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

郭畅[1,2]，徐曦煜[1,2]，许可[1,2]，李梦瑶[1,2]

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)

摘 要 星载雷达高度计能够定期提供高精度的全球海面高观测，但单星的星下点观测稀疏，为提升中尺度海洋现象的研究能力，对多颗卫星的观测进行融合是最有效的技术手段。本文对 HY-2C/D 卫星的海面高异常进行了计算，开展基于 Jason-3 卫星的交叉定标，校正系统偏差，并利用最优插值法，以当前国际上最先进的 MIOST 海面高异常场作为背景场，生成了南海区域(10°×10°)的海面高异常融合场。在最优插值法最关键的方差-协方差矩阵的构造中，基于 HY-2C/D 卫星自交叉定标的标准差构造对角线，利用海面高异常功率谱确定相关尺度，进而构造协方差阵元。最后，本文利用我国自主的万山定标场验潮站数据，对融合前后的海面高异常场进行了检验，证明了 HY-2C/D 数据在提升多源数据融合精度方面的贡献。

关键词 HY2-C/D 卫星，雷达高度计，海面高异常，交叉定标，最优插值，现场检验
中图分类号 TP79

最新录用

Study on the Fusion and Validation of Sea Surface Height Anomaly Field based on the Radar Altimeters Onboard HY-2C/D Satellites

GUO Chang[1,2], XU Xi-Yu[1,2], XU Ke[1,2], LI Meng-Yao[1,2]

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*)*

Abstract Spaceborne radar altimeters can provide high-precision global sea surface height (SSH) observations regularly. However, the along-track observations from a single satellite are sparse. To enhance research capabilities for mesoscale ocean phenomena, fusing observations from multiple satellites is the most effective technical approach. The HY-2C/D satellites are China's first inclined-orbit altimetry satellites. Their orbital configuration is similar to that of the internationally advanced Jason series satellites, making them particularly suitable as data sources for sea surface height anomaly (SSHA) fusion. Building upon the internationally advanced operational MIOST SSHA fusion product, this study integrates HY-2C/D satellite

data to generate a fused SSHA product that incorporates observations from all currently operating satellite radar altimeters, thereby expanding the application scope of the HY-2C/D satellites. The study first calculated the SSHA for the HY-2C/D satellites and performed cross-calibration, including self-cross-calibration and mutual cross-calibration using the Jason-3 satellite as the reference standard, to correct their systematic biases. Subsequently, the Optimal Interpolation (OI) method was employed, using the MIOST SSHA field as the background field, to generate a fused SSHA field for a region (10°×10°) in the South China Sea. In constructing the most critical variance-covariance matrix for the OI method, its diagonal elements were derived from the standard deviations obtained from the HY-2C/D self-cross-calibration, while the correlation scales were determined based on the SSHA power spectrum to construct the covariance matrix elements. Finally, this paper conducted both qualitative and quantitative validation of the fusion results. The qualitative analysis was primarily based on geographical distribution maps of SSHA before and after fusion; a comparison reveals that additional eddies were identified in the fused product. Quantitative analysis utilized tidal gauge data from China's independent Wanshan Calibration Site as validation data. The assessment of the SSHA fields before and after fusion demonstrated the contribution of HY-2C/D data in improving the accuracy of multi-source data fusion.

Key words HY-2C/D satellites, Radar altimeter, Sea surface height anomaly, Cross calibration, Optimal interpolation, In-situ validation

最新录用

0 引言

星载雷达高度计能够定期以厘米级的精度测量全球海面高度，是最重要的海洋遥感手段之一[1,2]。传统雷达高度计通常采用星下点观测方式，刈幅较窄，其时间和空间分辨率难以得到兼顾。多星融合的高度计测高数据集明显提高了海表面高度变化观测的空间分辨率和精度，同时为海洋中尺度动力现象研究提供了数据保障。参与融合的卫星越多，海面高异常场的分辨率和精度得到的提升越明显。

我国的海洋卫星系列目前有水色卫星海洋一号（HY-1）系列、动力环境卫星海洋二号（HY-2）系列、中法海洋卫星（CFOSAT）和高分三号 C 波段合成孔径雷达卫星系列（GF-3 C-SAR），如图 1 所示 [3]。其中海洋二号系列卫星全部搭载了双频雷达高度计。

海洋二号系列卫星已发射四颗，具有两种不同的轨道配置：A 星（2011 年 8 月 16 日发射）和 B 星（2018 年发射 10 月 25 日发射）是 14 天回归的太阳同步轨道，其中 A 星 2016 年 3 月以后转为 168 天回归的大地测量轨道；C 星（2020 年 9 月 21 日发射发射）和 D 星（2021 年 5 月 19 日发射）为约 10 天回归的倾斜轨道[3,4]。近期还将发射 E 星和 F 星，设计轨道分别和 B 星及 C 星相同，其上搭载的雷达高度计载荷还将升级为最新的合成孔径体制。

