DOI:10.14188/j.2095-6045.20260443

文章编号:2095-6045(2026)05-0016-11

卫星测高技术进展与发展趋势

金涛勇[1,2,3]　高贤文[1]　孙鹤洋[1]　王彦博[1]　冯　崎[1]

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

3 自然资源部地球物理大地测量重点实验室,湖北 武汉,430079

The Progress and Prospects of Satellite Altimetry

JIN Taoyong[1,2,3]　*GAO Xianwen*[1]　*SUN Heyang*[1]　*WANG Yanbo*[1]　*FENG Qi*[1]

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 MOE Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 MNR Key Laboratory of Geophysics and Geodesy, Wuhan University, Wuhan 430079, China

摘　要:卫星测高技术已广泛用于大地测量学、海洋学、地球物理学、水文学、冰冻圈科学等领域,在海平面变化、海洋重力场、海底地形、冰川变化等方面研究取得了重要进展。本文较为系统地总结了卫星测高技术的发展现状,以TOPEX/Poseidon系列、ERS系列、SARAL/AltiKa、CryoSat-2、Sentinel-3/6、SWOT、ICESat/ICESat-2及中国HY-2系列等代表性任务为主线,梳理低分辨率脉冲有限型雷达测高、合成孔径雷达测高、宽刈幅干涉雷达测高和激光测高等主要技术体制的发展及其在海洋、内陆水体和冰冻圈观测中的应用,并阐述现有业务化测高任务的延续规划以及S3 NG-T、CRISTAL和EDGE等未来任务。总体来看,卫星测高已形成多种技术体制相互补充的观测体系,观测方式由传统星下点沿轨一维测量逐步向更高分辨率的沿轨观测和二维成像拓展,观测范围也由开阔海洋不断延伸至近岸、内陆水体、海冰、冰盖和陆地表面。未来卫星测高将进一步向高频及多频联合观测、二维成像、多星组网和多任务协同发展,通过不同测高任务之间的优势互补,进一步提升观测精度、时空覆盖和长期一致性,逐步构建面向全球多类型地表的综合测高观测体系。

关键词:卫星测高;激光测高;合成孔径雷达测高;宽刈幅干涉雷达测高;海面高

中图分类号:P228

文献标志码:A

Abstract: After more than five decades of development, satellite altimetry has gradually become an important space-based Earth observation technique integrating low-resolution pulse-limited radar altimetry, synthetic aperture radar (SAR) altimetry and its interferometric mode (SARIn), wide-swath interferometric radar altimetry, and laser altimetry. It has been widely applied in geodesy, oceanography, geophysics, hydrology, and cryosphere science, contributing substantially to studies of sea-level change, marine geoid and gravity field determination, mean sea surface modeling, seafloor topography inversion, mesoscale and submesoscale ocean dynamics, inland water-level monitoring, sea-ice thickness estimation, and mapping of elevation changes in glaciers and ice sheets. This manuscript summarizes the development of satellite altimetry through representative missions, including the TOPEX/Poseidon series, ERS series, SARAL/AltiKa, CryoSat-2, Sentinel-3 and Sentinel-6 series, SWOT, ICESat/ICESat-2, and China's HY-2 series. The basic principles, technical characteristics, and evolution of the major altimetry techniques are summarized, with particular emphasis on the transition from low-resolution pulse-limited altimetry to high-resolution SAR/SARIn altimetry, from conventional one-dimensional nadir measurements to two-dimensional wide-swath imaging, and from full-waveform laser altimetry to photon-counting laser altimetry. Their observational advantages and applications over the open ocean, coastal zones, inland waters, and the cryosphere are also summarized. The manuscript further discusses the continuity plans for current operational altimetry missions and forthcoming missions such as S3 NG-T (Sentinel-3 Next Generation Topography), CRISTAL (Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimeter), and EDGE (Earth Dynamics Geodetic Explorer). Overall, satellite altimetry has evolved into an integrated observing

引用格式:金涛勇,高贤文,孙鹤洋,等. 卫星测高技术进展与发展趋势[J]. 测绘地理信息,2026,51(5):16-26(JIN Taoyong, GAO Xianwen, SUN Heyang, et al. The Progress and Prospects of Satellite Altimetry[J]. Journal of Geomatics, 2026, 51(5):16-26)

基金项目:国家自然科学基金(42192531,42374035)。

system in which multiple measurement techniques provide complementary capabilities. Observations are progressing from low-resolution, single-track nadir measurements toward higher-resolution along-track observations and two-dimensional swath imaging, while observation targets have expanded from the open ocean to coastal zones, rivers and lakes, sea ice, ice sheets, glaciers, and land surfaces. Looking ahead, future developments in satellite altimetry are expected to focus on four major directions: (1) higher-frequency radar measurements and multi-frequency joint observations; (2) two-dimensional imaging and multi-swath mapping; (3) multi-satellite constellations with enhanced temporal sampling and spatial coverage; and (4) coordinated and integrated observations across multiple missions. Through the complementary use of different frequency bands, measurement techniques, and satellite missions, these advances are expected to further improve measurement accuracy, spatiotemporal resolution and coverage, and long-term consistency, ultimately supporting the development of an integrated global satellite altimetry observing system capable of high-precision and high-resolution measurements over a broad range of surface types.

Key words: satellite altimetry; laser altimetry; synthetic aperture radar altimetry; wide-swath interferometric radar altimetry; sea surface height

1　引言

卫星测高技术通过精确测定卫星至地球表面的距离，并结合精密轨道及地球物理与环境误差改正获取海面及其他地表面相对参考椭球的高程，能够高效提供大范围、高精度的高程观测，并为地球形状、重力场及地表变化等研究提供重要基础数据[1-3]。经过半个多世纪的发展，卫星测高已深刻推动大地测量学、海洋学、地球物理学、水文学、气候科学和冰冻圈科学等领域的发展[4,5]，广泛应用于海洋大地水准面测定、海洋重力场与海底地形反演、海洋垂直基准建立与维持、全球和区域海平面变化与海洋动力过程监测、内陆水体水位监测及水量变化估算、海冰与冰川冰盖变化监测、陆地地形与表面高程观测以及气候变化监测与研究[6-17]，已成为全球海洋及多类地表高程变化监测的重要空间观测技术之一。

