

干涉雷达高度计定标检验进展

周兴华^{1,2}, 杨磊¹, 徐永生³, 朱琳⁴

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 山东科技大学海洋工程技术学院, 山东 青岛 266590;
3. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 4. 山东科技大学测绘科学与技术学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 卫星雷达高度计正从传统星下点的剖面测量向宽刈幅干涉测量发展, 利用卫星观测二维的高分辨率、高精度海面高度正在成为可能, 国外研究人员提出 SWOT(Surface Water and Ocean Topography)干涉雷达高度计计划和我国新一代海洋科学卫星任务等计划有望实现海洋亚中尺度现象的观测。定标检验是评价卫星观测资料精度和质量的必要工作, 传统高度计的定标检验均为基于验潮站、GNSS(Global Navigation Satellite System)浮标、有源定标器等方式的单点比对, 难以满足干涉高度计的需求。目前国内外研究人员在干涉雷达高度计的定标检验中采用了全新的技术方案, 并已利用机载试验和理论模拟开展了验证工作。对近 10 a 干涉雷达高度计定标检验的新技术方法进行介绍和总结, 希望对我国的干涉雷达高度计卫星定标计划起到借鉴作用。

关键词: SWOT; 定标检验; 干涉高度计

中图分类号: P229

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)04-0549-13

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.04.001

引用格式: ZHOU X H, YANG L, XU Y S, et al. The research progress in calibration/validation of interferometric altimeter[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(4): 549-561. 周兴华, 杨磊, 徐永生, 等. 干涉雷达高度计定标检验进展[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(4): 549-561.

经历 30 余 a 的发展, 卫星测高获得的海面动力学资料已成为物理海洋学、大地测量学等学科的重要基石^[1-2]。至今全球已发射了数十颗不同系列高度计卫星, 从早期的 SEASAT^[3]、Geosat^[4]到现在的 Jason-3^[5]、Sentinel3^[6]等, 数据观测精度从最初的米级提高到现在的 3 cm 左右^[2], 2011 年和 2017 年我国分别发射的 HY-2A 和 HY-2B 高度计卫星使我国具备了卫星海洋动力观测的业务化能力, HY-2A/B 全球测高资料在国际测高领域发挥了重要的作用^[7-12]。由于不同系列卫星高度计的测量偏差各有差异, 同一颗卫星高度计的测量偏差也可能随仪器老化等原因而产生漂移, 这就需要开展持续性的定标检验工作^[13-15]。

定标检验(Calibration Validation)是监测卫星高度计测量数据偏差和系统漂移的基本手段, 是保障业务化卫星资料精度和质量长期一致性和连续性的关键^[16-18]。定标检验通常是利用地面实测真值评估卫星测量的精度和质量, 地面实测真值通常又包含: 1) 具有参考椭球基准的验潮站^[19]; 2) GNSS 浮标^[20-23]; 3) 有源定标器^[24-26]; 4) 全球验潮站网、海底压力传感器、Argo 网^[27-30]①等。上述地面实测数据中以统一基准的验潮站和 GNSS 浮标使用最为广泛, 而有源定标器等方法的应用研究偏少^[13]。

目前国外主要的定标场: 美国 NASA 运行的 Harvest 石油平台定标场^[31-33]、法国 CNES 运行的 Corsica 定标场^[6, 34-38]、希腊克里特理工大学运行的 Crete 定标场^[39-45]、澳大利亚塔斯马尼亚大学负责的 Bass 海峡定标场^[46-48]。中国建设的卫星高度计定标站点有千里岩定标场^[49-52]和珠海万山综合定标场等^[13, 53-55]。这些定

收稿日期: 2020-06-08

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目——基于验潮、GNSS 连续运行站和浮标的卫星高度计绝对定标研究(41806214); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——海底精密定位关键算法研究及软件研制(2018Q04); 山东省自然科学基金项目——无定标场的 HY-2 卫星测高绝对偏差确定(ZR2017QD011); 自然资源卫星遥感业务支持服务体系项目——卫星海洋测绘应用

作者简介: 周兴华(1964-), 男, 教授级高工, 博士生导师, 主要从事海洋测绘方面研究. E-mail: xhzhou@fio.org.cn

(陈靖 编辑)

① LEGEAIS J F. Validation of altimeter data by comparison with in-situ T/S argo profiles, 2012.

标场最长的观测近 30 余 a, 为传统雷达高度计提供服务, 对于探测卫星测高偏差, 统一卫星测高数据基准发挥了重要作用^[16]。

传统高度计的噪声水平被限定在 100 km 以上的空间分辨率^[56-57], 为了以更高的分辨率观测海洋现象, 美国 NASA 和法国 CNES 于 2009 年正式提出 SWOT 干涉雷达高度计计划^②, 经过 10 余 a 的论证和发展, SWOT 计划于 2022 年发射^[58]。该卫星将利用干涉雷达测量技术, 获得 120 km 宽度刈幅的海面高度信息, 使高度计观测中尺度、亚中尺度海洋现象成为可能, 对于进一步研究海洋和全球气候变化的互相作用具有重大意义^[59]。同时该卫星还将观测高分辨率的陆地水表面高度, 对研究气候变化和全球陆地水分布、储量变化的相互作用意义重大^[60]。然而目前现有的定标检验技术均服务于传统星下点高度计, 其点对点式的定标方法很难适用于具有百余公里宽度刈幅的干涉雷达高度计^[61]。如何利用地面实测资料实现干涉雷达高度计的定标检验已经成为国内外学者所关注的重点问题之一^[59, 62]。因此, NASA 研制了 AirSWOT 机载干涉雷达高度计系统, 并进行了相关定标检验试验^[63-64], 开发了 SWOT simulator 模拟程序以及 SWOT OSSE 定标检验模拟系统^[61, 65-66]^③, 进行 SWOT 短波分量的定标检验模拟工作; 我国也开展了相应的预研工作, 其中“天宫”二号搭载全球首个成像雷达高度计获取了高分辨率的宽刈幅海面高度^[67], 我国也开展了机载干涉雷达高度计飞行试验, 对卫星载荷原型进行了性能检验和评估^[62, 68]。

1 SWOT 定标检验技术

SWOT 主要载荷包括 Ka 波段的雷达干涉计 (KaRIN), 它可以通过干涉测量方式获取海洋和陆地水的二维高度信息, 此外还有一个传统的剖面高度计载荷用于星下点测量, 在这种测量模式下, SWOT 可以覆盖宽 20~120 km、平行于基线方向的范围, 其网格像素大小在 10~70 m 范围, 在垂直于基线方向可以获得高达 2.5 m 的理论分辨率^④(图 1)。在 7.5 km × 7.5 km 的范围内, 通过滤波可以使 SWOT 噪声水平降低到

