基于多天线 GNSS 浮标的 HY-2D 卫星雷达高度计海面高测量精度验证研究

徐曦煜[1,2]，许可[1,2]，蒋茂飞[1,2]，管斌[3,4]，李敏[5]

1(中国科学院国家空间科学中心微波遥感技术重点实验室 北京 100190)
2(中国科学院大学 北京 100049)
3(空间基准全国重点实验室 西安 710054）
4(西安测绘研究所 西安 710054）
5(山东大学（威海） 威海 264209)

摘 要 星载雷达高度计的海面高定标是保障其测量质量的关键。万山定标场与 HY-2D 卫星星下点距离较远，难以用于其高度计的定标。本文利用 2023 年 5—6 月在千里岩岛定标场区布放的多天线 GNSS 浮标观测数据，实现了 HY-2D 卫星高度计的海面高绝对定标方法演示及测高精度验证。首先，对多天线 GNSS 浮标的观测数据进行动态差分处理；其次，获取 HY-2D 卫星高度计海面高；最后，实现海面高匹配和比对，完成测量精度验证。结果表明：HY-2D 卫星高度计相对于 GNSS 浮标的海面高偏差均值为-0.3cm，标准差为 2.8cm，偏差的不确定度达 1.2cm；自适应重跟踪算法可有效提升海面高测量精度；校正辐射计对湿对流层延迟的校正效果优于 ECMWF 模型。本文的研究结果可为 HY-2D 卫星雷达高度计数据产品质量提供可靠评估。

关键词 HY-2D 卫星，雷达高度计，海面高度，绝对定标，GNSS 浮标，多天线，回波重跟踪

中图分类号 TP79

最新录用

Research on Sea Surface Height Calibration of HY-2D Satellite Radar Altimeter Based on Multi-Antenna GNSS Buoy

XU Xi-Yu[1,2]，XU Ke[1,2]，JIANG Maofei[1,2]，GUAN Bin[3,4]，LI Min[5]

1. The CAS Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing,100049

3. State Key Laboratory of Spatial Datum, Xi'an, 710054

4. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an, 710054

5. Shandong University (Weihai), Weihai, 264209

Abstract. The sea surface height (SSH) calibration of spaceborne radar altimeters is crucial for ensuring their measurement accuracy and expanding the high-precision application of data. As one of China's HY-2 (Haiyang-2) series satellites, the HY-2D satellite is equipped with a dual-frequency radar altimeter, but no absolute SSH calibration research has been published since its launch, because China's official Wanshan calibration field is far from the satellite nadir. This study demonstrated the methodology and procedure of the absolute SSH calibration of the HY-2D satellite radar altimeter using the measurements a multi-antenna GNSS buoy deployed in the Qianliyan Islet calibration field from May to June 2023. Firstly, the raw observation data of the multi-antenna GNSS buoy were processed by dynamic

kinematic positioning, with a focus on correcting the height error due to the seawater density variety and the non-zero mean buoy attitude. Secondly, the “range” parameters were extracted from the HY-2D satellite SGDR data product, while another set of derived altimeter range was obtained using the advanced adaptive waveform retracker. The altimeter SSHs were calculated, considering the correction of various error items. Finally, after three mismatch corrections including mean sea surface, ocean tide, and reference ellipsoid, the biases between the buoy SSH and the altimeter SSH were computed for all the overhead, and the absolute calibration was realized. The results showed that the multi-antenna GNSS buoy can achieve long-term stable observation at sea, and the SSH measurement accuracy can be effectively improved after buoy attitude error correction. Using the combined scheme of "adaptive waveform retracker + wet tropospheric path delay measured by the microwave radiometer ", the mean SSH bias was -0.3 cm, the standard deviation was 2.8 cm, and the estimated accuracy of the altimeter system bias was 1.2 cm. The microwave radiometer on wet tropospheric path delay outperformed that of the ECMWF model, which significantly improves the SSH bias estimation. The results of this study can demonstrate the potential of the multi-antenna GNSS buoy, provide a reliable evaluation for the data product quality of the HY-2D satellite radar altimeter. In the near future, the multi-antenna GNSS buoy can make substantial contributions to the absolute calibration of wide-swath imaging altimeters, owing to its stability under complex marine environments.

Key words HY-2D satellite, Radar altimeter, Sea surface height, Absolute calibration, GNSS buoy, Multi-antenna, Waveform retracking

0 引言

星载雷达高度计能够实现对全球海面高度、有效波高和海面风速的全天候观测，在物理海洋学和大地测量学等领域起着无可替代的作用。自 1992 年 Topex/Poseidon（T/P）卫星成功发射以来，高度计的海面高测量精度已达到厘米级，加上后续的 Jason 系列卫星高度计，已积累了长达 30 余年不间断的全球海面高数据记录，为全球气候变化等研究提供了关键的证据支撑[1,2]。海洋二号（HY-2）系列卫星是我国的业务化动力环境卫星，全部搭载了双频雷达高度计[3, 4]。其中，C 星和 D 星运行在约 10 天回归的倾斜轨道，和 Jason 系列高度计非常接近。而 HY-2C/HY-2D/Jason-3/Sentinel-6 四星组网的形式，可相对均匀的采样实现海面高异常场的融合，提高海面高异常场的时空分辨率，为国际卫星测高行业做出重要贡献。

星载雷达高度计的精度和准确度要求均非常严苛，而对高度计观测的海面高的定标是空间大地测量学和定量遥感领域中最困难的问题之一，是卫星测高系统天地一体化的枢纽。不做定标，将严重限制高度计数据在重力场反演、全球变化研究等高精度应用中发挥作用。可绝大多数星载雷达高度计往往都进行了基于定标场的绝对定标。定标场位于近岸海域，其回波往往比开放海域更为复杂，定标场的海面高提供了可靠的原位（in-situ）观测真值，可用于对近岸海域不同回波重跟踪算法性能的检验。

在卫星测高中，定标场是划定的一个专门区域，该区域可获得精确的环境、几何和地理信息，实现对场区气象海洋环境参数长期、持续、稳定、准确、可靠的监测，完成对卫星测高遥感产品的定标和真实性检验。在海上定标场对雷达高度计测量的海面高进行绝对定标的关键在于获取用于比对的高度计星下点的海面高测量值（也称为地面真值：Ground Truth，简称真值）。我国当前唯一运行的业务化的卫星高度计海上定标场为建成于 2020 年的位于广东珠海的万山定标场[5]。该定标场可为 HY-2B、HY-2C（以及即将发射的 HY-2E、HY-2F）进行定标，但该定标场的场址和 HY-2D 卫星的星下点相距较远（超过 100km），难以满足为 HY-2D 卫星高度计定标和精度验证的条件。