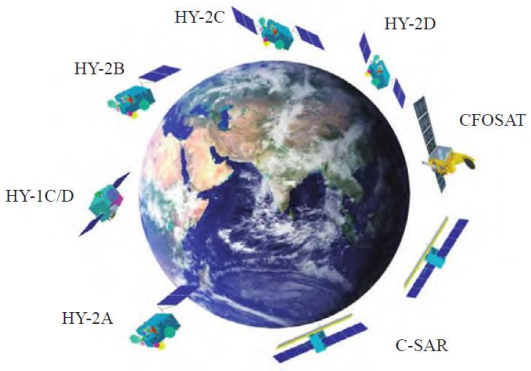


图 1 中国目前在轨运行的海洋卫星示意图[3]

Fig. 1 China’s ocean satellites currently in orbit

倾斜轨道配置有效解决了 S1 和 S2 潮汐分量混

叠的问题[1]，从其海面高观测序列中可以提取出所有的潮汐分量；且中等轨道倾角使得东西方向和南北方向的垂线偏差都能获得相对较好的反演效果。HY-2C 和 HY-2D 卫星的轨道倾角和回归周期都和国际上最经典的 Jason 系列卫星（包括 TOPEX/Poseidon、Jason-1、Jason-2、Jason-3 和 Sentinel-6 卫星）轨道非常接近（见表 1），且在空间取样上和 Jason 系列卫星更为适配。和 Jason 系列卫星相比，HY-2C/D 一个回归周期内的轨道更多，观测数据空间分布更密集。中国自主的倾斜轨道卫星有望为国际卫星测高做出重要贡献，尤其是在海面高异常场融合方面有独特的优势。

表 1 倾斜轨道测高卫星轨道参数表

Table 1. Orbital parameters of middle-inclination altimetry missions

卫星	HY-2C/D	Jason 系列
轨道半长轴 (km)	7328.580	7714.430
轨道倾角 (°)	65.92	66.04
卫星地面速度 (km/s)	6.42	5.94
回归周期 (天)	9.9042	9.9156
每周期轨道圈数	137	127
赤道相邻轨道间距（km）	292.512	315.545

HY-2C/D 卫星采取均匀穿插轨道（Evenly Interleaved Orbit）配置进行加密，图 2 为中国周边的 HY-2C/D 卫星轨道分布图。经过双星的加密，形成了规则的网状采样，相邻两个升轨或降轨的间距为 1.3139°（赤道为 146.256km）；若采用 HY-2C、HY-2D、Jason-3、Sentinel-6 四星组网，则赤道海域的交轨向分辨率在 100km 以内，中高纬度的分辨率更高，可以实现对中尺度海洋现象的探测。

须声明，本文中融合的并非海面高（Sea Surface Height，简称 SSH），而是海面高异常（Sea Surface Height Anomaly，简称 SSHA）。因为海面高的主要成分是大地水准面，而这在海洋动力研究中是稳态信号，海洋动力研究中一般用海面高减去一个多年平均的平均海面（Mean Sea Surface，简称 MSS），以提取真正感兴趣的海平面变化信息。

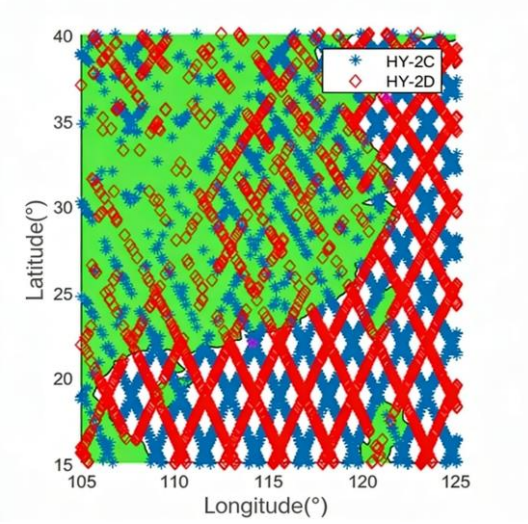


图 2 中国沿海的 HY-2C/D 卫星地面轨迹分布图

Fig. 2 Distribution of HY-2C/D satellites' track offshore China

1 研究思路

单颗卫星高度计的海面高异常产品是沿轨数据，且不同卫星的采样模式不同，而海洋用户研究和使用中更需要规则格网化产品。传统卫星高度计只能观测得到星下点轨迹的海面高异常，单颗卫星空间上比较稀疏，如 HY-2C/D 卫星的交轨向分辨率在赤道海域为 300km 左右（如表 1），很难满足海洋中尺度（≤100km）现象研究的需要。对多星进行融合，则可实现更高的分辨率，有助于对中尺度现象的监测和研究。我国的 HY-2B/C/D 卫星目前已初步实现三星组网观测，其性能比单星观测有了几何级的提高。而理想的融合产品，则应该融合尽可能多的国内外测高卫星数据。