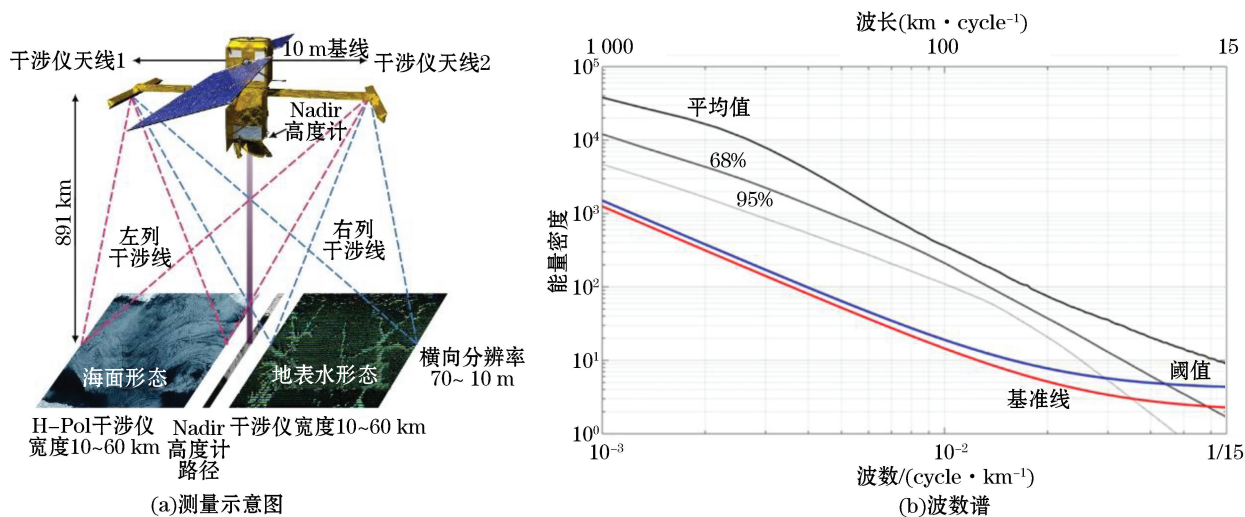


图 1 SWOT 干涉卫星高度计工作原理以及误差波数谱需求^④

Fig.1 Conceptual illustration of the SWOT mission measurement and the sea surface height error spectrum requirement as a function of wavenumber^④

② LEE L F, DOUG L A, ERENSTO R, et al. The SWOT (Surface Water and Ocean Topography) mission: spaceborne radar interferometry for oceanographic and hydrological applications, 2009.

③ GAULTIER L, UBELMANN C, FU L L. SWOT simulator documentation, 2017.

④ DANIEL E F. SWOT project mission performance and error budget revision A: JPL D-79084, 2017.

$2 \text{ cm}^2/(\text{cycle} \cdot \text{km}^{-1})$,而 Jason 系列的噪声水平约为 $100 \text{ cm}^2/(\text{cycle} \cdot \text{km}^{-1})$ ^[69],因此 SWOT 对海洋信号的分辨能力与传统高度计比较提高一个数量级,其对海洋信号的目标分辨率高达 15 km ^[65]。针对 SWOT 二维海面高度特征以及全新的科学目标,其定标检验也有别于传统高度计,例如传统高度计的定标检验目的主要为获取测高偏差,并以均值和均方根误差的形式进行评估,而 SWOT 的定标检验开创性地将高度计误差分解为波数谱的形式^[69],并设定 2 个目标:大地测量检验和海洋学定标检验。其中大地测量检验主要评估 SSH(Sea Surface Height)是否满足 SWOT 波数谱的科学需求,主要可用的设备包括 GNSS 和 LiDAR;海洋学检验主要是评估 SWOT 满足既定科学目标的能力,如亚中尺度海洋信号的探测等,可用的现场测量设备有温盐潜标、Glider、海洋上层剖面仪等^{⑤⑥}。此外 SWOT 还观测陆地水域,因此其定标检验也在河流湖泊开展,目前国外已经利用机载干涉雷达高度计和 GNSS 浮毯、无人船、LiDAR 等开展了河流观测和定标检验^{⑦⑧}。

1.1 海洋长波信号定标

结合 SWOT 的科学目标,其海洋领域的定标检验需在 $15 \sim 1\,000 \text{ km}$ 波长范围内开展,其中短波部分($15 \sim 120 \text{ km}$)需使用现场观测资料进行定标检验,而长波部分($120 \sim 1\,000 \text{ km}$)则使用 SWOT 携带的 Jason 型传统高度计^[59,70]。研究表明,Jason 级的传统高度计在大于 100 km 波长范围海洋信号强于噪声,在 SWOT 刈幅宽度 120 km 处的信噪比为 5,具备在长波部分评估 SWOT 的条件^[59],但 Jason 系列高度计无法识别小于 70 km 波长的海洋信号^[71](图 2)。Wang 等详细研究了 SWOT 传统高度计评估干涉雷达高度计长波信号的能力,考虑了 SWOT 误差与沿轨距离的相关性,选择刈幅的内边缘(距离星下点最近)和中间线(仪器噪声最小)分别与 Jason 高度计比较波数谱,通过模拟实验证明传统高度计可评估最短为 120 km 波长的 SWOT 数据^[70],因此仅波长小于 120 km 的海洋信号需要通过现场观测进行检验。

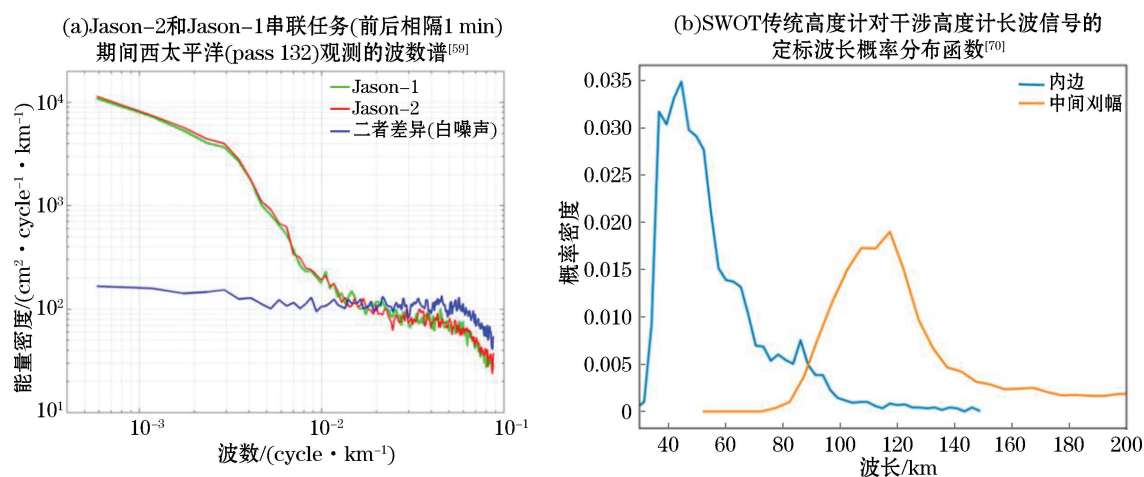


图2 Jason-2 和 Jason-1 串联任务观测的波数谱以及 SWOT 传统高度计对干涉高度计长波信号的定标波长概率分布函数

Fig.2 The sea surface height wavenumber spectra of Jason-1 and Jason-2 during the tandem mission and the probability function of the globally sampled nadir scale for SWOT

⑤ FU L L. Ocean in-situ CalVal, 2018.

