018 年至今	SAR	Ku 和 C	27 天	104km

*卫星运行期间的主要重访周期；**卫星在赤道上的地面轨迹间距

1975 年，美国国家航空航天局发射了高度计卫星 GEOS-3，采用了脉冲压缩技术，测高精度提高到 0.25～0.5m（Stanley，1979），为后续高度计的发展奠定了坚实的基础，但它仍然没有达到能够提取有用科学数据的实用阶段。

1978 年，美国国家航空航天局发射了第一颗海洋实验卫星 Seasat，其上装载的高度计采用了全去斜坡（full-deramp）技术，提高了高度计的分辨率，测高精度达到 10cm 左右（Lame and Born，1982；Bernstein et al.，1982），在此之后的高度计都采用了全去斜坡技术。Seasat 卫星较高的测距精度，使得利用卫星监测洋流的变化成为可能。由于电池故障，该卫星仅工作了 3 个月。尽管其运行寿命较短，仍首次为人们提供了较高质量的所有海区的海洋大地水准面数据，并证实了高度计在研究海洋动力学和地球物理学方面的巨大潜力，对雷达高度计的发展具有决定性意义。

1985 年，美国海军发射了 Geosat 卫星，该卫星为军民两用，以军用为主，其目的在于获取高密度的全球测高数据，用于改进现有地球重力场及海洋大地水准面。卫星携带的雷达高度计工作频率为 13.5GHz，测高精度为 10～20cm（Douglas and Cheney，1990）。卫星计划包括两个任务：大地测量任务（geodetic mission，GM）和精确重复任务（exact repeat mission，ERM）。大地测量任务从 1985 年 3 月开始，使用近似重复周期观测了 18 个月，主要目的是提供高分辨率的海洋大地水准面、垂直偏差及飞行中制图补偿；确定需船舶进行详查的特定区域；发现可能的水下航行水深突变灾害区。大地测量任务结束后，卫星姿态调整到精确重复任务。该任务使用重复周期为 17.05 天的精确重复轨道，重复轨道的地面轨迹与 Seasat 的地面轨迹相同，其数据被广泛应用于地球重力场、海山海沟探测、海面地形测量等研究。Geosat 计划的不足之处在于定轨使用的多普勒系统提供的轨道精度较低，由于太阳活动加强，电离层对定轨的影响加剧，卫星轨道径向测量精度下降，精度不足 30cm，同时，卫星上没有配备微波辐射计，无法测量大气中的水蒸气含量，限制了大气校正的精度，从而限制了 Geosat 卫星在许多领域（如全球海平面变化、洋流监测和厄尔尼诺监测等）的应用。因此，美国海军于 1998 年发射了 Geosat 的

后继卫星 GFO，测高误差为±3.5cm（何宜军等，2002）。

1991 年，欧洲空间局（European Space Agency，ESA）发射了欧洲第一颗遥感卫星 ERS-1，其携带的雷达高度计测高精度约 3cm，用途与 Geosat 大致相同，卫星轨道重复周期为 35 天，它和 1995 年发射的 ERS-2 上均载有 Ku 波段（13.5GHz）的雷达高度计，主要用于全球范围的重复性环境监测，包括全球海浪动态情况、海面风场及其变化、大洋环流、海洋及陆地表面的测高监测。ERS-1/2 高度计虽然具有对各种表面兼容的测高功能，但跟踪容易失锁。2002 年，欧洲空间局发射了 ENVISAT，ENVISAT 雷达高度计在跟踪方式上采用了模型无关的算法，大大增强了对海洋、海冰、陆地等各种类型表面的跟踪能力。ENVISAT 雷达高度计的测高范围为南北纬 81.45°，重复周期为 35 天，轨道间距为 80km，载有频率为 3.2GHz 和 13.575GHz 的双频测高仪，测高精度为±2cm。

1992 年，美国国家航空航天局和法国空间研究中心（Centre National d'Etudes Spatiales，CNES）合作发射了 TOPEX/Poseidon 卫星（简称 T/P 卫星），其高度计的测高精度达 2.4cm，完全满足卫星业务应用的需要，之后，海洋地形卫星应用研究在世界范围内广泛开展，提高了人类对全球海洋现象的认识。其后继卫星 Jason-1 于 2001 年发射，轨道参数与 T/P 卫星基本相同，测高精度为±1.5cm。Jason-1 卫星继承了 T/P 卫星的设备和数据处理系统，与 T/P 卫星具有同样的精度，但重量比 T/P 轻。2003 年，美国又发射了 ICESat 卫星，其上携带激光雷达高度计，观测范围为南北纬 86°，重复周期为 183 天，地面轨迹为 15km，在冰面的测高精度为±10cm。