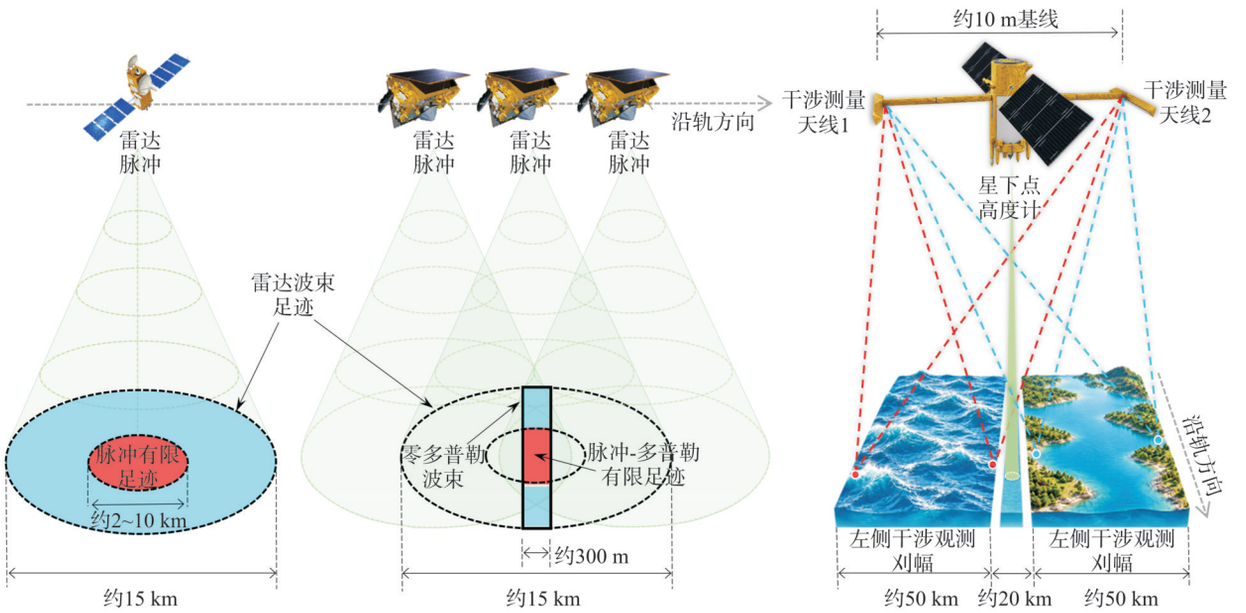
伴随应用范围的不断拓展，卫星测高的观测体制和传感器技术持续演进，主要形成了微波雷达测高（后文简称为雷达测高）和激光测高两条技术路线。雷达测高具有全天时、全天候和大范围连续观测优势，技术上由传统低分辨率脉冲有限型雷达测高逐步发展至合成孔径雷达测高、合成孔径雷达干涉测高和二维宽刈幅干涉雷达测高，不断提升空间分辨率和覆盖能力[4,8,18,19]；激光测高则凭借小足迹和高空间分辨率，在冰冻圈、陆地地形及复杂地表精细高程观测方面具有突出优势，其技术由全波形测高逐步发展至光子计数测高，并通过多波束观测进一步提高空间采样与覆盖能力[20]。总体而言，卫星测高正由传统低分辨率星下点一维沿轨观测向高分辨率沿轨和二维面状观测持续拓展。

2　卫星测高技术发展现状

2.1　低分辨率脉冲有限型雷达测高

20 世纪 60 年代，随着空间大地测量技术的发展，卫星雷达测高的概念逐步形成。如图 1(a)所示，早期星载雷达高度计采用脉冲有限型星下点观测体制，以较低脉冲重复频率发射雷达脉冲，海面散射回波经非相干累积形成具有特定统计特征的平均功率波形[21]。脉冲有限型雷达高度计在星下点附近回波对应的有效地表范围主要受雷达有效脉冲宽度限制，其脉冲有限足迹通常为公里量级[22]。该体制在后来的测高技术发展中通常被称为低分辨率模式（low resolution mode，LRM）。在开阔海洋和大型湖泊等相对均质水面上，LRM 测高能够获得稳定且高精度的测距结果[8]。

1973 年，Skylab 卫星率先开展星载雷达测高试验，验证了卫星测高用于海洋大地水准面和陆地表面高程观测的潜力[23]；随后，GEOS-3 卫星进一步提高了测距分辨率和测高精度，并验证了海面起伏、海上垂线偏差和有效波高等观测能力[24]；后续 Seasat 卫星则发展了第三代高精度雷达高度计，推动卫星测高向洋流、潮汐和波浪等海洋动力过程观测拓展[25-27]；1985 年发射的 Geosat 卫星首次实现了近 5 年全球卫星测高数据的连续获取，其大地测量任务获得的约 6 km 轨间距高密度数据与后续 ERS-1 卫星数据结合，首次实现了全球大洋盆地约 10 km 尺度的海洋重力场模型构建[28]。20 世纪 90 年代以后，卫星测高技术进入快速发展阶段。1992 年，美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）与法国国家空间研究中心（Centre National d′Etudes Spatiales，CNES）联合发射 TOPEX/Poseidon（T/P）卫星，凭借高度计性能、精密定轨等方面的显著提升，使海面高测量进入厘米级精度时代[29]。T/P 实现了每 10 天对全球海洋的高精度重复观测，首次建立精度和采样能力均满足大尺度海洋环流研究需求的全球观测系统[30]，并首次揭示了全球海平面变化的区域非均匀性[31]；以



(a) 低分辨率脉冲有限雷达测高 (b) 合成孔径雷达测高 (c) SWOT宽刈幅干涉雷达测高

图 1 雷达测高观测原理示意图(低分辨率脉冲有限雷达测高、合成孔径雷达测高、SWOT宽刈幅干涉雷达测高)

Fig. 1 Schematic of Radar Altimetry(Low-Resolution Pulse-Limited Radar Altimetry, Synthetic Aperture Radar Altimetry, SWOT Wide-Swath Interferometric Radar Altimetry)

T/P海面高观测为重要组成的多源卫星遥感数据还首次实现了对完整厄尔尼诺—拉尼娜事件全过程的连续遥感监测[32]。随后,Jason-1、Jason-2和Jason-3卫星延续了T/P任务的轨道设计,逐步形成自1992年以来超过30年的连续海面高观测序列,为全球平均海平面变化趋势研究、海洋环流变化监测以及气候变化分析提供了关键数据支撑[33,34]。

与此同时,欧洲空间局(European Space Agency,ESA)于1991年发射首颗搭载雷达高度计的极轨卫星ERS-1,进一步拓展了卫星测高在高纬极地区域的应用。ERS-1雷达高度计设置了海洋模式和冰模式,其中冰模式通过增大接收窗口范围,增强了对起伏冰面的回波跟踪能力。在冰盖区域,ERS-1在168天周期大地测量阶段获取的高密度数据被用于构建高分辨率南极冰盖数字高程模型,并进一步支撑冰盖形态、冰流运动特征和动力过程研究[14];35天重复轨道测高则用于冰盖高程变化监测和质量平衡评估[14]。此后,ERS-2、Envisat和SARAL/AltiKa卫星先后延续了ERS-1 35天重复轨道的长期观测。其中,SARAL/AltiKa首次采用Ka波段雷达高度计,相较于传统Ku波段高度计具有更窄的天线波束和更高的距离分辨能力,其天线波束足迹由约15 km缩小至约8 km[35],在近岸海域和极区观测中展现出一定优势。2016年7月,SARAL/AltiKa进入漂移轨道阶段,为海洋大地测量和冰盖地形研究提供新的高密度测高数据。

我国卫星测高技术起步相对较晚,但近年来发展迅速。2011年,中国首颗海洋测高卫星HY-2A成功发射,标志我国正式进入卫星测高时代[36]。随后,HY-2B、HY-2C和HY-2D分别于2018年、2020年和2021年发射,逐步形成我国自主海洋测高卫星体系,为全球海洋动力环境监测和海洋科学研究提供重要数据支撑[9]。