⑥ FU L-L. A synergistic approach to SWOT ocean CalVal, 2018.

⑦ FROIDEVAL L, LAIGNEL B, PICOT N. CalVal LiDAR, 2018.

⑧ CALMANT S, CRÉTAUX J F, PICOT N. Presentation cover current pre-launch and post-launch Cal/Val plans led by France, 2018.

1.2 海洋短波信号检验

SWOT 设计的主要科学目标之一为通过海面地形观测海洋亚中尺度现象,因此 SWOT 短波部分的定标检验非常重要^[61,66]。由于 SWOT 携带的传统高度计可在长波部分对 SSH 进行评估,故地面观测主要用于 SWOT 短波部分(15~120 km)的定标检验。为了开展短波信号的定标检验,SWOT 设计了总计 90 d、重访周期 1 d 的快速 Cal/Val 飞行轨道,和传统高度计比较,该设计可大大提高时间分辨率,提高地面固定定标场的定标检验效率^[69]。短波信号的定标检验同样采用波数谱的形式,可利用的定标检验数据包括机载 LiDAR、机载干涉高度计和海上实测资料等。目前除了机载数据,尚无海面现场观测资料可以提供 15~120 km 波长的可靠波数谱,通过现场观测资料评估 SWOT 短波信号是一项具有挑战性的工作^[69]。Wang 等研究了利用固定站位 Glider、温盐锚系定标检验 SWOT 短波信号的可行性,为使现场观测资料能满足 15 km 波长的信号解析能力,站位空间间隔至少为 7.5 km,为满足 150 km 的最大波长信号解析能力,需沿着 SWOT 轨迹布设 20 个观测站位^[61]。Wang 等结合传统高度计解析长波信号的能力修改了短波信号的上限波长为 120 km^[70],因此现场站位数可降低为 16 个。此外,NASA 关于 GNSS 浮标用于 SWOT 短波定标检验的可行性正在评估之中^[69]⑨。然而成像雷达高度计获得的直接海面高度信息为相对于参考椭球的 SSH,如与 Glider/温盐锚系结果比较,需要转化成动力高度 SLA,因此定标结果中将包含大地水准面误差。目前大地水准面在短波分量的误差尚难以确定^[72-73],所以在实际的海洋定标过程中可能产生由大地水准面误差引起的潜在问题。

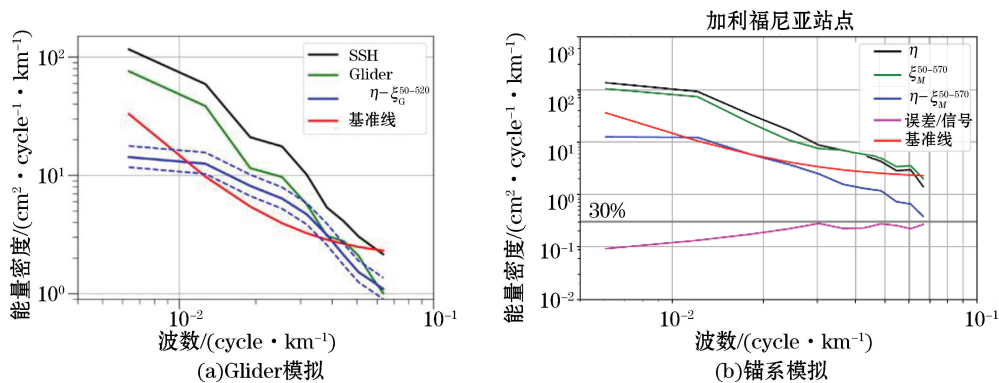
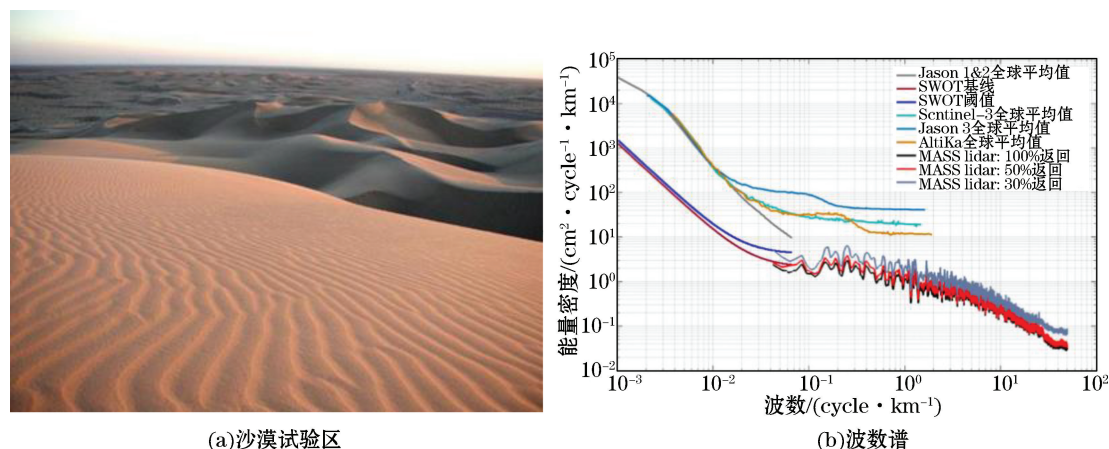


图 3 SWOT 和现场设备模拟的波数谱误差^[61]

Fig.3 Simulated wavenumber spectra of SWOT and field facilities^[61]

因机载干涉雷达高度计存在显著的 wave-bunching 效应,机载 LiDAR 将替代 AirSWOT 进行 SWOT 短波信号的定标检验^[74]。美国 Scripps 海洋研究所开发了一套 MASS(Modular Aerial Sensing System)系统,主要携带机载地形测量 LiDAR、视频、红外高光谱成像仪等设备,可以直接观测 SSH、海浪谱和海流等参数^[74]。因为海洋表面真实值难以确定,所以 MASS 选择不变的地面目标且与海洋波动类似的沙丘进行了系统噪声检验,结果如图 4 所示,MASS 的噪声水平在传统高度计之下,符合 SWOT 需求。然而 MASS 尚未在海洋领域获得可靠的结论,主要原因是缺少海上实测资料支持 15~120 km 的准确波数谱观测,相关研究仍在进行之中。

⑨ HAINES B, DESAI S, MEINIG C, et al. Status, results and plans for development of GPS buoys: potential for SWOT in-situ Cal-Val, 2018.



