

任小宁, 贾玲, 沙金霞, 等. 卫星测高技术的发展及其在内陆水体的应用研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(11): 64-72.

REN Xiaoning, JIA Ling, SHA Jinxia, et al. Study on development of satellite altimetry technique and its application to inland water [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(11): 64-72.

卫星测高技术的发展及其在内陆水体的应用研究

任小宁¹, 贾玲², 沙金霞¹, 段浩²

(1. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056107; 2. 中国水利水电科学研究院
水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 随着测高卫星监测技术水平和数据精度的提升, 将其应用于内陆水体的潜力逐渐凸显。文章首先简要回顾了卫星测高技术的发展历程, 并重点汇总了 20 世纪 90 年代稳定发展期以来测高卫星的发射任务和运行状态。然后针对卫星测高技术在内陆水体的应用, 从水位监测、流量估算、存量测算、气候变化和数据共享等 5 方面, 结合应用实例进行了分析评价。进而提出了卫星测高技术在发展应用中存在的时空分辨率矛盾、数据质量参差不齐、数据验证依据不足等问题及其解决方法。最后, 展望了卫星测高技术在内陆水体的应用前景。随着卫星测高技术的发展, 测高卫星重访周期的加密、时空分辨率和数据精度的不断提升, 将为水资源评价、水资源调度、水资源管理等提供重要支撑。

关键词: 卫星测高技术; 内陆水体; 水资源管理

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.11.007

中图分类号: TP79

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

文章编号: 1000-0860(2021)11-0064-09



Study on development of satellite altimetry technique and its application to inland water

REN Xiaoning¹, JIA Ling², SHA Jinxia¹, DUAN Hao²

(1. College of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056107, Hebei, China;

2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower
Research, Beijing 100038, China)

Abstract: With the improvement of the technical level and data accuracy of altimetry satellite monitoring, the potential of its application to inland water gradually becomes prominent. The developing course of the technique of satellite altimetry is briefly reviewed herein at first, which focuses on the summarization of the launch missions and operation statuses of the altimetry satellites since the stable development period in 1990s. And then, the analysis and evaluation on the application of the technique of satellite altimetry to inland water in the five aspects, i. e. water level monitoring, flow rate estimation, storage calculation, climate change and data sharing, are made in combination with the relevant application case. Subsequently, the problems of contradictory spatial-temporal resolutions, uneven data qualities, insufficient data verification bases, etc., during the application of the technique of satellite altimetry and their solving methods are put forward. Finally, the application of the technique of satellite altimetry to inland water is prospected. Along with the development of the technique of satellite altimetry, the densification of the altimetry

收稿日期: 2021-05-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407705); 国家自然科学基金项目(71774172, 51625904)

作者简介: 任小宁(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事遥感应用方面研究。E-mail: renxiaoning0205@163.com

通信作者: 贾玲(1984—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事水资源核算、水资源规划与管理等方面研究。E-mail: jialing@iwhr.com

satellite revisit cycles and the continuous improvements of both the spatio-temporal resolution and the data accuracy, an important support is to be provided by the technique for water resources evaluation, water resource dispatching and water resource management.

Keywords: satellite altimetry; inland water; water resources management

0 引言

卫星测高技术起源于20世纪60年代初,研发的最初目的比较单一,即采用遥感的方法对海洋的相关信息观测。随着技术的发展,测高数据精度显著提升,卫星测高技术的研究领域也由海洋逐渐扩展到内陆水体,在大地测量学和地球物理学领域也得到了广泛的应用。随着各国测高任务的发射,卫星测高技术在内陆水体的应用潜力凸显出来。且在未来的测高卫星计划中,备受瞩目的SWOT卫星将对全球内陆水体覆盖率达到90%。

卫星测高是利用卫星搭载雷达/激光雷达高度计测量卫星至地球表面的距离,是空间技术与信息技术交叉的产物^[1]。目前,已有20多颗测高卫星发射升空,测高卫星的监测技术水平和数据精度均有提升。现有的星载高度计分为两大类,分别为激光雷达高度计和微波高度计。激光雷达高度计具有线性和单光子两种探测方式,发射的激光波束数量也由单束扩展到多束,单光子探测技术极大地提高了探测数据获取率,ICESat-2激光测高卫星采用了单光子探测技术,计划于2022年发射的LIST也将采用单光子探测技术^[2]。微波高度计包括有限脉冲雷达高度计、合成孔径雷达高度计(SAR)、合成孔径雷达干涉高度计(SARIn)。目前,SAR和SARIn高度计是新型高度计。SAR高度计在传统高度计沿轨方向加入合成孔径技术,使得卫星的沿轨分辨率由千米级提升到米级别。SARIn高度计在跨轨方向上加入干涉技术,测高范围由沿轨方向上的一维扩大到二维,高度计的时空分辨率同时提高^[1]。在发展过程中,高度计也由单频转换为双频,增强电离层改正,新型的精密定轨系统(GPS、DORIS)的研发成功也使得测高卫星跨轨分辨率得到很大的提升,进而测高精度达到新高度。