总体而言,LRM测高依托长期稳定运行的系列任务,建立了覆盖全球海洋的连续观测体系,是全球海平面变化研究和海洋动力环境监测的重要基础。然而,其天线波束覆盖范围通常可达十公里量级,在近岸、内陆水体和海冰覆盖区域,陆地、岛礁和冰面等非目标散射回波容易混入测高波形,造成波形畸变并降低测距精度[37,38]。因此,提高空间分辨能力并增强复杂地表环境下的回波识别能力,成为卫星测高技术进一步发展的重要方向。

2.2 合成孔径雷达测高

针对LRM测高在复杂区域观测能力不足的问题,合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)测高技术应运而生。该技术最早由Raney(1998)提出[39],其核心思想是提高脉冲重复频率并保持连续回波的相干性,利用卫星运动引起的地面目标多普勒频率差异,对连续接收的雷达回波进行延迟—多普勒处理,将雷达足迹在沿轨方向分解为约300 m宽的多普勒波束(见图1(b))。同时,通过多视叠加

降低回波散斑噪声,提高回波信噪比。因此,SAR测高在显著提高沿轨空间分辨率的同时,降低了复杂环境对测距精度的影响[5,40]。

2010年,ESA发射的CryoSat-2卫星首次实现了SAR测高技术的在轨应用,其支持LRM、SAR和合成孔径雷达干涉测量(synthetic aperture radar interferometry,SARIn)三种工作模式。其中,LRM模式用于海洋与冰盖内部,SAR模式主要用于海冰区域,SARIn模式在沿轨SAR处理基础上引入双天线干涉测量,以获取跨轨方向的地形坡度,从而降低其对测距精度的影响,应用于地形复杂的极地冰盖边缘和山地区域[41]。CryoSat-2的SAR/SARIn观测进一步推动了卫星测高在冰冻圈研究中的应用,实现了泛北极海冰厚度和体积的持续监测,并揭示了北极海冰体积的显著减少[15];同时,CryoSat-2还被用于格陵兰和南极冰盖高程变化制图和体积变化估计,为量化极地冰盖损失及其对海平面变化的影响提供重要观测依据[42,43]。此外,CryoSat-2的长重复周期(约369天)轨道观测和高密度测高数据进一步拓展了其在海洋重力场和平均海面模型构建中的应用。文献[44]在Geosat和ERS-1等早期卫星测高数据基础上进一步纳入CryoSat-2与Jason-1的高密度测高数据,构建了全球海洋重力场模型,其精度约为早期卫星测高重力场模型的2倍,并揭示了残余扩张脊、传播型裂谷、深海丘陵及大量未测绘海山等精细海底构造;CryoSat-2的SAR/SARIn测高模式提高了极区测高数据的有效覆盖和观测质量,显著改善了极区平均海面模型的空间解析能力和可靠性[45]。尽管CryoSat-2的SAR/SARIn模式覆盖区域有限,但验证了SAR/SARIn测高在复杂环境下相较于LRM测高观测能力的显著提升[46-48]。

在CryoSat-2基础上,Sentinel-3A和Sentinel-3B卫星于2016年和2018年相继发射,首次实现了全球范围SAR测高模式的业务化运行,同时结合业务化开环跟踪命令(open-loop tracking command,OLTC)技术,提高了复杂区域水面回波的捕获能力和数据可用性[49,50]。研究表明,在西北大西洋近岸大陆架区域,Sentinel-3 SAR测高的海面高观测噪声相比传统LRM模式降低约50%以上,提高了沿轨方向对近岸大陆架区域中小尺度海洋动力信号的探测能力[51];此外,Sentinel-3在内陆水体监测方面也表现出良好能力,对中型湖泊水位监测的误差为厘米级[52],对河流水位监测误差的中位数小于20 cm[53]。随后,Sentinel-6 Michael Freilich(也称为Sentinel-6A)和Sentinel-6B卫星延续了T/P的参考轨道,进一步引入开放式脉冲串(Open-Burst)SAR测高模式,通过保持与LRM高度计相似的雷达脉冲时序,在生成SAR测高波形的同时同步生成与T/P系列卫星历史观测序列兼容的LRM波形数据[54],在延续长期海面高连续观测的同时,兼具复杂区域的测量能力。

我国于2023年发射了首个搭载SAR高度计的新一代编队跟飞海洋测绘卫星COATS(China Ocean Altimetry Tandem Satellites)。COATS由A、B两颗卫星组成,两星位于同一轨道面,前后相距约30 km、时间相差约4 s,赤道附近瞬时轨间距约1.8 km。双星跟飞形成的近实时跨轨方向观测结合高分辨率SAR测高,可获得多方向海面坡度信息,具备1′×1′格网海面高测量及垂线偏差计算能力,为高分辨率海洋重力场反演和海洋测绘提供了新的观测手段[55]。此外,搭载SAR高度计的HY-2系列第五颗卫星HY-2E也于2026年7月成功发射,进一步提升了我国自主海洋测高卫星体系的观测能力[18]。

SAR测高通过延迟—多普勒处理,实现了沿轨方向的精细分辨,已成为当前海洋、极地及内陆水体高程观测的重要技术手段。然而,SAR测高仍属于沿轨一维观测,对海洋和内陆水体二维空间连续变化的观测存在不足,因此,发展具备二维观测能力的新型测高技术成为下一阶段目标。

2.3　宽刈幅干涉雷达测高

传统星下点高度计受轨道间距和时空采样限制,难以充分观测约100 km以下空间尺度的二维海洋信号[56],且陆地上大量地表水体信息无法被有效观测。为突破这一局限,基于雷达干涉测量技术的宽刈幅测高方案逐步形成并不断完善[57]。2022年12月,由NASA与CNES联合主导的首颗Ka波段宽刈幅干涉雷达测高任务——地表水和海洋地形卫星(surface water and ocean topography,SWOT)成功发射,标志着雷达测高技术向二维高分辨率观测迈出了关键一步[58-60]。如图1(c)所示,SWOT的核心载荷为Ka波段雷达干涉仪(Ka-band radar interferometer,KaRIn),利用约10 m长基线两端的天线同步接收雷达回波,通过干涉相位差反演目标高程,可获取星下点两侧各约50 km刈幅内的二维水面高程信息;SWOT同时搭载Ku/C双频星下点雷达高度计用于补充星下点沿轨观测并支持电离层延迟改正[61]。

在海洋观测方面,SWOT主要目标是观测约15～150 km尺度的海面高变化[62],显著增强了对涡旋、锋面和内潮等海洋过程的观测能力[63,64]。近期

研究表明,SWOT 首次从全球尺度揭示了传统星下点测高难以解析的亚中尺度(1～100 km)海洋动力过程,包括亚中尺度涡旋和非线性内孤立波,为揭示海洋中小尺度动力过程及其能量交换提供了新的全球观测手段[65]。此外,有研究基于一年 SWOT 数据构建了全球海洋重力场模型,空间分辨率接近 8 km,可识别深海丘陵、小型海山和大陆边缘海底峡谷等传统卫星测高难以解析的精细海底构造,显著拓展了卫星测高在海洋重力场和海底地形研究中的应用能力[66]。