根据真值获取来源（即定标场海面高观测设备）的不同，高度计绝对定标方法分为：验潮站定标法、GNSS（Global Navigation Satellite System，全球导航卫星系统）浮标定标法和海床基锚泊定标法等。1990 年代以来，随着 GNSS 卫星导航定位技术的飞速发展，出现了 GNSS 天线安装在海上浮动平台（如浮标或船）上，直接测量海面高度序列的尝试。在浮动平台附近布设 GNSS 基准站，利用载波相位动态差分测量技术，可获得 GNSS 天线相位中心的精确三维空间坐标，结合先验或实测的 GNSS 天线相位中心相对水面的精确高度值，得到海平面到参考椭球面的高度（绝对海面高度）的时间采样序列[6]。

最早的 GNSS 浮标只是将 GNSS 天线密封在救生圈里，而将配套的 GNSS 接收机通过电缆安装在附近的系泊船上。后来出现了以澳大利亚 Bass 海峡定标场上布放的 MK 系列为代表的小型自动化有源 GNSS 浮标，将 GNSS 天线、接收机和蓄电池密封在浮标舱体内，可实现长时间无人值守的自动观测[7, 8]。这类浮标在国际上各个主要的卫星测高定标场均有布放。但这类小型浮标易受海浪的影响，在高海况情况下容易倾覆或损坏，难以长期连续工作，只能作为验潮站等设备的补充，很难作为长期业务运行的主力设备[7, 8, 9, 10, 11]。管斌等人（2025）提出了多天线浮标的方案[12]，在不显著增加制造成本的前提下， 通过对现有大型海洋浮标（十米标）进行重新设计改造，设计了多天线浮标海面高测量系统。该浮标能够在海浪中保持工作稳定， 实现对海面高度变化的稳定跟踪。该系统支持无人值守运行，可在开放海域连续部署数月时间，很适合作为高度计绝对定标的主力设备。此外，通过对多天线浮标生成的长期海面高序列的调和分析，可获得定标场区海域各海潮分量的振幅和迟角，对于区域海洋调查提供重要信息。

本文使用 2023 年 5~6 月的多天线 GNSS 浮标观测数据，验证了 HY-2D 卫星高度计的绝对定标方法。由于 HY-2D 卫星星下点距离万山定标场较远，HY-2D 卫星 2021 年 5 月 19 日发射至今，尚未有对其上搭载的雷达高度计进行海面高定标的研究发表。本文开展的海上试验可满足为 HY-2D 卫星雷达高度计的绝对定标需求，本文的定标结果可为其数据产品质量提供可靠的评估，为提高数据的可靠性和有效性作出贡献。

1 试验情况

1.1 试验场区简介

试验场区位于我国黄海外海的千里岩岛。图1 示意了千里岩岛的位置。该岛距最近陆地45千米，呈哑铃形状，南北长约820 米，总面积0.16平方千米，环岛水深约30 米。岛上有一个观测站， 是中国国家海洋局的业务海洋观测站之一。多年来，该站一直运行着验潮仪、连续运行的GNSS 站以及相关的气象仪器[12, 13]。

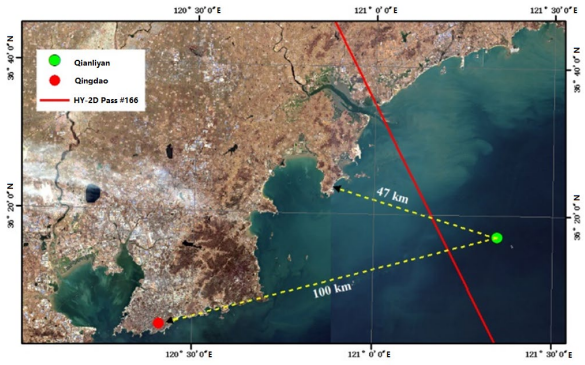


图 1. 千里岩岛及周边海域位置地图。地图中的红色圆圈显示了 GNSS 浮标的布放位置。

Fig. 1. Map of Qianliyan islet and its surrounding regions. The red circle shows the location of the Buoy.

2023 年 5-6 月，在该定标场区开展了大型海面高观测试验，主要试验设备包括千里岩验潮井、多天线 GNSS 浮标以及海床基锚泊压力计[14]（类似于澳大利亚巴斯海峡定标场的锚泊设备[7]）。验潮井有多年连续观测记录，多天线 GNSS 浮标以及海床基锚泊也连续工作 2 个月以上。

1.2 多天线 GNSS 浮标

四天线 GNSS 浮标（图 2）由一个业务化海洋监测平台（十米标）改造而成。该平台上安装了四个 GNSS 天线、四台配套的压力传感器及相应的通信设备。这种改造能够实现精确的海面高度数据采集。该浮标具备对严酷海洋环境条件的适应能力和长期连续运行能力，以及强化的防护结构。浮标上的四个天线呈 Y 形状分布（如图 3）。其中天线①、②和③构成等边三角形，天线④位于该三角形正中心处。 总体设计时，四个天线的参考面位于同一个水平面，但实际上四个天线参考面并不完全重合，其相对高差可通过长期同步观测的比对进行校正。

由于浮标整体为中心对称结构，天线④观测的海面高对浮标总体的海面高最有代表性。定标时主要采用天线④的海面高。其它天线则主要用于对浮标的姿态误差的校正（详见 2.3 节）。

