0254-6124/2023/43(6)-1036-22 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

XU Ke, JIANG Maofei. Advance in Ocean Satellite Radar Altimetry Technology (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(6): 1036–1057. DOI:10.11728/cjss2023.06.2023-06-yg14

海洋卫星雷达测高技术进展*

许 可 蒋茂飞

(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

摘 要 雷达高度计是一种主动式的微波遥感器，可以提供全球海面高度、有效波高和海面风速数据，利用雷达高度计测得的数据可以进一步用于海洋动力学、海面地形、海洋重力异常和海底地形等方面的研究。经过近50年的发展，雷达测高技术已取得巨大进展，从载荷设计、数据处理到实际应用都积累了大量成果，雷达测高数据不仅用于海洋研究，还广泛用于内陆水域水位变化、海冰厚度变化、冰川质量平衡和异常气候影响等方面研究。本文根据雷达测高技术的基本原理，分析了海洋卫星雷达测高技术发展的现状，并对未来的发展进行了展望。

关键词 海洋卫星，卫星测高，雷达高度计，海面高度

中图分类号 P414

Advance in Ocean Satellite Radar Altimetry Technology

XU Ke JIANG Maofei

(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract Radar altimeter is an active microwave remote sensor, which is able to provide global Sea Surface Height (SSH), Significant Wave Height (SWH) and sea surface wind speed measurements. Radar altimetry data can be further used for study of ocean dynamics, sea surface topography, marine gravity anomalies, seafloor topography, global and regional sea level changes, *etc.* After decades of development, satellite radar altimetry has made great progress, from instrument design, data processing to application. Up to now, more than 20 radar altimetry satellites have been launched in the world. Radar altimetry data can be used not only for oceanographic research, but also widely used for inland water level changes, sea ice thickness changes, glacier mass balance and abnormal climate impacts. This paper mainly analyzes the basic principles, current development status and typical applications of satellite radar altimetry technology, and presents the prospects for future development.

Key words Ocean satellite, Satellite altimetry, Radar altimeter, Sea surface height

* 国家自然科学基金项目资助（41906199）

2023-10-17 收到原稿，2023-10-29 收到修定稿

E-mail：xuke@mirslab.cn；jiangmaofei@mirslab.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

0　引言

雷达高度计是一种主动式的微波遥感器, 其通过向海面发射电磁波和接收海面返回的回波, 测量卫星至海面的高度、海面有效波高和后向散射系数, 通过后向散射系数可以反演海面风速。卫星雷达测高所获取的高精度海洋观测信息, 为海洋学、地球物理、大地测量学、大气物理及全球气候变化等领域的研究与应用提供了稳定、可靠、连续的数据源, 促进了人类对海洋的认知。卫星测高数据已经成为全球气候观测系统 (Global Climate Observing System, GCOS) 和全球大地测量观测系统 (Global Geodetic Observing System, GGOS) 的重要组成部分。

美国著名大地测量学家 Kaula 在 1969 年首次提出利用星载雷达高度计对全球海洋进行测量的构想[1]。从 20 世纪 70 年代开始, 国际上先后发射了一系列雷达测高卫星, 用于海面高度、海面有效波高、海面风速的测量, 进一步应用于海洋环流[2,3]、中尺度涡[4,5]、全球和区域性海平面变化[6,7]、海洋短波重力场[8,9]、海底地形[10,11]、海洋潮汐[12,13]、冰盖高程[14,15]、海冰厚度[16,17]、内陆水位[18,19] 等方面的研究。表 1 给出了目前已发射的雷达测高卫星。

本文论述了雷达测高技术的基本原理以及国内外卫星雷达测高技术发展的现状, 并对未来的发展进行了展望。

1　雷达测高技术基本原理

雷达高度计通过测量卫星到海平面的距离从而进一步获得海面高度数据。测量过程中, 高度计向海面发射脉冲信号, 脉冲被海面反射回接收天线, 通过确定脉冲信号的往返时间来测量卫星到海面的距离为

$$R = \frac{1}{2}ct. \tag{1}$$

其中, c为光速, t为脉冲在高度计和海面之间的往返时间。

在雷达高度计测量过程中, 高度计先向观测目标表面发射微波脉冲信号, 并对回波信号进行跟踪, 确定回波到达时间, 进而可以计算出雷达高度计与被观测目标之间的距离R。在测高卫星中需要配备精密定轨设备, 通过精密定轨可以得到卫星到参考椭球面的高度H。二者相减就可以得到海面到参考椭球面的距离, 即海面高度为

$$h = H - R. \tag{2}$$

在测量过程中, 雷达高度计微波信号传播过程中会经过大气层, 大气层中的干大气、水汽和电离层都会减慢雷达脉冲的传播速度。不同海况对雷达脉冲的反射特性不同, 也会造成卫星到海面距离的海况误差, 并且还存在着潮汐、大气压力等地球物理和环境因素引起的误差。同时, 雷达高度计还存在各项仪器误差等。图 1 给出了雷达高度计测高示例, 卫星到平均海面的实际距离可表示为

$$\bar{R} = R + \sum_{i=1}^{n} \Delta R_i. \tag{3}$$

其中, ΔR_i为各测高误差校正项, n为校正项的个数。校正后的海面高度为

$$h = H - \bar{R} = H - R - \sum_{i=1}^{n} \Delta R_i. \tag{4}$$

目前雷达高度计技术体制主要有三种: 第一种是脉冲有限体制雷达高度计 (Pulse Limited Radar Altimeter, PLR altimeter), 以 T/P, Jason, HY-2 卫星等为代表; 第二种是合成孔径体制雷达高度计 (Synthetic Aperture Radar Altimeter, SAR altimeter), 以 Sentinel-3 和 Sentinel-6 卫星等为代表; 第三种是宽刈幅体制高度计 (Width Swath Ocean Altimeter, WSOA), 以 SWOT 卫星等为代表。

2　国外海洋卫星测高技术的发展

2.1　脉冲有限体制高度计的发展

1973 年 5 月 14 日, 美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 发射了 Skylab 空间站, 卫星轨道高度 425 km, 轨道倾角 50°。Skylab 上搭载的雷达高度计 S-193 为世界上首个雷达高度计, 工作频率在 13.9 GHz, 主要目标是获取海面状态对脉冲响应的影响信息, 以确定雷达高度计的可行性及其测量海面地形的能力。该雷达高度计采用 100 ns 脉冲宽度, 得到了 15 m 的分辨率, 测高精度为 1 m[20], 首次得到了因海底特征引起的海洋大地水准面观测值[21]。虽然 S-193 雷达高度计只能在低轨道段运行, 但是通过 Skylab 还是证实了雷达高度计可以观测出海洋大地水准面的粗略特征 (例如可以观测出主要的海沟), 同时 Skylab 证明

表 1 目前已发射的雷达测高卫星

Table 1 Past and current radar altimetry mission characteristics

卫星名称	研制国家或地区	发射/结束时间	雷达高度计类型	轨道高度/km
Skylab	美国	1973/1974	Ku波段雷达高度计	425
Geos-3	美国	1975/1979	Ku波段雷达高度计	840
Seasat	美国	1978/1978	Ku波段雷达高度计	800
Geosat	美国	1985/1990	Ku波段雷达高度计	800
ERS-1	欧洲	1991/2000	Ku波段雷达高度计	785
T/P	美国/法国	1992/2006	Ku和C波段雷达高度计	1336
ERS-2	欧洲	1995/2011	Ku波段雷达高度计	785
GFO	美国	1998/2008	Ku波段雷达高度计	800
SZ-4	中国	2002/2003	Ku波段雷达高度计	340
Jason-1	美国/法国	2001/2013	Ku和C波段雷达高度计	1336
ENVISAT	欧洲	2002/2012	Ku和S波段雷达高度计	800
Jason-2	美国/法国	2008/2019	Ku和C波段雷达高度计	1336
CryoSat-2	欧洲	2010/—	Ku波段雷达高度计(LRM, SAR, InSAR模式)	717
HY-2A	中国	2011/2022	Ku和C波段雷达高度计	971
SARAL	印度/法国	2013/—	Ka波段雷达高度计	800
Jason-3	美国/法国	2016/—	Ku和C波段雷达高度计	1336
Sentinel-3 A	欧洲	2016/—	Ku和C波段雷达高度计(闭环合成孔径模式)	815
TG-2	中国	2016/2019	Ku波段干涉雷达高度计	378
HY-2B	中国	2018/—	Ku和C波段雷达高度计	971
Sentinel-3 B	欧洲	2018/—	Ku和C波段雷达高度计(闭环合成孔径模式)	815
HY-2C	中国	2020/—	Ku和C波段雷达高度计	957
Sentinel-6 A	欧洲/美国	2020/—	Ku和C波段雷达高度计(开环合成孔径模式)	1336
HY-2D	中国	2021/—	Ku和C波段雷达高度计	957
SWOT	美国/欧洲	2022/—	Ka波段干涉雷达高度计; Ku和C波段底视雷达高度计	890

注 “—”表示目前还处于在轨运行状态。

了测高概念具有强大的生命力和发展潜力,为后续雷达高度计的发展提供了许多宝贵的技术依据。

1975 年 4 月 9 日,美国宇航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,该卫星搭载了雷达高度计、激光反射镜和跟踪信标等设备。GEOS-3 卫星的轨道径向精度达到 2 m,该卫星轨道高度为 840 km,轨道倾角为 115°,卫星轨道的重复周期为 23 天。受存储能力的限制, GEOS-3 只进行了 3 年约 1680 h 的数据采集和观测,直到 1978 年 12 月任务结束。与 Skylab 高度计相比, GEOS-3 的各方面都有了许多重大的改进,例如精度和分辨率均有很大提高,仪器性能有了进一步的改善,全球覆盖范围也有较大提高。GEOS-3 卫星测高数据对于确定全球海洋重力场精细结构及相应的高精度海洋大地水准面具有开拓意义[22],另外也证实了雷达高度计在陆地和海冰也能够提供有效的数据。

1978 年 6 月 28 日,美国 NASA 发射了海洋卫星 Seasat,继续开展对全球海洋的观测任务。Seasat 卫星轨道高度为 800 km,轨道倾角为 108°,卫星轨道的重复周期为 17 天。在脉冲压缩技术上,Seasat 卫星高度计设计了全去斜技术,此后所有高度计都使用了此技术,大大提高了仪器性能。在 Seasat 设计中,增加了回波采样的数量,采样间隔为 3.125 ns。虽然

Seasat 仅仅运行约 3 个月的时间, 但是 Seasat 高度计首次提供了全球范围的海洋环流、波浪和风速[23]。利用 Seasat 测高数据绘制的海洋地形, 科学家可以确定海洋环流和热存储。Seasat 数据还揭示了地球重力场和海底地形的新信息, 找到了小尺度地幔对流的证据[24]。GEOS-3 和 Seasat 卫星的成功实施, 证实了雷达高度计在测量海面和海洋重力场[25], 以及应用地球物理学和海洋学方面的巨大潜力。

1985 年 3 月 12 日, 专门为美国海军研制的大地测量卫星 Geosat 发射成功。Geosat 卫星轨道倾角为 108°, 轨道高度为 800 km。该卫星搭载的雷达高度计工作频率为 13.5 GHz, 海面高度测量精度约为 10 cm。Geosat 卫星的主要目标在于提供高精度、高分辨率的海洋重力数据, 进而增加对于海洋大地水准面的认识, 图 2 给出了利用 Geosat 卫星雷达高度计得到的全球海底地形。同时, Geosat 高度计提供的高纬度测高数据在研究冰川融化、冰盖质量均衡以及绕南极圈环流方面具有很高的价值, 其是第一个提供具