在陆地水文方面,SWOT 主要面向全球宽度超过 100 m(目标为 50 m)的河流以及面积大于 250 m×250 m 的湖泊、水库和湿地,可同步获取水面高程、水域范围、河宽和水面坡度,并为湖库蓄水量变化和河流流量估算提供数据支持[67-70]。近期研究展示了 SWOT 在水文观测方面的独特优势:依托 SWOT 对河宽和水面高程的同步观测能力,有学者在全球 126 674 个河段上刻画了活动河道几何形态并估算月尺度河流水储量变化,首次建立了近全球尺度的河流水储量变化观测记录[71];此外,有研究利用 SWOT 宽刈幅测高数据分析了 3 172 条沿海河流的潮汐传播特征,识别出超过 16.5 万 km 受潮汐影响的河段,并首次构建了全球河流潮汐影响范围图谱[72]。

我国于 2016 年利用天宫二号空间实验室完成了国际上首次星载宽刈幅雷达高度计在轨试验,采用 Ku 波段小入射角和短基线干涉技术,实现了单侧宽刈幅二维海面高程测量[18]。在此基础上,我国正在开展新一代宽刈幅干涉雷达测高任务的方案论证[73]。

宽刈幅干涉雷达测高突破了传统星下点高度计跨轨方向采样稀疏的限制,为中小尺度海洋动力过程研究和全球陆地水体监测提供了新的技术手段。然而,其测量精度易受干涉基线与姿态误差、相位误差、长波误差、湿对流层延迟以及海面和地表散射噪声等因素影响,且在近岸和复杂地形区域还可能出现地形叠掩、水陆混合回波等干扰问题,相关误差改正与质量控制方法仍在不断完善发展中[74-77]。

2.4 激光测高

尽管雷达测高已广泛应用于极地冰盖和海冰变化监测,但其测量结果反映的是雷达足迹范围内的平均高程,较大的观测足迹引发的回波波形畸变和地表坡度的影响限制了其在冰盖、冰架以及陆地等区域的高程测量能力。针对这一问题,激光测高技术在近年来发展迅速,已成为冰冻圈监测、内陆水体水位观测和陆地高程获取等领域的重要手段。

2003 年,NASA 发射冰、云和陆地高程卫星(Ice,cloud and land elevation satellite,ICESat),其搭载地球科学激光测高系统(Geoscience laser altimeter system,GLAS)开展全波形激光测高。GLAS 采用 1 064 nm 波段激光进行地表高程测量,532 nm 波段激光用于大气探测[78]。如图 2(a)所示,ICESat 激光足迹约 70 m,沿轨采样间距约 170 m,可实现约 0.15 m 的高程测量精度[79],显著推动了冰盖高程变化和海冰厚度监测[80-83]。例如,研究人员基于 ICESat 数据估算了 2003—2008 年北冰洋海冰厚度和体积变化,揭示季节冰在冬季面积和体积上均超过多年冰的重要转变[84]。同时,ICESat 较小的激光足迹拓展了内陆水体观测,已有研究利用其获取了青藏高原 154 个湖泊的水位变化,扩大了以往 LRM 测高任务难以覆盖的中小湖泊观测范围[85]。

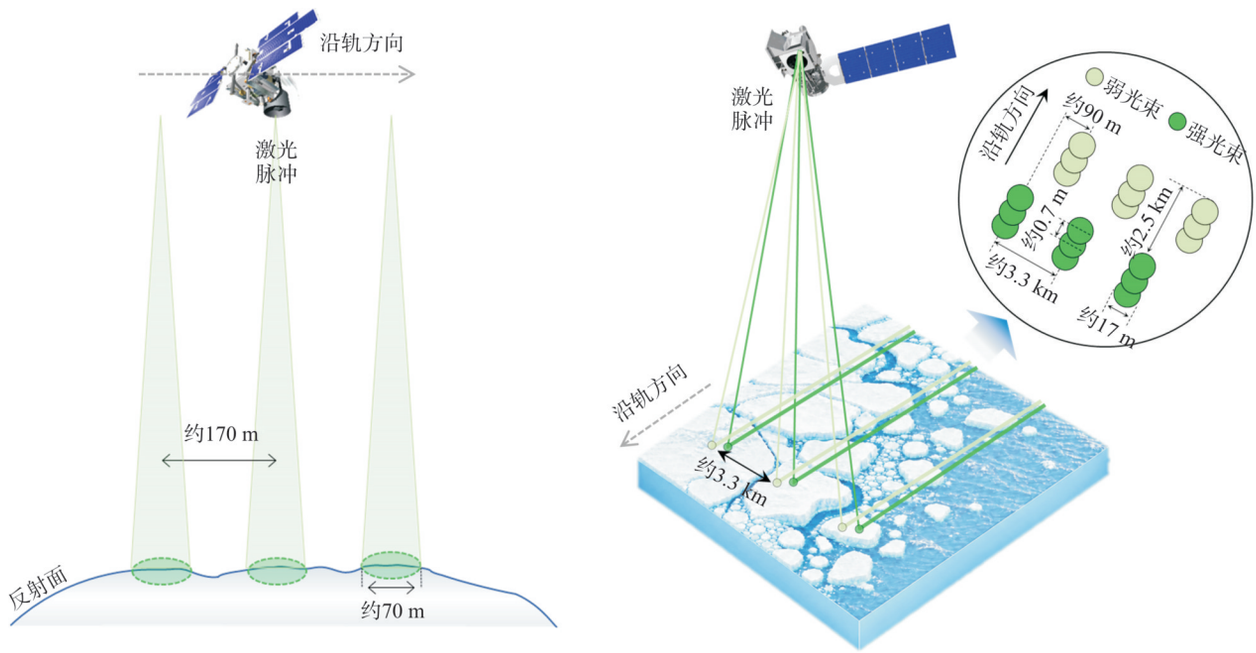
2018 年发射的 ICESat-2 继承了 ICESat 的任务,标志着星载激光测高由全波形体制进入光子计数时代,其搭载着先进地形激光测高系统(advanced topographic laser altimeter system, ATLAS)。如图 2(b)所示,ATLAS 采用 6 波束光子计数观测体制,激光足迹约 17 m,沿轨采样间距约 0.7 m[86,87],显著提高了空间采样密度和小尺度目标观测能力。ICESat-2 不仅延续了冰盖、冰川和海冰变化监测,其 532 nm 激光还可穿透冰面融水,实现融水深度反演,为冰盖表面融水储量估算提供新的观测手段[88]。此外,其小足迹和高密度采样显著增强了中小水体观测能力,研究表明 ICESat-2 可获取宽度仅约 6 m 河流的有效水位[89];同时,其多波束观测还可反演河流水面坡度,为河流流量估算和水动力过程研究提供新的观测信息[90]。

总体而言,激光测高凭借小足迹和高沿轨采样密度,在冰冻圈变化监测、内陆水体水位观测和陆地高程获取等方面形成了独特优势,但其信号易受云覆盖和大气条件影响,全球连续观测能力存在一定局限。

3 未来测高卫星计划与趋势

3.1 业务化星下点雷达测高任务

测高技术不断发展的同时,星下点雷达测高仍承担全球海平面长期监测和业务化海洋观测的重要任务。全球平均海平面变化研究依赖 T/P 及其后续卫星系列形成的连续高精度海面高观测序列,海洋分析和预报也需要稳定、近实时的沿轨海面高度数