内陆水体是水资源的重要组成部分,在全球范围内分布较广布,分布区域的地理环境多种多样。水文站的建立需要考虑水体分布区域的自然条件的恶劣程度、地理位置偏远程度、技术实施的可行性、建立水文站所耗费的成本等因素,因此水文站在全球范围内分布有限,且全球水文站数量不断减少。目前,全球

很多偏远地区的水体和小型水体没有实测水文数据。且由于政治、商业、数据保密性等,许多水文数据处于不公开状态,公开的水文数据量急剧下降。传统技术条件的不足和水文数据共享量逐年下降等因素导致世界各国对水位等相关水文信息掌握不足,研究人员在水资源方面的研究受到了阻碍。在这种情况下,研究人员渐渐把目光转向遥感技术。

卫星测高技术是遥感技术的边缘学科,它具有快速的覆盖能力,能够从全球范围内获得周期性的测高数据^[3]。相较于传统水文站,投入低、回报高、具有较高的空间分辨率,可以满足全球范围或部分区域年尺度上的水位变化监测,弥补传统水位监测技术的不足之处。水位变化是衡量内陆水体流量、存量变化的重要因素之一。卫星测高技术在内陆水体的应用中以湖泊、大型河流的水位监测为主,随后又扩展到对流量等与水位相关的水文变量的估算、以及水位对气候变化、人类活动的反演。研究人员将多源测高数据整合成数据集发布在相关网站,目前世界上有4个相关的全球测高数据共享平台。在发展过程中也出现了一些问题,虽然卫星测高技术覆盖范围较广,但不能达到全球覆盖的程度,且测高卫星的时空分辨率不能同时提升;其次,在地形复杂区域的数据精度较差。虽然卫星测高技术在内陆水体的应用具有一定的局限性,但随着相关技术的发展,卫星测高技术在内陆水体的应用会向着更精确、更实用的方向发展。翟国军等^[4]、蔡玉林等^[5]对卫星测高技术的原理、发展历程,以及卫星测高技术的在海洋学、地球物理学、测绘学等领域的应用进行描述,并分析测高卫星的发展趋势;高乐等^[6]详细介绍了卫星雷达测高在海洋、陆地水体、冰川和测绘上的应用,并提出测高技术现存的问题和对应的解决方案;汪海洪等^[7]总结了卫星测高的局限性,并对卫星测高的新技术(Ka、宽幅、GNSS测高、星座技术)进行分析评价;唐新明^[2]通过对比卫星激光测高、卫星雷达测高、卫星激光测距三种技术,对激光测高卫星的发展现状的进行梳理。本文主要通过对卫星测高技术的发展历程及其在内陆水体的应用研究进行分析,为今后卫星测高技术在内陆水体的研究提供参考。

1 卫星测高技术的发展历程

1.1 萌芽期

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提出卫星测高概念^[8]。1973年美国 NASA 发射第一颗搭载雷达高度计(S193)的 Skylab,这是人类第一次应用雷达高度计来探测地球,是卫星测高发展史上的里程碑^[9]。虽然 Skylab 卫星搭载的高度计误差较大,测得的测高数据精度失真,不能得到有效的实验数据,但证明了卫星测高这一概念的可行性,将理论付诸实践,为后续测高卫星的发展奠定了技术基础,自此开启卫星测高的新时代。

1.2 探索期

1975年,美国发射测高卫星 Geos-3^[10]。相较于 Skylab, Geos-3 的分辨率和测高精度均有所提高,全球覆盖率也大大增加,但由于数据精度未达到使用要求,仍旧无法为研究提供有效的数据。1978年,美国发射 Seasat 卫星,Seasat 卫星搭载的高度计改用新型的全去斜坡技术,分辨率提升,测高精度大大提高。虽然 Seasat 因故障仅运行了3个月,但 Seasat 卫星首次为研究人员提供了有效的全球测高数据,揭示了卫星测高的应用潜力。

1.3 成熟期

1985年,美国海军发射 Geosat 卫星,用于完成海洋大地水准面的测量目标。Geosat 卫星运行分为两个时期,前期数据用于军事活动,这段时期处于保密阶段;后期沿用了 Seasat 卫星的运行轨迹,这段时期数据可免费获取。Geosat 卫星执行任务长达6年,首次为研究人员提供了长时间、高精度、周期性的有效测高数据,标志着卫星测高技术的发展进入成熟时期。

1.4 发展期

20世纪90年代初,研究卫星测高技术的国家增多,研究人员致力于提高测高精度,分别采用不同技术提高高度计性能。美法合作研发 Topex/Poseidon 系列卫星,欧洲发射了 ERS 系列卫星。自此,测高卫星发展进入平稳时期。1991年,欧空局发射了第一颗测高卫星 ERS-1,搭载 RA-1 雷达高度计实现对陆地和海洋的监测。同系列卫星 ERS-2、Envisat 分别于1995年和2002年发射。1992年,美法合作研发出 T/P,该卫星搭载了新的精密轨道确定系统,采用 Ku 和 C 双波段,重访周期缩减到 10 d,测高精度提高到了 2.4 cm 的级别,标志着卫星测高技术进入高

精度时代。T/P 的后继卫星 Jason-1/2/3 分别于 2001年、2008年、2016年相继发射升空。1998年,美国发射 GFO 卫星作为 Geosat 卫星的后继卫星。