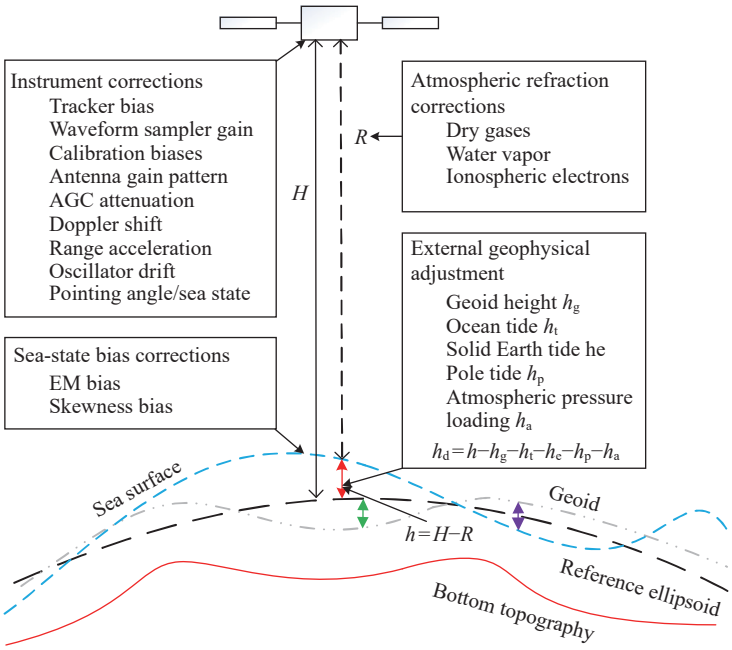


图 1　雷达高度计测高示例

Fig. 1　A schematic of the satellite radar altimetry measurement

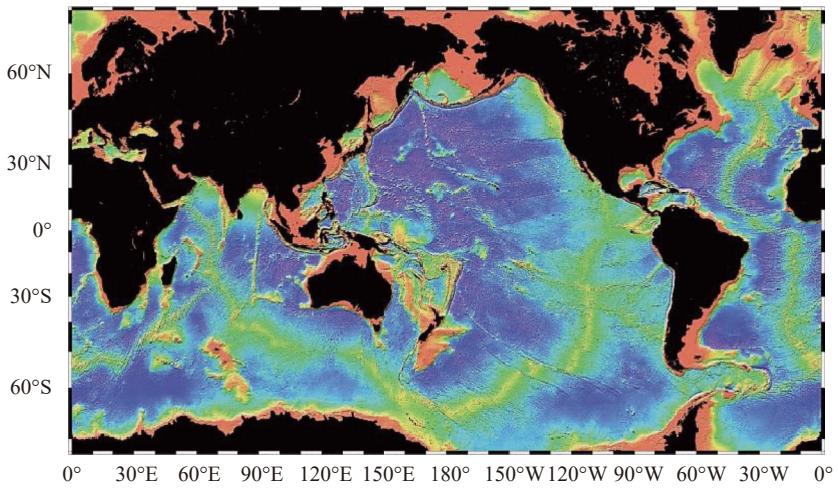


图 2　利用 Geosat 卫星雷达高度计得到的全球海底地形

Fig. 2　Ocean seafloor map created from the Geosat altimetric data

有重复性、长期性、高分辨率、高质量特征的全球海面高数据的卫星，被认为是卫星海洋学和卫星大地测量学的里程碑，标志着卫星测高技术进入了成熟阶段[26]。

1998 年 2 月 10 日，美国海军发射了 Geosat 的后续卫星 (Geosat follow-on, GFO)。GFO 与 Geosat 的精密重复测量任务的轨道相同，旨在实现雷达测高任务的连续性。GFO 卫星主要目的是为美国海军提供实时的海洋地形数据，并为 NOAA 和 NASA 提供测高数据。GFO 搭载的雷达高度计可提供基本的、近实时的海面地形数据，用于确定漩涡、冰缘位置、表面风速和有效波高等信息，同时可为建立海洋模型提供动态输入数据，这些模型有助于理解全球气候变化、长期气候预报机制和行星能量平衡等[27]。GFO 的数据通过同化处理，已广泛用于提供环流和海洋环境结构的数值预测系统中，在科学研究以及全球极端变化事件的监测中发挥了重要作用。

1992 年 8 月 10 日，美国 NASA 和法国国家空间研究中心 (Centre National d′Etudes Spatiales, CNES) 合作研制的 Topex/Poseidon (T/P) 卫星发射成功，该卫星轨道高度为 1336 km，轨道倾角为 66°，轨道重复周期为 10 天。T/P 卫星的载荷分布如图 3 所示，卫星上搭载了两台雷达高度计：一台是由美国 NASA 研制的双频 Topex 雷达高度计，工作在 Ku 波段 (13.575 GHz) 和 C 波段 (5.4 GHz)；另一台是法国 CNES 研制的单频固态雷达高度计 Poseidon-1，工作在 Ku 波段 (13.65 GHz)。Topex 高度计是世界上第一台双频雷达高度计，通过双频同步测量来校正电离层引起的路径延迟，其仪器参数如表 2 所示。另外

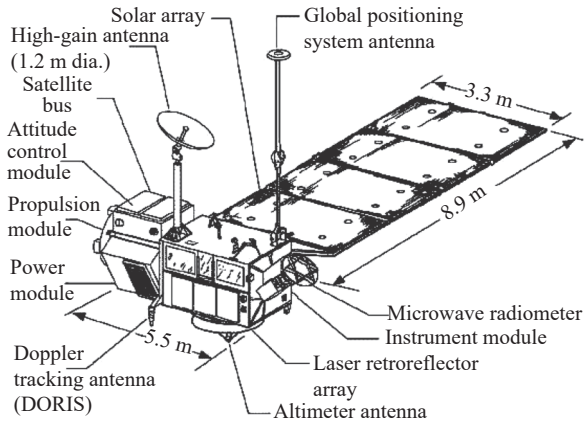


图 3 T/P 卫星载荷分布

Fig. 3 T/P spacecraft illustration

T/P 卫星搭载了三频段 (17.0, 21.0 和 37.0 GHz) 微波辐射计 (Topex Microwave Radiometer, TMR)，用于校正湿对流层引起的路径延迟。T/P 卫星首次搭载了全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 和多普勒无线电定轨定位系统 (Doppler Orbitograph and Radio Positioning Integrated by Satellite, DORIS)，使得 T/P 卫星的径向轨道精度达到了 3～4 cm[28]。

T/P 卫星的主要目标是观测海洋环流及其对气候变化的作用，并为海洋大地测量以及地球物理相关的研究提供数据支持。T/P 卫星以每 10 天一个重复周期提供全球动力海洋地形 (Dynamic Ocean Topography, DOT)；T/P 卫星还用于测量全球洋流变化，确定洋流对气候变化的影响，并提供潮汐、海浪和风等海况信息。2002 年 9 月 15 日，T/P 卫星调整到新的轨道高度，新轨道调整到原地面轨迹的中间位置上，而 T/P 卫星的初期轨道由 Jason-1 取代。

2001 年 12 月 T/P 卫星的后续卫星 Jason-1 发射成功，Jason-1 卫星由 NASA 和 CNES 合作实施，用于接替已经运行了 9 年的 T/P 卫星，继续对全球海平面进行高精度的测量，同时为全球洋流变化和气候研究积累更长时间的数据。图 4 给出了 Jason-1 卫星载荷分布，Jason-1 卫星其主要特征 (轨道、仪器、观测精度等) 与 T/P 基本一致，其中 Poseidon-2 高度计为双频固态雷达高度计，由 CNES 研制，工作频率为 13.575 GHz (Ku 波段) 和 5.3 GHz (C 波段)，可用于电离层校正，其仪器参数如表 3 所示。校正辐射计的工作频率是 18.7, 23.8, 34.0 GHz。相比于 T/P 卫星，Jason-1 卫星搭载了技术水平和精度水平

表 2 Topex 雷达高度计仪器参数

Table 2 Specification of the Topex radar altimeter

参数	参数值
发射频率/GHz	13.575 (Ku), 5.3 (C)
脉冲重复频率/Hz	4200 (Ku), 1220 (C)
脉冲宽度/μs	102.4 (Ku), 102.4 或 32 (C)
带宽/MHz	320 (Ku), 320 或 100 (C)
天线直径/m	1.5
天线波束宽度/(°)	1.1 (Ku), 2.7 (C)
质量/kg	230
功耗/W	237

更高的星载 GPS 接收机、DORIS 接收机以及激光反射器, 用于获取卫星的精密轨道。Jason-1 卫星的海面高度测量精度达到 4 cm, 每 10 天即可实现全球 95% 无冰覆盖海面的精确重复测量[29]。

Jason-2 是 Topex/Poseidon 和 Jason-1 的后续卫星, 主要用于海洋表面地形观测, 因此也称为海洋表面地形任务 (Ocean Surface Topography Mission, OSTM)。Jason-2 卫星于 2008 年 6 月 20 日发射, 由 CNES、NASA、欧洲气象卫星应用组织 (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT) 以及 NOAA 等机构联合实施。其中 Poseidon-3 高度计由 CNES 提供, 与 Poseidon-2 基本特征一致, 但是仪器的噪声功率更低。为了更好地跟踪陆地表面和冰面, Jason-2 高度计采用了新的跟踪算法。Jason-2 卫星的轨道设计与 T/P 和 Jason-1 卫星相同, 其主要目标是实现厘米级海面高度的测定, 进而确定海洋环流和平均海平面的变化

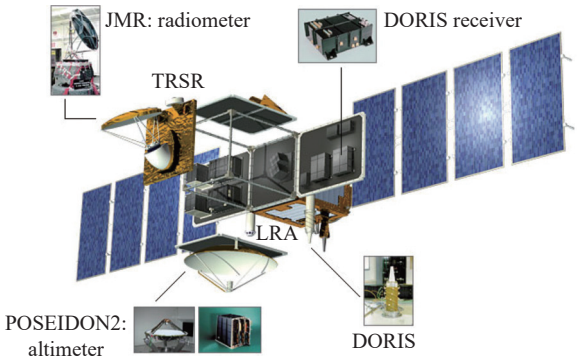


图 4　Jason-1 卫星载荷分布

Fig. 4　Instrument allocations on the Jason-1 spacecraft

趋势, 为天气预报和气候监测等提供科学依据, 该卫星获得海面高精度可达 2.5～3.4 cm[30]。图 5 给出了分别利用 T/P 和 Jason-2 卫星雷达高度计观测到的 1997－1999 年和 2015－2017 年厄尔尼诺事件。

Jason-3 卫星由 CNES, NASA, EUMETSAT 和 NOAA 共同研制, 于 2016 年 1 月 17 日发射, 卫星轨道高度为 1336 km, 轨道倾角为 66°, 轨道重复周期为 10 天。Jason-3 作为 T/P, Jason-1 及 Jason-2 卫星的后续卫星, 将提供与其一致的、连续的、高精度和相同覆盖范围的观测数据。Jason-3 卫星以优于 4 cm 的精度探测全球海面高度, 目的是研究海洋环流、气候变化和海平面上升。图 6 给出了利用 T/P, Jason-1, Jason-2 和 Jason-3 卫星测高数据得到的全球海平面变化[6], 图 7 给出了利用多源卫星测高数据得到的全球海洋潮汐模型[12]。

ERS-1 是欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 发射的第一颗地球观测卫星, 于 1991 年 7 月 17 日发射进入太阳同步轨道, 轨道高度为 785 km, 轨

表 3　Poseidon-2 雷达高度计仪器参数

Table 3　Poseidon-2 radar altimeter parameters

参数	参数值
发射频率/GHz	13.575 (Ku), 5.3 (C)
脉冲重复频率/Hz	2060 interlaced (3 Ku-1 C-3 Ku-band)
脉冲宽度/μs	105.6
带宽/MHz	320 (Ku, C)
天线直径/m	1.2
天线波束宽度/(°)	1.28 (Ku), 3.4 (C)
质量/kg	70
功耗/W	78

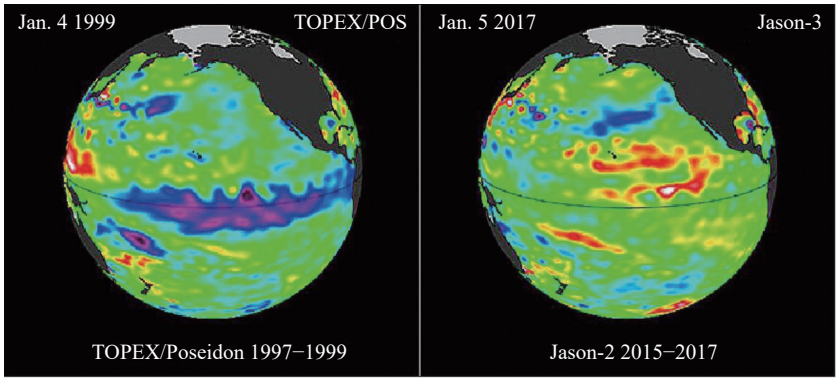


图 5　利用 T/P 卫星和 Jason-2 卫星雷达高度计监测到的 1997－1999 年和 2015－2017 年厄尔尼诺事件

Fig. 5　El Niño events detected using the T/P and Jason-2 radar altimeters in 1997－1999 and 2015－2017

道倾角为 98.5°。ERS-1 卫星载荷分布如图 8 所示，ERS-1 携带的雷达高度计 (RA1: Radar Altimeter1) 主要用于测量大地水准面、海洋重力场以及极地冰盖和海冰，其仪器载荷参数如表 4 所示。ERS-1 卫星主要利用 SLR 进行轨道改正，海面高度测量精度为 10 cm。ERS-1 卫星包含多个任务阶段，分别为重复周期 3 天、35 天和 168 天的大地测量任务。3 天的重复轨道任务主要用于定标，35 天的重复轨道任务用于海洋观测，168 天的重复轨道任务则用于大地测量。

为了保证数据的连续性，ESA 于 1995 年 4 月 21 日发射了 ERS-1 卫星的后续卫星 ERS-2。ERS-2 轨道高度为 785 km，轨道倾角为 98.5°，轨道重复周期为 35 天。该卫星的主要任务是进行地球观测，特别是对大气和海洋的观测，观测区域包括南极、北极在内的地球表面，并可用于监测海冰范围及其密集度，图 9 给出了利用 ERS-1/2 卫星雷达高度计数据反演得到的北极海冰厚度[16]。ERS-2 雷达高度计的基本参数与 ERS-1 高度计一致。ERS-2 和 ERS-1 发射日期间隔不到 4 年，两颗卫星实现了同一轨道平面内的组网观测，为大气、陆地、海洋、冰川监测打下了基础。