(a) ICESat/GLAS　　(b) ICESat-2/ATLAS

图 2　激光测高观测原理示意图

Fig. 2　Schematic of Laser Altimetry

据。因此,未来业务化观测仍需由多任务测高卫星共同维持。Sentinel-6B 完成与 Sentinel-6A 的串飞定标后,将接续 T/P 参考轨道的全球高精度海面高观测序列,预计运行至 2030 年代初;此后拟由 Sentinel-6 下一代任务进一步接续,目前其轨道和任务方案仍在论证。Sentinel-3 系列将通过 C、D 两颗后续星维持双星业务观测至 2030 年代。其中,Sentinel-3C 计划于 2026 年 9 月发射并逐步接替 Sentinel-3A,Sentinel-3D 预计于 2028 年以后实施[91,92]。HY-2E 之后的 HY-2F 卫星也规划搭载 SAR 高度计,进一步延续 HY-2 系列海洋动力环境观测[18]。未来星下点雷达测高任务仍将延续海面高长期序列,SAR 测高将成为重要技术方向,进一步提升近岸和内陆水体等复杂区域的测量能力。同时,星下点任务可为宽刈幅等新型测高任务提供交叉定标基准,是全球海平面长期变化监测和业务化海洋观测的重要组成部分。

3.2　极地冰雪多频雷达测高任务

尽管现有 SAR/SARIn 测高任务已显著提升极地冰雪环境观测能力,但雷达回波仍易受到积雪结构、信号穿透和冰面粗糙度等因素影响,增加海冰干舷、积雪深度和海冰厚度反演的不确定性。为提高极地冰雪参数的综合观测能力,未来极地雷达测高任务将向多频联合观测方向发展。ESA 正在推进 CryoSat-2 的接续任务——哥白尼极地冰雪地形测高任务(copernicus polar ice and snow topography altimeter, CRISTAL)。该任务由 CRISTAL-A 和 CRISTAL-B 两颗同型卫星接续实施,其中首星 CRISTAL-A 预计于 2028 年前后发射,CRISTAL-B 计划在其后接替运行。CRISTAL 继承 CryoSat-2 的 SAR/SARIn 测高技术,并采用 Ku/Ka 双频联合观测,利用不同频段电磁波对积雪和冰层穿透及散射特性的差异,提高积雪深度、海冰厚度和冰盖高程的监测能力[93]。此外,CRISTAL 还将为内陆水体和近岸等复杂区域提供高分辨率 SAR 测高数据。

3.3　下一代多波束激光测高任务

ICESat-2 显著提高了冰盖、海冰和陆地表面的沿轨高分辨率观测能力,但其观测仍以有限数量的沿轨剖面为主,跨轨方向覆盖相对稀疏。为提高激光测高的空间覆盖能力,NASA 正在推进地球动力学大地测量探测任务(earth dynamics geodetic explorer, EDGE),计划最早于 2030 年发射。EDGE 将搭载全球首个星载成像/条带测绘激光测高系统,其 40 波束在空间上组成 5 个宽度 120 m 的微型条带(轨间间距约 1.2 km),实现由沿轨剖面观测向高密度条带化空间观测的拓展,可提供比以往星载激光高度计更密集的空间覆盖。相较于 ICESat-2,EDGE 将进一步加强对陆地生态系统三维结构及冰冻圈(冰川、冰盖、海冰)表面地形的观测能力[20]。我国也在规划陆海激光测绘卫星(land-ocean laser

mapping satellite，LOLM），其概念方案拟搭载 128 波束激光测高系统，重点提升海岸带、潮滩、岛礁及浅水区域的高精度三维地形测绘能力[94]。

3.4 测高卫星组网计划

SWOT 任务验证了宽刈幅干涉雷达测高获取海洋和陆地水体二维高程的能力，但约 21 天的重复周期仍限制了对快速变化过程的连续监测。为突破时空采样瓶颈，测高卫星组网是一种可行方案，当前主要包括两种技术路线：一是基于 SWOT 测高技术构建宽刈幅双星星座，二是基于传统星下点测高技术构建小型测高卫星星座。

在宽刈幅星座方向，CNES 联合工业界基于 SWOT 测高技术提出并论证了新型的宽刈幅测高（wide-swath altimetry，WiSA）概念。WiSA 面向业务化海洋学和水文学，相较于 SWOT 更简单、体积更小且更经济[95]。据此，ESA 正在推进 Sentinel-3 下一代地形测量任务（Sentinel-3 next generation topography，S3 NG-T）。S3 NG-T 计划采用双星构型，每颗卫星搭载一台 Ku/C 双频星下点 SAR 高度计和 Ka 波段宽刈幅高度计 SAOOH（Swath Altimeter for Operational Oceanography and Hydrology）[96]。SAOOH 继承 SWOT/KaRIn 的宽刈幅干涉测高技术，但采用约 3 m 短基线，在星下点两侧分别形成约 50 km 宽的观测刈幅[97]。双星组合有望使全球海洋中约 68% 的 50 km 尺度特征获得平均不超过 5 天的重访时间[95]。

在小型测高卫星星座方向，CNES 及相关机构提出了面向内陆地表水的 SMASH（SMall Altimetry Satellites for Hydrology）小卫星星座概念[98]。其方案规划采用约 10 颗搭载紧凑型 Ka 波段 LRM 雷达高度计的小卫星，并针对内陆水体回波特性进行优化，通过星座协同实现全球河流、湖泊和水库虚拟站点（即卫星轨迹与水体交汇处的固定水位监测位置）的日尺度水位观测[99]。SMASH 的设计目标是观测宽度超过 50 m 的河流和面积大于 100 m×100 m 的湖泊，预计覆盖约 3 万个虚拟站点，并将数据延迟控制在数小时量级[100]。SMASH 与 S3 NG-T 星座在时空采样方面具有较强互补性，前者具有高时间采样频率和较低空间采样频率，后者则具有高空间覆盖能力，但时间采样频率相对 SMASH 较低，二者结合可实现更优的时空覆盖[101]。

3.5 未来发展趋势

综合未来测高任务计划，卫星测高正由星下点沿轨观测为主的传统模式，向高频及多频联合观测、二维成像、多星组网和多任务协同发展。（1）Ka 波段测高与多频联合观测将得到更广泛应用。SWOT 和 S3 NG-T 采用 Ka 波段宽刈幅与 Ku/C 双频星下点协同观测，SMASH 采用 Ka 波段提高内陆水体观测能力，CRISTAL 则通过 Ku/Ka 双频观测增强冰雪参数反演能力。（2）观测方式将由一维沿轨观测向二维面状和条带成像观测发展。宽刈幅干涉雷达测高和多波束激光测高将进一步提高海洋、近岸、内陆水体和冰冻圈的空间覆盖和识别能力。（3）任务组织形式将由单星向多星组网发展。通过双星或多星组网缩短重访周期，是提高测高时间分辨率和连续监测能力的重要途径。（4）不同功能任务将进一步协同观测。星下点测高任务、宽刈幅测高任务、多频雷达和多波束激光测高任务各有侧重，通过优势互补共同提升观测精度、时空覆盖和长期一致性。为适应这一趋势，未来卫星测高数据处理需要由单星独立处理转向多星协同处理，并加强跨任务定标、时空匹配、多源融合以及海量数据的智能化处理。