录用稿件



图 2　GNSS 浮标整体外观图

Fig 2 Overall view of GNSS buoy

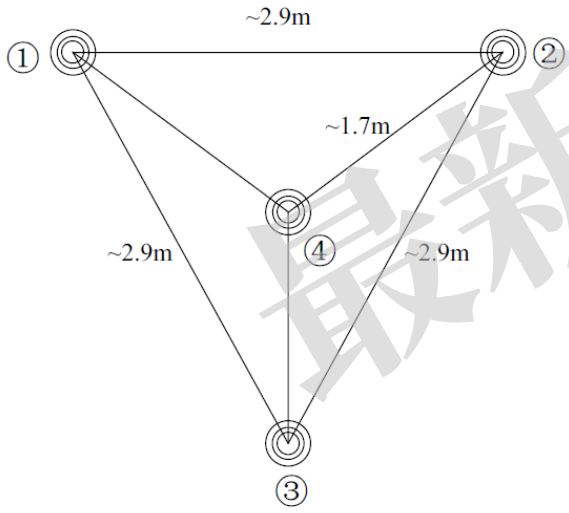


图 3 GNSS 浮标天线位置俯视图

Fig. 3 Top-view layout of GNSS buoy antenna positions

2 数据情况

本文的研究中采用了以下数据：

GNSS 观测数据。包括：多天线 GNSS 浮标的观测数据数据（包括 4 个天线），以及千里岩岛上架设的静态 GNSS 基站在 2023 年 5-6 月期间采集的数据。数据以 RENIX（Receiver Independent Exchange Format，与接收机无关的数据交换格式）格式存储[15]。该静态基站可为 GNSS 浮标天线提供动态差分定位基准，基站和 GNSS 浮标之间的距离（GNSS 基线长度）约为 4.1 km。如此短的基线，对流层和电离层延迟误差基本上可抵消，因此可获得很高的定位精度。GNSS 动态差分处理中，还需要 GNSS 卫星钟差文件 、GNSS 卫星广播星历文件、GNSS 卫星精密星历文件、地球自转参数文件、差分码偏差（Differential Code Bias，简称 DCB）文件和海洋负荷潮文件等辅助文件。

本研究应用的 HY-2D 卫星雷达高度计数据为 SGDR（Sensor Geophysics Data Record，传感器地球物理数据记录）二级数据产品。SGDR 产品是 GDR 产品（Geophysics Data Record，地球物理数据记录）的一个超集，除了包括 GDR 中的轨道高度、雷达测距值、测高误差项、有效波高、海面风速等参数，还包括雷达高度计回波信息。本研究对 HY-2D 卫星高度计回波进行了专门的重跟踪研究，详见 3.5 节。

在为期两个月的浮标海面高定标试验中，HY-2D 卫星的#166 号轨道（Pass）一共过顶定标场海域六次，对应于第 72~77 回归周期（Cycle），GNSS 浮标和卫星星下点的平均最近距离约为 12.5km。过顶情况汇总于表 1。

表 1 HY-2D 卫星过顶定标场区汇总表

Table 1 Summary of the overheads of HY-2D satellite over the calibration field

周期序号	72	73	74	75	76	77
日期	2023-05-07	2023-05-17	2023-05-27	2023-06-05	2023-06-15	2023-06-25
过顶时刻	04:41:54	02:24:14	00:06:29	21:48:52	19:31:12	17:13:27

3 处理方法

3.1 GNSS 浮标动态定位方法

GNSS 浮标的海面高（SSH_{Buoy}），可由 GNSS 天线（本文中为天线④）相对于参考椭球面的高度减去天线高出水面的高度得到。天线高出水面的高度在平静水面进行了量取，为 10.40 米。之后还要进行对姿态误差、海水密度误差等的校正。

GNSS 天线的高度可由载波相位动态差分软件进行确定。目前国外主流的 GNSS 动态定位软件都是以 GPS（Global Positioning System，全球定位系统）卫星

最新录用

作为主要的 GNSS 卫星数据源，随着北斗三代卫星的发展，北斗卫星系统的性能已经和 GPS 卫星相当，在亚太区域还有所超越[16]。我们研制了集成北斗三代的 GNSS 差分动态定位软件，其处理流程图如图 4 所示。集成了北斗三代之后，该定位软件的性能优于国外类似软件。

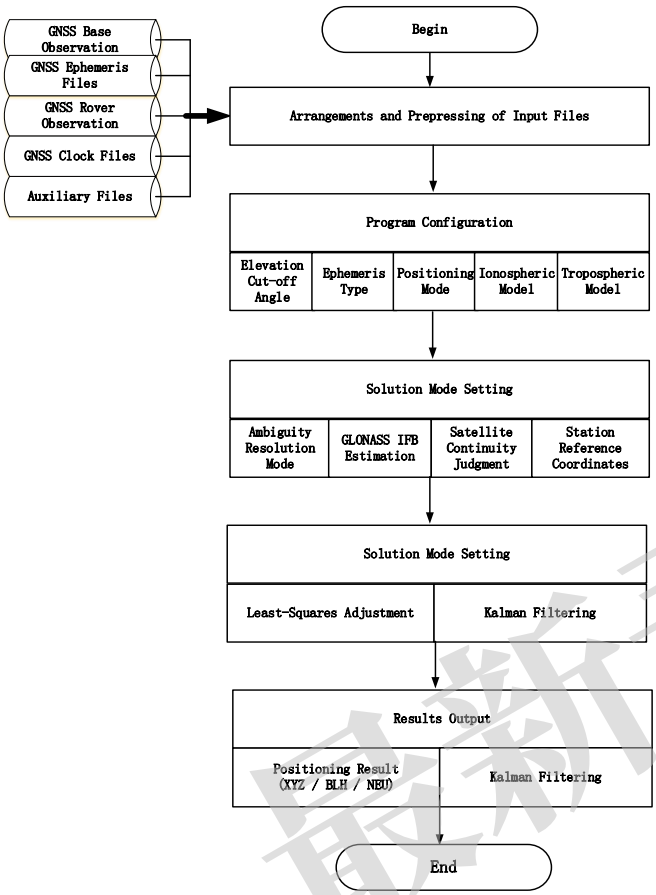


图 4 GNSS 差分动态定位处理流程图

Fig. 4 Flowchart of GNSS Positioning process

3.2 GNSS 浮标海水密度误差

浮标 10.40 米的天线高是在静水环境量取的，其海水密度和定标场海域不同，这也会带来测高误差。根据阿基米德定律，不同密度的海水浮力相等（都等于浮标受到的重力）：

$$\rho_0 g V_0 = \rho g V = mg \qquad (1)$$

其中g为重力加速度，ρ_0和ρ分别为天线高量取处的静水密度和高度计定标期间的海水密度，V_0和V分别为浮标吃水部分的体积，m为浮标的总质量。左式为淡水条件下测量的吃水深度，海水盐度导致密度上升，浮标会抬高，若还按照量取的天线高进行校正，则会使浮标测量的海面高增大。