Envisat 属于 ERS-1/2 的后续卫星，由 ESA 制造，发射于 2002 年 3 月 1 日，主要应用于环境研究，特别是气候变化研究，主要任务是对地球大气及地球表面进行观测。Envisat 轨道与 ERS-2 相似，轨道为 764～825 km 的太阳同步轨道，轨道倾角为 98.5°，运行重复周期为 35 天，实际地面轨迹与标称偏差保持在 1 km 以内[31]。Envisat 卫星的载荷分布如图 10 所

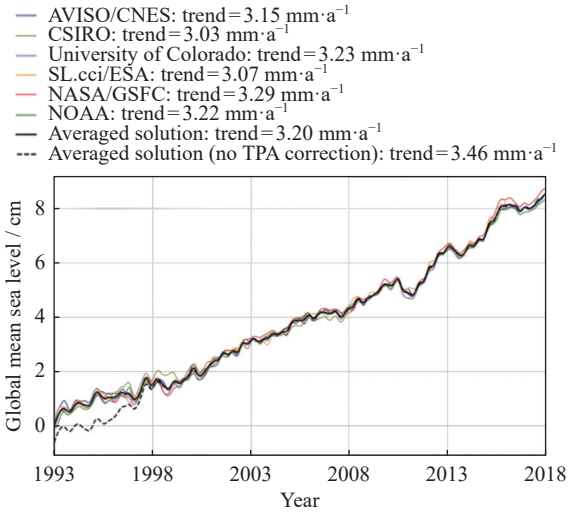


图 6 联合 T/P，Jason-1，Jason-2 和 Jason-3 卫星测高数据得到的全球海平面变化

Fig. 6 Measuring global sea level rise derived from the Jason-1, Jason-2 and Jason-3 satellite altimetry data

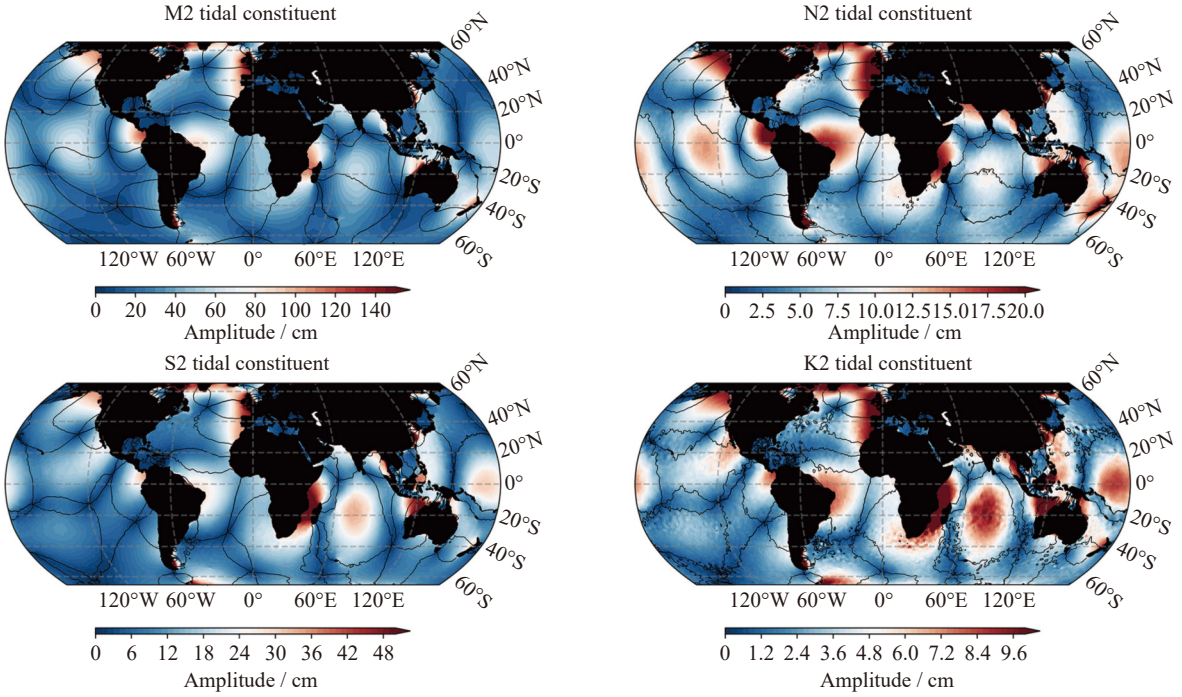


图 7 联合 T/P，Jason-1，Jason-2 和 Jason-3 等卫星测高数据得到的全球海洋潮汐模型

Fig. 7 Global ocean tide model obtained by combining T/P, Jason-1, Jason-2, and Jason-3 satellite altimeter data

示, 载荷主要有第二代雷达高度计 (RA2: Radar Altimeter2)、微波辐射计 (Microwave Radiometer, MWR)、DORIS 系统、LRA 系统, 其中 RA-2 雷达高度计仪器参数如表 5 所示。

法国 CNES 和印度空间研究组织 (Indian Space Research Organization, ISRO) 联合研制的 SARAL 卫星于 2013 年 2 月 25 日成功发射, 其载荷分布如图 11 所示, SARAL 卫星的主要有效载荷为 Altika 雷达高度计, Altika 为第一台 Ka 波段雷达高度计, 由法国 CNES 研制, 其仪器参数如表 6 所示。

相比于 Ku 波段高度计, Ka 波段测高的优点包括: 电离层延迟小、分辨率高、更精细的海面探测能力等[32]。Ka 波段也有一定的缺点, 在对流层传播时会导致严重的衰减[33,34]。

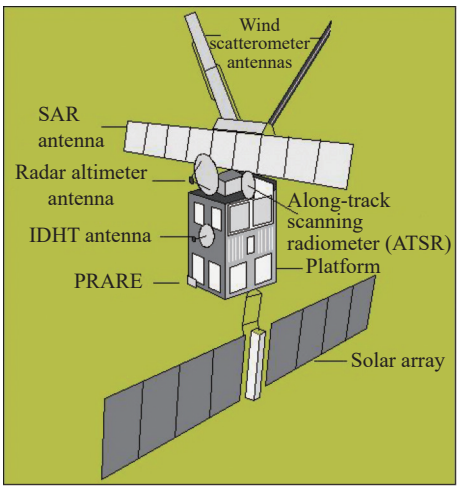


图 8　ERS-1 卫星载荷分布

Fig. 8　ERS-1 spacecraft

表 4　RA-1 雷达高度计仪器参数

Table 4　Specification of the RA-1 instrument

参数	参数值
发射频率/GHz	13.8 (Ku-band)
脉冲重复频率/Hz	1020
脉冲宽度/μs	100
带宽/MHz	330 (ocean mode) 82.5 (ice mode)
回波采样点数	64
天线直径/m	1.2
天线波束宽度/(°)	1.3
质量/kg	96
功耗/W	134.5

2.2　合成孔径体制高度计的发展

自从 1978 年 Seasat 卫星雷达高度计正式业务运行以来, 雷达高度计 (Geosat, ERS-1/2, T/P, GFO, Envisat, Jason-1/2/3 等) 一直采用脉冲有限体制的工作模式。为了进一步提高雷达高度计的测量精度和空间分辨率, Raney 提出了基于延迟校正的多普勒锐化技术, 提高了测量精度和顺轨向分辨率, 从而形成延迟–多普勒雷达高度计 (Delay/Doppler Radar Altimeter, DDA)[35], 目前国际上也普遍称之为合成孔径高度计 (Synthetic Aperture Radar Altimeter, SAR altimeter)。

如图 12(a)(b) 所示, 脉冲有限体制雷达高度计的脉冲有限足迹是直径为 2 km 左右的圆, 且随着海面

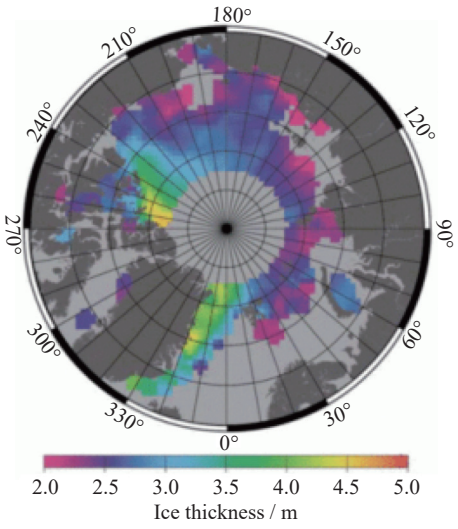


图 9　利用 ERS-1 和 ERS-2 卫星雷达高度计数据得到的北极海冰厚度

Fig. 9　Arctic sea ice thickness derived from the ERS-1 and ERS-2 radar altimetry data

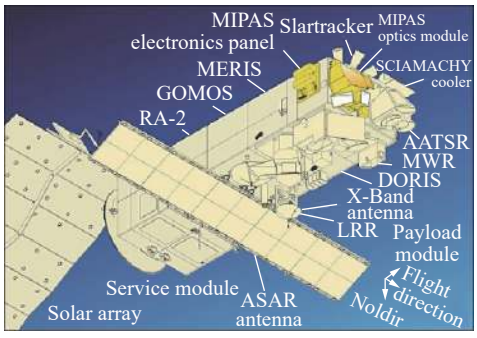


图 10　Envisat 卫星载荷分布

Fig. 10　Payloads on Envisat spacecraft

表 5 RA-2 雷达高度计仪器参数

Table 5 Specification of the RA-2 instrument

参数	参数值
发射频率/GHz	13.575 (Ku-band) 3.2 (S-band)
脉冲重复频率/Hz	1795.33 (Ku-band) 448.83 (S-band)
脉冲宽度/μs	100
带宽/MHz	320, 80, 20 (Ku-band) 160 (S-band)
回波采样点数	128
天线直径/m	1.2
天线波束宽度/(°)	1.29 (Ku-band), 5.5 (S-band)
质量/kg	110
功耗/W	161

表 6 AltiKa 雷达高度计参数

Table 6 Key parameters of the AltiKa radar altimeter

参数	参数值
发射频率/GHz	35.75
脉冲带宽/MHz	500
脉冲持续时间/μs	110
PRF/kHz	4
回波平均值/ms	25
回波采样点个数	128
天线直径/m	1

粗糙度的增大而增大; 图 12(c)(d) 表明, 合成孔径雷达高度计在顺轨向进行了合成孔径处理, 其足迹是沿航迹向宽度为 300 m 左右的条带, 且不随着海面粗糙度的变化而变化, 提高了有效观测次数, 同时提高了测量精度和沿航迹向分辨率。由于回波足迹的改变, 合成孔径雷达高度计的回波形状也与脉冲有限体制雷达高度计 (类似于阶跃函数) 不同, 类似于脉冲函数, 如图 13 所示。

为了监测极地冰的范围和厚度的变化, ESA 于 2005 年 10 月 8 日发射了一颗专门用于极地观测的卫星 Cryosat, 但由于火箭发射失败, 该卫星发射不久后坠毁。 2010 年 4 月 8 日, ESA 又发射了 Cryosat 的替代星 Cryosat-2 卫星。为了观测更大范围内的海冰及冰盖变化情况, Cryosat-2 卫星的轨道倾角设定为 92°, 测量的纬度范围可达±88°, 轨道高度为 717 km, 轨道重复周期为 369 天。

Cryosat-2 卫星主要科学目标为: 确定海洋中海冰厚度的变化, 确定南极、北极海冰质量和厚度的区域性变化、季节性变化、年际变化趋势, 以及冰盖和冰川厚度的变化, 研究南极和格陵兰岛冰盖消融对全球海平面上升的影响, 以及气候变化对南极和北极海冰厚度变化的影响[36]。

CryoSat-2 卫星的载荷分布如图 14 所示, 其主要有效载荷是合成孔径干涉雷达高度计 (SAR Interferometric Radar Altimeter, SIRAL), SIRAL 雷达高度计数据在极地测量方面取得了巨大成功, 图 15～17 分别给出了 CryoSat-2 数据在极地冰盖[15]、北极海冰厚[17]、北极地转流[3] 等方面的典型应用。在进行冰测

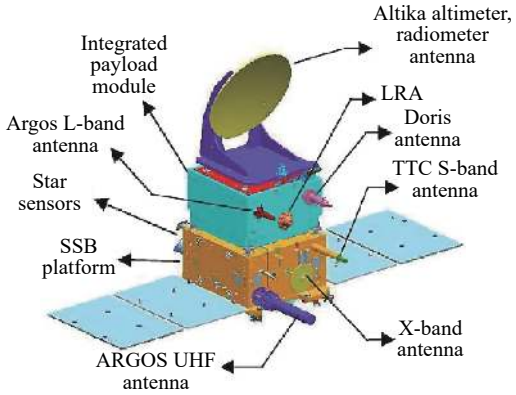


图 11 SARAL 卫星载荷分布

Fig. 11 SARAL spacecraft configuration

量的同时, CryoSat-2 卫星还在海洋上进行了高度计合成孔径测高模式的实验并取得了巨大的成功, CryoSat-2 合成孔径测高体制下获得的海面高度噪声水平都低于 Jason-2[37], 这些结果为 ESA 的 Sentinel-3 A 和 Sentinel-3 B 上搭载的合成孔径高度计奠定了基础。