4 总结与展望

历经五十多年发展，卫星测高已形成涵盖低分辨率脉冲有限型雷达测高、合成孔径雷达测高、合成孔径雷达干涉测高、宽视幅干涉雷达测高和激光测高的多体制技术体系。以 T/P 系列、ERS 系列、SARAL/AltiKa、CryoSat-2、Sentinel-3/6、SWOT、ICESat/ICESat-2 及中国 HY-2 系列等为代表的典型任务，不仅构建了超过三十年的全球海面高度连续观测序列，还将观测范围不断拓展至近岸、内陆水体、海冰、冰盖和陆地表面。

展望未来，业务化星下点雷达测高任务将持续维系长期观测序列，宽刈幅测高将逐步由科学试验走向业务化运行，Ku/Ka 双频 SAR 测高和新型条带成像激光测高任务将进一步提升冰冻圈和陆地高程的精细观测能力，多星组网则将有效提高海洋与水文过程监测的时空覆盖和时间分辨率，我国也将进一步完善自主综合测高观测体系。卫星测高正在由传统星下点一维测量逐步迈向 Ka 波段及多频联合观测、二维成像、星座组网和多任务协同的新阶段。通过不同测高任务之间的优势互补，将逐步形成面向海洋、内陆水体、冰冻圈和陆地表面的综合观测体系，实现对其变化更加连续、精细和系统地监测，为海洋环境监测、全球变化研究、水资源管理和可持续发展等提供更加可靠的时空信息支撑。

参 考 文 献

[1] 翟国君，黄谟涛，欧阳永忠，等. 卫星测高原理及其

应用[J]. 海洋测绘, 2002, 22(1): 57-62

[2] 李建成, 宁津生, 晁定波, 等. 卫星测高在大地测量学中的应用及进展[J]. 测绘科学, 2006, 31(6): 19-23

[3] Chelton D B, Ries J C, Haines B J, et al. Satellite Altimetry[M]//Fu L L, Cazenave A. Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications. San Diego: Academic Press, 2001: 1-131

[4] Abdalla S, Abdeh Kolahchi A, Ablain M, et al. Altimetry for the Future: Building on 25 Years of Progress [J]. Advances in Space Research, 2021, 68(2): 319-363

[5] 金涛勇, 刘文轩, 姜卫平, 等. 卫星测高确定全球海平面变化研究进展[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(3): 1-8

[6] 姜卫平. 卫星测高技术在大地测量学中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2000

[7] 李建成, 宁津生, 晁定波. 卫星测高在物理大地测量应用中的若干问题[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1996,21(1): 9-14

[8] 李建成, 金涛勇. 卫星测高技术及应用若干进展[J]. 测绘地理信息, 2013, 38(4): 1-8

[9] 孙中苗, 管斌, 翟振和, 等. 海洋卫星测高及其反演全球海洋重力场和海底地形模型研究进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 923-934

[10] 胡敏章, 张胜军, 金涛勇, 等. 新一代全球海底地形模型 BATWHU2020[J]. 测绘学报, 2020, 49(8): 939-954

[11] 金涛勇, 李建成, 姜卫平, 等. 基于多源卫星测高数据的新一代全球平均海面高模型[J]. 测绘学报, 2011, 40(6): 723-729

[12] 郭金运, 王建波, 胡志博, 等. 由 TOPEX/Poseidon 和 Jason-1/2 探测的 1993—2012 中国海海平面时空变化[J]. 地球物理学报, 2015, 58(9): 3 103-3 120

[13] 姜丽光, 刘俊, 张星星. 基于卫星雷达测高技术的湖库动态监测理论、方法和研究进展[J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 104-114

[14] Rémy F, Parouty S. Antarctic Ice Sheet and Radar Altimetry: A Review[J]. Remote Sensing, 2009, 1(4): 1 212-1 239

[15] Laxon S W, Giles K A, Ridout A L, et al. CryoSat-2 Estimates of Arctic Sea Ice Thickness and Volume[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(4): 732-737

[16] 李国元, 唐新明. 资源三号 02 星激光测高精度分析与验证[J]. 测绘学报, 2017, 46(12): 1 939-1 949

[17] Nerem R S, Beckley B D, Fasullo J T, et al. Climate-Change—Driven Accelerated Sea-Level Rise Detected in the Altimeter Era[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(9): 2 022-2 025

[18] 许可, 蒋茂飞. 海洋卫星雷达测高技术进展[J]. 空间科学学报, 2023, 43(6): 1 036-1 057

[19] Le Traon P Y, Dibarboure G, Lellouche J M, et al. Satellite Altimetry and Operational Oceanography: From Jason-1 to SWOT[J]. Ocean Science, 2025, 21(4): 1 329-1 347

[20] Fricker H A. A Half Century of Satellite Altimetry: A Tale of Quantum Leaps in Knowledge and Understanding of Earth Systems[C]//AGU25 Annual Meeting. New Orleans, LA, USA: American Geophysical Union, 2025

[21] Brown G. The Average Impulse Response of a Rough Surface and Its Applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1977, 25(1): 67-74

[22] Cipollini P, Snaith H. A Short Course on Altimetry [R]. Cork, Ireland: European Space Agency, 2013

[23] Pierson W J. Skylab EREP Investigations Summary [R]. Washington, D C: National Aeronautics and Space Administration, 1978

[24] Stanley H R, Dwyer R E. NASA Wallops Flight Center GEOS-3 Altimeter Data Processing Report[R]. Wallops Island, VA: National Aeronautics and Space Administration, 1980

[25] MacArthur J. Design of the SEASAT-a Radar Altimeter [C]//OCEANS' 76. September 13-15, 1976, Washington, D C, USA. New York: IEEE Press, 2011: 222-229

[26] Bernstein R L, Born G H, Whritner R H. SEASAT Altimeter Determination of Ocean Current Variability [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1982, 87(C5): 3 261-3 268

[27] Mazzega P. The M2 Oceanic Tide Recovered from Seasat Altimetry in the Indian Ocean [J]. Nature, 1983, 302(5 908): 514-516

[28] Sandwell D T, Smith W H F. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS 1 Satellite Altimetry[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102(B5): 10 039-10 054

[29] Fu L L, Christensen E J, Yamarone C A Jr, et al. TOPEX / POSEIDON Mission Overview [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1994, 99(C12): 24 369-24 381

[30] Ducet N, Le Traon P Y, Reverdin G. Global High-Resolution Mapping of Ocean Circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2000, 105(C8): 19 477-19 498

[31] Cazenave A, Nerem R S. Present-Day Sea Level Change: Observations and Causes[J]. Reviews of Geo-

physics, 2004, 42(3): 2003RG000139

[32] Picaut J, Hackert E, Busalacchi A J, et al. Mechanisms of the 1997—1998 El Niño-La Niña, as Inferred from Space-Based Observations[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2002, 107 (C5): 2001JC000850

[33] Lemoine F G, Zelensky N P, Chinn D S, et al. Towards Development of a Consistent Orbit Series for TOPEX, Jason-1, and Jason-2 [J]. Advances in Space Research, 2010, 46(12): 1 513-1 540