目前国际上主要发达国家发布了一系列海面高异常的融合格网业务数据产品。最经典的是法国的多卫星数据统一与高度计组合系统（multi-satellite Data Unification and Altimeter Combination System，简称 DUACS）的延迟处理（Delayed Time，简称 DT）数据产品，该产品每天提供一张全球海面高异常分布图，目前已更新到 DT2021。该产品和欧空局、美国、英国官方机构发布的标准产品的空间分辨率都是 0.25°×0.25°，不能完全满足海洋中尺度现象研究的需求。

李露雅（2023）[5]使用 HY-2C 和 HY-2D 卫星高度计数据进行了海面高融合研究，但其采用的是较简单的客观分析法，且是利用 Jason-3、Sentinel-3A/B、

SARAL/AltiKa、HY-2B/C/D 卫星自行生成一个融合海面高异常模型，然后通过该卫星和经典的 AVISO（Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data）模型进行对比以验证其性能。

AVISO+在 2024 年发布的多尺度插值海洋科学地形（Multiscale Interpolation Ocean Science Topography，简称 MIOST）产品是迄今为止最先进的多星融合海面高异常产品。该产品融合了 SARAL/AltiKa、Cryosat-2、Jason-3、Sentinel-3A/3B、Sentinel-6A、SWOT（Surface Water Ocean Topography）等卫星的数据，采用最优插值法生成逐日的全球海面高异常格网产品[6,7,8]。最优插值法运行效率高，且能够定量评估现场观测数据对最终产品精度的贡献，在多卫星测高数据融合中已成为标准方法。尤为可贵的是，该产品首次融合了 SWOT 卫星了宽刈幅成像雷达高度计的观测数据[9,10]，比以往产品的空间分辨率提高了一倍以上。

本文的研究思路，就是以 MIOST 产品作为背景场，采用最优插值方法，将 HY-2C 和 HY-2D 的实际观测值作为新信息，对海面高度异常场进行融合。

在 MIOST 产品中融合 HY-2C/D 卫星数据，若数据可靠且方法得当，则可代表当前多星融合海面高异常场的最高水平。本文利用定标场数据对融合前后的海面高异常场的性能进行检验，评估融合的效果。

2 研究区域和使用数据

2.1 研究区域

本文的研究区域为南海海域，具体范围为：北纬 12°~22°、东经 110°~120°（10°×10°），该海域有多条 HY-2C/D 卫星轨道穿过，如图 3 所示。本文选取的研究时间是 2023 年 5~6 月，共两个月，通过经纬度范围筛选，该海域内，HY-2C 卫星高度计有观测数据的天数为 43 天，HY-2D 卫星高度计有观测数据的天数为 40 天，双星高度计均有观测数据的天数为 23 天，双星高度计均无有效观测数据的天数只有 1 天（2023 年 5 月 14 日）。

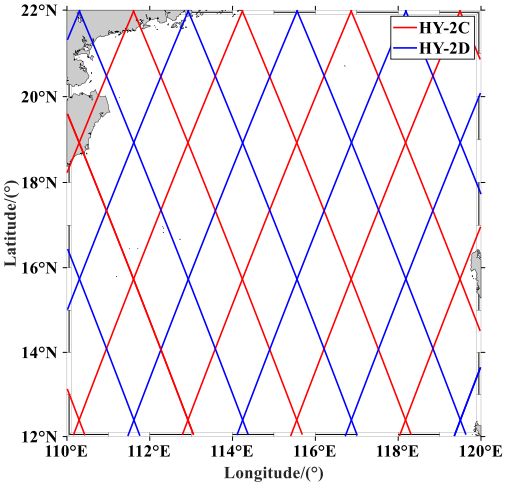


图 3 南海区域卫星轨道示意图

Fig.3 Satellite orbit diagram over the South China Sea

2.2 使用数据

2.2.1 背景场数据

本文中使用的背景场数据是在法国航天局资助下，由 SSALTO/DUACS（Segment Sol multimissions d'ALTimétrie d'Orbitographie et de localisation precise / Data Unification and Altimeter Combination System）生产，并由 AVISO+分发的 MIOST 模式数据，数据持续时间为 2023 年 5~6 月，每天 1 个数据文件，空间分辨率为 0.1°×0.1°。MIOST 模式数据目前有 2 个版本：v0.3 版本和 v1.0 版本，后者是基于优化处理的 SWOT 卫星数据生产的，精度比前者有所提高，于 2024 年 10 月发布。

2.2.2 卫星数据

本文中使用的卫星数据包括 HY-2C/D 卫星数据产品和 Jason-3 卫星数据产品。卫星数据产品均尽可能使用 GDR（Geophysics Data Record，地球物理数据记录）产品。Jason-3 最新数据产品为 G 版，但当前该版本可用的数据产品都在 2025 年以后。Jason-3 两个可用版本的 GDR 产品（D 版和 F 版）中，选择精度更高的 GDR-F。2023 年 5~6 月间，HY-2D 卫星业务产品的高频校正误差项缺失，因此官方只有 IGDR（Interim Geophysics Data Record，中间地球物理数据记录）数据，本文利用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）的动态大气校正模式数据对其进行了补充，以便计算更精确的 SSHA。