2010 年，欧洲空间局在 2005 年 Cryosat-1 卫星发射失败的基础上成功发射了 Cryosat-2 卫星，该卫星密切跟踪极地冰层和海洋浮冰的厚度及其他参数变化，通过测量浮冰顶部与海面之间的距离，计算得到浮冰的总体积，从而确定冰川融化现象与全球气候变暖之间的关系。Cryosat-2 卫星携带的全天候微波雷达测高仪的垂直测量精度达 1～3cm，可随时掌握两极冰盖厚度的变化情况。

Cryosat-2 卫星的雷达高度计在现有高度计的基础上进行了若干改正来提高测量的精度。它运行有 SAR 和 SARIn 模式，相较于 ERS-1 雷达高度计，Cryosat-2 卫星利用合成孔径技术将沿轨道方向的分辨率提高到 250m（ERS-1 的分辨率约 5km），使得更精确的高度测量变为可能。

2011 年，我国第一颗海洋动力环境卫星（HY-2）发射，其中包括一部双频雷达高度计，重复周期为 14 天，星下点海面测高精度优于 8cm（蒋兴伟等，2013）。2013 年，法国和印度联合研制的 SARAL/AltiKa 卫星成功发射，Ka 波段（35.75GHz）的独特设计，使其具有更小的足迹点和更高的测高精度。2016 年，欧洲空间局第三颗环境监测卫星 Sentinel-3 发射成功，其上携带合成孔径雷达高度计（synthetic aperture radar altimeter，SRAL），同年 9 月，我国天宫二号空间实验室发射升空，其上装载的 InIRA 是世界上首次实现宽刈幅海面高度测量并能进行三维成像的微波高度计，这些星载高度计在海洋动力环境探测、全球气候变化应对等方面发挥了重要作用。

综上所述，卫星测高技术处于不断的发展中，其实用性得到了系统发展，技术水平和测量精度也在不断提高。近几年以及将来的几十年，世界各国还将继续发射载有雷达高度计的卫星平台。根据卫星测高技术的原理，测高的精度主要取决于高度计精度、径向定轨精度和对测高值进行地球物理改正（如大气延迟、电离层改正等）的情况，其中

最大程度上取决于定轨精度的提高。在卫星测高技术发展的早期阶段，卫星精密定轨水平较低，轨道精度一般为几十厘米，难以探测到变化幅度不超过几厘米的海洋现象的变化。直至 20 世纪 90 年代，以 T/P 卫星的发射为标志，随着卫星精密定轨技术的发展，定轨精度达到厘米量级，卫星测高技术进入一个新的发展时期，使得卫星测高技术在应用上进入定量阶段（董晓军和黄珹，1997）。

近几十年来，随着观测手段的更新，数据采集由点到面，研究地域类型和范围更加广泛。但在实际应用中，不同周期的卫星数据间存在卫星轨道不严格重复、星下点在全球分布不均匀等问题，要想得到高精度的监测结果，还需对数据做相应的处理。例如，针对卫星轨道不严格重复问题，通常采用“共线法平差”（李建成等，2000）原理来消除误差，测高卫星提供了每个正常点不同周期海面高的观测值，进而可研究每一正常点处观测时间内的海面变化；针对每一重复周期内监测点不均匀分布的问题，则采用“加权平均”的方法来解决，人们不仅关心某一点上的海面变化，还关心某个区域甚至全球的海面变化，通过“加权平均”处理后的测高数据正好满足这方面的需要（于宜法，2004）。因此，随着数据处理方法的不断完善，卫星测高数据的应用逐步从一个个点的变化，逐步扩展到整个面上的变化监测和研究。