Sentinel-3 卫星由 ESA 和欧洲气象卫星应用组织 (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT) 组织实施。该卫星轨道高度为 814 km, 轨道倾角为 98.6°, 轨道重复周期为 27 天。其中 Sentinel-3 A 卫星于 2016 年 2 月 16 日发射, Sentinel-3 B 于 2018 年 4 月 25 日发射。

Sentinel-3 卫星的载荷分布如图 18 所示, Sentinel-3 A 和 Sentinel-3 B 卫星都搭载了合成孔径雷达高度计 (Synthetic Aperture Radar Altimeter, SRAL)。为了修正电离层传输延时带来的误差, SRAL 雷达高度计技术方案采用双频体制, 工作频率分别是 Ku

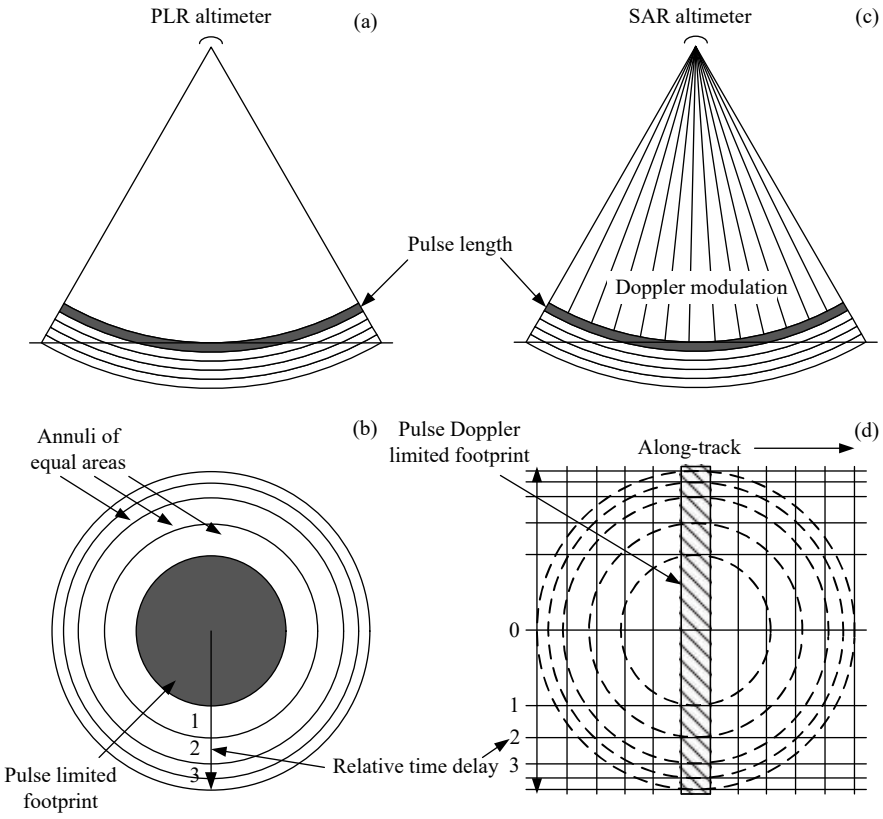


图 12　脉冲有限雷达高度计和合成孔径雷达高度计照亮足迹对比

Fig. 12　Comparison of the footprint geometry between PLR altimeter and SAR altimeter

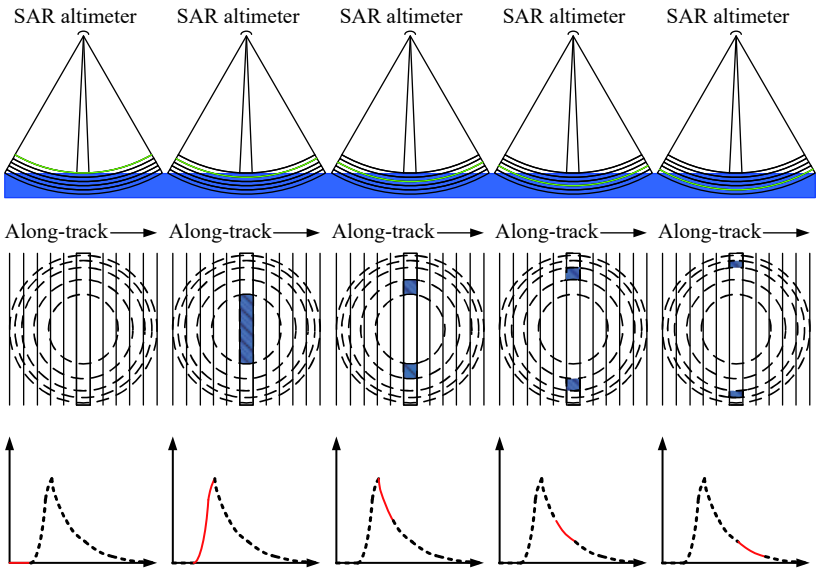


图 13　合成孔径雷达高度计回波波形

Fig. 13　Echo generation process of SAR altimeter

(13.575 GHz) 和 C (5.41 GHz), 共用一台天线[38]。SRAL 的主要目的是进一步研究海洋环流、水深测量和海洋大地水准面特性。同时 SRAL 还将测量海岸带、内陆水域(湖和大的河流)、极地海冰和冰盖。从雷达回波测量的风速和有效波高可以对天气和海况进行预测。

Jason-CS (Jason Continuity of Service) 又称 Sentinel-6 卫星，其中 Sentinel-6 A 于 2020 年 11 月 21 日发射，轨道与 Jason 系列卫星一致，轨道高度为 1336 km，轨道倾角为 66°，轨道重复周期为 10 天，是 ESA, EUMETSAT, NASA, CNES 和 NOAA 的联合任务，确保 Jason-3 后能够提供不间断的卫星测高数据服务；Sentinel-6 B 星计划于 2025 年发射[39]。Sentinel-6 卫星的载荷分布如图 19 所示，卫星上搭载了合成孔径雷达高度计。区别于 Sentinel-3 合成孔径高度计的闭环工作模式，Sentinel-6 合成孔径高度计工作在开环模式，进一步提高了测量精度，高度计测距精度达到了 0.8 cm[40]。

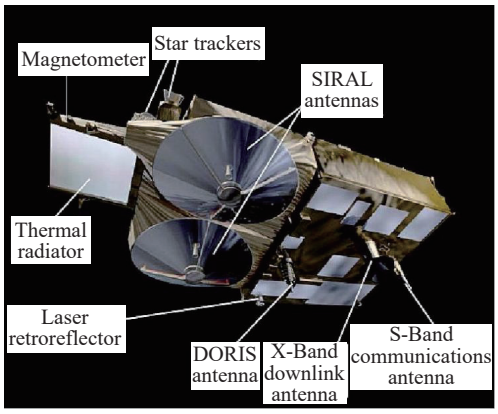


图 14 CryoSat-2 卫星载荷分布

Fig. 14 CryoSat-2 spacecraft and its instruments

2.3 宽刈幅体制高度计的发展

脉冲有限高度计和合成孔径高度计都采用了窄波束的天线，为了增大雷达高度计的测量刈幅，有研究提出了宽刈幅海洋高度计 (Width Swath Ocean Altimeter, WSOA) 的构想[41]。其由一个传统的底视高度计 (Ku, C 双波段，并且带有三频辐射计和 GPS 接收机) 和一个 Ku 波段的侧视雷达干涉仪组成。其中星下点高度计主要用来测量高精度海面高度、电离

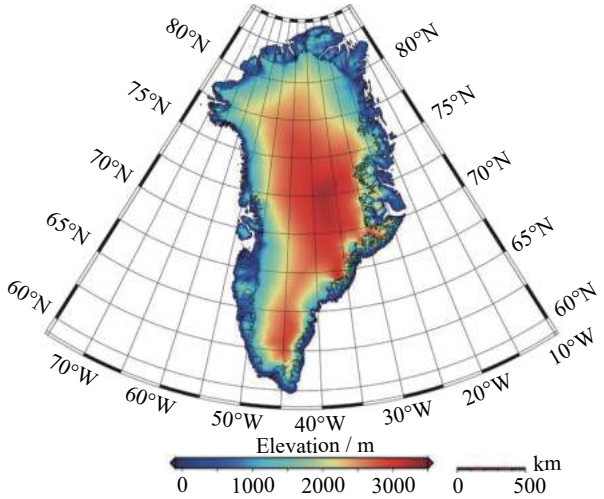


图 15 利用 CryoSat-2 雷达高度计数据生成的格陵兰岛冰盖数字高程模型

Fig. 15 Ice elevation model of Greenland derived from CryoSat-2 radar altimetry data

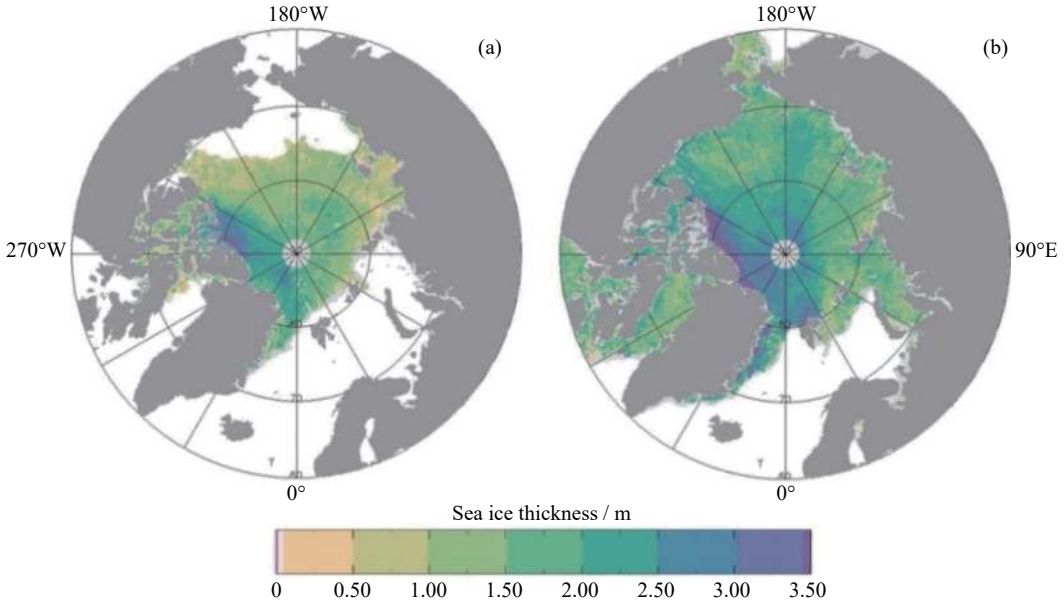


图 16 利用 CryoSat-2 雷达高度计数据反演的北极海冰厚度

Fig. 16 Arctic sea ice thickness derived from the CryoSat-2 altimetry data

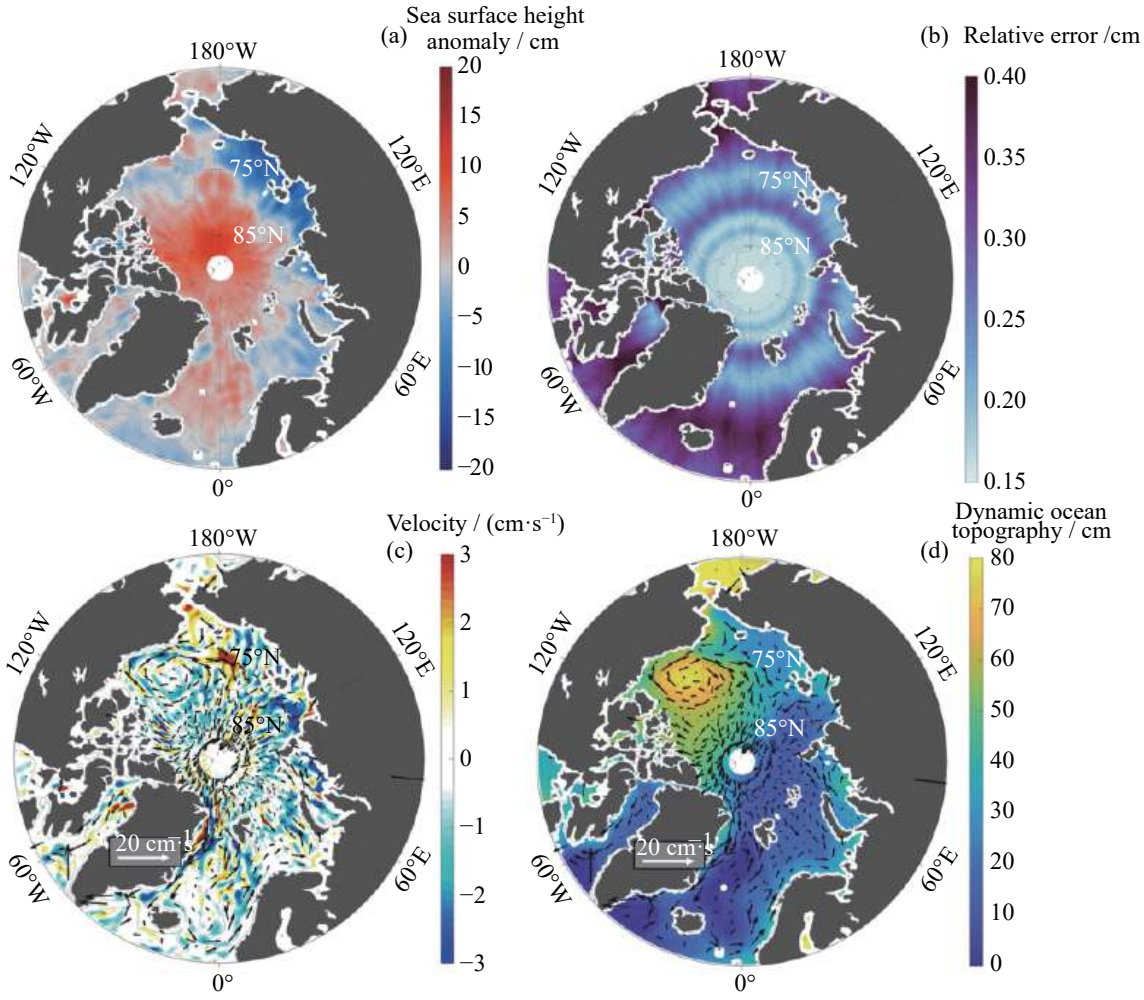


图 17　利用 CryoSat-2 测高数据获取的北极海面高度异常与地转流

Fig. 17　Arctic sea level anomaly and geotrophic current derived from the CryoSat-2 radar altimetry data