[34] Beckley B D, Callahan P S, Hancock Ⅲ D W, et al. On the "Cal-Mode" Correction to TOPEX Satellite Altimetry and Its Effect on the Global Mean Sea Level Time Series [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(11): 8 371-8 384

[35] Verron J, Bonnefond P, Andersen O, et al. The SARAL/AltiKa Mission: A Step Forward to the Future of Altimetry[J]. Advances in Space Research, 2021, 68(2): 808-828

[36] 林明森, 何贤强, 贾永君, 等. 中国海洋卫星遥感技术进展[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 99-112

[37] Vignudelli S, Birol F, Benveniste J, et al. Satellite Altimetry Measurements of Sea Level in the Coastal Zone [J]. Surveys in Geophysics, 2019, 40(6): 1 319-1 349

[38] 高贤文, 金涛勇, 李建成. 兼顾内陆水体水位时空变化特性的合成孔径雷达波形重跟踪算法[J]. 测绘学报, 2024, 53(2): 217-230

[39] Raney R K. The Delay/Doppler Radar Altimeter[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1 578-1 588

[40] Tournadre J, Bouhier N, Boy F, et al. Detection of Iceberg Using Delay Doppler and Interferometric Cryosat-2 Altimeter Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 212: 134-147

[41] Wingham D J, Francis C R, Baker S, et al. CryoSat: A Mission to Determine the Fluctuations in Earth's Land and Marine Ice Fields[J]. Advances in Space Research, 2006, 37(4): 841-871

[42] Helm V, Humbert A, Miller H. Elevation and Elevation Change of Greenland and Antarctica Derived from CryoSat-2[J]. The Cryosphere, 2014, 8(4): 1 539-1 559

[43] McMillan M, Shepherd A, Sundal A, et al. Increased Ice Losses from Antarctica Detected by CryoSat-2[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(11): 3 899-3 905

[44] Sandwell D T, Müller R D, Smith W H F, et al. New Global Marine Gravity Model from CryoSat-2 and Jason-1 Reveals Buried Tectonic Structure[J]. Science, 2014, 346(6 205): 65-67

[45] Andersen O B, Rose S K, Abulaitijiang A, et al. The DTU21 Global Mean Sea Surface and First Evaluation [J]. Earth System Science Data, 2023, 15(9): 4 065-4 075

[46] Villadsen H, Andersen O B, Stenseng L, et al. CryoSat-2 Altimetry for River Level Monitoring—Evaluation in the Ganges-Brahmaputra River Basin[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 168: 80-89

[47] Dinardo S, Fenoglio-Marc L, Buchhaupt C, et al. Coastal SAR and PLRM Altimetry in German Bight and West Baltic Sea[J]. Advances in Space Research, 2018, 62(6): 1 371-1 404

[48] Jiang Liguang, Schneider R, Andersen O B, et al. CryoSat-2 Altimetry Applications over Rivers and Lakes[J]. Water, 2017, 9(3): 211

[49] Taburet N, Zawadzki L, Vayre M, et al. S3MPC: Improvement on Inland Water Tracking and Water Level Monitoring from the OLTC Onboard Sentinel-3 Altimeters[J]. Remote Sensing, 2020, 12(18): 3055

[50] Cheng Yu, Zhang Xingxing, Yao Zhijun. On the Performance of Sentinel-3 Altimetry over High Mountain and Cascade Reservoirs Basins: Case of the Lancang and Nu River Basins[J]. Remote Sensing, 2023, 15(7): 1769

[51] Feng Hui, Egido A, Vandemark D, et al. Exploring the Potential of Sentinel-3 Delay Doppler Altimetry for Enhanced Detection of Coastal Currents Along the Northwest Atlantic Shelf[J]. Advances in Space Research, 2023, 71(1): 997-1 016

[52] Boy F, Crétaux J F, Boussaroque M, et al. Improving Sentinel-3 SAR Mode Processing over Lake Using Numerical Simulations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5220518

[53] Gao Xianwen, Jin Taoyong, Deng Xiaoli, et al. A Multi-parameter Optimized Sub-waveform Retracker for Monitoring River Water Levels Using SAR Altimetry[J]. Remote Sensing of Environment, 2025, 327: 114838

[54] Donlon C J, Cullen R, Giulicchi L, et al. The Copernicus Sentinel-6 Mission: Enhanced Continuity of Satellite Sea Level Measurements from Space[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 258: 112395

[55] 翟振和, 孙中苗, 马健, 等. 中国编队海洋测绘卫星数据反演海域重力扰动矢量及性能分析[J]. 测绘学报, 2025, 54(4): 714-724

[56] Ballarotta M, Ubelmann C, Pujol M I, et al. On the Resolutions of Ocean Altimetry Maps[J]. Ocean Science, 2019, 15(4): 1 091-1 109

[57] Fu L L, Rodriguez E. High-Resolution Measurement

of Ocean Surface Topography by Radar Interferometry for Oceanographic and Geophysical Applications[M]// The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics. American Geophysical Union, 2004: 209-224

[58] Durand M, Fu L L, Lettenmaier D P, et al. The Surface Water and Ocean Topography Mission: Observing Terrestrial Surface Water and Oceanic Submesoscale Eddies[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 766-779

[59] Fjørtoft R, Gaudin J M, Pourthié N, et al. KaRIn on SWOT: Characteristics of Near-Nadir Ka-Band Interferometric SAR Imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(4): 2 172-2 185

[60] Fu L L, Ubelmann C. On the Transition from Profile Altimeter to Swath Altimeter for Observing Global Ocean Surface Topography[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 560-568

[61] Fu L L, Pavelsky T, Cretaux J F, et al. The Surface Water and Ocean Topography Mission: A Breakthrough in Radar Remote Sensing of the Ocean and Land Surface Water[J]. Geophysical Research Letters, 2024, 51(4): e2023GL107652

[62] Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO. DAAC). Surface Water and Ocean Topography (SWOT)[EB/OL]. [2026-08-21]. https://podaac.jpl.nasa.gov/SWOT

[63] Morrow R, Fu L L, Ardhuin F, et al. Global Observations of Fine-Scale Ocean Surface Topography with the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 232

[64] Wang Jinbo, Lucas A J, Stalin S, et al. SWOT Mission Validation of Sea Surface Height Measurements at Sub-100 Km Scales[J]. Geophysical Research Letters, 2025, 52(11): e2025GL114936

[65] Archer M, Wang Jinbo, Klein P, et al. Wide-Swath Satellite Altimetry Unveils Global Submesoscale Ocean Dynamics[J]. Nature, 2025, 640(8 059): 691-696

[66] Yu Yao, Sandwell D T, Dibarboure G. Abyssal Marine Tectonics from the SWOT Mission[J]. Science, 2024, 386(6 727): 1 251-1 256

[67] Biancamaria S, Lettenmaier D P, Pavelsky T M. The SWOT Mission and Its Capabilities for Land Hydrology [M]//Remote Sensing and Water Resources. Cham: Springer International Publishing, 2016: 117-147

[68] Solander K C, Reager J T, Famiglietti J S. How well will the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission Observe Global Reservoirs? [J]. Water Resources Research, 2016, 52(3): 2 123-2 140