由（1）式易得：

$$V_0 - V = (1 - \frac{\rho_0}{\rho})V_0 = \frac{m}{\rho_0} - \frac{m}{\rho} \qquad (2)$$

因为海水对浮标吃水深度的改变很小，浮标升降过程中变化的部分可近似为一个圆柱，设圆柱直径为D，则浮标吃水深度的变化为体积变化和吃水截面表面积之商：

$$\Delta h = \frac{V_0 - V}{\pi D^2/4} = \frac{4m(\rho - \rho_0)}{\pi D^2 \rho_0 \rho} \qquad (3)$$

多天线浮标的重量为 50.4 吨，截面直径 10 米。2023 年 4 月 26 日至 6 月 30 日，随着从春天到夏天海水温度的升高（海水盐度变化很小），海水密度越来越轻，浮标天线高有一个缓慢的下降。整个定标试验期间，多天线浮标吃水深度变化不超过 2 毫米；相对于定标精度的要求可忽略。

3.3 GNSS 浮标姿态误差校正

定标场多天线浮标的天线高出海面超过 10 米，由于姿态误差（由姿态导致的海面高观测误差）和天线高成正比，需要进行重点考虑。

在净水条件下，由于浮标的中心对称特性，GNSS 天线的取向是垂直向上的。当海上有风浪时，天线的姿态将偏离天顶方向。根据天线 1~天线 3 的三维坐标确定一个参考面，该参考面法向量和铅垂向量之间的夹角（俯仰角）为姿态角。姿态误差和姿态角的余弦呈负相关。

如图 5，设 GNSS 浮标姿态为 α，天线在水面以上高度为 h，则相应的姿态偏差为：

$$\Delta h = h\left(\cos\alpha - 1\right) = -\frac{h\sin^2\left(\alpha/2\right)}{2} \qquad (4)$$

从（4）式可看到，浮标姿态误差并非零均值，即使长期进行平均，也无法消除。只要浮标姿态发生偏离，实际的天线参考面一定比静水情况下降低。不补偿姿态误差时，浮标测得的海面高会比真实海面高略低，从而，得到的高度计海面高测量偏差估计值要比真实值略高。姿态角为 5°时，带来的偏差为：3.81cm[12]；显然，这样的偏差必须进行校正。

校正姿态误差的前提，是确定浮标姿态角。多天线浮标中有 4 个天线，其中天线①~③构成了一个等边三角形，通过刚性结构相连，这三个天线的坐标可确定一个平面。在静水条件下，该平面为水平面，其法线为铅垂线。浮标倾斜时，该平面的法线方向即为

浮标的姿态方向。根据空间解析几何理论，法线方向为平面上任意两个相交向量叉乘的方向[12]。本文中选取图 3 中的①—②和②—③两条边作为向量，因为三个天线的坐标已在 3.1 节获得，两条边的基线向量也可确定，进而计算卫星姿态角。由于确定姿态的过程中未用到天线④的定位信息，可认为是独立地确定了浮标姿态误差。

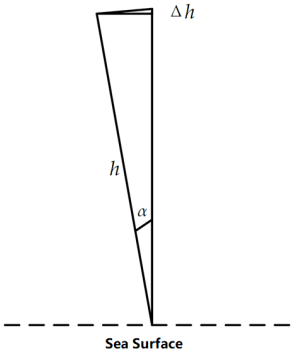


图 5 GNSS 浮标姿态误差示意图

Fig. 5 SSH errors induced by GNSS buoy attitude

3.4 高度计海面高确定方法

高度计测量过程中，需要对各种误差源进行校正。由于 HY-2D 卫星数据产品中没有直接给出海面高，需先对其进行计算[4]：

$$\begin{aligned}\mathrm{SSH_{alt}} &= \mathrm{H}-(\mathrm{R}+\Delta\mathrm{h_{dry}}+\Delta\mathrm{h_{wet}}+\Delta\mathrm{h_{ion}}+\Delta\mathrm{h_{ssb}}\\ &+\Delta\mathrm{h_{ot}}+\Delta\mathrm{h_{st}}+\Delta\mathrm{h_{pt}}+\Delta\mathrm{h_{ib}}+\Delta\mathrm{h_{hf}})\end{aligned} \quad (5)$$

式（5）中，H 为轨道高度（卫星到参考椭球面的距离），R 为雷达高度计测量的距离，Δh_{dry}、Δh_{wet}、Δh_{ion}分别为高度计电磁波传输过程中对流层干空气（干对流层）、对流层水汽（湿对流层）和电离层的延迟校正，Δh_{ssb}为海况偏差校正，Δh_{ot}为海洋潮汐校正（包括弹性海洋潮和海洋负荷潮），Δh_{st}为固体地球潮校正，Δh_{pt}极潮校正（以上三项统称为潮汐校正），Δh_{ib}和Δh_{hf}分别为大气逆压校正和高频大气校正，二者统称动态大气校正（Δh_{dac}）。

由于定标场区为近岸海域，本文除了提取了 GDR 中现成的测距值（基于四参数最大似然（4-parameter Maximum Likelihood Estimator ，简称 MLE4）重跟踪方法），还利用更适合于近岸海域自适应重跟踪方法得到了另一组测距值。两组测距值都用于 HY-2D 高度计的海面高定标。

3.5 高度计自适应回波重跟踪方法

自适应（Adaptive）重跟踪方法由 Poisson 等人（2018）提出的自适应回波模型[17]。该模型依托于经典的三项卷积模型[18]：

$$\begin{aligned}P_r(t) &= FSR(t)*q(t)*PTR(t)\\ &= SSR(t)*PTR(t)\end{aligned} \quad (6)$$

其中：$SSR(t)=P_{FS}(t)*q(t)$

上式中 $FSR(t)$为平坦海面的脉冲响应（Flat Surface Response）函数，主要和雷达高度计天线参数有关；$q(t)$为海面波高密度函数，主要由海面散射点的特性决定；海面脉冲响应（Sea Surface Response）函数 $SSR(t)$为 $FSR(t)$ 和 $q(t)$ 的卷积；$PTR(t)$为雷达系统的点目标响应（Point Target Response）函数。