最新录用

2.2.3 定标场检验数据

本文选用的数据为珠海万山雷达高度计海上定标场直湾岛验潮站的数据。万山定标场是我国第一个业务化运行的高度计定标场，分布在万山群岛中的 4 个岛(外伶仃岛、担杆岛、直湾岛、庙湾岛)。本文选用直湾岛验潮站的水位数据作为检验的基准数据[11]。该验潮站的地理坐标为：114.1479°，北纬 21.9949°；其数据经过精确的 GNSS 定位和水准联测，其海面高是相对于 WGS84（WGS 为世界大地测量服务中心：World Geodetic Service 的缩写）参考椭球面的绝对海面高。

3 数据融合和检验方法

3.1 融合前的准备：卫星交叉定标

交叉定标是利用卫星轨道交叉点（crossover）处升降轨观测值的比较，进行卫星数据质量和精度评估的方法[12,13,14]。相比于定标场的绝对定标，其优点是可实现在全球范围内对数据进行分析，可有效避免定标场地理相关误差。通过对交叉定标可评估卫星的系统偏差和测量精度，发现卫星和载荷系统中的软硬件问题，并改进数据处理算法。

相对定标分为单颗卫星升降轨道的自交叉和不同卫星升降轨道之间的互交叉。自交叉定标是高度计数据质量评估的标准方法之一，此方法可用来评价高度计数据的稳定性，在本文的研究中，自交叉定标的结果是构造数据融合中方差-协方差矩阵（Variance-Covariance Matrix）的主要依据。互交叉定标则是以经过充分定标的参考卫星（国际上卫星测高交叉定标最主流的选择为 Jason 系列卫星，该系列卫星经过全球四大定标场严格进行过绝对定标）的观测为基准，对待定标卫星（本文为 HY-2C 和 HY-2D 卫星）的雷达高度计进行定标的方法。

交叉定标的步骤分为：交叉点位置计算、数据筛选、数据匹配和统计分析等步骤。

由于 HY-2C/D 卫星数据产品中没有直接给出 SSH 或 SSHA，需先对其进行计算[15]：

$$SSHA_{alt} = H - \left(h + \Delta h_{dry} + \Delta h_{wet} + \Delta h_{ion} + \Delta h_{ssb} + \Delta h_{ot} + \Delta h_{st} + \Delta h_{pt} + \Delta h_{ib} + \Delta h_{hf}\right) - MSS \quad (1)$$

上式中，H 为轨道高度（卫星到参考椭球面的距离），h 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}为极潮校正（以上三项统称为潮汐校正），Δh_{ib}和Δh_{hf}分别为逆气压校正和高频大气校正，二者统称动态大气校正（Δh_{dac}），MSS 为平均海平面高度。当前最先进的 MSS 模型是 Hybrid2023 模型，它融合了法国航天局（Centre National d’Etudes Spatiales，简称 CNES）、丹麦技术大学（Danmarks Tekniske Universitet，简称 DTU）和美国斯克利普斯海洋研究所（Scripps Institute of Oceanography，简称 SIO）等国际权威机构的平均海面高产品。需指出，在交叉定标中减去 MSS 只是为了尽可能降低交叉点附近大地水准面的影响，在定标过程中，双星减去的不是数据产品里的 MSS 值，而是根据同一个 Hybrid2023 模型插值得到的值。因此，交叉定标的对象本质上是海面高，而非海面高异常。

数据筛选时需要剔除不匹配或不理想的观测值，本文使用的数据筛选准则为[12]：

（1）升轨和降轨观测时间间隔不小于 3 天；

（2）升轨和降轨的海面高异常不符值（即二者的海面高异常之差）不大于 0.2 米（若超过此值，则说明某条轨道存在异常的海洋事件，如风暴潮等）；

（3）水深不小于 1000 米，以剔除近岸带来的海面高观测误差；

（4）只统计南北纬 50°之间的海域，以规避极区海冰的影响；

（5）高度计数据产品中的降雨标记和冰标记为 0（表示海面不存在降雨或冰）。

由于卫星高度计数据产品为 1Hz（每约 6km 一个采样点），数据匹配时，交叉点位置处不太可能碰巧有完全相同经纬度的高度计观测值，因此须用两侧的观测值插值到星下点位置处。本文采用升降轨中交叉点两侧各 4 个采样点进行三次样条插值，得到交叉点处升轨和降轨的 SSHA。因此，为计算每个交叉点的海面高异常不符值，需要 16 个卫星高度计观测采样点（升降轨两侧各 4 个），如图 4 所示。若某个交叉点附近不足 16 个观测点，则剔除该交叉