(a)沙漠试验区

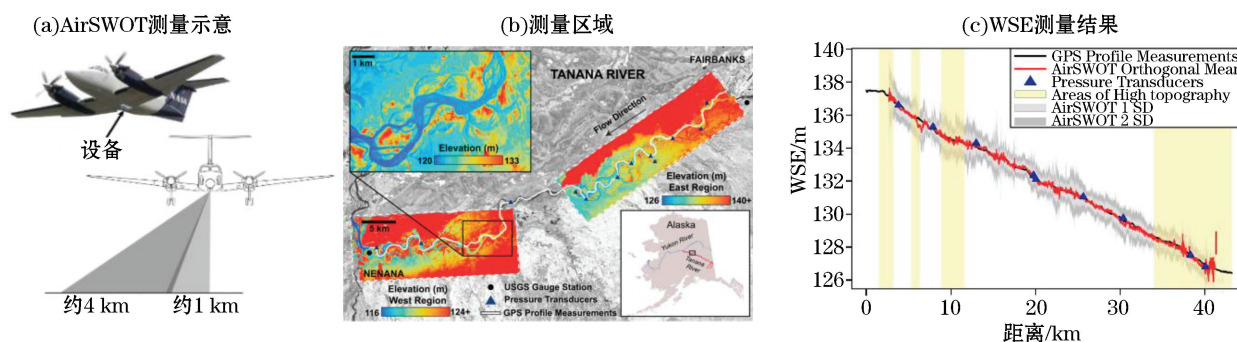
(b)波数谱

图4 MASS在沙漠中观测的高度波数谱和SWOT目标误差^⑩Fig.4 MASS lidar height error spectra obtained over the dunes, with the SWOT ocean requirements and typical nadir altimetry signal levels overlaid^⑩

1.3 AirSWOT 河流定标检验

SWOT 陆地水观测的科学目标为直接观测地表水面高度,并进一步获得水储量、流量、洪水动力等参数,陆地水观测的误差分配(error budget)包含高度误差、坡度误差和水分分类误差,SWOT 设计的陆地水面高度测量目标为 1 km^2 面积平均后的误差不大于 10 cm ,坡度测量目标为 10 km 长度误差不大于 1 cm/km ,对面积大于 250 m^2 的水体或者宽度大于 100 m 的河流识别误差小于 15% 。和传统高度计比较 SWOT 可以观测不低于 70 m 分辨率的二维陆地水文信息,通过观测水面坡度可估计得到水流速度、流量等信息,对于研究水文动力学意义重大^[75-78]。

为验证 SWOT 所设定的科学目标能否实现,美国科学家利用 AirSWOT 干涉雷达高度计进行了大量的河流观测定标检验试验^[63-64]^⑩。AirSWOT 河流定标检验地点之一是美国阿拉斯加州的 Tanana 河,通过机载干涉雷达高度计得到了河流的水面高度(Water Surface Elevation, WSE)和水面坡度两个参数,地面验证数据采用船载测绘型 GPS 和河底压力计。该试验结果表明,AirSWOT 观测到的 WSE 误差均方根为 9.0 cm



(a)AirSWOT测量示意

(b)测量区域

(c)WSE测量结果

图5 AirSWOT 河流测量实验区域及 WSE 观测的定标检验结果^[63]Fig.5 Location of the Tanana River study by AirSWOT, and the Cal/Val results from the WSE measurement^[63]

^⑩ LENAIN L, MELVILLE K, STATOM N, et al. Broad range airborne ocean topography measurements: Modular Aerial Sensing System (MASS) in support of SWOT Calval, 2019.

(1 km 平均),坡度均方根误差为 1.0 cm/km(10 km 长度),符合 SWOT 科学目标的精度需求,因此未来可使用 AirSWOT 开展 SWOT 陆地水域的现场定标检验工作^[63]。此外,AirSWOT 在美国俄勒冈州的 Willamette 河也开展了定标检验试验,其 WSE 误差均方根为 11.6 cm,坡度误差均方根为 3.2 cm/km^[64],与文献^[63]有所不同,高出 SWOT 的目标误差值,这也表明 SWOT 的地面定标检验仍旧存在挑战和不确定性。

2 中国干涉雷达高度计定标检验技术

目前我国多家机构也计划研制干涉雷达高度计,其中“观澜”卫星是一颗由青岛海洋科学与技术试点国家实验室牵头研发的干涉雷达高度计卫星,除干涉雷达高度计外,“观澜”还计划搭载激光雷达进行海洋的剖面观测,“观澜”干涉雷达高度计的主要科学目标与 SWOT 类似,也是海洋中尺度和亚中尺度海洋信号的观测^[79]。但“观澜”干涉雷达高度计设计参数与 SWOT 略有不同,其设计的刈幅宽度为 166.4 km,观测信息的像素大小为 5 km,设定的目标是识别 10 km 尺度的亚中尺度海洋信息。为了验证“观澜”干涉雷达高度计的概念设计,目前已开展机载海洋观测进行定标试验^[62]。

2.1 机载系统定标检验

机载干涉雷达高度计系统(Airborne Interferometric Radar Altimeter System, AIRAS)设计波段为 Ka 波段,刈幅覆盖范围为 1 km(3 000 m 高度,1°~15°入射角),预期测量精度为 3.4 cm。2019 年 3 月自然资源部第一海洋研究所等在青岛小麦岛海域进行了机载观测和现场定标检验试验,现场观测设备为 2 套同类型的 GNSS 测高浮标,同时搜集了小麦岛海洋观测站采集的验潮、气象、波浪等资料,通过 GNSS 静态测量和水准测量,统一了小麦岛验潮站和机载资料的参考基准面。如何利用有限的 GNSS 浮标对机载干涉雷达高度计的二维海面高度数据进行评估是一项前人所未涉及的研究,由于 GNSS 仅提供固定点位的 SSH 时间序列(1 Hz),而机载干涉雷达高度计则测量二维 SSH(原始分辨率 0.3 m),因此无法使用直接比较的办法进行误差分析。对此,提出一种适用于 GNSS 浮标评估二维海面高度的方法,对于时空域中波浪引起的海平面高程(Wind-induced Sea Surface Elevation, WSSE)的均匀场,假定以下 3 个陈述正确^[62]:

- 1) 如果被测 WSSE 的时间序列足够长,则在域内任何位置测得的 WSSE 的方差都相同;
- 2) 如果被测 WSSE 的面积足够大,则域内随时测量的 WSSE 的方差相同;
- 3) 如果条件 1)和 2)为真,则波浪引起的 WSSE 在空间和时间上是均匀的场,并且 1)和 2)的方差相等。

进而通过功率密度谱分析可以得到空间域的波数谱和时间域的频率谱,通过积分可以获得海洋波动信号方差,GNSS 浮标和机载数据的在时空域的积分方差差异可视为二者的总体差异。然而时空域的波数谱采用了不同的数学单位,因此无法直接分析误差在单独的空间域或者时间域的分布特征。为此,Yang 等^[62]提出一种时空谱统一方法,通过频散关系和方差守恒关系可以得到:

$$\begin{cases} d(\ln f) = \frac{1}{2}d(\ln k) \\ S(f)f = 2Q(k)k \end{cases}, \quad (1)$$

式中: f 为频率; k 为波数; S 和 Q 分别为时间域和空间域的能量密度函数。

通过上述转换关系可统一 GNSS 浮标一维时间频率谱和机载干涉雷达高度计二维空间波数谱,使之在同样的坐标单位下进行比较。结果表明,机载干涉雷达高度计和 GNSS 浮标的方差差异小于 8 cm²,对应约 2.8 cm 的标准偏差,二者波数谱的相关性大于 0.9,表明二者在频率域的方差分布具有很高的一致性。