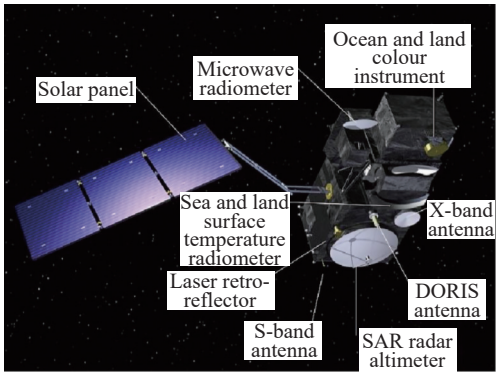


图 18　Sentinel-3 卫星载荷分布

Fig. 18　Alternate view of the Sentinel-3 spacecraft and the accommodation of the payload

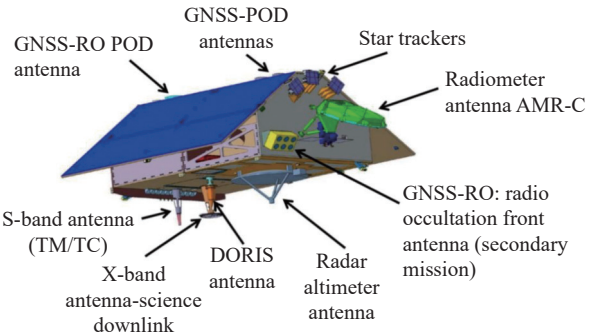


图 19　Sentinel-6 A 卫星载荷分布

Fig. 19　Alternate view of the Sentinel-6 A spacecraft and the accommodation of the payload

层以及干涉仪的校准; 雷达干涉仪能够将两幅单视复图像, 处理后得到干涉相位图, 然后从干涉相位信息中获取海洋的三维地形图。

2007 年, 美国国家研究理事会提出了 SWOT (Surface Water and Ocean Topography) 卫星计划,

由美国 NASA 和法国 CNES 联合实施，该计划采用卫星观测地球表面水体，研究河流、湖泊、水库和海洋等水资源的情况，进而监测全球淡水资源，改进海洋环流模型及天气和气候的预测。SWOT 卫星于 2022 年 12 月 16 日发射，卫星的轨道高度为 890 km，轨道倾角为 78°，卫星轨道重复周期为 22 天 (在轨校验期间轨道重复周期为 3 天)。

SWOT 卫星的干涉测高如图 20 所示，主要包括一个 Ka 波段的宽刈幅干涉高度计 (KaRIN)，仪器参数如表 7 所示，其能够对地表进行宽刈幅干涉测量，观测带的宽度达 120 km[42]；还包括一个底视高度计、一个三频微波辐射计、一套卫星精密定轨/定位系统。

目前 SWOT 卫星干涉测高仪的数据尚未向全球用户开放，NASA 和 CNES 对外发布了一些 SWOT 干涉测高仪数据在海洋和陆地应用的图片，图 21 和图 22 分别给出了 SWOT 干涉测高仪在近岸和内陆水方面的表现[43,44]。

3 中国海洋卫星测高技术的发展

与欧美国家相比，中国雷达高度计的研究起步较晚，但经过 30 多年的发展，在脉冲有限体制、合成孔径体制和宽刈幅体制方面都取得了重大的进展。

3.1 脉冲有限体制高度计的发展

中国科学院国家空间科学中心在 1995 年研制出了第一部机载海洋雷达高度计，获得了机载飞行数据，其测高精度为 15 cm，有效波高的精度为实际波高的 15%。

神舟四号(SZ-4)飞船于 2002 年 12 月 30 日发射成功，其轨道高度为 340 km，图 23 给出了 SZ-4 飞船上搭载的多模态微波遥感器。由中国科学院国家空间科学中心研制的 SZ-4 主载荷多模态微波遥感器中的雷达高度计，是一个脉冲有限体制雷达高度计，其工作频率为 13.9 GHz，信号带宽为 333 MHz，测高精度为 10 cm，有效波高测量精度为 0.5 m，后向散射系数测量精度为 1 dB。多模态微波遥感器作为中国第一个上星的微波遥感器，成功地实现了功能体制验证，为后续的海洋二号 (HY-2) 卫星奠定了基础。

HY-2 卫星是中国业务化应用的海洋动力环境系列卫星，首发星 HY-2A 于 2011 年 8 月 16 日发射，卫星照片如图 24 所示，主载荷包括：雷达高度计、微波散射计、微波辐射计和大气校正辐射计。HY-2A 设计的轨道高度为 971 km，轨道倾角为 99°，HY-2A 卫星初期在重复周期为 14 天的动力轨道，从 2016 年 3 月开始转入重复周期为 168 天的漂移轨道，开始进行大地测量任务。HY-2A 的目标是监测和调查海洋

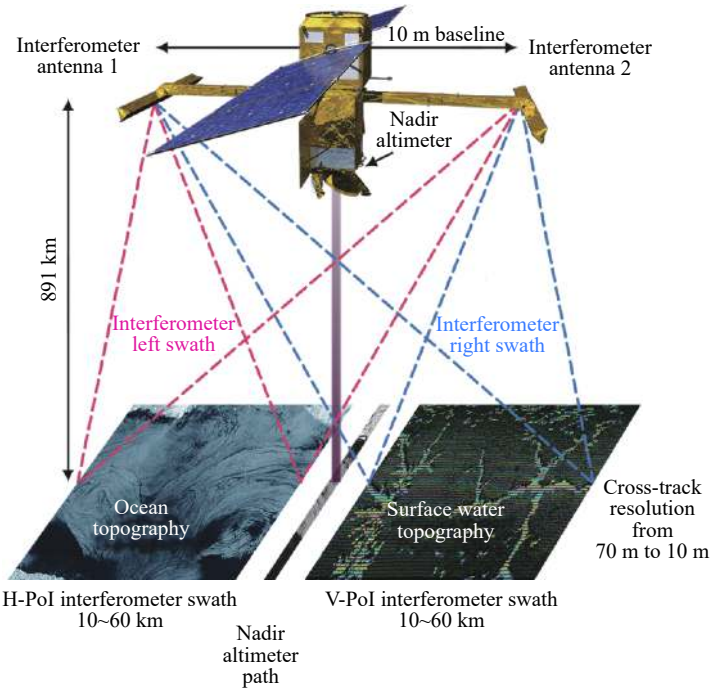


图 20 SWOT 卫星宽刈幅干涉测高

Fig. 20 SWOT integrated measurement approach

表 7　KaRIN 雷达干涉仪参数

Table 7　Main parameters of KaRIN

参数	参数值
发射频率/GHz	35.75
发射带宽/MHz	200
发射脉冲宽度/μs	4.5
PRF/Hz	2 × 4420 (Average)
峰值发射功率/W	1500
基线长度/m	10
天线尺寸/m	5 × 0.25
极化方式	VV(右刈幅)和HH(左刈幅)

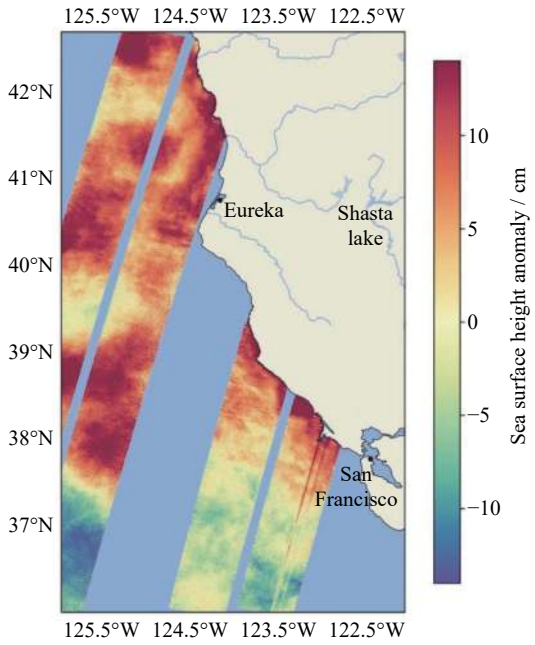


图 21　利用 SWOT 干涉测高仪获取的加利福尼亚州北部海岸海面高度异常

Fig. 21　Sea surface height anomalies along the northern coast of California measured by the SWOT interferometric altimeter

环境, 包括海面风场、浪场、海流、海面温度、海上风暴和潮汐等海况的重要参数, 掌握灾害性海况预报, 为国民经济和国防建设服务, 为海洋科学研究提供实测数据。

中国科学院国家空间科学中心研制了 HY-2A/B/C/D 四个卫星的雷达高度计。HY-2 卫星雷达高度计是一个双频脉冲有限体制雷达高度计, 分别工作在 Ku 波段和 C 波段, 中心频率分别为 13.58 GHz 和 5.25 Hz, 信号带宽为 320 MHz。采用脉冲有限工

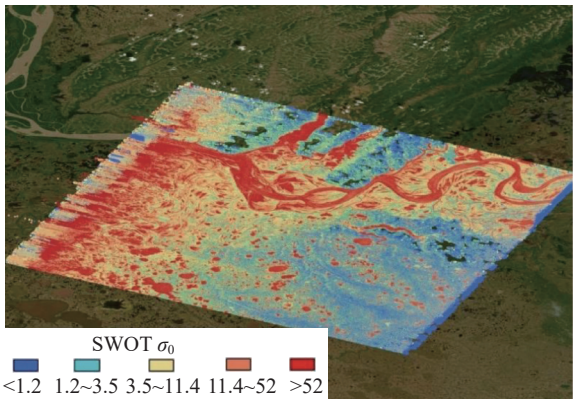


图 22　SWOT 干涉测高仪捕捉到阿拉斯加的育空河（红色为育空河和附近的湖）

Fig. 22　SWOT interferometric altimeter captured the Yukon River in Alaska (The red image showing the Yukon River and nearby lakes)