点。

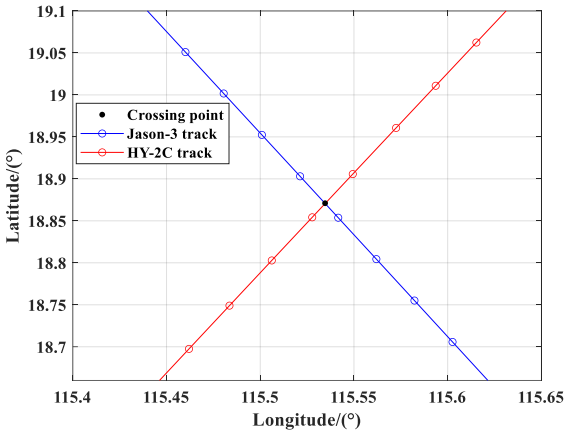


图 4 HY-2C 和 Jason-3 插值所需的交叉点示意图

Fig. 4 Schematic of the intersection points required for HY-2C and Jason-3 interpolation

通过较严格的剔除准则，可有效剔除海面高异常不符值中的粗差，得到更准确的交叉定标结果。交叉定标的结果为筛选后的升降轨海面高异常不符值的均值和标准差。

须指出，高度计的海面高都是基于参考椭球面的。参考椭球面是最符合地球形状的椭球的表面，由半长轴、半短轴、扁率和离心率决定。卫星高度、以及海面高度（SSH）和平均海平面等都是以此为起算点的。HY-2C/D 卫星是基于 Topex/Poseidon（T/P 卫星）椭球[11]，Jason-3 卫星的 F 版数据产品则从 D 版的 T/P 椭球改为 WGS84 椭球[16]，两个椭球的参数不同，如表 2 所示。

表 2. 参考椭球参数表

Table 2. Parameters of different reference ellipsoids

	Topex/Poseidon	WGS84
半长轴 a	6378136.3	6378137
半短轴 b	6356751.600563	6356752.31424518
扁率倒数 1/f	298.257	298.257223563
离心率 e	0.081819221456	0.0818191908426215

不同椭球面之间高度差可通过下式进行计算(根据椭圆参数方程即可推导)[12]：

$$\nabla h = (a_2 - a_1) \times \cos(lat)^2 + (b_2 - b_1) \times \sin(lat)^2 \quad (2)$$

式中，a_1 和 a_2 分别为不同椭球的半长轴，b_1 和 b_2 分别为半短轴；lat 以弧度计的纬度。T/P 和 WGS84 在全球高度差约为 70cm，随着纬度的增加，该偏差还会增大。这样的误差显然是不能接受的，交叉定标过程中此项差异必须予以补偿。

3.2 融合方法：最优插值法

最优插值法是当前多星海面高异常场融合的主流方法，在很多业务产品中都有应用。该方法通过对背景场与观测进行线性组合，得到分析场，如下式所示：

$$X_a = X_b + W(d - HX_b)$$
$$W = BH^T(HBH^T + R)^{-1} \quad (3)$$

在上式中，X_a表示模式运行后的分析场，X_b表示模式的背景场，d表示为观测数据向量，在这里观测向量的维数通常远小于模式的网格维数，因而需要有一个线性插值算子H，将模式的背景场X_b通过插值算子映射到观测数据的节点上，W表示观测数据到背景场的误差权重矩阵，相当于将两者的误差映射到背景场所在的网格节点上。在对W的求解式子中，R表示观测误差的方差-协方差矩阵，B表示为背景误差的方差-协方差矩阵。

最优插值法在实际应用时，背景误差方差-协方差矩阵 B 和观测误差方差-协方差矩阵 R 会十分巨大，直接利用（3）式进行矩阵相乘和求逆时对计算平台的内存和处理速度要求过高，故本文对算法的具体实现进行了优化，以实现快速处理。具体流程如表 3 所示。

表 3 最优插值算法实现流程

Table 3. Optimal interpolation algorithm implementation flow

最优插值算法实现流程
Step1 加载背景场、观测数据，处理异常、无效值，生成背景场网格
Step2 背景场插值到观测点，对每个观测点计算观测增量
Step3 遍历分析点选择最近的 *m* 个观测点
Step4 计算观测点和分析点的协方差，观测点之间的协方差
Step5 求伪逆，并计算误差权重矩阵 *W*
Step6 更新分析场和分析误差，返回 Step3 继续循环，直到遍历所有分析点

3.3 方差-协方差矩阵的确定

最优插值算法，其关键就是要求得观测误差方差-协方差矩阵 R，以及背景误差方差-协方差矩阵 B。

雷达高度计观测误差的方差-协方差矩阵构造过程中，需考虑两个方面的问题，一是其对角线，即高度计测量海面高的随机误差方差。

传统最优插值中，观测方差-协方差矩阵常常被简化为 1 个对角阵，即相邻两个观测点的海面高不相关。但从卫星高度计海面高异常谱的形状可看出，相邻观测之间还是有一定的相关性的，将矩阵近似为对角阵将导致对高度计分辨能力的乐观估计。