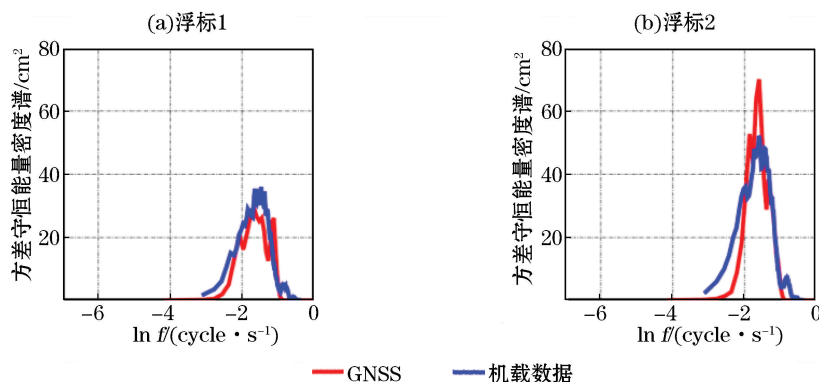


图6 机载干涉雷达高度计和GNSS浮标统一后风浪引起的海面高度波数谱比较^[64]

Fig.6 Unified VPS in frequency domain of Wind-induced Sea Surface Elevation measured by AIRAS and GNSS buoys^[64]

2.2 卫星定标检验计划

我国“观澜”干涉雷达高度计设计的定标方案同SWOT相似,同样采用波数谱的方式进行误差评估。目前我国在西太平洋、印度洋、南海等海域布设了温盐潜标,这些已有的设施可为我国相关卫星的定标检验提供潜在的数据支持,卫星发射后的定标检验计划还包括布设GNSS浮标阵列、PIES(Pressure-sensor-equipped Inverted Echo Sounders)阵列,以及在南海石油平台安装GNSS、验潮仪定标设备等^[79]。

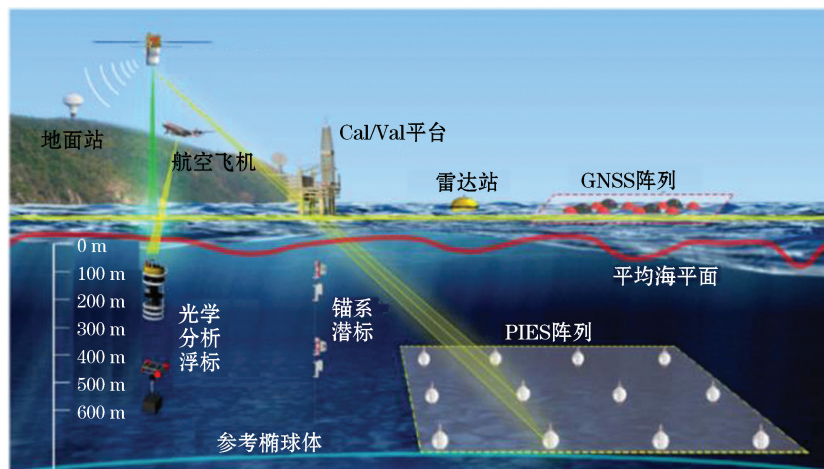


图7 “观澜”任务的定标示意图^[79]

Fig.7 A schematic illustration of calibration/validation facility for the 'Guanlan' mission^[79]

3 其他方法

除现场观测和机载激光测量方法,SWOT二维海面高度的误差评估还可以采用交叉谱分析方法^[80]。由于SWOT的观测数据误差源多样(如地球物理误差、仪器误差等),并且测量误差和距离向的长度相关,如何定量分离各项误差成为一项挑战性的研究。Ubelmann等研究表明利用交叉谱分析可以探测雷达距离向的绝大多数误差并给出能量密度谱,对于天线滚动误差、相位误差、基线膨胀误差具有非常高的精度^[80]。由于SWOT的误差评估采用的波数谱的策略,因此交叉谱误差分析的方法对于SWOT的定标检验具有一定

的适用性。此外,该方法还可用于 SWOT 数据去噪及计算误差协方差等方面,对于 SWOT 网格数据产品的制作有一定价值。交叉定标也是 SWOT 干涉雷达高度计数据定标检验的方法之一^[81-82],Dibarboure 等研究表明利用经验交叉定标方法可以探测并显著降低 SWOT 天线的姿态误差,例如由天线基线长度误差和翻滚误差带来的最大可为 70 cm 的误差通过交叉定标可降低为 2 cm^[82]。

4 挑战和展望

SWOT 及其同类型干涉雷达高度计的科学目标之一是通过二维海面高度的观测来解析海洋中尺度和亚中尺度信号,因此设定的目标分辨率为 10~15 km,较传统高度计高出一个数量级。干涉雷达高度计通过 InSAR 技术进行海面高观测,与传统高度计测量方式不同,其测量方式和科学目标使得定标检验具有一定的挑战性,且尚无成熟经验可以借鉴。其主要挑战可简述为以下几方面:1)卫星干涉雷达高度计观测亚中尺度海洋信号本身即一项具有挑战性的工作,实现此目标应首先将干涉雷达高度计仪器噪声水平控制在约 $2 \text{ cm}^2/(\text{cycle} \cdot \text{km})$,较现在传统雷达高度计的噪声水平需提高 2 个数量级,因此对仪器硬件噪声控制以及数据滤波算法都提出了很高要求,特别是在利用机载干涉雷达高度计标定卫星数据时,机载资料的噪声水平不应高于卫星的噪声水平,同理对浮标、PIES 等现场设备也存在噪声水平的控制问题;2)干涉雷达高度计定标的主要目标之一是获得噪声误差谱,分析其在不同尺度(特别是亚中尺度)的误差水平,平均海平面模型(MSS)或者大地水准面模型(Geoid)是海洋动力信号提取的重要参考基准,MSS 包含了大地水准面高度和稳态海面地形(Mean Dynamic Topography, MDT)高度,MSS 是海面高度异常(SLA)的参考基准,大地水准面是绝对动力高度(Absolute Dynamic Topography, ADT)的参考基准^[83],目前常用的 MSS 模型为多年测高平均模型(如 DTU MSS 2018),大地水准面模型为理论模型 EGM2008 等,其中多年测高数据平均得到的 MSS 模型忽略了可能存在的亚中尺度的季节性变化,其引入的误差可能对分离较弱的亚中尺度海洋信号带来干扰,进而影响误差谱分析,因此解决 MSS 基准模型在亚中尺度波段的精度评估和优化格外重要^[72]。

本文对 SWOT 发展至今 10 余年内的国外定标检验工作和研究成果进行了总结分析,并对我国相关的同类型干涉雷达高度计的机载定标检验工作做了阐述。由于 SWOT 和我国的同类卫星都尚未发射,目前绝大部分工作都是基于理论模拟数据开展,在真实海洋中的相关机载定标检验工作依旧缺乏。目前美国 NASA/JPL 证实 AirSWOT 尚不具备海洋亚中尺度信号的定标检验能力,而转为采用机载激光测高系统 MASS,这也给我国的相关机载试验带来启示,需尽早开展机载干涉雷达高度计的海洋观测性能分析,并对海洋干涉雷达高度计数据处理算法进行优化设计,论证是否可以满足相关要求。SWOT 和我国同类卫星的科学目标之一还包括陆地水域测高,因此陆地水域的定标检验也是重要工作之一。陆地河、湖、湿地等资源是宝贵的自然资源,通过新型干涉雷达高度计观测其水位、储量和流量意义重大,我国在开展海洋领域定标检验研究同时,建议同步考虑陆地水域的测高定标研究工作。

参考文献(References):

- [1] XU Y S, GAO L, ZHANG Y H. 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. 徐永生, 高乐, 张云华. 美国新一代测高卫星 SWOT 及对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.
- [2] CHELTON D, RIES J, HAINES B, et al. Satellite altimetry and earth sciences: a handbook of techniques and applications[M]. California: Academic Press, 2001.
- [3] TAPLEY B D, BORN G H, PARKE M E. The SEASAT altimeter data and its accuracy assessment[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1982, 87(C5): 3179-3188. DOI: 10.1029/JC087iC05p03179.
- [4] CHENEY R E, DOUGLAS B C, MILLER L. Evaluation of Geosat altimeter data with application to tropical Pacific sea level variability[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1989, 94(C4): 4737-4747. DOI: 10.1029/JC094iC04p04737.