进入 21 世纪,除去 T/P 和 ESA 系列卫星任务外,激光、合成孔径、干涉等技术应用到新的卫星测高任务中,我国和印度也相继加入到卫星测高技术研究的队伍中。2003年,全球第一个对地激光测高计划 ICESat-1 发射升空,激光雷达高度计的足迹点远小于雷达高度计^[11]。后继卫星 ICESat-2 于 2018 年发射。2010年,欧洲空间局发射了 Cryosat-2 卫星,该卫星具有 3 种观测模式,分别为脉冲有限(普通模式)、SAR(合成孔径雷达)、SARIn(合成孔径雷达干涉)模式^[12]。该卫星在 SAR 模式下沿轨分辨率可以达到 250 m, SARIn 模式下,实现二维的宽刈幅测高,提高了测高卫星的时空分辨率,SARIn 技术是未来卫星测高技术的重点研究方向。

2011年,中国发射第一颗海洋动力环境卫星 HY-2A,填补了我国测高卫星研究方面的空白,标志着我国对测高卫星的研究进入起步阶段。该系列卫星包含的 HY-2B、HY-2C 卫星分别于 2018 年、2020 年发射,与 HY-2A 共同构成网状监测体系对全球海洋环境进行长期的探索和监测。2013年,法国和印度合作研发 Saral,沿用了 Envisat 的轨道。Saral 测高卫星首次采用 Ka 波段,Ka 波段具有电离层延迟小、脉冲重复频率高、带宽大、穿透力弱的优点,使其在测高精度更高,但该波段易受对流层中水汽延迟,在降雨过程中会受到干扰^[7]。

2016年,欧洲空间局发射了 Sentinel-3A,采用 SAR 技术提高测高卫星的空间分辨率;2018年,同系列卫星 Sentinel-3B 发射,与 Sentinel-3A 同轨道运行,共同提供全球监测,提供海洋业务化服务。2016年5月,中国发射了第一颗搭载激光雷达测高计对地观测卫星 ZY3-02;2016年9月,中国发射天宫二号卫星,它是世界上第一个集合成孔径雷达干涉和三维成像技术于一身的测高卫星^[13]。2019年,中国发射了第二颗搭载激光雷达高度计对地观测卫星 GF-7。2020年, Sentinel-6 作为 Jason-3 的后继卫星发射,它是 ESA, Eumetsat, EU, NOAA, Cnes 和 NASA 国际组织之间共同合作的产物。

卫星测高技术发展的最终目标是提高测高精度和增加数据覆盖范围使测高数据达到应用水平。在测高卫星发展的 40 多年进程中,卫星测高技术越来越成熟,测高卫星应用精密的定轨系统使测高精度达到厘米级,测高卫星搭载的高度计由单频转换到双频加强