高度计测量海面高的随机误差方差可由两种方法确定：

① 自交叉定标方法。自交叉定标时，得到升轨点和降轨点的海面高异常不符值。升轨点海面高异常和降轨点海面高异常都含有随机噪声，这二者是独立的随机变量，且方差可近似认为相等（因为是同一台卫星高度计），因此，单颗卫星海面高观测的方差可由海面高异常不符值除以 2 得到。

② 海面高异常功率谱法。在海面高异常功率谱中，识别白噪声区的功率水平。将该功率谱幅度值除以数据采样率（HY-2C 和 HY-2D 的 1Hz 产品对应于约 6.2km 的空间分辨率），即可得到海面高异常测量方差。

通过功率谱法确定海面高噪声水平时，存在线性下降区和白噪声区界限不分明，白噪声区内功率谱起伏带来误差等问题。该方法的效果略低于自交叉定标。因此本文采用自交叉定标方法构造方差-协方差矩阵的对角线。

假设海面高异常观测序列满足平稳随机过程的条件，则方差-协方差矩阵为一个(2N+1)对角矩阵。该矩阵是一个稀疏矩阵，除了(2N+1)条对角线，其余元素全是 0。主对角线为每个观测点的方差，两侧各有 N 条对角线。越远离主对角线，随着相关系数减小（呈指数衰减），协方差越小，直至可以忽略的程度。

方差-协方差矩阵中的每个元素表示为$\sigma_i^2\sigma_j^2\rho_{ij}$。其中$\sigma_i^2,\sigma_j^2$分别表示在$i,j$两个点处的均方根误差，而计算方差-协方差矩阵的关键就在于i,j两个点处相关函数ρ_{ij}的计算。

相关系数由相关尺度代入所谓“核函数”确定。最常用的核函数是高斯核函数，形式如下[17]：

$$\rho_{ij} = exp\left(-\frac{|x_i-x_j|^2}{2L^2}\right) \quad (4)$$

上式中$|x_i - x_j|$为同一条轨道上第 i 个和第 j 个观测值之间的距离，L是相关尺度，可通过对高度计回波功率谱的分析进行确定，经过对 HY-2C/D 海面高异常功率谱的分析，观测误差的相关尺度约为 50~80km，取 L=80km。

背景场的方差-协方差矩阵的构造方法大致相同，但对角线方差和相关尺度通常都是经验常数，在融合产品使用手册中并未详细涉及其误差特征。

背景场的方差一般比高度计直接观测的方差大，本文根据经验和测试结果，选取了 5cm 作为其观测标准差，对应方差 25cm^2，约为高度计的 2 倍。不同于高度计的一维观测，背景场为二维场，其相关系数为二维高斯函数：

$$\rho_{ij} = exp\left(-\frac{|x_i-x_j|^2}{2L_x^2}-\frac{|y_i-y_j|^2}{2L_y^2}\right) \quad (5)$$

上式中 x 方向为经向（东西方向），y 方向为纬向（南北方向），L_x和L_y分别为经向和纬向的相关尺度，本文经过测试，L_x和L_y均设置为 0.707°，对应的模量为 1°，略高于 100km（具体值随纬度变化）。

3.4 检验数据预处理方法

定标场验潮站测量的海面高之中包含了海洋潮汐成分和动态大气效应，但不包含海洋负荷潮，而卫星测量的海面高则包含了海洋负荷潮。这是因为，负荷潮本质上是受到海水质量分布引起的固体地球的一种形变，验潮站是安装在固体地球上的，和固体地球同时运动，观测不到负荷潮；而卫星是在固体地球之外的，其观测中包含了负荷潮。同理，在高度计海面高异常计算中需要校正的固体潮和极潮，在验潮站数据预处理时也不需要校正。因此，验潮站的海面高异常由下式进行计算：

$$SSHA_{tg} = SSH_{tg} - (\Delta h_{ot} - \Delta h_{lt}) - \Delta h_{dac} - MSS \quad (6)$$

其中，SSH_{tg}为验潮站海面高观测值（经低通滤波并剔除粗差），Δh_{ot}为海洋潮汐，Δh_{lt}为海洋负荷潮，Δh_{dac}为动态大气校正，MSS 为平均海面高。本文中，Δh_{ot}和Δh_{lt}采用 LEGOS 生产的 FES2014（Finite Element Solution，有限元解）模型归算到验潮站观测位置及时刻获得；Δh_{dac}采用 LEGOS 生产的 DAC（Dynamic Atmospheric Correction）模式数据插值到验

潮站观测位置及时刻获得；*MSS* 则采用 Hybrid2023 模型插值到验潮站位置处获得，且以 WGS84 参考椭球面为高程基准面。

验潮站原始数据为每 6 分钟一个观测值，将该序列每天格林尼治时间 0 点（北京时间 8 点）的观测进行抽取，形成一个日序列。将融合前后的海面高异常场插值到验潮站位置处，按日期排列，也可生成日序列。对这些日序列和验潮站 SSHA 日序列进行比较，求其均方根误差（Root Mean Square Error，简称 RMSE）即可得到融合前后海面高异常场的定量检验结果。