- [5] BIANCAMARIA S, SCHAEDELE T, BLUMSTEIN D, et al. Validation of Jason-3 tracking modes over French rivers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018(209): 77-89. DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.037.
- [6] BONNEFOND P, LAURAIN O, EXERTIER P, et al. Calibrating the SAR SSH of Sentinel-3A and CryoSat-2 over the Corsica facilities [J/OL]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 92. <http://www.mdpi.com/2072-4292/10/1/92>. DOI: 10.3390/rs10010092.
- [7] CHEN N, HAN G, YANG J, et al. Hurricane Sandy storm surges observed by HY-2A satellite altimetry and tide gauges[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(7): 4542-4548. DOI: 10.1002/2013jc009782.
- [8] LI M, ZHAO C, ZHAO Y, et al. Polar sea ice monitoring using HY-2A scatterometer measurements[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(8): 688. DOI: 10.3390/rs8080688.
- [9] JIANG X W, LIN M S, ZHANG Y G. An overview of HY-2 satellite ground application system[J]. *Strategic Study of CAE*, 2014, 16(6): 4-12. 蒋兴伟, 林明森, 张有广. HY-2 卫星地面应用系统综述[J]. *中国工程科学*, 2014, 16(6): 4-12.
- [10] YANG L, ZHOU X H, WANG Z Y, et al. Absolute calibration of sea surface height for HY-2A satellite altimeter by GNSS buoy and tide gauge data[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(1): 111-120. 杨磊, 周兴华, 王朝阳, 等. 基于 GNSS 浮标和验潮资料的 HY-2A 卫星雷达高度计绝对定标[J]. *海洋学报*, 2017, 39(1): 111-120.
- [11] PENG H L, LIN M S, MU B, et al. Global statistical evaluation and performance analysis of HY-2A satellite radar altimeter data[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 32(7): 54-66. 彭海龙, 林明森, 穆博, 等. HY-2A 卫星雷达高度计数据的全球统计评价及质量分析[J]. *海洋学报*, 2015, 32(7): 54-66.
- [12] ZHU C, GUO J, HWANG C, et al. How HY-2A/GM altimeter performs in marine gravity derivation: assessment in the South China Sea[J]. *Geophysical Journal International*, 2019, 219(2): 1056-1064. DOI: 10.1093/gji/ggz330.
- [13] YANG L, ZHOU X H, XU Q J, et al. Current status of satellite altimeter calibration[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(3): 392-407. 杨磊, 周兴华, 徐全军, 等. 卫星高度计定标现状[J]. *遥感学报*, 2019, 23(3): 392-407. DOI: 10.11834/jrs.20198262.
- [14] ANDERSEN O B, CHENG Y. Long term changes of altimeter range and geophysical corrections at altimetry calibration sites[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(8): 1468-1477. DOI: 10.1016/j.asr.2012.11.027.
- [15] BROWN S, DESAI S, KEIHM S, et al. Microwave radiometer calibration on decadal time scales using on-earth brightness temperature references: application to the TOPEX microwave radiometer[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(12): 2579-2591. DOI: 10.1175/2009jtecha1305.1.
- [16] FU L L, HAINES B J. The challenges in long-term altimetry calibration for addressing the problem of global sea level change[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(8): 1284-1300.
- [17] BONNEFOND P, HAINES B J, WATSON C. In situ absolute calibration and validation: a link from coastal to open-ocean altimetry [M/OL]. VIGNUDELLI S, KOSTIANOV A G, CIPOLLINI P. // *Coastal Altimetry*. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 259-296. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0_11. DOI: 10.1007/978-3-642-12796-0_11.
- [18] LEULIETTE E W, NEREM R S, MITCHUM G T. Calibration of TOPEX/Poseidon and Jason altimeter data to construct a continuous record of mean sea level change[J]. *Marine Geodesy*, 2004, 27(1-2): 79-94.
- [19] HAINES B J, DONG D, BORN G H, et al. The harvest experiment: monitoring Jason-1 and TOPEX/POSEIDON from a California offshore platform special issue: Jason-1 calibration/validation[J]. *Marine Geodesy*, 2003, 26(3-4): 239-259. DOI: 10.1080/714044520.
- [20] XU X, XU K, SHEN H, et al. Sea surface height and significant wave height calibration methodology by a GNSS buoy campaign for HY-2A altimeter[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(11): 5252-5261.
- [21] BORN G H, PARKE M E, AXELRAD P, et al. Calibration of the TOPEX altimeter using a GPS buoy[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C12): 24517-24526. DOI: 10.1029/94jc00920.
- [22] CHADWELL C D, BOCK Y. Direct estimation of absolute precipitable water in oceanic regions by GPS tracking of a coastal buoy[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(19): 3701-3704.
- [23] WATSON C S. Satellite altimeter calibration and validation using GPS buoy technology[D]. Tasmania: University of Tasmania, 2005.
- [24] WAN J, GUO W, ZHAO F, et al. HY-2A radar altimeter ultrastable oscillator drift estimation using reconstructive transponder with its validation by multimission cross calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015(9): 5229-5236.
- [25] ZHEN G A O. Simulations of satellite-borne altimeter tracking system with transponder in calibration test[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(2): 365-382. DOI: 10.1080/01431169308904342.
- [26] WANG C, GUO W, ZHAO F, et al. Development of the reconstructive transponder for in-orbit calibration of HY-2A altimeter[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 9(6): 2709-2719.
- [27] CHAMBERS D, RIES J, SHUM C, et al. On the use of tide gauges to determine altimeter drift[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 1998, 103(C6): 12885-12890.
- [28] FENOGLIO-MARC L, SCHÖNE T, ILLIGNER J, et al. Sea level change and vertical motion from satellite altimetry, tide gauges and