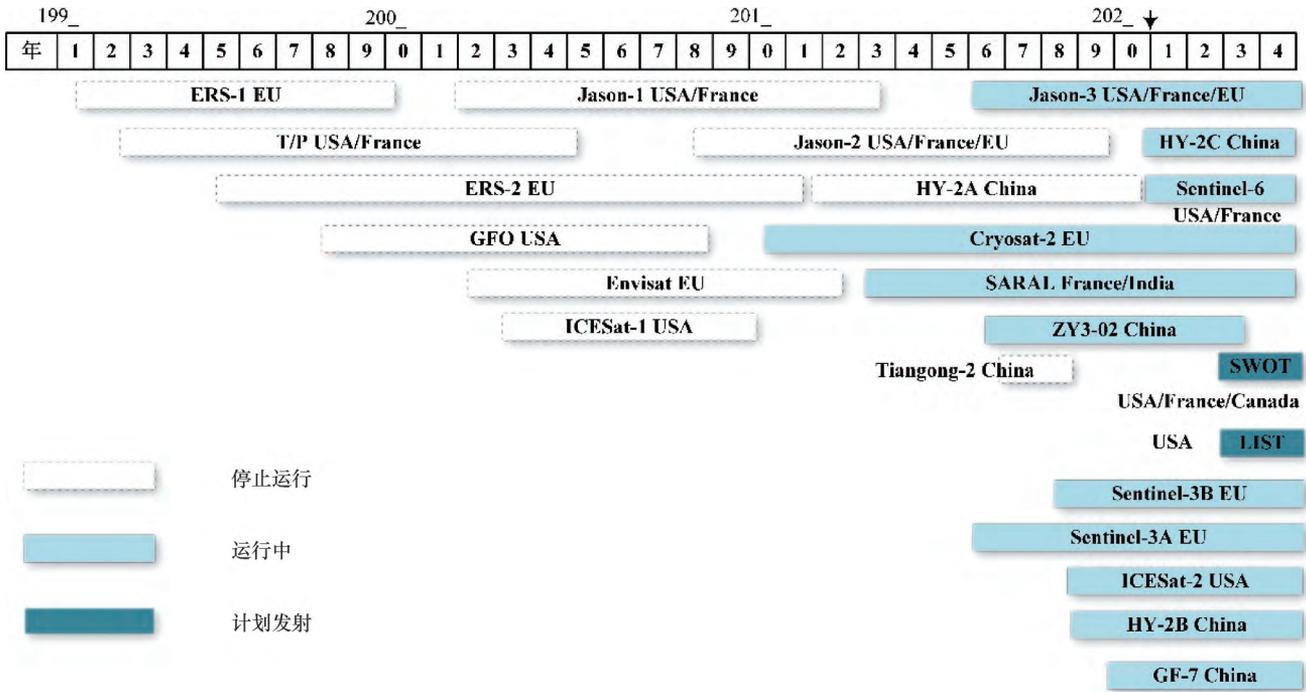


图 1 1991 至 2024 年测高卫星状态

Fig. 1 The status of altimetry satellites from 1991 to 2024

了电离层误差改正, 引入 Ka 波段、激光雷达、合成孔径、干涉等技术来提升高度计的性能。目前运行中的测高卫星主要有 Jason-3、Sentinel-3A、Sentinel-3B、ICESat-2、HY-2B、GF-7、HY-2C、Sentinel-6。近几年, 世界各国还有测高卫星发射计划。

2 卫星测高技术在内陆水体的应用

水位是反映水体水情的最直观要素。随着卫星测高技术的发展, 测高数据在水资源监测和防洪抗旱方面的应用越来越多^[14]。卫星测高技术具有不受气候条件限制, 长时间, 周期性等优点。随着卫星测高技术应用水平的提高, 越来越多的研究人员开始利用该技术开展内陆水体水位监测的研究, 随后发展到水位-流量、水位-水量、气候反演等研究方向。这些水文相关变量信息, 对于气候变化研究、水资源开发、管理、节约、保护和政府决策都有着重要的参考价值 and 意义。

2.1 水位监测方面

卫星测高作为一种周期性、全天候、无空间限制的技术, 解决了无水位监测水域无法获得实测水位的问题, 为水位监测提供了全新的技术方法^[14]。20 世纪 80 年代末, 有学者利用卫星测高数据监测河湖水位。此后, 越来越多测高数据应用于河流、湖泊水位监测。1993 年, KOBLINSKY^[15]采用 GeoSat 测高数据

对亚马逊河流域 1986—1988 年水位进行监测, 得出卫星测高技术在内陆水体研究中具有巨大潜力。2018 年, 王红等^[16]基于 Jason-2 测高数据, 对长江中游枝城、小河嘴水文站附近进行水位监测和数据精度评价, 研究表明, 测高数据与实测水位数据变化趋势相同, 相关性系数分别为 0.93 和 0.96。高永刚^[17]选择呼伦湖等 7 个湖泊为研究区, 应用 T/P 和 Jason-1 卫星测高数据对卫星测高技术在湖泊水位异常变化监测的可行性进行分析, 并选取多种方法对测高数据进行波形重定, 最终得出 Threshold 算法的重定结果最好。廖静娟等^[18]基于三种多源测高数据和 MODIS 影像数据, 提取了全球 118 个湖泊 15 年的水位变化。文京川^[19]基于 Jason-3 和 Sentinel-3A 测高数据, 对全国 36 水库和湖泊进行水位监测, 引入“连续优质点群”概念, 对测高数据进行分级, 建立相关的水位质量评价指标体系, 得出对湖库测高水位的筛选方法, 提高了测高数据的质量。张建涛等^[20]选取 2003—2009 年 ICESat/GLAH14 全球地表高程数据、2018 年 10 月—2019 年 8 月的 ICESat-2/ATL13 全球内陆水体高程数据, 提取丹江口水库多期水位变化数据, 利用水位站实测水位对其准确度进行了验证, 并分析了丹江口水库年度水位变化规律, 结果表明, 测高数据的平均误差为 15.6 cm, 丹江口水库水位呈季节性变化, 这表明测高水位变化与实测水位变化一致, 能够反映水库

水位变化特性。

2.2 流量估算方面

BIRKINSHAW^[21]提出了一种利用遥感数据估算无实测水文站地区的河流日流量的方法,该方法基于 ERS-2、Envisat 测高数据和 Landsat 遥感影像提供的测高水位、河道坡度的时间序列和河道宽度信息,结合 BJERKLIE 等人的方程,对 Nakhon Phanom、Vientiane 和 Kalpashevo 流量进行估算和验证。结果表明,湄公河上的 Nakhon Phanom 和 Vientiane 的纳什效率值分别为 0.90 和 0.86,鄂比河上的 Kalpashevo 为 0.8。该研究表明,测高水位数据在无实测水文站地区的河流日流量估算方面具有很大的潜力和应用价值。袁翠^[22]选取长江中游三个监测点,根据 2008—2009 年实测流量数据和 Jason-2 测高数据构建流量特性曲线方程,基于该曲线方程估算 2010—2015 年监测点的流量,并对估算的流量数据进行精度评价,结果表明,监测点反演得到的流量数据的均方根误差在 10% 以内。闵林等^[23]以遥感影像和多种雷达高度计提取的河宽、水位为输入数据,以曼宁公式为基础,在黄河下游建立 MRRS-RCM 模型,该模型可以反映河面变化与径流波动的关系,与曼宁公式方法相比,MRRS-RCM 模型无需水面坡度与曼宁粗糙系数等参数的输入,简化了计算过程。研究表明,监测点花园口、夹河滩、高村的估算流量与实测流量的相对均方根均低于 14%。