自适应回波模型和传统的 Brown 模型的重要区别在于海面脉冲响应函数中引入了新的参数：

$$\begin{aligned}SSR(t) = P_u \bullet &\left[1+\mathrm{erf}\left(\frac{t-\tau-\frac{4c}{\Gamma h}\sigma_s^2}{\sqrt{2}\sigma_s}\right)\right]\\ &\bullet\exp\left[-\frac{4c}{\Gamma h}\left(t-\tau-\frac{2c}{\Gamma h}\sigma_s^2\right)\right]+N_t\end{aligned} \quad (7)$$

式中：P_u 为回波幅度，erf(·)为误差函数，τ 为回波延迟，c 为光速，h 为卫星轨道高度，σ_s 为波高标准差，N_t 为热噪声基底。自适应重跟踪引入了一个复合参数：$\Gamma = (4\gamma\cdot mss)/(4mss\cdot\cos 2\xi+\gamma)$，它综合考虑了天线波束宽度（参数 $\gamma=(2/\ln 2)\cdot\sin^2(\theta_0/2)$，其中 θ_0为高度计天线的 3 dB 波束宽度）、海面均方根斜率（mean surface slope, 简称 mss）和测高卫星姿态角 ξ 的影响。

自适应回波重跟踪方法最早在 Envisat 卫星高度计中进行测试[17]，后来拓展应用到中法海洋卫星波谱仪[19]和 Jason-3 高度计[20]中，徐曦煜等人（2026）通过对 Jason-3 卫星雷达高度计 G 版 GDR 产品的统计分析，发现无论是在开放海域还是近岸海域，对于相同回波，自适应回波重跟踪得到的海面高精度都优于 MLE4 标准产品的海面高精度[21]。

海洋二号系列卫星雷达高度计的官方产品中尚未采用自适应回波重跟踪方法，李梦瑶等人（2025）利用该方法在塔克拉玛干沙漠地区的 HY-2C 卫星雷达高度计回波进行了重跟踪，其散射系数的精度和稳定性明显强于业务产品中的散射系数[22]。

本研究中首次对 HY-2D 卫星雷达高度计的回波进行自适应重跟踪处理，基于（6）和（7）式的在自适应回波模型对回波进行迭代非线性最小二乘拟合（回波重跟踪）。对 P_u、τ（相当于 SGDR 产品中的

最新录用

“Epoch”参数）、σ_s和Γ等参数进行联合估计。

3.6 GNSS 浮标海面高定标方法

每次过顶，只需要一个高度计的海面高（SSH_{Alt}）和一个浮标海面高（SSH_{Buoy}）值。定标比对时，需要比较的是一个点（浮标布放位置处）在某一个时刻（卫星星下点离浮标最近的时刻）的海面高。由于浮标并不位于卫星地面轨迹上（最近距离约为 12.5km），因此二者的海面高观测存在空间失配，无法直接进行比对。

雷达高度计的海面高测量是瞬时的一个较大海域（雷达高度计脉冲有限足迹的直径至少为千米级）的空间平均海面高。GNSS 浮标则可看作一个点（浮标水平方向漂移的自由度为十米量级，比高度计的足迹小 2~3 个数量级）的时间序列。可将海面近似为一个遍历的随机过程，则时间平均和空间平均可在一定程度上等效。GNSS 浮标时间平均等效为一个低通滤波，根据重力波色散理论[23]，其滤波的截止频率依赖于海面有效波高（浪高）。

每次卫星飞越定标场区海域上空时，根据 HY-2D 卫星高度计数据产品中的星下点坐标序列得到了卫星地面轨迹和 GNSS 浮标布放处的最近点坐标，其对应的时刻称为“过顶时刻”，高度计海面高序列内插到过顶时刻，则可得到SSH_{Alt}。

而 GNSS 浮标的海面高度值为浮标的海面高序列经过低通滤波之后，内插到过顶时刻得到。GNSS 浮标测量的时序数据的原始采样间隔是 1 秒，对其进行了 301 阶 EWM（Exponential Weighted Moving）平滑，效果上相当于 150 阶（2.5 分钟）的简单滑动平均（Simple Moving Average，简称 SMA）。和 SMA 相比，EWM 平滑算法效率较高，且滞后小，特别适合快速动态变化的海洋环境应用。平滑后的 GNSS 浮标的观测序列插值于过顶时刻，得到本次过顶的现场海面高参考值SSH_{Buoy}。

SSH_{Alt}和SSH_{Buoy}不能直接比较，需要进行以下三个方面的校正：

① 平均海面（主要是大地水准面）差异校正。

② 海洋潮汐差异校正。

③ 参考椭球面差异校正。

以上校正中，①和②属于空间失配误差，源自星下点和 GNSS 浮标之间的地理位置的不同。定标场区位于陆架边缘，其大地水准面变化剧烈（可达 5cm/km），12.5km 的间距可能导致数十厘米的偏差。该偏差可由平均海平面（Mean Sea Surface，简称 MSS）模型进行校正。当前最先进的 MSS 模型为 Hybrid 2023 模型，它融合了国际上三种主流模型的成果[24]。

定标场区为近岸海域，通常认为超过 5km 的尺度，海洋潮汐的差异已不能忽略。本文同样采用先进模型数据进行校正。当前最先进的海潮模型为法国地球物理和空间海洋学研究实验室（Laboratoire d’Etudes en Geophysique et Oceanographie Spatiale，简称 LEGOS）研发的 FES（Finite Element Solution，有限元解）2022 版模型[24]。

须指出，HY-2 卫星精密定轨过程中给出的轨道高度是基于 T/P 椭球的，而 GNSS 定位是基于 WGS84 椭球，二者之间有一个约 0.7 米的偏差[4, 26]。

在进行了以上三项校正之后，GNSS 浮标的海面高就可用于高度计定标了。每次过顶得到一个偏差值。多次过顶得到一个序列（称为“海面高残差序列”），对该序列求偏差和标准差，即可得到定标结果。

高度计绝对定标的核心任务，是对未知的高度计系统偏差的估计。定标场区经过前期精心选址，在 2 个月期间其气象海洋条件基本稳定，可合理假设每次定标的标准差相等（设为σ）。因此，高度计系统偏差可由海面高残差序列的均值逼近，而经过多次定标试验，该偏差的估计精度随着定标次数按平方根反比规律减小。经过 N 次有效定标，偏差估计值$\hat{b}$的不确定度为：