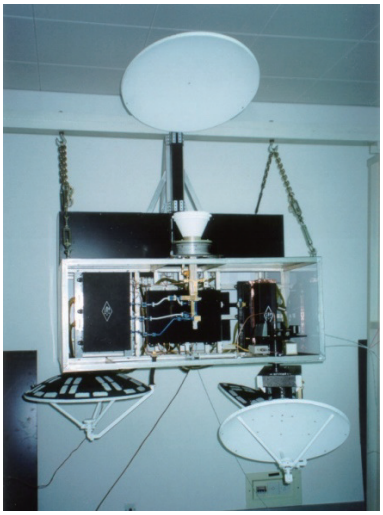


图 23　SZ-4 飞船多模态微波遥感器

Fig. 23　SZ-4 multimodal microwave remote sensor



图 24　HY-2A 卫星

Fig. 24　Photo of the HY-2A spacecraft

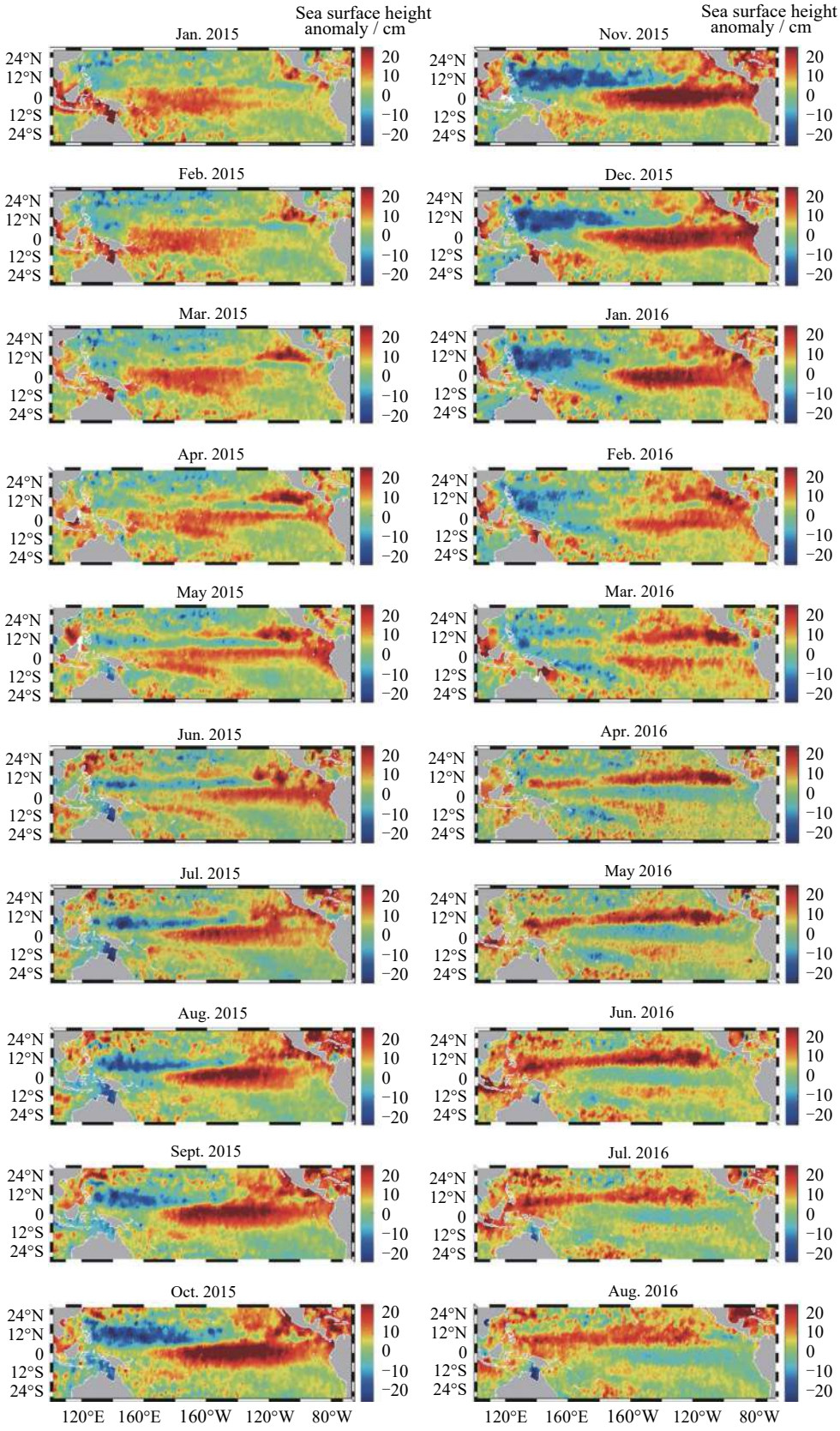


图 25 利用 HY-2A 高度计监测 2015—2016 年厄尔尼诺事件

Fig. 25 El Niño events detected using the HY-2A altimeter data in 2015—2016

作方式测量海面高度、有效波高和海面风速等海洋基本要素。HY-2A 雷达高度计仪器测距精度达到 2 cm, 有效波高精度达到 0.2 m, 风速测量精度达到 1.5 m·s^{-1}。HY-2A 卫星的设计寿命为 3 年, 雷达高度计在轨工作了 11 年, 获得了大量的科学数据并已得到用户广泛使用, 图 25 给出了利用 HY-2A 高度计监测 2015－2016 年厄尔尼诺事件, 图 26 给出了利用 HY-2A 测量获得的南海海域重力异常。

表 8 给出了 HY-2A 卫星雷达高度计仪器硬件指标, HY-2A 卫星雷达高度计采用大时带积线性调频信号, 并采用全去斜坡技术和双频全固态体制。其中双频设计用来校正电离层对高度测量的影响; 大时带积线性调频信号降低了发射峰值功率; 星上采用 SMLE 和 OCOG 并行跟踪算法, 增强了高度计的跟踪能力, 采用地面的二次跟踪技术, 可以获得高精度的测高结果[45]。

2018 年 10 月 25 日, 2020 年 9 月 21 日, 2021 年 5 月 19 日, 中国先后发射了海洋二号 B 星、C 星和 D 星, 从而建成了中国首个海洋动力环境监测网, 具备全天时、全天候、高精度的测量能力。HY-2B 星沿用了 HY-2A 轨道, 轨道倾角为 99°, 重复周期为 14 天; HY-2C 和 HY-2D 采用了 66° 倾角的倾斜, 重复周期为 10 天。随着三星组网, 全球海洋监测的覆盖能力达到 80% 以上, 海洋监测的效率和精度得到大幅提升, HY-2 卫星观测网格间距优于 100 km[46], 达到国际先进水平。这 3 个卫星上分别搭载的双频雷达高度计, 在 HY-2A 星高度计的基础上增加了高稳定的铷钟, 年漂移率不超过 0.1 mm, 大大提高了测量的稳定性。HY-2B/C/D 高度计的仪器测距精度均优于 2 cm, 单星海面高度自交叉不符值优于 5 cm, 对应的海面高度精度优于 3.4 cm。海洋二号高度计组网数据广泛应用于海洋预报、中尺度涡监测[47]、重力场[48] 和海底地形[49] 反演、冰间水道识别[50]、海冰厚度反演[51,52] 等方面的研究。图 27～30 分别给出了海

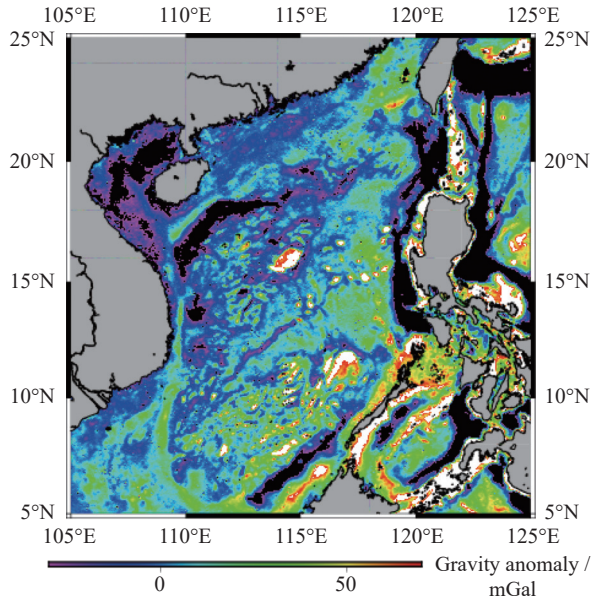


图 26　利用 HY-2A 测量获得的南海海域重力异常

Fig. 26　Gravity anomalies in the South China Sea area obtained from HY-2A measurements

表 8　HY-2A 卫星雷达高度计仪器硬件指标

Table 8　Main parameters of the HY-2A radar altimeter

硬件参数	硬件指标
工作频率/GHz	13.58, 5.25
发射脉冲宽度/μs	102.4
线性调频信号带宽/MHz	320/80/20
发射峰值功率/W	10(Ku波段), 20(C波段)
Ku脉冲重复频率/kHz	2.3
天线口径/m	1.3 (Ku波段和C波段共用一副天线)
半功率波束宽度/(°)	1.2 (Ku波段)和 3.2 (C波段)
极化方式	线性同极化
天线增益/dBi	42 (Ku波段), 32 (C波段)
AGC动态范围/dB	60
数据率/(kbit·s^{-1})	240
质量/kg	110
功耗/W	170

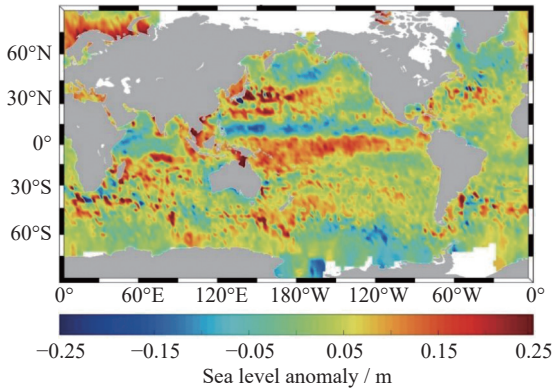


图 27　HY-2B 测量的海面高度异常 (2018 年 12 月 10－24 日)

Fig. 27　Sea level anomalies obtained from HY-2B measurements (10－24 December 2018)

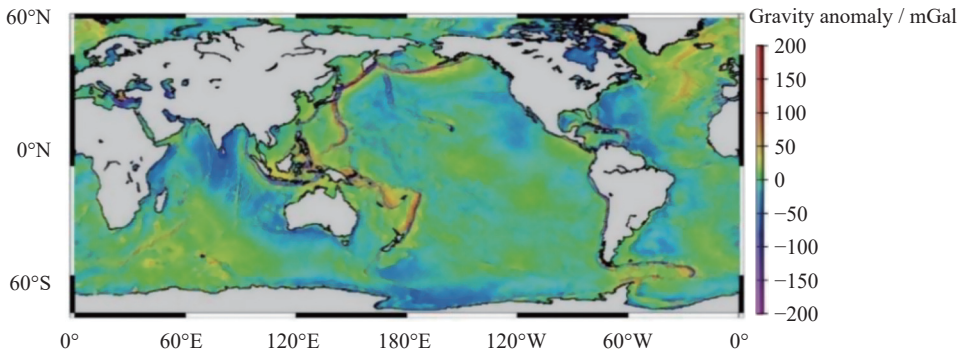


图 28 融合 HY-2A/B/C/D 高度计数据反演得到的全球重力异常

Fig. 28 Global gravity anomaly obtained by fusing HY-2A/B/C/D altimeter data

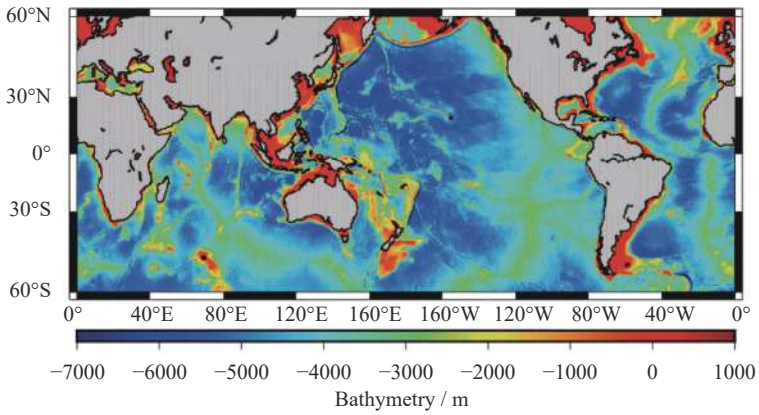


图 29 融合 HY-2A/B/C/D 高度计数据反演得到的全球海底地形

Fig. 29 Global seafloor topography obtained by fusing HY-2A/B/C/D altimeter data

洋二号高度计组网数据在海面高度测量、海洋重力场[48]和海底地形[49]反演、中尺度涡监测[47]方面的典型应用。

HY-2 系列卫星雷达高度计数据质量得到国内外机构的充分认可，法国空间中心的科学家经过多次评估，认为 HY-2 系列卫星获取的海面高度数据精度较高，具有与欧美国家卫星同等的精度水平[53–55]。自 2011 年 10 月开始，HY-2 系列卫星高度计数据已纳入到欧洲业务化运行的高度计数据融合系统（DUACS）中，为全球用户提供数据。

3.2 合成孔径体制高度计的发展

中国对合成孔径雷达高度计的研究从 2000 年开始，中国科学院国家空间科学中心是中国最早从事合成孔径雷达高度计研究的单位，对合成孔径雷达高度计测量原理、信号处理、回波模型和回波重跟踪算法等关键技术进行了深入研究，取得了重要的研究成果[56–59]。

中国科学院国家空间科学中心研制的合成孔径雷达高度计载荷通过了相关试验验证，可以在闭环和开环两种工作模式下，通过指令在两种工作模式之间切换。在 HY-2E 和 HY-2F 星上，将搭载合成孔径雷达高度计（仪器参数参见表 9），以替代已有的脉冲有限体制高度计，实现对全球海面高度、海岸带、海冰和海洋重力场等目标的持续观测。

3.3 宽刈幅体制高度计的发展

中国科学院国家空间科学中心自 1998 年开始宽刈幅体制高度计研究工作，突破了孔径合成技术和干涉信息提取技术等关键技术，实现对海洋和陆地的立体观测[60]。

2016 年 9 月 15 日，由中国科学院国家空间科学中心研制的天宫二号宽刈幅体制高度计（TG-2 高度计）随天宫二号空间实验室在酒泉卫星发射中心发射升空，成为了国际上第一个上星的宽刈幅雷达高度计。TG-2 高度计在天宫二号空间实验室中的位置如