2.3 存量测算方面

段浩等^[24]利用 Sentinel-3 测高数据和 GF-1 遥感影像对黄河流域潼关—三门峡段河流存量进行了计算。该研究主要是通过卫星测高技术 and 遥感影像得到测高水位和河流宽度,通过实测站点的流量数据计算观测站参考流量,根据水力学经验流量公式得到最小水深,结合监测流量、河宽和平均水深计算断面计算水体流速,并计算研究区的河道槽蓄。吴红波^[25]以多源卫星测高数据、Landset 遥感影像为基础数据,构建基于水位、面积的蓄水量变化方程,结果表明,1990—2015 年博斯腾湖蓄水量变化较大,与水位、面积变化趋势一致。这表示卫星测高数据能够用于在博斯腾湖的水位变化监测。李兴东等^[26]基于多源卫星测高数据 (Jason-1/2/3、EnviSat、Cryosat-2) 和 Landset 遥感影像,获取青藏高原湖泊水位变化数据集,估测 52 个湖泊的总蓄水量变化,结果表明,52 个湖泊总蓄水量在 2000—2011 年处于快速增长期,在 2012—2017 年处于温和增长期。李闯^[27]利用 Sentinel-3A 测高水位数据、Sentinel-2A/B 的 MSI 影像和

Sentinel-1A 的 SAR 影像多源遥感影像提取的水库水域面积,采用多源数据融合的方式,得到水位与水域面积拟合曲线,并采用数据同化技术建立多源遥感水库蓄水量估算模型,最终基于模型开发了一款水库蓄水量估算系统,系统估算的蓄水量作为数据异常、数据缺失时的补充。

2.4 气候变化方面

王文种等^[28]利用 2016—2018 年 Sentinel-3 测高数据和 Landsat 遥感影像研究当惹雍错湖湖泊水位—面积变化关系,并得到了相应的水量估算公式。基于公式和 1988—2018 年的湖泊面积变化,推算出 1988—2018 年的湖泊水量变化,得到该时间段内湖泊水位、水量、面积减少,结合 GLDAS 气象资料与雪线变化情况,推测出湖泊水量变化与降水、降雪、气温等因素相关。褚永海等^[29]使用 Jason-1 测高数据,对其进行地球物理改正,对呼伦湖 2002—2004 年水位进行变化监测,由此反演出 2002—2004 年,呼伦湖区域降雨量下降,持续干旱。李均力等^[30]获取了 24 个湖泊 2003—2009 年的测高水位数据,同时结合冰川、水坝分布以及气候数据,采用长时间、多研究区、多种因素并存的方式深入探讨了湖泊水位对人类活动和气候变化的响应。

2.5 数据共享平台

随着时间的推移,各国相继发射测高卫星,卫星测高数据逐渐增加。有研究人员将全球范围的内陆水体测高数据整合为数据集,构建全球湖泊、河流、水库的水位时间序列,建立数据共享平台,推进卫星测高技术在内陆水体的应用和业务化、提高测高数据利用率。这类数据共享平台目前共有 4 个,分别为欧空局建立的全球河湖水位监测数据库 (The River and Lake, <http://tethys.eapsr.cse.dmu.ac.uk/RiverLake/shared/main>); LEGOS 生产的水位数据产品 (Hydroweb, <http://Hydroweb.theia-land.fr/>); 美国农业部全球水库湖泊水位监测产品 (GMRL, https://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/); 德国慕尼黑工业大学团队建立的全球内陆水体水文时间序列 (DAHITI, <http://dahiti.dgfi.tum.de/en>)^[22-31]。数据共享平台属性具体情况如表 2 所列。

3 发展过程中存在的问题

3.1 时空分辨率矛盾

测高卫星多是单颗卫星沿既定轨道运行模式,在沿轨方向上,对星下点进行观测,以点网形式对地球进行覆盖,不能全面覆盖地球。高时空分辨率的

表 1 卫星测高技术在内陆水体的应用

Table 1 The application of satellite altimetry to inland water

研究区	研究内容	数据	研究时段
亚马逊河流域	水位监测	GeoSat	1986—1988
枝城、小河咀水文站附近		Jason-2	2008-07—2009-12
呼伦湖等 7 个湖泊		T/P 和 Jason-1 卫星测高数据	1993—2005
全球 118 个湖泊		ENVISAT/RA-2、Cryosat-2/SIRAL、Jason-2 和 MODIS 影像数据	2002—2016
中国 36 水库和湖泊		Jason-3、Sentinel-3A	2016-02—2017-07
丹江口水库		ICESat/GLAH14 ICESat-2/ATL13	2003—2009 2018-10—2019-08
Nakhon Phanom、Vientiane 和 Kalpashevo	流量估算	ERS-2、Envisat、Landsat 遥感影像	1995—2008
长江中游三个监测点		Jason-2	2008—2015
花园口、夹河滩、高村水文站		遥感影像和 Jason-3、Sentinel-3A	2017-01—2019-08
潼关-三门峡河段	存量估算	GF-1 影像、Sentinel-3A	2019
博斯腾湖		多源卫星测高数据、Landset 遥感影像	1990—2015
青藏高原 52 个湖泊		Jason-1/2/3、EnviSat、Cryosat-2、Landset 遥感影像	2000—2017
丹江口水库		Sentinel-3A、Sentinel-2A/B 的 MSI 影像和 Sentinel-1A 的 SAR 影像	2019
当惹雍错湖		Sentinel-3、Lansat 遥感影像、GLDAS 气象资料与雪线变化	2016—2018
呼伦湖	气候变化	Jason-1	2002—2004
中亚地区 24 个湖泊		测高水位数据, 同时结合冰川、水坝分布以及气候数据	2003—2009