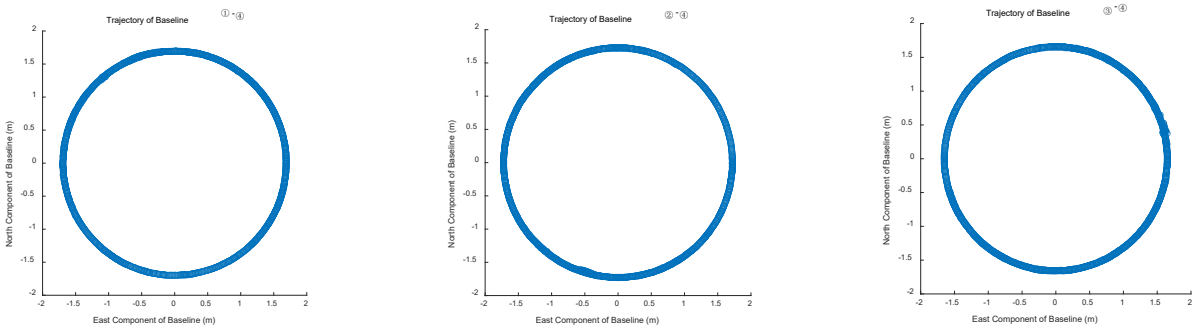
$$\sigma(\hat{b}) = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \qquad (8)$$

4 处理结果

4.1 GNSS 浮标测量结果

多天线浮标上不同天线之间是刚性连接的，所以不论浮标怎么打转，其在水平方向的轨迹投影应该是一个圆。可通过对定位的稳定性对浮标坐标解算的质量进行评估。

图 6 统计了 2023 年 6 月 18 日（任意选取该日期作为示意），3 个浮标基线向量（“天线①-天线④”、“天线②-天线④”、“天线③-天线④”）的水平轨迹图。从图中可看到，这些向量的水平轨迹基本上都是圆形，且圆的半径和图 3 中的值非常吻合。



(a)：“天线①-天线④”基线　(b)：“天线②-天线④”基线　(c)：“天线③-天线④”基线

(a): “Antenna ① - Antenna ④”　(b): “Antenna ② - Antenna ④”　(c): “Antenna ③ - Antenna ④”

图 6 基线向量水平轨迹图（2023-06-18）。

Fig. 6 Horizontal trajectory of the baseline vector on June 18, 2023

根据两个月有效数据（所有四个天线都有有效观测数据的情况），剔除掉姿态角大于 20 度的观测点（剔除率均小于 1%）之后，仍剩下超过 350 万个观测点。

根据天线①-③得到的多天线 GNSS 浮标角姿态分布直方图如图 7 所示。可看到，分布形状很接近瑞利分布。

由浮标姿态带来的测高误差分布直方图如图 8 所示。可看到，分布形状很接近指数分布。这是合理的：θ 角较小时，$1-\cos\theta \approx \theta^2/2$；而根据概率模型推导，瑞利分布随机变量的平方的分布为指数分布。从图中可看到，约一半的姿态测高误差分布在≥1cm 的区间。因此必须对这些时刻的姿态误差进行校正。

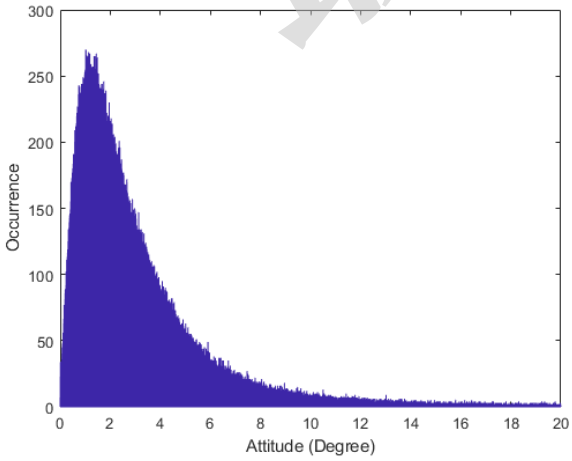


图 7 GNSS 浮标姿态角直方图

Fig. 7 Histogram of the GNSS buoy attitude angle

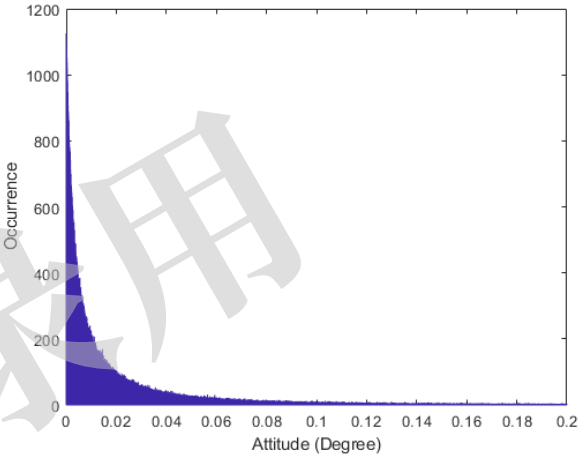


图 8 GNSS 浮标姿态测高误差直方图

Fig. 8 Histogram of the height error induced from the GNSS buoy attitude angle

4.2 高度计海面高定标结果

在 2023 年 5-6 月，HY-2D 卫星六次过顶定标场，对每次过顶进行了定标处理，得到的结果表 2 所示。为了评估卫星的另一个主载荷：校正辐射计的性能，我们也给出了不用校正辐射计，而使用当前国际上最主流的 ECMWF（European Center for Medium range Weather Forecasting，欧洲中期天气预报中心）模型提供的湿对流层延迟时的定标结果。

最新录用

表 2 HY-2D 卫星定标结果汇总表（GDR 产品；单位：厘米）

Table 2 Summary of the HY-2D satellite radar altimeter SSH calibration results (GDR product; Unit: cm)

周期序号	72	73	74	75	76	77
海面高偏差结果（利用校正辐射计测量湿对流层延迟）	0.13	1.60	10.86	0.69	0.83	8.35
海面高偏差结果（利用 ECMWF 模型计算湿对流层延迟）	1.42	2.64	12.19	0.89	4.27	6.73
湿对流层延迟量	6.62	15.3	28.9	13.2	20.2	33.3