- GPS in the Indonesian region[J]. *Marine Geodesy*, 2012, 35(Suppl. 1): 137-150. DOI: 10.1080/01490419.2012.718682.
- [29] VALLADEAU G, LEGEAIS J F, ABLAIN M, et al. Comparing altimetry with tide gauges and Argo profiling floats for data quality assessment and mean sea level studies[J]. *Marine Geodesy*, 2012, 35(Suppl. 1): 42-60. DOI: 10.1080/01490419.2012.718226.
- [30] GE L, XU Y S, YIN B S. Comparison of sea surface height anomalies derived by pressure-sensor-equipped inverted echo sounder[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(2): 128-135. 葛磊, 徐永生, 尹宝树. 日本海西南海域现场观测和卫星高度计获取的海面高度距平的比较研究[J]. *海洋科学*, 2016, 40(2): 128-135.
- [31] CHRISTENSEN E J, HAINES B J, KEIHM S J, et al. Calibration of TOPEX/POSEIDON at platform harvest[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C12): 24465-24485. DOI: 10.1029/94jc01641.
- [32] HAINES B J, DESAI S D, BORN G H. The harvest experiment: calibration of the climate data record from TOPEX/Poseidon, Jason-1 and the Ocean Surface Topography Mission[J]. *Marine Geodesy*, 2010, 33(Suppl. 1): 91-113. DOI: 10.1080/01490419.2010.491028.
- [33] MNARD Y, JEANSOU E, VINCENT P. Calibration of the TOPEX/POSEIDON altimeters at Lampedusa: additional results at harvest [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 1994, 99(C12): 24487-24504.
- [34] BONNEFOND P, EXERTIER P, MENARD Y, et al. Calibration of radar altimeters and validation of orbit determination in the Corsica-Capraia area[J]. *Molecular Human Reproduction*, 1997, 15(414): 205-213.
- [35] BONNEFOND P, EXERTIER P, LAURAIN O, et al. Absolute Calibration of Jason-1 and TOPEX/Poseidon altimeters in corsica special issue: Jason-1 calibration/validation[J]. *Marine Geodesy*, 2003, 26(3-4): 261-284. DOI: 10.1080/714044521.
- [36] BONNEFOND P, EXERTIER P, LAURAIN O, et al. Absolute calibration of Jason-1 and Jason-2 altimeters in Corsica during the formation flight phase[J]. *Marine Geodesy*, 2010, 33(Suppl. 1): 80-90.
- [37] BONNEFOND P, EXERTIER P, LAURAIN O, et al. SARAL/AltiKa absolute calibration from the multi-mission corsica facilities[J]. *Marine Geodesy*, 2015, 38 (Suppl. 1): 171-192.
- [38] GOURINE B, KAHLOUCHE S, EXERTIER P, et al. Corsica SLR positioning campaigns (2002 and 2005) for satellite altimeter calibration missions[J]. *Marine Geodesy*, 2008, 31(2): 103-116. DOI: 10.1080/01490410802053658.
- [39] MERTIKAS S P, ZHOU X, QIAO F, et al. First preliminary results for the absolute calibration of the Chinese HY-2 altimetric mission using the CRS1 calibration facilities in West Crete, Greece[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 57(1): 78-95. DOI: 10.1016/j.asr.2015.10.016.
- [40] MERTIKAS S P, DASKALAKIS A, TZIAVOS I N, et al. Ascending and descending passes for the determination of the altimeter bias of Jason satellites using the gavdos facility[J]. *Marine Geodesy*, 2011, 34(3-4): 261-276. DOI: 10.1080/01490419.2011.584837.
- [41] MERTIKAS S P, DASKALAKIS A, TZIAVOS I N, et al. First calibration results for the SARAL/AltiKa altimetric mission using the gavdos permanent facilities[J]. *Marine Geodesy*, 2015(Suppl. 1): 249-259.
- [42] MERTIKAS S P, DASKALAKIS A, TZIAVOS I N, et al. Altimetry, bathymetry and geoid variations at the Gavdos permanent Cal/Val facility[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(8): 1418-1437. DOI: 10.1016/j.asr.2012.10.021.
- [43] PAVLIS E C, MERTIKAS S P. The GAVDOS mean sea level and altimeter calibration facility: results for Jason-1[J]. *Marine Geodesy*, 2004, 27(3-4): 631-655. DOI: 10.1080/01490410490902106.
- [44] TZIAVOS I N, VERGOS G S, MERTIKAS S P, et al. The contribution of local gravimetric geoid models to the calibration of satellite altimetry data and an outlook of the latest GOCE GGM performance in Gavdos[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(8): 1502-1522. DOI: 10.1016/j.asr.2012.06.013.
- [45] MERTIKAS, DONLON, VUILLEUMIER, et al. An action plan towards fiducial reference measurements for satellite altimetry[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(17): 1993. DOI: 10.3390/rs11171993.
- [46] WATSON C, WHITE N, COLEMAN R, et al. TOPEX/Poseidon and Jason-1: absolute calibration in Bass Strait, Australia[J]. *Marine Geodesy*, 2004, 27(1-2): 107-131. DOI: 10.1080/01490410490465373.
- [47] WATSON C, WHITE N, CHURCH J, et al. Absolute calibration in bass strait, Australia: TOPEX, Jason-1 and OSTM/Jason-2[J]. *Marine Geodesy*, 2011, 34(3-4): 242-260. DOI: 10.1080/01490419.2011.584834.
- [48] WATSON C, COLEMAN R, WHITE N, et al. Absolute calibration of TOPEX/Poseidon and Jason-1 using GPS buoys in Bass Strait, Australia special issue: Jason-1 calibration/validation[J]. *Marine Geodesy*, 2003, 26(3-4): 285-304. DOI: 10.1080/714044522.
- [49] LEI Y, XINGHUA Z, P. M S, et al. First calibration results of Jason-2 and Saral/AltiKa satellite altimeters from the Qianliyan permanent facilities[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(12): 2831-2842.
- [50] ZHOU X, YANG L, LIN M, et al. Absolute calibration of HY-2, Jason-2 and Saral/AltiKa from China in-situ calibration site: Qian Li Yan[C]//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326616.
- [51] ZHOU X, YANG L, LEI N, et al. Calibration results of multiple satellite altimetry missions from QianliYan permanent CAL/VAL facilities[C]//2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127392.