1.1.2 已有的星载雷达高度计

1. 早期实验测高卫星

1）Skylab

美国太空实验室 Skylab 可以说是最早搭载有高度计的卫星，也是美国空间站的最早实验卫星，该卫星发射于 1973 年 5 月 14 日，属于低轨卫星，卫星高度只有 435km，轨道倾角为 50°。该卫星携带了一个非常普通的微波观测系统 S-193，S-193 为第一个星载高度计，其目的主要是对太阳和地球进行工业试验以及研究海洋状态对脉冲特征的影响，系统使用的脉冲宽度为 0.1ms，可以获取约 15m 的分辨率。虽然高度计只能在低轨道段运行，但通过 Skylab 证实了高度计可以观测到海洋大地水准面的粗略特征，如观测到主要的海沟，同时 Skylab 证明了测高概念具有强大的生命力和发展潜力，为后续高度计的发展提供了许多宝贵的技术依据，奠定了卫星测高学的技术基础。

2）GEOS-3

1975 年 4 月 9 日，美国国家航空航天局发射了第一颗专门用于测高的海洋地形卫星，即地球动力学实验海洋卫星 GEOS-3，其轨道径向精度可达 2m，轨道高度为 840km，卫星倾角为 115°。GEOS-3 卫星的任务是进一步了解地球引力场、地球大地水准面的大小和形状、深海潮汐、海洋状态、地壳结构、固体地球动力学和遥感技术。GEOS-3 项目是 GEOS 计划与新兴的美国国家航空航天局地球和海洋物理应用计划之间的跳板。GEOS-3 卫星任务提供的数据进一步促进了各领域的科学认知，该任务的海洋高度数据集首次全面覆盖了世界海洋的大部分区域，不仅可更好地了解海洋大地水准面、海洋高度，还提供了关于大地水准面的准静态偏离信息，如电流、涡流、风暴潮等事件。GEOS-3 卫星返回的波形数据还可用于推导海面风速，可保持对地形和冰的追踪，且其高度计数据还可应用于许多重力模型，如 GEM-T3、JGM-1 和 JGM-2 等。同时，自 GEOS-3

卫星之后，所有高度计都使用了脉冲压缩技术，该技术的应用使得分辨率的提高成为可能。与 Skylab 高度计相比，GEOS-3 卫星的精度和分辨率均有很大提高，各方面都有了许多重大的改进，如仪器性能有了进一步的改善，全球覆盖范围也有较大提高，但是受到精度的限制，这些性能的改善仍然不足以保证能从观测值中提取出用于科学研究的信息。

3）Seasat

1978 年 6 月 28 日，美国国家航空航天局发射了海洋卫星 Seasat，卫星轨道高度为 800km，运行周期为 100min，轨道倾角为 108°。在 Seasat 卫星上，搭载了许多新的仪器设备，主要有合成孔径雷达，用来提供高质量详细的海洋和陆地雷达图像；雷达散射计，用来测量近地面风速及其方向；多频段微波辐射计，用来测量地面温度、风速及海冰覆盖；雷达高度计，用来测量海面和浪高。为了对 Seasat 卫星的雷达高度计进行改进，仅直接更新早期 GEOS-3 卫星的设计并不能满足需要。GEOS-3 卫星中使用的脉冲压缩滤波技术过于简单，只能直接完成必要的波形处理，不能满足 Seasat 卫星的要求，因此采用了全去斜坡技术，使接收机不需要进行压缩滤波处理。从 Seasat 卫星开始，所有高度计都使用了该技术，大大提高了分辨率。在 Seasat 卫星设计中，增加了回波采样的数量，采样间隔为 3.125ns，在海洋波高达 20m 时，采样点分别在海洋回波的展开范围内进行测量。在这种情况下，波形采样通过带宽为 312.5kHz 的一个滤波库完成。与早期的高度计设计相比，波形采样测量构成了高度跟踪处理的主要部分。不幸的是，由于功率子系统失败，Seasat 卫星在运行 99 天后于 1978 年 10 月就失效了。虽然 Seasat 卫星仅运行约 3 个月的时间，但 Seasat 卫星首次提供了全球范围的海洋环流、波浪和风速。