表 2 全球测高数据共享平台

Table 2 Global altimeter data sharing platform

产品名称	数据来源	间隔时间
The River and Lake	Jason-2, Envisat	35 d
Hydroweb	T/P, Jason-1/2/3, GFO, Envisat, Sentinel-3A/3B	30 d
GRLM	T/P, Jason-1/2/3, ERS-1/2, Envisat, SARAL, Sentinel-3A	10 d
DAHITI	T/P, Jason-1/2/3, ERS-1/2, Envisat, SARAL, Cryosat-/InSAR, Sentinel-3A/3B	与测高卫星周期和任务重叠有关

测高数据需要短重访周期、高密度的监测来支撑, 但当前测高卫星技术还难以同时满足这一需求。当卫星重访周期变短, 时间分辨率变大, 测高卫星轨迹点网稀疏, 空间分辨率变小; 反之卫星重访周期加长, 时间分辨率变小, 测高卫星轨迹点网加密, 空间分辨率变大。测高卫星的时空分辨率决定了测高数据的覆盖范围和获取周期, 进而影响了卫星测高数据的应用领域和应用程度。

为同时提高卫星测高数据的时空分辨率, 研究人员对卫星搭载仪器的性能进行改进并尝试引入多卫星作业方式。其中, 星座技术通过组建相同配置卫星群的方式缩短重访周期, 从而同时提高时空分辨率^[7]; GNSS 测高技术利用现有的 GNSS 不断发射 GPS 信号, 使近极轨道卫星上安装星载接收机的两个天线分别接收 GPS 信号和水面反射 GPS 信号, 计算出反射信号相对于直接信号的时间延迟, 在一定程度上达到目的; 此外, 通过宽刈幅技术, 可在卫星过境时, 得到二维的测高数据, 提高卫星测高数据的时空分辨率^[32]; 同样, 多源卫星测高数据融合也可达到相似效果, 但由于卫星的轨道不重合、重访周期不同等问题, 该方法受到一定限制。

3.2 数据质量参差不齐

由于卫星高度计运行过程中面对不同的自然环境, 卫星测高数据质量参差不齐, 如传统雷达高度计在监测较为平缓的地形时获得的数据质量较高, Ka 波段的雷达高度计易受降雨因素的影响。测高卫星在沿海区域、湖泊、河流宽度较窄、山区等地形复杂区域得到的回波会受到污染, 导致测高数据精度下降; 风沙、强降雨等极端天气条件下测高难度较大, 恶劣的气候条件会干扰脉冲信号, 使测高数据出现丢失或精度下降现象^[33]。

研究人员采用多种方式来改善测高数据的质量, 如运用拟合法、重心偏移法等技术对数据进行波形重定来提高数据精度, 赵云等^[3]利用主波峰重心偏移法等六种算法对 Cryosat-2/SIRAL 数据进行波形重定, 来验证测高数据的监测能力; 采用“共线平差法”来解决同一卫星、同一轨道、不同周期不严格重复的问题, 刘沙^[34]利用 GeoSat 的 5 个周期重复轨道周期数据验证该方法的可行性; 采用多源数据融合的方式填补缺失数据, 黎鹏等^[35]利用 ICESat-1 和 Cryosat-2 数据对洞庭湖流域湖泊水位进行监测。

3.3 数据验证依据不足

在卫星测高数据应用过程中,研究人员选择有实测数据的地点作为研究区,通过实测数据来验证测高水位和估算的流量数据。利用卫星测高数据估算的河流、湖泊存量数据只能通过与计算存量要素的变化趋势对比的方式来验证。由于现有水文站位置与测高卫星轨道重合的较少、用来进行验证的案例较少,卫星测高数据估算的流量、存量数据结果验证困难,暂无有效解决方法。

4 卫星测高技术在 inland 水体的应用前景

随着星座技术、宽刈幅等新技术的引入,测高数据精度和测高卫星的时空分辨率不断提升,卫星测高技术不断进步,将更加适用于内陆水体。当测高数据精度达到实测程度,且数据质量稳定时,测高卫星可作为移动虚拟水文站,对无水文监测区域进行周期性监测,提供精确有效的水文数据,为水文年鉴编制,水资源存量测算、气候预测、水资源评价、水资源管理等工作提供基础支撑;当测高卫星重访周期达到 1 d,实时测高数据精度达到应用标准,测高卫星可为防洪抗旱、通航水位条件、水力发电提供实时水位信息。

受传统监测技术条件时空覆盖度不足、水文数据共享程度提升较慢等问题的制约,人类对内陆水体的了解具有一定的局限性,这在一定程度上推动了卫星测高技术的发展。当前,卫星测高技术还处在不断探索之中,但在内陆水体的监测领域已展现出较好的应用前景,将成为内陆水体监测过程中重要的技术手段之一。

参考文献 (References):

[1] 廖静娟. 星载雷达高度计数据处理及陆地应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
LIAO Jingjuan. Data processing and land application of spaceborne radar altimeter[M]. Beijing: Science Press, 2020.