4 处理结果

4.1 交叉定标结果

我们分别对 2023 年 5~6 月的 HY-2C 和 HY-2D 卫星高度计测量的海面高进行了自交叉定标，以及相对于同期 Jason-3 卫星高度计的互交叉定标（参考椭球面都统一到 WGS84 椭球），每次定标的有效交叉点都在 6000 个以上。交叉定标结果如表 4 所示。双星的自交叉定标偏差都接近于 0cm（D 星略大，但也在±1cm 以内），标准差都在 5cm 以内，C 星的自交叉标准差均值为 4.87cm，D 星的自交叉标准差均值为 4.92cm。C 星和 Jason-3 卫星的相对偏差为：5.28±0.08cm，D 星和 Jason-3 卫星的相对偏差为：-2.63±0.25cm。总的来说，双星精度都是比较高的，且 C 星略优于 D 星。

表 4. 交叉定标结果一览表（单位：cm）

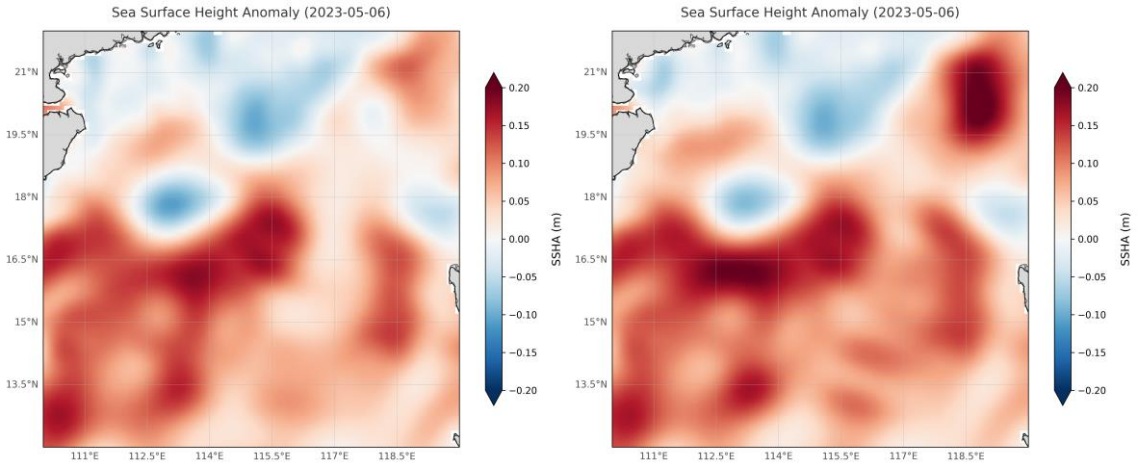
Table 4. Summary of cross calibration results (unit: cm)

月份	2023 年 5 月	2023 年 6 月
HY-2C 自交叉偏差	0.26	0.26
HY-2C 自交叉标准差	4.87	4.87
HY-2D 自交叉偏差	-0.60	0.47
HY-2D 自交叉标准差	4.98	4.86
HY-2C 和 Jason-3 互交叉偏差	5.22	5.33
HY-2C 和 Jason-3 互交叉标准差	5.12	5.05
HY-2D 和 Jason-3 互交叉偏差	-2.45	-2.81
HY-2D 和 Jason-3 互交叉标准差	5.28	5.22

注：HY-2C 自交叉偏差，5 月实际值为 0.261, 6 月实际值为 0.260；HY-2C 自交叉标准差，5 月实际值为 4.866, 6 月实际值为 4.873。取小数点后 2 位有效数字，则 HY-2C 卫星高度计 5 月和 6 月的自交叉定标偏差和标准差均完全一致。

4.2 融合结果

本文选取 2 天有代表的海面高异常融合场进行展示。图 5 和图 6 分别为选取的 2023 年 5 月 6 日和 2023 年 6 月 4 日的融合前后的海面高异常场对比图。可以看到，HY-2C 和 HY-2D 数据融合之后，海面高异常场结构更精细了，捕捉到了一些中尺度涡。例如，图 5b 右上角的高值区对应于一个暖涡，图 6b 右上角的暖涡和海南岛东北角外海的冷涡，融合后轮廓明显比融合前（图 6a）清晰。