2. 军用测高卫星

1）Geosat

1985 年 3 月 12 日，美国海军发射了大地测量卫星 Geosat，卫星轨道高度约 800km，轨道倾角为 108°，主要目的是为美国海军测量海洋大地水准面，并为其提供海况和风速观测数据，进而增加人类对海洋大地水准面的认识。Geosat 卫星首先执行的是大地测量任务，任务前后持续 18 个月，此项任务的数据一直保密了许多年。大地测量任务完成之后，1986 年 11 月 8 日开始，Geosat 卫星转而执行精确重复任务，精确重复任务轨道重复周期为 17 天，地面轨迹与原来的 Seasat 卫星相同，此阶段的数据可以免费使用，进而为科学界提供了长期高质量的高度计观测数据。Geosat 卫星前后工作了近五年，首次提供了具有重复性、高分辨率、长期高质量的全球海面高度数据集，标志着卫星测高技术进入成熟阶段。1997 年，美国国家海洋和大气管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration，NOAA）发布的 Geosat JGM-3-GDR 测高数据，其交叉点的中误差只有 13cm，采用 1993 年多普勒跟踪数据，并利用当时最新的 JGM-3 地球重力场模型改进了卫星轨道，使得径向轨道误差提高到 10cm 的水平。由于全部大地测量任务和精确重复任务数据的轨道计算基于精度较高的 JGM-3 地球重力场模型，并且提高了高度计各项地球物理方面的改正精度，测高数据质量较以前的版本有了很大的提高。

2）GFO

GFO 卫星属于 Geosat 的后续卫星，于 1998 年 2 月 10 日发射成功，按原来 Geosat

卫星精确重复轨道继续运行，轨道高度为 880km，轨道倾角为 108°，运行周期为 100min，轨道偏心率为 0.001，卫星质量为 300kg。GFO 卫星的主要星载仪器为雷达测高计，主要任务是为美国海军提供近实时的海洋地形数据。通过 GFO 卫星对中尺度和盆地尺度的海洋现象进行精确观测，海洋学家可以精确测量海面地形。GFO 卫星集成星载全球定位系统（global position system，GPS）和卫星激光测距（satellite laser ranging，SLR）技术，实现了卫星的精密定轨，可对星载雷达测高计进行校准。由于 GFO 卫星为军用目的的卫星，开始时数据一般不向用户开放，只有向美国国家海洋和大气管理局申请的科学与商业用户才有权使用该产品。与其他测高卫星不同的是，GFO 卫星的主要仪器为雷达高度计，属于专门的测高卫星。

3. 海洋综合环境监测卫星

1）ERS-1/2

ERS-1 卫星的主要任务是进行地球观测，利用雷达高度计准确进行地球的海洋测深和大地水准面测量。ERS-1 卫星于 1991 年 7 月 17 日发射成功，卫星轨道高度约 785km，轨道倾角为 98.52°。1996 年 6 月，为了履行多学科任务进行了重复周期改变，最后 ERS-1 卫星任务结束于 2000 年 3 月。ERS-1 卫星任务执行期间，前后使用了 3 个不同的轨道，第一个为 3 天重复周期轨道，主要用于校正和海冰观测；第二个为 35 天重复周期轨道，主要用于多学科任务之间的海洋观测；第三个为 168 天重复周期轨道，主要用于大地测量。ERS-1 卫星搭载的星载仪器主要有合成孔径雷达、沿轨扫描辐射计、雷达高度计、风散射仪和微波辐射计等。

ERS-2 卫星为 ERS-1 的后续卫星，于 1995 年 4 月发射成功，其轨道高度、轨道倾角、技术参数与 ERS-1 卫星一致，该卫星的主要任务是进行地球观测，特别是进行大气和海洋观测。1995 年 8 月到 1996 年 6 月，ERS-2 卫星与 ERS-1 卫星构成了一前一后的并具有相同轨道周期（35 天）的卫星观测系统。此外，在偏航操纵模式（yaw steering mode，YSM）下，ERS-2 卫星为三轴稳定并指向地球的卫星。2003 年 6 月 22 日开始，ERS-2 卫星上用于记录高度计数据的磁带机因故障影响了数据的记录存储，只有当卫星飞越欧洲、北大西洋、北极和北美西部地区时，地面站才可以获取数据，在其他地区则无法获取测高数据。ERS-2 卫星搭载的星载仪器主要有合成孔径雷达、沿轨扫描辐射计、雷达高度计、风散射仪、微波辐射计和全球臭氧检测实验仪器。