[2] 唐新明. 对地观测卫星激光测高数据处理方法与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
TANG Xinming. Earth observation satellite laser altimeter data processing method and engineering practice[M]. Beijing: Science Press, 2019.

[3] 赵云, 廖静娟, 沈国状, 等. 卫星测高数据监测青海湖水位变化[J]. 遥感学报, 2017, 21(4): 633-644.
ZHAO Yun, LIAO Jingjuan, SHEN Guozhuang, et al. Monitoring the water level changes in Qinghai Lake with satellite altimetry data[J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(4): 633-644.

[4] 翟国军, 黄漠涛, 欧阳永忠, 等. 卫星测高原理及其应用[J]. 海洋测绘, 2002(1): 57-62.
ZHAI Guojun, HUANG Motao, OUYANG Yongzhong, et al. The principle and application of satellite altimetry[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2002(1): 57-62.

[5] 蔡玉林, 程晓, 孙国清. 星载雷达高度计的发展及应用现状[J]. 遥感信息, 2006(4): 74-78.
CAI Yulin, CHENG Xiao, SUN Guoqing. A review of development of radar altimeter and its applications[J]. Remote Sensing Information, 2006(4): 74-78.

[6] 高乐, 廖静娟, 刘焕玲, 等. 卫星雷达测高的应用现状及发展趋势[J]. 遥感技术与应用, 2013, 18(6): 13-18.
GAO Le, LIAO Jingjuan, LIU Huanling, et al. Applying status and development of satellite radar altimeter[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 18(6): 978-983.

[7] 汪海洪, 钟波, 王伟, 等. 卫星测高的局限与新技术发展[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(1): 91-95.
WANG Haihong, ZHONG Bo, WANG Wei, et al. Limitations of satellite altimetry and future technology improvements[J]. Journal of geodesy and geodynamics, 2009, 29(1): 91-95.

[8] 胡淑梅. 卫星测高反演海域重力异常和大地水准面的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012.
HU Shumei. Determination of marine gravity anomalies and geoid by using satellite altimetry data[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2012.

[9] 崔伟. 多源卫星高度计海面高度异常数据融合研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2016.
CUI Wei. The study of merging sea level anomalies data derived from multi-satellite altimeter[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2016.

[10] 尹路, 李延斌, 马金刚. 海洋观测技术现状综述[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(11): 4-7.
YIN Lu, LI Yanbin, MA Jingang. Present status of marine observation technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2013, 33(11): 4-7.

[11] 唐新明, 李国元. 激光测高卫星的发展与展望[J]. 国际太空, 2017, 467(11): 13-18.
TANG Mingxin, LI Guoyuan. Development and prospect of laser altimetry satellite[J]. Space International, 2017, 467(11): 13-18.

[12] 赵秋阳. 基于卫星测高数据的南极冰下湖活动监测与分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
ZHAO Qiuyang. Detection of antarctic subglacial lakes activities using satellite altimetry data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.

[13] 任海根, 李盛阳. 天宫二号对地观测应用研究进展[J]. 载人航天, 2019, 25(6): 825-833.
REN Haigen, LI Shengyang. Research progress of Tiangong-2 earth observation applications[J]. Auditing Research, 2019, 25(6): 825-833.