[69] Durand M, Gleason C J, Pavelsky T M, et al. A Framework for Estimating Global River Discharge from the Surface Water and Ocean Topography Satellite Mission[J]. Water Resources Research, 2023, 59(4): e2021WR031614

[70] Jiang Liguang, Nielsen K, Andersen O B, et al. SWOT Reveals Detailed Dynamics of Longitudinal River Slope in the Missouri River Basin[J]. Geophysical Research Letters, 2025, 52(14): e2025GL115953

[71] Cerbelaud A, Wade J, David C H, et al. Wide-Swath Altimetry Maps Bank Shapes and Storage Changes in Global Rivers[J]. Nature, 2026, 651(8 106): 666-671

[72] Hart-Davis M G, Scherer D, Schwatke C, et al. Observing the Tidal Pulse of Rivers from Wide-Swath Satellite Altimetry[J]. Nature, 2026, 652(8 109): 371-378

[73] Chen Ge, Tang Junwu, Zhao Chaofang, et al. Concept Design of the "Guanlan" Science Mission: China's Novel Contribution to Space Oceanography[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 194

[74] Jin Taoyong, Zhou Mao, Zhang Huan, et al. Analysis of Vertical Deflections Determined from One Cycle of Simulated SWOT Wide-Swath Altimeter Data[J]. Journal of Geodesy, 2022, 96(4): 30

[75] Shi Jiasheng, Jin Taoyong, Zhou Mao, et al. Enhancing the Reconstruction of Mesoscale Signal Mapped with Surface Water and Ocean Topography Mission [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2025, 63: 4208309

[76] Müller F L, Dettmering D, Seitz F. First Arctic-Wide Assessment of SWOT Swath Altimetry with ICESat-2 over Sea Ice[J]. The Cryosphere, 2026, 20(1): 397-409

[77] Normandin C, Frappart F, Moisy C, et al. To Which Extent the Surface Water Ocean Topography (SWOT) Mission Is Currently Able to Monitor Water Surface Elevation and Extent on the French Lakes?[J]. Earth and Space Science, 2026, 13(6): e2025EA004655

[78] Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, et al. Overview of the ICESat Mission[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(21): 2005GL024009

[79] Wang Xianwei, Cheng Xiao, Gong Peng, et al. Earth Science Applications of ICESat/GLAS: A Review[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(23): 8 837-8 864

[80] Kwok R, Cunningham G F. ICESat over Arctic Sea Ice: Estimation of Snow Depth and Ice Thickness[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2008, 113(C8): 2008JC004753

[81] Pritchard H D, Arthern R J, Vaughan D G, et al. Extensive Dynamic Thinning on the Margins of the Green-

land and Antarctic Ice Sheets [J]. Nature, 2009, 461 (7 266): 971-975

[82] Simard M, Pinto N, Fisher J B, et al. Mapping Forest Canopy Height Globally with Spaceborne LiDAR[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2011, 116(G4): 2011JG001708

[83] Zwally H J, Li Jun, Robbins J W, et al. Mass Gains of the Antarctic Ice Sheet Exceed Losses[J]. Journal of Glaciology, 2015, 61(230): 1 019-1 036

[84] Kwok R, Cunningham G F, Wensnahan M, et al. Thinning and Volume Loss of the Arctic Ocean Sea Ice Cover: 2003—2008[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2009, 114(C7): 2009JC005312

[85] Phan V H, Lindenbergh R, Menenti M. ICESat Derived Elevation Changes of Tibetan Lakes between 2003 and 2009[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 17: 12-22

[86] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science Requirements, Concept, and Implementation [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 260-273

[87] Neumann T A, Martino A J, Markus T, et al. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 Mission: A Global Geolocated Photon Product Derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111325

[88] Fricker H A, Arndt P, Brunt K M, et al. ICESat-2 Meltwater Depth Estimates: Application to Surface Melt on Amery Ice Shelf, East Antarctica[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(8): e2020GL090550

[89] Li Hui, Zhang Jinyong, Cai Xiaobin, et al. On the Capacity of ICESat-2 Laser Altimetry for River Level Retrieval: An Investigation in the Ohio River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: 130277

[90] Scherer D, Schwatke C, Dettmering D, et al. ICESat-2 Based River Surface Slope and Its Impact on Water Level Time Series from Satellite Altimetry[J]. Water Resources Research, 2022, 58(11): e2022WR032842

[91] Nieke J, Dransfeld S, Donlon C, et al. SENTINEL-3 A, B, C, D: Development, Commissioning and Operations of an Environmental and Climate Monitoring Observation System[C]//IGARSS 2019 —2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. July 28-August 2, 2019. Yokohama, Japan. IEEE, 2019: 5 784-5 785

[92] Pérez-López F, Casonato G, Weber J P, et al. Re-Engineering A Ground Segment —Preparing Sentinel-3 for the Future[C]//18th International Conference on Space Operations (SpaceOps 2025). Montreal, Canada, 2025

[93] Kern M, Cullen R, Berruti B, et al. The Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimeter (CRISTAL) High-Priority Candidate Mission[J]. The Cryosphere, 2020, 14(7): 2 235-2 251

[94] Yao Jiaqi, Mo Fan, Xu Nan, et al. The Chinese Laser Altimetry Satellite Will Significantly Enhance the 3D Mapping Capability of Global Coastal Zones[J]. The Innovation Geoscience, 2025, 3(1): 100121

[95] Benkiran M, Le Traon P Y, Dibarboure G. Contribution of a Constellation of Two Wide-Swath Altimetry Missions to Global Ocean Analysis and Forecasting [J]. Ocean Science, 2022, 18(3): 609-625

[96] Lalau N, Vaujour T, Ablain M, et al. Sentinel-3 Next Generation Topography Mission Performance and Uncertainty Assessment (S3NGT-MPUA) [C]//2025 SWOT Science Team Meeting. Arcachon, France: SWOT Science Team, 2025

[97] Houpert A, Demeestere F, Phalippou L, et al. Performances of the Swath Altimeter SAOOH on Board the S3NG-T Mission [C]//Living Planet Symposium 2025. Vienna, Austria: European Space Agency, 2025

[98] David C H, Blumstein D, Biancamaria S. Capturing River Dynamics with Observations from SMASH[C]// Frontiers in Hydrology 2022. San Juan, Puerto Rico, 2022

[99] Biancamaria S, Calmant S, Frappart F, et al. SMASH: A Constellation of Small Altimetry Satellites to Monitor Daily Inland Surface Waters[C]//Europe arXivan Geosciences Union General Assembly 2024 (EGU24). Vienna, Austria, 2024

[100] Benveniste J. Altimetric Nanosatellite Constellation for Daily Monitoring of Continental Water Surfaces[C]// 45th COSPAR Scientific Assembly. Busan, Republic of Korea, 2024

[101] Blumstein D, Biancamaria S, Guérin A, et al. A Potential Constellation of Small Altimetry Satellites Dedicated to Continental Surface Waters (SMASH mission) [C]//AGU Fall Meeting 2019. San Francisco, CA, USA: American Geophysical Union, 2019

修回日期:2026-09-08

第一作者:金涛勇,博士,教授,主要从事卫星大地测量理论方法及其应用研究。E-mail:tyjin@sgg.whu.edu.cn