2）ENVISAT

ENVISAT 卫星为 ERS-1/2 的后续卫星，由欧洲空间局研制，于 2002 年 3 月 1 日发射成功，主要用于环境研究，特别是气候变化研究。ENVISAT 卫星轨道与 ERS-2 相似，轨道为距地面 764～825km 的太阳同步轨道，轨道倾角为 98.55°，重复周期为 35 天，实际地面轨迹与标称偏差保持在 1km 以下。由于 ENVISAT 卫星是一颗新的全球气候研究计划[如全球海洋观测系统（global ocean observation system，GOOS）和全球海洋数据同化实验（global ocean data assimilation experiment，GODAE）]综合卫星，可提供近实时的观测数据，开创了海洋学研究的新纪元。ENVISAT 卫星共携带 10 种不同的传感器，包括第二代雷达高度计（radar altimeter-2，RA-2）、微波辐射计（microwave radiometer，MWR）、被动大气探测迈克尔逊干涉仪（Michelson interferometer for passive atmospheric

soundings，MIPAS）、全球臭氧检测装置、大气层制图扫描成像吸收频谱仪、中分辨率成像光谱仪、先进的沿轨扫描辐射计、先进的合成孔径雷达、多普勒卫星测轨和无线电定位组合（Doppler orbitography and radio-positioning integrated by satellite，DORIS）系统、激光后向反射阵列（laser retro reflector array，LRA）系统。

ENVISAT 卫星的主要目标是提高欧洲从空中对地球观测的遥感能力，逐步提高欧洲空间局成员国研究和监测地球及其环境的能力，并作为 ERS 系列卫星的后续卫星，继续提供连续观测，包括基于雷达的观测；进一步加强 ERS-1 的观测任务，特别是加强对海洋和冰的观测，并应用于环境监视，加强对地球表面和大气层的连续观测，提供制图、资源勘查、气象及灾害监测等应用。

3）HY-2

HY-2 卫星是中国第一颗海洋动力环境系列卫星，主要任务是监测和调查海洋环境，提供海洋防灾减灾的监测数据。2011 年 8 月 16 日，载有 HY-2A 卫星的“长征四号乙”运载火箭从太原卫星发射中心点火升空，成功将 HY-2A 卫星送入太空。2018 年 10 月 25 日，HY-2B 卫星在太原成功发射。HY-2B 卫星是海洋动力环境探测卫星，将与后续的 HY-2C 和 HY-2D 卫星组网形成全天候、全天时、高频次全球大中尺度海洋动力环境卫星监测体系。

HY-2 卫星具有高精度测轨定轨能力与全天候、全天时、全球探测能力，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、国防建设等提供支撑服务。搭载的主要仪器有一个双频（Ku 和 C 波段）雷达高度计、一个散射仪、一个微波辐射计，DORIS 系统和 LRA 系统用于精密定轨。卫星轨道为太阳同步轨道，轨道高度为 973km，重复周期为 104.46min，轨道倾角为 99.34°。

4. 海洋地形探测卫星

1）TOPEX/Poseidon

TOPEX/Poseidon（T/P）卫星于 1992 年 8 月 10 日发射成功，轨道高度为 1336km，轨道倾角为 66°，重复周期为 10 天，运行周期为 112min，卫星质量为 2400kg，T/P 卫星由美国国家航空航天局和法国空间研究中心联合研制，其主要任务是为观测和认识海洋环流、热带海洋及全球大气计划提供数据。T/P 卫星携带了两个雷达高度计：一个是 TOPEX，即美国国家航空航天局建造的指向雷达高度计，用于测量海面以上的高度；另一个是 Poseidon，即法国空间研究中心建造的固态指向雷达高度计。除高度计之外，T/P 卫星还搭载了新的精密轨道确定系统（GPS、DORIS），TOPEX 微波辐射计（TOPEX microwave radiometer，TMR）用于校正大气湿路径延迟。相比早期的测高系统而言，T/P 卫星已经进行了许多改进，包括特别设计的卫星、一整套传感器、卫星跟踪系统、轨道配置，以及精密轨道确定使用的优化重力场模型（轨道径向精度可达 3～4cm）和专门的任务运转地面系统。因此，T/P 卫星对于海洋环流特别是涡流的研究特别有用，奠定了从空中对海洋进行长期监测的基础，并以前所未有的精度（每 10 天一个重复周期）提供全球动力海洋地形或者海面高度。2002 年 9 月 15 日，T/P 卫星调整到新的轨道高度，新

需要全本请访问 www.ertongbook.com