[14] ALSDORF D E. Water storage of the central amazon floodplain meas-

- ured with GIS and remote sensing imagery[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2003, 93(1): 55-66.
- [15] KOBLINSKY C J, CLARKE R T, BRENNER A C, et al. Measurement of river level variations with satellite altimetry [J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(6): 1839-1848.
- [16] 王红, 孙福宝, 杨涛, 等. Jason_2 卫星测高数据在长江中游水位监测中的应用[J]. *三峡生态环境监测*, 2018, 3(3): 48-54. WANG Hong, SUN Fubao, YANG Tao, et al. Application of Jason_2 satellite altimetry data to water level monitoring in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2018, 3(3): 48-54.
- [17] 高永刚. 利用卫星测高进行陆地湖泊水位变化监测[D]. 南京: 河海大学, 2006. GAO Yonggang. Lake level variations from satellite altimetry [D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [18] 廖静娟, 沈国状, 赵云. 多源雷达高度计全球典型湖泊水位变化数据集 2002—2016[J]. *全球变化数据学报(中英文)*, 2018, 2(3): 184-191. LIAO Jingjuan, SHEN Guozhuang, ZHAO Yun. Dataset of global lake level changes using multi-altimeter data (2002-2016) [J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2018, 2(3): 184-191.
- [19] 文京川. 测高卫星数据在我国湖区水位监测中的应用研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018. WEN Jingchuan. Research and application on the satellite altimetry data to monitor the water level of lakes and reservoirs in China [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [20] 张建涛, 刘传立. 基于激光测高数据的丹江口水库水位变化监测[J]. *测绘科学*, 2021, 46(2): 20-24. ZHANG Jiantao, LIU Chuanli. Water level change monitoring of Danjiangkou reservoir based on laser altimetry data [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(2): 20-24.
- [21] BIRKINSHAW S J, MOORE P, KILSBY C, et al. Daily discharge estimation at ungauged river sites using remote sensing[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(3): 1043-1054.
- [22] 袁翠. 基于雷达高度计的内陆水体应用研究[D]. 北京: 中国科学院遥感与数字地球研究所, 中国科学院大学, 2017. YUAN Cui. Applied research on radar altimetry over inland waters [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese Academy of Science, Peking University, 2017.
- [23] 闵林, 王宁, 毋琳, 等. 基于多源雷达遥感技术的黄河径流反演研究[J]. *中国水利*, 2020, 42(7): 1590-1598. MIN Ling, WANG Ning, WU Lin, et al. Inversion of Yellow River runoff based on multi-source radar remote sensing technology [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(7): 1590-1598.
- [24] 段浩, 贾玲, 文京川, 等. 基于 GF-1 影像和测高卫星的河流流量计算方法: 中国, CN202010794107.3 [P]. 2020-11-06. DUAN Hao, JIA Ling, WEN Jingchuan, et al. Calculation method of river storage based on GF-1 image and altimetry satellite; China, CN202010794107.3 [P]. 2020-11-06.
- [25] 吴红波. 基于星载雷达测高资料估计博斯腾湖水位-水量变化研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(3): 9-16. WU Hongbo. Studies on changes in water level and storage of Bosten-Lake based on satellite-borne radar altimetry data [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2019, 30(3): 9-16.
- [26] LI Xingdong, LONG Di, HUANG Qi, et al. High-temporal-resolution water level and storage change data sets for lakes on the Tibetan Plateau during 2000—2017 using multiple altimetric missions and Landsat-derived lake shoreline positions [J]. *Hydrological Processes*, 2019, 4(11): 1603-1627.
- [27] 李闯. 多源遥感水库蓄水量估算研究与系统实现[D]. 开封: 河南大学, 2020. LI Chuang. Estimation and system implementation of the reservoir storage based on multi-source remote sensing [D]. Kaifeng: Henan University, 2020.
- [28] 王文种, 黄对, 刘九夫, 等. 基于 Landsat 与 Sentinel-3A 卫星数据的当惹雍错 1988—2018 年湖泊水位水量变化及归因[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1552-1563. WANG Wenzhong, HUANG Dui, LIU Jiufu, et al. Patterns and causes of changes in water level and volume in Tangra Yumco from 1988 to 2018 based on Landsat images and Sentinel-3A synthetic aperture radar [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1552-1563.
- [29] 褚永海, 李建成, 姜卫平, 等. 利用 Jason-1 数据监测呼伦湖水位变化[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005(4): 11-16. ZHU Yonghai, LI Jiancheng, JIANG Weiping, et al. Monitoring of water level variations of Hulun Lake with Jason-1 altimetric data [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005(4): 11-16.
- [30] 李均力, 陈曦, 包安明. 2003—2009 年中亚地区湖泊水位变化的时空特征[J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1219-1229. LI Junli, CHEN Xi, BAO Anming. Spatial-temporal characteristics of lake level changes in Central Asia during 2003—2009 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1219-1229.
- [31] ZHENG D, BASTIAANSEN W G M. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134: 403-416.
- [32] 徐永生, 高乐, 张云华. 美国新一代测高卫星 SWOT——评述我国宽刈幅干涉卫星的发展借鉴[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(1): 84-94. XU Yongsheng, GAO Le, ZHANG Yunhua. New generation altimetry satellite SWOT and its reference to China's swath altimetry satellite [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(1): 84-94.
- [33] 文京川, 赵红莉, 蒋云钟, 等. 卫星测高数据筛选方法研究: 以 Jason-3 数据和洪泽湖为例[J]. *南水北调与水利科技*, 2018,

16(3): 194-200.

WEN Jingchuan, ZHAO Hongli, JIANG Yunzhong, et al. Research on the quality screening method for satellite altimetry: take Jason-3 data and Hongze Lake as an example[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 194-200.

[34] 刘沙. 卫星高度计共线算法实现及分析[J]. 今日科苑, 2009(20): 45-46.

LIU Sha. Realization and analysis of collinear algorithm of satellite al-

timeter[J]. Modern Science, 2009(20): 45-46.

[35] 黎鹏, 李辉. 基于多源卫星测高数据的洞庭湖流域 2003—2017 年湖泊水位变化监测[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 1956-1966.

LI Peng, LI Hui. Monitoring the changes of lake water level in Dongting Lake Basin from 2003 to 2017 based on multi-source satellite altimetry data [J]. Earth Science, 2020, 45(6): 1956-1966.

(责任编辑 郭利娜)