对六个周期的海面高偏差结果进行统计分析，利用利用校正辐射计测量湿对流层延迟时，得到的海面高偏差均值为：3.7cm，标准差为 4.6cm。从表中可看到，第 74 和第 77 周期得到的海面高和其他 4 个周期相比明显偏大，而该现象是和湿对流层延迟强相关的（这两次过顶的湿对流层延迟均为 30cm 左右）。

进一步考察这两个周期的高度计回波（以第 74 周期为例，图 9 画出了距离星下点最近的 20 个 HY-2D 卫星雷达高度计回波波形；由于高度计数据产品中每秒有 20 个回波，这些回波对应了 1 秒的观测时间，在此期间卫星星下点移动了约 6km）。从图中可看到，少数回波呈现异常尖峰，但不太严重。然而，高度计定标精度要求非常苛刻，这样已对高度计测量造成不可忽视的影响。利用 GDR 产品中的 MLE4 回波重跟踪算法进行定标时，必须舍弃这两个周期的数据。

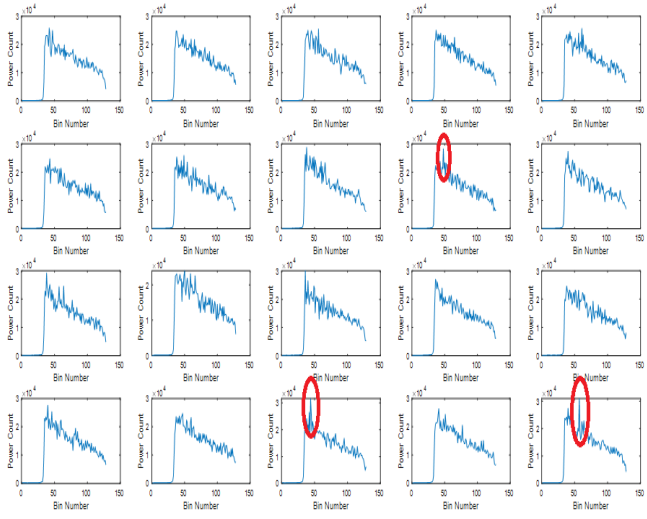


图 9 距离星下点最近的 20 个高度计回波波形图 （74 周期）

Fig. 9 Diagrams of the 20 closest altimeter waveforms (74th Cycle)

为了提高数据的可用性，我们对定标场附近的所有高度计回波进行了自适应重跟踪，重跟踪的算法结果如表 3 所示。

对六个周期的定标结果进行统计分析可得，利用校正辐射计进行湿对流层延迟校正时，自适应重跟踪得到的海面高偏差均值为：-0.3cm，标准差为 2.8cm；利用 ECMWF 模型进行湿对流层延迟校正时，自适应重跟踪得到的海面高偏差均值为：0.7cm，标准差为 3.4cm。

表 3 HY-2D 卫星定标结果汇总表（自适应重跟踪；单位：厘米）

Table 3 Summary of the HY-2D satellite radar altimeter SSH calibration results (Adaptive retracking; Unit: cm)

周期序号	72	73	74	75	76	77
海面高偏差结果（利用校正辐射计测量湿对流层延迟）	3.62	-1.89	-4.21	-1.67	1.44	1.13
海面高偏差结果（利用 ECMWF 模型计算湿对流层延迟）	4.91	-0.85	-2.88	-1.47	4.88	-0.49

因此，“自适应重跟踪+校正辐射计湿对流层”组合的验证效果是最好的，得到的海面高偏差均值更接近于 0，标准差也最低。经过 6 次过顶定标，最终的高度计海面高系统偏差估计精度为：$2.8/\sqrt{6}$=1.2cm。若开展更多次定标试验，该精度还可更低。

5 结论

2023 年 5-6 月，使用多天线 GNSS 浮标对 HY-2D 卫星雷达高度计进行了海上定标试验，使用自动化软件对其进行了海面高测量精度验证。

多天线 GNSS 浮标的海面高序列很稳定，但由于其天线高出海面超过 10m，很小的姿态角变化都将带来不可忽略的测高误差，且该误差是非零均值的，无法通过平滑滤波消除，必须对其进行校正。

利用业务产品（MLE4 回波重跟踪），6 次过顶海面高偏差序列的标准差为 4.6cm；其中有 2 次误差较大。若使用自适应重跟踪方法对高度计回波进行重跟踪，则 6 次定标偏差均可接受，6 次标准差为 2.8cm，对应的高度计海面高系统偏差估计精度为 1.2cm。若湿对流层延迟由校正辐射计产品改为 ECMWF 模型，则标准差明显恶化，证明了校正辐射计的贡献。

录用

综上所述，本文首次实现了基于海上大型多天线GNSS浮标的HY-2D卫星雷达高度计的绝对定标方法和流程的演示验证。可看到HY-2D卫星高度计作为传统高度计，其观测性能是非常稳定的：海面高残差序列标准差在5cm以内；通过引入自适应回波重跟踪方法，还可将标准差进一步降低到3cm以内。经过6次有效过顶之后，得到的海面高测量系统偏差为-0.30cm，该偏差值比高度计海面高测量的精度指标低一个数量级，因此可得到结论：经过2年的在轨运行，并未发现HY-2D卫星的雷达高度计的海面高测量有显著的（需要校正的）偏差。本文的研究工作为HY-2D卫星雷达高度计的海面高反演数据进行了可靠的精度验证，对推动HY-2D卫星的海面高产品应用具有重要意义。同时，通过在定标场区的检验，也可看到校正辐射计对卫星测高系统的显著贡献。

本文所用的多天线GNSS浮标，可实现在海上的自动化工作，兼具灵活性和可靠性。除了适合在星下点雷达高度计的定标，更适合往较远的海域布放，构成GNSS浮标阵列[26, 27]，为更为复杂的宽刈幅成像高度计定标提供可靠的技术保障。

致谢

本文中使用的HY-2D卫星雷达高度计数据产品是由国家卫星海洋应用中心提供的。本文中使用的GNSS辅助文件是由武汉大学国际GNSS服务中心（International GNSS Service，简称IGS）的FTP服务器（ftp://igs.gnsswhu.cn/）上下载的。作者对这些机构表示感谢。

参考文献

[1]STAMMER D, CAZENAVE A. Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018