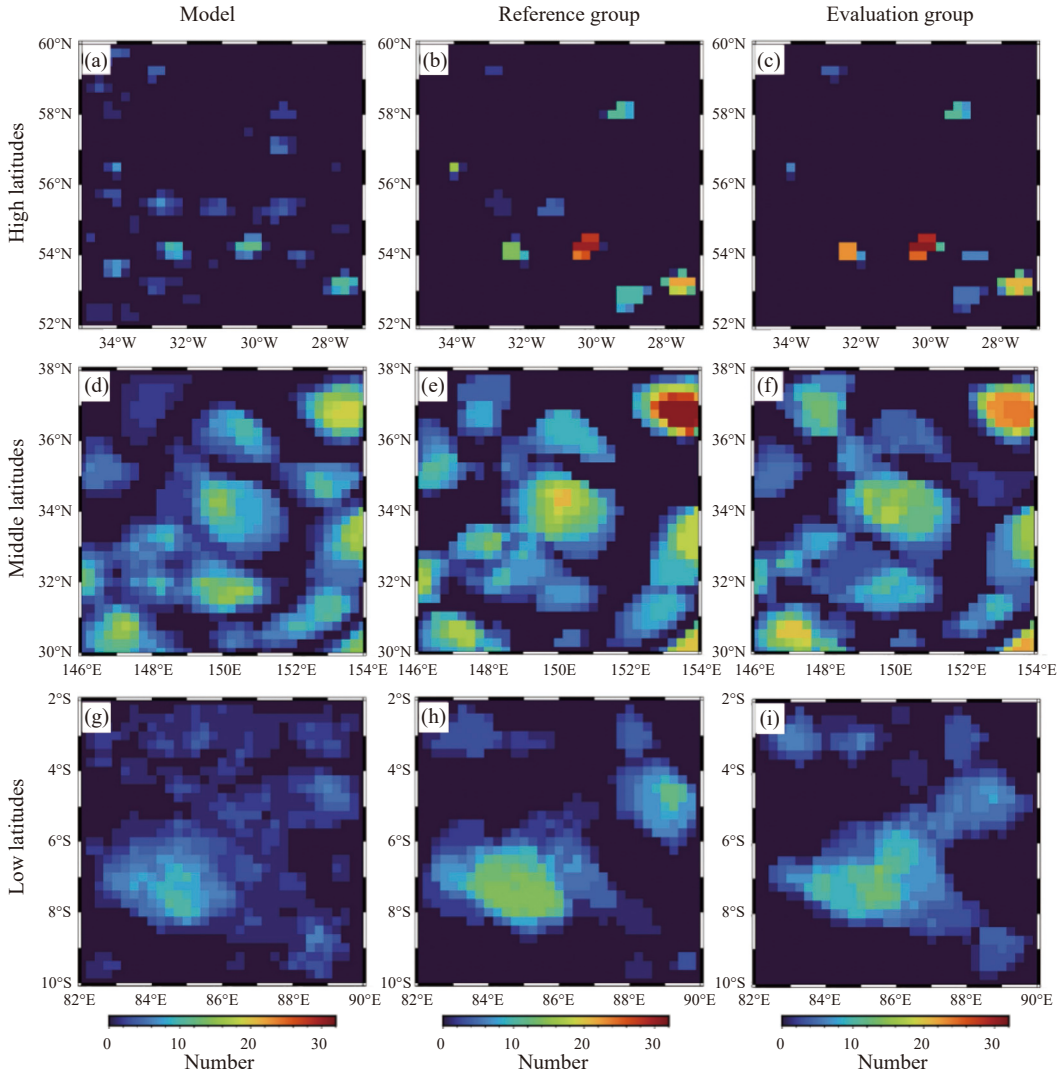


图 30　HY-2B/C/D 高度计数据在中尺度涡监测中的应用

Fig. 30　Application of HY-2B/C/D altimetry data in mesoscale eddies monitoring

表 9　HY-2E 星合成孔径雷达高度计参数

Table 9　Main parameters of the HY-2E radar altimeter

参数	参数值
工作频率/GHz	13.58 (Ku波段), 5.41 (C波段)
发射脉冲宽度/μs	51.2
线性调频信号带宽/MHz	320
发射峰值功率/W	10(Ku波段), 20(C波段)
Ku脉冲重复频率/kHz	9
合成孔径模式	开环合成孔径模式
天线口径/m	1.2 (Ku波段和C波段共用一副天线)
天线增益/dBi	41(Ku波段), 31 dBi(C波段)
AGC动态范围/dB	60
测距精度/cm	0.8

图 31 所示, 其仪器参数如表 10 所示, TG-2 高度计采用了小入射角和短基线干涉测量技术, 实现的单侧幅宽达到了数十公里、海平面高度相对测量精度达到厘米级[61]。图 32 和图 33 给出了 TG-2 宽刈幅高度计数据在海面高度测量和海洋重力异常反演中的应用[62]。

4　结语

从 20 世纪 70 年代起, 国际上已发射了一系列的测高卫星。1973 年发射的 Skylab 代表着卫星测高技术的起步; 1985 发射的 Geosat 标志着卫星测高技术的成熟; 1992 年发射的 T/P 卫星标志着高精度测高

的开端; 2016 年发射的 Sentinel-3A 标志着新型的合成孔径技术体制的成熟运用, 并将逐步替代已有脉冲有限体制高度计; 2022 年发射的 SWOT 标志着卫星测高进入了宽刈幅测量的时代。

中国 2002 年发射的 SZ-4 飞船多模态微波遥感器, 标志着中国卫星测高技术的起步; 2011－2021 年期间陆续发射的 HY-2A/B/C/D 四星, 标志着中国高精度卫星测高技术的成熟, 单星水平与国际同类卫星

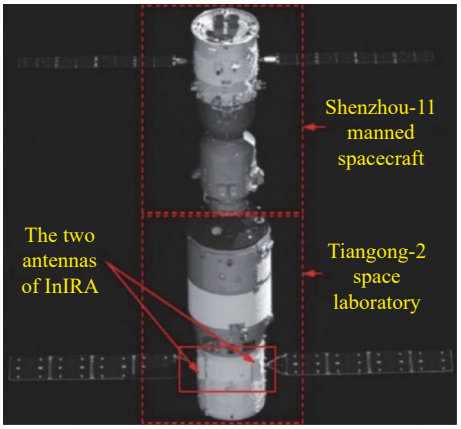


图 31 TG-2 宽刈幅高度计在天宫二号空间实验室中的位置

Fig. 31 Location of the TG-2 wide swath altimeter

表 10 TG-2 宽刈幅高度计主要系统参数

Table 10 Main parameters of the TG-2 wide swath altimeter

参数	参数值
工作频率/GHz	13.58
线性调频信号带宽/MHz	40
发射峰值功率/W	300
极化方式	VV
入射角/(°)	1～8
天线增益/dB	36
基线长度/m	2.3
方位向分辨率/m	30
距离向分辨率/m	30～200
飞行高度/km	379
刈幅宽度/km	35～40
海面高度相对测量精度/cm	5～10

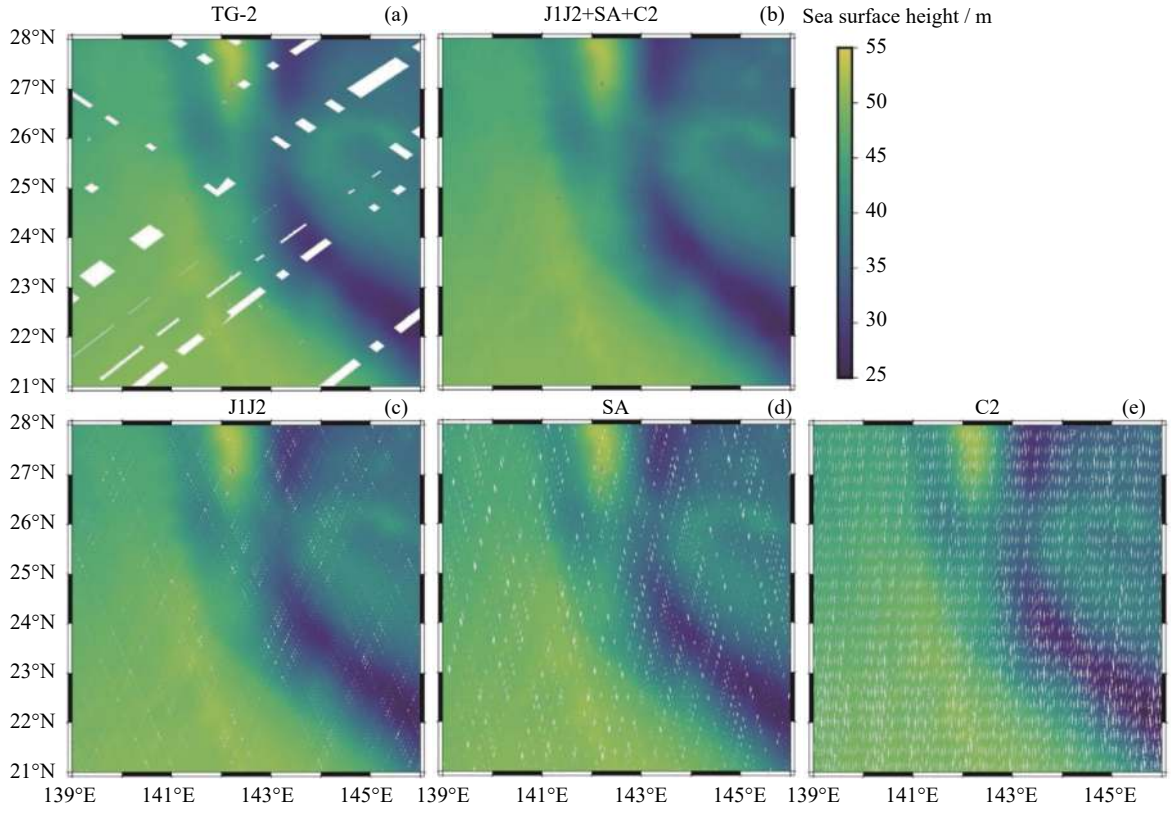


图 32 TG-2 宽刈幅高度计数据得到的海面高度

Fig. 32 Sea surface height measurements derived from the TG-2 interferometric imaging radar altimeter

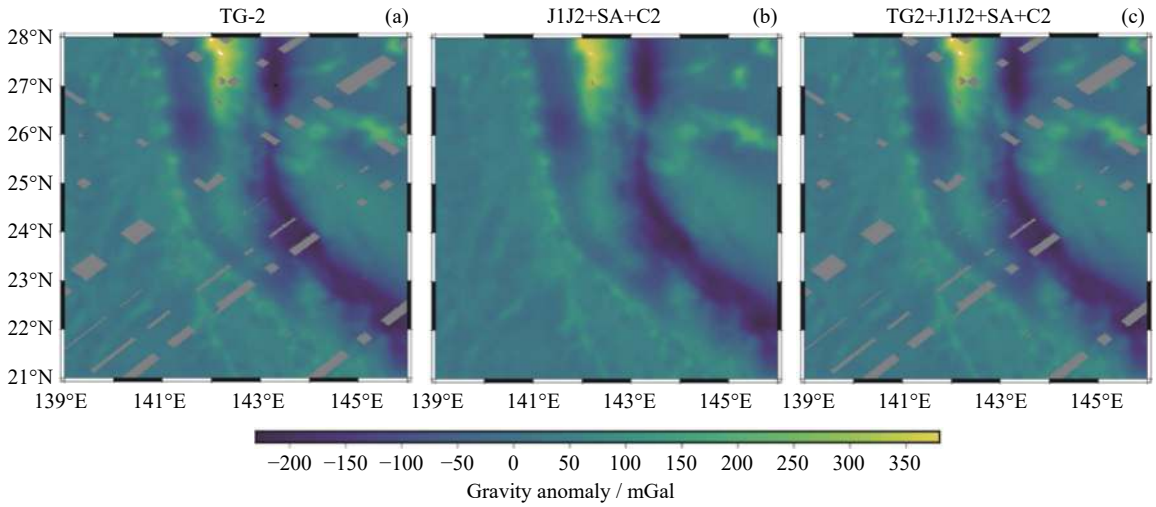


图 33　TG-2 宽刈幅高度计数据反演得到的海洋重力异常

Fig. 33　Gravity anomalies derived from the TG-2 interferometric imaging radar altimeter.