- [52] ZHOU X, YANG L, WANG Y, et al. Research progress of satellite altimeter calibration in China[C]//IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8898571.
- [53] ZHANG Y F, JIANG X W, MA C F. The progress of the altimeter calibration based on the in-situ observation[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(6): 1190-1196. 张宇飞, 蒋兴伟, 马超飞. 基于现场观测的星载雷达高度计定标方法进展[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(6): 1190-1196.
- [54] ZHAN Y G, LIN M S. Research progress of calibration site and calibration method of satellite altimeter[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(3): 87-92. 张有广, 林明森. 卫星高度计海上定标及定标方法研究进展[J]. 海洋通报, 2007, 26(3): 87-92.
- [55] LIU Y L. Research on HY-2 radar altimeter sea height calibration technology[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. 刘亚龙. HY-2 雷达高度计海面高度定标技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [56] XU Y, FU L L. The effects of altimeter instrument noise on the estimation of the wave number spectrum of sea surface height[J]. Journal of Physical Oceanography, 2012, 42: 2229-2233.
- [57] XU Y, FU L L. Global variability of the wavenumber spectrum of oceanic mesoscale turbulence[J]. Journal of Physical Oceanography, 2011, 41: 802-809.
- [58] CHEVALIER L, DESROCHES D, LAIGNEL B, et al. High-resolution SWOT simulations of the macrotidal seine estuary in different hydrodynamic conditions[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(1): 5-9. DOI: 10.1109/LGRS.2018.2862470.
- [59] 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. DOI: 10.1175/JTECH-D-13-00109.1.
- [60] PRIGENT C, LETTENMAIER D P, AIRES F, et al. Toward a high-resolution monitoring of continental surface water extent and dynamics, at global scale: from GIEMS (Global Inundation Extent from Multi-Satellites) to SWOT (Surface Water Ocean Topography) [M/OL]//CAZENAVE A, CHAMPOLLION N, BENVENISTE J. Remote Sensing and Water Resources. Cham: Springer International Publishing, 2016: 149-165[2018-10-17]. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32449-4_7. DOI: 10.1007/978-3-319-32449-4_7.
- [61] WANG J, FU L L, QIU B, et al. An observing system simulation experiment for the calibration and validation of the surface water ocean topography sea surface height measurement using in situ platforms[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2017, 35(2): 281-297. DOI: 10.1175/JTECH-D-17-0076.1.
- [62] YANG L, XU Y, ZHOU X H, et al. Calibration of an airborne interferometric radar altimeter over the Qingdao coast sea, China: 10 [J]. Remote Sensing, 2020, 12(10): 1651. DOI: 10.3390/rs12101651.
- [63] ALTENAU E H, PAVELSKY T M, MOLLER D, et al. AirSWOT measurements of river water surface elevation and slope: Tanana river, AK[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(1): 181-189. DOI: 10.1002/2016GL071577.
- [64] TUOZZOLO S, LIND G, OVERSTREET B, et al. Estimating river discharge with Swath altimetry: a proof of concept using AirSWOT observations[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(3): 1459-1466. DOI: 10.1029/2018GL080771.
- [65] WANG J, FU L L, TORRES H S, et al. On the spatial scales to be resolved by the surface water and ocean topography Ka-band radar interferometer[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2019, 36(1): 87-99. DOI: 10.1175/JTECH-D-18-0119.1.
- [66] LI Z, WANG J, FU L L. An observing system simulation experiment for ocean state estimation to assess the performance of the SWOT mission: part 1 a twin experiment[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(7): 4838-4855. DOI: 10.1029/2018JC014869.
- [67] ZHANG Y, SHI X, WANG H, et al. Interferometric imaging radar altimeter on board Chinese Tiangong-2 space laboratory[C]//2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). DOI: 10.23919/APMC.2018.8617189.
- [68] CHEN H, GUO W, YANG S B, et al. A method of calibration of SAR altimeter[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(9): 2232-2237. 谌华, 郭伟, 杨双宝, 等. 一种合成孔径雷达高度计定标方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(9): 2232-2237.
- [69] 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/OL]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6[2020-04-04]. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2019.00232/full>. DOI: 10.3389/fmars.2019.00232.
- [70] WANG J, FU L L. On the long-wavelength validation of the SWOT KaRIn measurement[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2019, 36(5): 843-848. DOI: 10.1175/JTECH-D-18-0148.1.
- [71] DUFAU C, ORSZTYNOWICZ M, DIBARBOURE G, et al. Mesoscale resolution capability of altimetry: present and future[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(7): 4910-4927. DOI: 10.1002/2015JC010904.
- [72] PUJOL M I, SCHAEFFER P, FAUGRE Y, et al. Gauging the improvement of recent mean sea surface models: a new approach for identifying and quantifying their errors[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(8): 5889-5911. DOI: 10.1029/2017JC013503.
- [73] DIBARBOURE G, PUJOL M I. Improving the quality of sentinel-3A data with a Hybrid Mean Sea Surface Model, and implications for sentinel-3B and SWOT[J/OL]. Advances in Space Research, 2019[2020-04-12]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027311771930434X>. DOI: 10.1016/j.asr.2019.06.018.

- [74] MELVILLE W K, LENAIN L, CAYAN D R, et al. The modular aerial sensing system[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, 33(6): 1169-1184. DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0067.1.
- [75] BARATELLI F, FLIPO N, RIVIÈRE A, et al. Retrieving river baseflow from SWOT spaceborne mission[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 218: 44-54. DOI: 10.1016/j.rse.2018.09.013.
- [76] GRIPPA M, ROUZIES C, BIANCAMARIA S, et al. Potential of SWOT for monitoring water volumes in Sahelian Ponds and Lakes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019: 1-9. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2901434.
- [77] DOMENEGHETTI A, SCHUMANN G J-P, FRASSON R P M, et al. Characterizing water surface elevation under different flow conditions for the upcoming SWOT mission[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 561: 848-861. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.04.046.
- [78] BIANCAMARIA S, DURAND M, ANDREADIS K M, et al. Assimilation of virtual wide swath altimetry to improve Arctic river modeling[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 373-381. DOI: 10.1016/j.rse.2010.09.008.
- [79] CHEN G, TANG J, ZHAO C, et al. Concept design of the "Guanlan" science mission: China's novel contribution to space oceanography[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6.
- [80] UBELMANN C, DIBARBOURE G, DUBOIS P. A cross-spectral approach to measure the error budget of the SWOT altimetry mission over the ocean[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 35(4): 845-857. DOI: 10.1175/JTECH-D-17-0061.1.
- [81] DIBARBOURE G, UBELMANN C. Investigating the performance of four empirical cross-calibration methods for the proposed SWOT mission[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(6): 4831-4869.
- [82] DIBARBOURE G, LABROUE S, ABLAIN M, et al. Empirical cross-calibration of coherent SWOT errors using external references and the altimetry constellation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(6): 2325-2344. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2171976.
- [83] XIE L, ZHENG Q, TIAN J, et al. Cruise observation of Rossby waves with finite wavelengths propagating from the Pacific to the South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(10): 2897-2913. DOI: 10.1175/JPO-D-16-0071.1.

The Research Progress in Calibration/Validation of Interferometric Altimeter

ZHOU Xing-hua^{1,2}, YANG Lei¹, XU Yong-sheng³, ZHU Lin⁴

(1. *First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;*

2. *College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;*

3. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;*

4. *College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)*

Abstract: The satellite altimeter technology is evolving from the nadir to interferometric wide swath altimetry, which make it possible to monitor the two-dimensional sea surface height and water surface elevation of rivers/lakes with high resolution and accuracy. For oceanographic study, the monitoring of submesoscale signals may be performed in the U.S.—French SWOT (Surface Water and Ocean Topography) and the follow-up Chinese "Guanlan" missions. The calibration/validation (Cal/Val) is one of important components of such satellite missions. Traditional Cal/Val methods for nadir altimeters are mainly based on the tide gauge, GNSS buoy and transponders, and are compared point by point with the satellite data. However, these Cal/Val methods are difficult to satisfy the requirements of SWOT-like missions. Innovated Cal/Val methods have been tested with the air borne sensors, which can fly over the ocean and land water surfaces. This study summarized the research progress in the field of Cal/Val methods for interferometric altimeters, and expected that this work might serve as a reference to future missions.

Key words: SWOT; calibration/validation; interferometric altimeter

Received: June 8, 2020