[2]VIGNUDELLI S, KOSTIANOY A G, CIPOLLINI P, et al. Coastal Altimetry[M]. Berlin: Springer, 2011

[3]LIN M S, ZHANG Y G. The development status and main application progress of China's ocean satellites[J]. *Aerospace China*, 2022, **23**(1): 41-54

[4]GUO Chang, XU Xiyu, XU K, LI Mengyao. Study on the fusion and validation of sea surface height anomaly field based on the radar altimeters onboard HY-2C/D satellites[J/OL]. *Chinese Journal of Space Science*, (2026-07-07). https://www.cjss.ac.cn/cn/article/doi/10.11728/cjss2025-0049 (郭畅, 徐曦煜, 许可，李梦瑶. 基于HY-2C/D卫星雷达高度计的海面高异常场融合与检验研究[J/OL]. 空间科学学报, (2026-04-30). https://www.cjss.ac.cn/cn/article/doi/10.11728/cjss2025-0049)

[5]WANG Jianbo, LIU Mohan, SONG Huanyu, *et al*. Research on calibration and validation of HY-2B/C altimetry data based on situ gauge data of Wanshan[J]. *Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Sciences Edition)*, 2023, **32**(3): 63-70 (王建波, 刘莫涵, 宋焕宇, 等. 基于万山定标场验潮数据的HY-2B/C 雷达高度计定标检验[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2023, **32**(3): 63-70)

[6]XU X Y, 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

[7]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

[8]ZHOU B Y, WATSON C, LEGRESY B, *et al*. Ongoing development of the bass strait GNSS/INS buoy system for altimetry validation in preparation for SWOT[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(1): 287

[9]HAINES B, DESAI S D, KUBITSCHEK D, *et al*. A brief history of the Harvest experiment: 1989-2019[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **68**(2): 1161-1170

[10]BONNEFOND P, EXERTIER P, LAURAIN O, *et al*. Corsica: a 20-Yr multi-mission absolute altimeter calibration site[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **68**(2): 1171-1186

[11]MERTIKAS S P, DONLON C, KOKOLAKIS C, *et al*. The ESA permanent facility for altimetry calibration in Crete: advanced services and the latest Cal/Val results[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(2): 223

[12]GUAN B, SUN Z M, HUANG H, *et al*. Performance of multi-antenna GNSS buoy and co-located mooring array deployed around Qianliyan islet for altimetry satellite calibration[J]. *Remote Sensing*, 2025, **17**(20): 3436

[13]YANG L, XU Y S, LIN M S, *et al*. Monitoring the performance of HY-2B and Jason-2/3 sea surface height via the China altimetry calibration cooperation plan[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**: 1002013

[14]XU X Y, HUANG L Y, LIU Y L, et al. Sentinel-6A satellite altimeter sea surface height calibration using a seabed-based pressure gauge[C]//IGARSS 2025-2025 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Brisbane: IEEE,

录用稿件，非最终出版稿

2025: 4825-4828

[15]LI Zhenghang, ZHANG Xiaohong. New Techniques and Precise Data Processing Methods of Satellite Navigation and Positioning[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009 (李征航, 张小红. 卫星导航定位技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009)

[16]WU Z J, YUE M, LEI J. Information Security Authentication Technology for Civil Navigation Message of Satellite Navigation System [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2024 (吴志军, 岳猛, 雷缙. 卫星导航系统民用导航电文信息安全认证技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2024)

[17]POISSON J C, QUARTLY G D, KUREKIN A A, *et al*. Development of an ENVISAT altimetry processor providing sea level continuity between open ocean and arctic leads[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, **56**(9): 5299-5319

[18]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

[19]TOURAIN C, PIRAS F, OLLIVIER A, *et al*. Benefits of the adaptive algorithm for retracking altimeter nadir echoes: results from simulations and CFOSAT/SWIM observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, **59**(12): 9927-9940

[20]THIBAUT P, PIRAS F, ROINARD H, et al. Benefits of the "adaptive retracking solution" for the JASON-3 GDR-F reprocessing campaign[C]//2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. Brussels: IEEE, 2021: 7422-7425

[21]XU X Y, HUANG Z Y, SHI T T, *et al*. Preliminary analysis of the GDR-G data products of Jason-3 satellite altimeter[J]. *Oceans*, 2025, **7**(1): 2

[22]LI M Y, XU X Y, JIANG M F, *et al*. Research on the backscattering characteristics of HY-2C satellite radar altimeter over desert surface[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2025, **22**: 3506705

[23]LALOUE A, SCHAEFFER P, PUJOL M I, *et al*. Merging recent mean sea surface into a 2023 Hybrid model (from Scripps, DTU, CLS, and CNES)[J]. *Earth and Space Science*, 2025, **12**(2): e2024EA003836

[23]SHI M. Physical Oceanography[M]. Jinan Shandong Education Press, 2004 (侍茂崇. 物理海洋学[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004)

[24]LALOUE A, SCHAEFFER P, PUJOL M I, *et al*. Merging recent mean sea surface into a 2023 Hybrid model (from Scripps, DTU, CLS, and CNES)[J]. *Earth and Space Science*, 2025, **12**(2): e2024EA003836

[25]AVISO+ Altimetry. FES2022 (Finite Element Solution) Ocean Tide Product Handbook[R]. Paris: Centre National D'études Spatiale, 2022

[26]LIU Yalong. Calibration Technology for HY-2 Radar Altimeter Sea Surface Height[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)

[27]XU X Y. Simulation of the wide swath sea surface height calibration using GNSS buoy array[C]//IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa: IEEE, 2020: 5835-5838

[28]HAY A, WATSON C, LEGTESY B, et al. In situ geometric validation of SWOT satellite observations in Bass Strait, Australia [J]. Earth and Space Science, 2025, 12, e2025EA004326

作者 简介

徐曦煜（第一作者+通信作者） 男，1979 年 8 月出生于河南省南阳市，现为中国科学院国家空间科学中心研究员，博士生导师，主要研究方向为卫星测高数据处理、定标检验和应用.

E-mail: xuxiyu@mirslab.cn

项目资助信息：国家民用空间基础设施：HY-2D 卫星雷达高度计（编号：E01Z200501）；国家民用空间基础设施：HY-2E/F 卫星雷达高度计（编号：E41Z200101）；自然科学基金面上项目（编号：41876209）。

最新录用