最高水平的 Jason-3 相当，业务化组网观测能力处于领先；计划中的 HY-2E/F 星将采用合成孔径雷达高度计体制代替 HY-2A/B/C/D 的脉冲有限体制；作为国际上第一个搭载的 TG-2 宽刈幅高度计，代表着中国在宽刈幅测高方面的良好开端。

目前高精度的全球海面高度连续观测数据，已在全球海洋环流、中尺度涡、全球和区域性海平面变化、海洋短波重力场、海底地形、海洋潮汐等方面发挥着不可替代的作用，同时在有效波高、海面风速、冰盖高程、海冰厚度和内陆水位测量等方面发挥着重要作用。可以说卫星测高技术开辟了海洋遥感的新领域，为认知海洋、开发利用海洋、开展全球变化研究等方面提供卓越的手段。随着技术的不断进步，海洋卫星测高也将继续向高精度、高分辨率、宽刈幅和快速全球覆盖方向发展，并将进一步推动多领域的科学研究。

参考文献

[1] KAULA W M. The terrestrial environment: Solid-earth and ocean physics [EB/OL]. (1970-04-01)[2023-10-26]. https://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/williamstown_1968.pdf

[2] CAO Y H, DONG C M, QIU Z H, *et al*. Corrections of mesoscale eddies and Kuroshio extension surface velocities derived from satellite altimeters[J]. *Remote Sensing*, 2022, **15**(1): 184

[3] DOGLIONI F, RICKER R, RABE B, *et al*. Sea surface height anomaly and geostrophic current velocity from altimetry measurements over the Arctic Ocean (2011-2020)[J]. *Earth System Science Data*, 2023, **15**(1): 225-263

[4] MORROW R, LE TRAON P Y. Recent advances in observing mesoscale ocean dynamics with satellite altimetry [J]. *Advances in Space Research*, 2012, **50**(8): 1062-1076

[5] WANG G H, SU J L, CHU P C. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(21): 2121

[6] ABLAIN M, MEYSSIGNAC B, ZAWADZKI L, *et al*. Uncertainty in satellite estimates of global mean sea-level changes, trend and acceleration[J]. *Earth System Science Data*, 2019, **11**(3): 1189-1202

[7] CHEN X Y, ZHANG X B, CHURCH J A, *et al*. The increasing rate of global mean sea-level rise during 1993-2014[J]. *Nature Climate Change*, 2017, **7**(7): 492-495

[8] ZHU C C, GUO J Y, YUAN J J, *et al*. SDUST2021GRA: global marine gravity anomaly model recovered from Ka-band and Ku-band satellite altimeter data[J]. *Earth System Science Data*, 2022, **14**(10): 4589-4606

[9] 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**(6205): 65-67

[10] SMITH W H F, SANDWELL D T. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings [J]. *Science*, 1997, **277**(5334): 1956-1962

[11] FAN D, LI S S, LI X X, *et al*. Seafloor topography estimation from gravity anomaly and vertical gravity gradient using nonlinear iterative least square method[J]. *Remote Sensing*, 2020, **13**(1): 64

[12] HART-DAVIS M G, PICCIONI G, DETTMERING D, *et al*. EOT20: a global ocean tide model from multi-mission satellite altimetry[J]. *Earth System Science Data*, 2021, **13**(8): 3869-3884

[13] LYARD F H, ALLAIN D J, CANCET M, *et al*. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance[J]. *Ocean*

Science, 2021, **17**(3): 615-649

[14] SLATER T, SHEPHERD A, MCMILLAN M, *et al*. A new digital elevation model of Antarctica derived from CryoSat-2 altimetry[J]. *The Cryosphere*, 2018, **12**(4): 1551-1562

[15] HELM V, HUMBERT A, MILLER H. Elevation and elevation change of Greenland and Antarctica derived from CryoSat-2[J]. *The Cryosphere*, 2014, **8**(4): 1539-1559

[16] LAXON S, PEACOCK N, SMITH D. High interannual variability of sea ice thickness in the arctic region[J]. *Nature*, 2003, **425**(6961): 947-950

[17] TILLING R L, RIDOUT A, SHEPHERD A. Estimating Arctic sea ice thickness and volume using CryoSat-2 radar altimeter data[J]. *Advances in Space Research*, 2018, **62**(6): 1203-1225

[18] LIU G M, SCHWARTZ F, TSENG K H, *et al*. Satellite altimetry for measuring river stages in remote regions[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, **77**(18): 639

[19] JIANG L G, NIELSEN K, ANDERSEN O B. Improvements in mountain lake monitoring from satellite altimetry over the past 30 years – lessons learned from Tibetan lakes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, **295**: 113702

[20] MCGOOGAN J T, MILLER L S, BROWN G S, *et al*. The S-193 radar altimeter experiment[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, **62**(6): 793-803

[21] MARSH J G, CHANG E S. Detailed gravimetric geoid confirmation of sea surface topography detected by the skylab S-193 altimeter in the Atlantic Ocean[J]. *Journal of Geodesy*, 1976, **50**(3): 291-299

[22] RAPP D H. Geos 3 data processing for the recovery of geoid undulations and gravity anomalies[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1979, **84**(B8): 3784-3792

[23] BAUER E, HASSELMANN S, HASSELMANN K, *et al*. Validation and assimilation of Seasat altimeter wave heights using the WAM wave model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1992, **97**(C8): 12671-12682

[24] HAXBY W F, WEISSEL J K. Evidence for small-scale mantle convection from Seasat altimeter data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, **91**(B3): 3507-3520

[25] MARSH J G, KOBLINSKY C J, ZWALLY H J, *et al*. A global mean sea surface based upon GEOS 3 and Seasat altimeter data[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1992, **97**(B4): 4915-4921

[26] SANDWELL D T, MCADOO D C. High-accuracy, high-resolution gravity profiles from 2 years of the Geosat exact repeat mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1990, **95**(C3): 3049-3060

[27] TRAN N, HANCOCK III D W, HAYNE G S, *et al*. Assessment of the cycle-to-cycle noise level of the Geosat Follow-On, TOPEX, and poseidon altimeters[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, **19**(12): 2095-2107

[28] TAPLEY B D, RIES J C, DAVIS G W, *et al*. Precision orbit determination for TOPEX/POSEIDON[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, **99**(C12): 24383-24404

[29] DORANDEU J, ABLAIN M, FAUGÈRE Y, *et al*. Jason-1 global statistical evaluation and performance assessment: Calibration and cross-calibration results[J]. *Marine Geodesy*, 2004, **27**(3/4): 345-372

[30] ABLAIN M, PHILIPPS S, PICOT N, *et al*. Jason-2 global statistical assessment and cross-calibration with Jason-1[J]. *Marine Geodesy*, 2010, **33**(S1): 162-185

[31] FAUGERE Y, DORANDEU J, LEFEVRE F, *et al*. Envisat ocean altimetry performance assessment and cross-calibration[J]. *Sensors*, 2006, **6**(3): 100-130

[32] BONNEFOND P, VERRON J, AUBLANC J, *et al*. The benefits of the Ka-Band as evidenced from the SARAL/AltiKa Altimetric mission: quality assessment and unique characteristics of AltiKa data[J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(2): 83

[33] TOURNADRE J, LAMBIN-ARTRU J, STEUNOU N. Cloud and rain effects on AltiKa/SARAL Ka-band Radar altimeter—Part I: modeling and mean annual data availability[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(6): 1806-1817

[34] TOURNADRE J, LAMBIN-ARTRU J, STEUNOU N. Cloud and rain effects on AltiKa/SARAL Ka-Band radar altimeter—Part II: definition of a rain/cloud flag[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(6): 1818-1826

[35] RANEY R K. The delay/Doppler radar altimeter[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**(5): 1578-1588

[36] 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

[37] BOY F, DESJONQUERES J D, PICOT N, *et al*. CryoSat-2 SAR-mode over oceans: processing methods, global assessment, and benefits[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, **55**(1): 148-158

[38] DONLON C J, BERRUTI B, BUONGIORNO A, *et al*. The global monitoring for environment and security (GMES) sentinel-3 mission[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **120**: 37-57

[39] 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

[40] JIANG M F, XU K, WANG J M. Evaluation of Sentinel-6 altimetry data over ocean[J]. *Remote Sensing*, 2022, **15**(1): 12

[41] POLLARD B D, RODRIGUEZ E, VEILLEUX L, *et al*. The wide swath ocean altimeter: radar interferometry for global ocean mapping with centimetric accuracy [C]// IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE,

2002

[42] FJORTOFT R, GAUDIN J M, POURTHIE 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): 2172-2185

[43] NASA/JPL. Water-watching satellite monitors warming ocean off California coast[EB/OL]. (2023-09-19)[2023-10-26]. https://swot.jpl.nasa.gov/news/107/water-watching-satellite-monitors-warming-ocean-off-california-coast/

[44] NASA/JPL. SWOT captures the Yukon River in Alaska[EB/OL]. (2023-09-11)[2023-10-26]. https://swot.jpl.nasa.gov/news/106/swot-captures-the-yukon-river-in-alaska/

[45] XU K, JIANG J S, LIU H G, *et al*. HY-2A radar altimeter design and in flight preliminary results[C]//2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Melbourne: IEEE, 2013

[46] QIN D, JIA Y J, LIN M S, *et al*. Performance evaluation of China's first ocean dynamic environment satellite constellation[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(19): 4780

[47] YU F J, QI J J, JIA Y J, *et al*. Evaluation of HY-2 series satellites mapping capability on mesoscale eddies[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(17): 4262

[48] ZHANG S J, ZHOU R S, JIA Y J, *et al*. Performance of HaiYang-2 altimetric data in marine gravity research and a new global marine gravity model NSOAS22[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(17)

[49] WAN X Y, WANG H B, JIA Y J, *et al*. Performance of Haiyang-2 derived gravity field products in bathymetry inversion[J]. *Remote Sensing*, 2022, **15**(1): 32

[50] ZHONG W Q, JIANG M F, XU K, *et al*. Arctic sea ice lead detection from Chinese HY-2B radar altimeter data[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(2): 516

[51] JIANG M F, ZHONG W Q, XU K, *et al*. Estimation of Arctic Sea Ice thickness from Chinese HY-2B radar altimetry data[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(5): 1180

[52] DONG Z Q, SHI L J, LIN M S, *et al*. Feasibility of retrieving Arctic sea ice thickness from the Chinese HY-2B Ku-band radar altimeter[J]. *The Cryosphere*, 2023, **17**(3): 1389-1410

[53] PHILIP A, TABURET G, CHARLES E, *et al*. HY-2B now used operationally in multi-mission sea level and wave systems [EB/OL]. (2020-10-19)[2023-10-26]. https://oostst.aviso.altimetry.fr/fileadmin/user_upload/tx_ausyclsseminar/files/OSTST_2020_HY2B_feedbacks_and_contribution.pdf

[54] LABROUE S, RAYNAL M, PIRIZ F, *et al*. Performance of the altimetry constellation: contribution of HY2B mission [EB/OL]. (2019-10-23)[2023-10-26]. https://oostst.aviso.altimetry.fr/programs/abstracts-details.html?tx_ausyclsseminar_pi2%5BobjAbstracte%5D=2772&cHash=524847cb8397fe1cedc24474fdd8e741

[55] AOUF L, WANG J, DALPHINET A. On the assessement of the assimilation of HY2B Significant wave height in the wave model MFWAM (2020-10-19)[2023-10-26]. https://oostst.aviso.altimetry.fr/fileadmin/user_upload/tx_ausyclsseminar/files/OSTST2020_LAouf_HY2B.pdf

[56] WANG Lei, XU Ke, SHI Lingwei, *et al*. A new range migration correction algorithm and its simulation for SAR altimeter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, **37**(11): 2713-2718 (王磊, 许可, 史灵卫, 等. 一种消除合成孔径雷达高度计延迟校正中残余误差的新算法及仿真验证 [J]. 电子与信息学报, 2015, **37**(11): 2713-2718)

[57] SHI L, XU K, LIU P, *et al*. Height precision of SAR altimeter and conventional radar altimeter based on flight experimental data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, **9**(6): 2676-2686

[58] WANG Jiaming, XU Ke, JIANG Maofei. Design and verification of retracking estimator for synthetic aperture altimeter based on weighted least squares[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, **44**(6): 2135-2142 (王佳明, 许可, 蒋茂飞. 基于加权最小二乘的合成孔径高度计重跟踪估计器设计与验证 [J]. 电子与信息学报, 2022, **44**(6): 2135-2142)

[59] WANG Jiaming, XU Ke, JIANG Maofei. An open burst anti-aliasing filtering method for Synthetic Aperture Radar Altimeter[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2023, **38**(3): 680-687 (王佳明, 许可, 蒋茂飞. 一种用于合成孔径高度计的开环抗混叠滤波方法 [J]. 遥感技术与应用, 2023, **38**(3): 680-687)

[60] ZHANG Yunhua, JIANG Jingshan, ZHANG Xiangkun, *et al*. Principle model and preliminary flight experiment of the three-dimensional imaging radar altimeter[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, **32**(6): 899-902 (张云华, 姜景山, 张祥坤, 等. 三维成像雷达高度计机载原理样机及机载试验 [J]. 电子学报, 2004, **32**(6): 899-902)

[61] REN L, YANG J S, DONG X, *et al*. Preliminary evaluation and correction of sea surface height from Chinese Tiangong-2 Interferometric imaging radar altimeter[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(15): 2496

[62] SUN M, ZHANG Y, DONG X, *et al*. Preliminary results of marine gravity recovery by Tiangong-2 interferometric imaging radar altimeter[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**: 4759