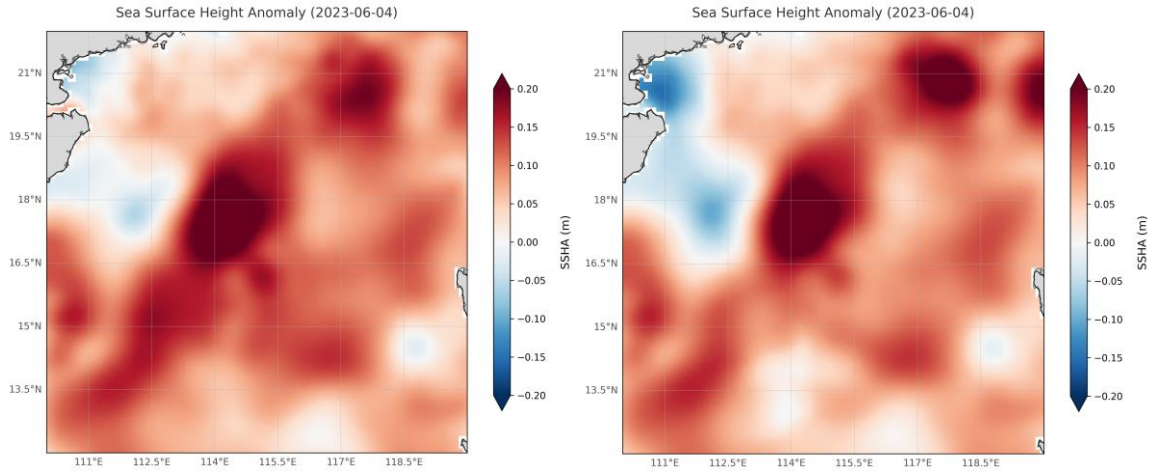


(a) (b)

图 5　2023 年 5 月 6 日南海区域融合前后结果对比图 (a) 融合前 (b) 融合 HY-2C/D 后

Fig. 5 Comparison of results before and after fusion in the South China Sea on May 6, 2023 (a) before fusion (b) after HY-2C/D fusion

最终录用



(a) (b)

图 6　2023 年 6 月 4 日南海区域融合前后结果对比图 (a) 融合前 (b) 融合 HY-2C/D 后

Fig. 6 Comparison of results before and after fusion in the South China Sea on June 4, 2023 (a) before fusion (b) after HY-2C/D fusion

4.3 验潮站数据结果

验潮站获得的数据中往往包含一些高频噪声和异常值，这些噪声可能由仪器误差、海洋表面的微小波动、环境干扰等因素引起。因此，在去除潮汐前，先对直湾岛验潮站原始 SSH 数据进行高斯平滑处理。高斯平滑通过对数据进行加权平均，能够有效地衰减高频噪声，使数据更加平滑，更能反映出真实的海面高度变化趋势。

本文通过 FES2014 模型解算潮汐（不含负荷潮），图 7 为验潮站数据平滑后的 SSHA 和 FES 模型解算的海洋潮汐（扣除负荷潮）对比图。FES 模型考虑了 34 个海洋潮汐谐波，被普遍认为是当前最好的海潮模型[18]。可以看到，两条曲线的趋势基本一致，不太一致的地方主要源于验潮站数据的不连续或异常值。

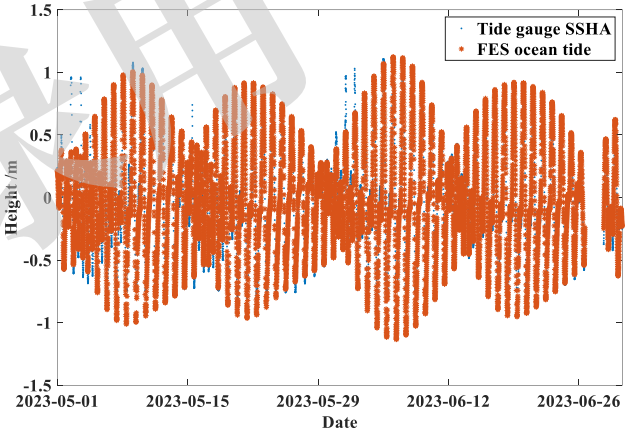


图 7 直湾岛验潮站海面高异常和 FES 模型解算的潮汐（不含负荷潮）对比示意图

Fig. 7 Comparison of SSHA and tides (excluding load tides) calculated by FES model of Zhiwan Wharf tide gauge

4.4 检验结果

表 5 为融合前后，海面高异常场插值到直湾岛验潮站位置处的海面高异常日序列，相对于直湾岛验潮站海面高异常日序列的均方根误差（Root-Mean-Square Error，简称 RMSE）对比表。可以看到，融合前 RMSE 为 4.62cm，融合后为 4.43cm，融合改善程度为：$\sqrt{4.62^2 - 4.43^2} = 1.31\text{cm}$。

表 5. 融合前后海面高异常场相对于直湾岛验潮站的均方根误差对比表（单位：cm）

Table 5. Comparison of the RMSE of the regional SSHA fields with respect to the tide gauge before and after fusion (unit: cm)

误差校正情况	融合前	融合后
MIOST 偏差和 DAC 均校正	4.62	4.43
MIOST 偏差不校正/DAC 校正	7.15	6.38
MIOST 偏差校正/DAC 不校正	6.49	5.92

图 8 为直湾岛验潮站、融合前后的逐日 SSHA 序列对比图。验潮站 6 月 27 日无数据，6 月 1 日数据异常，在计算 RMSE 时剔除了这两天的数据。从图中可以看到，在融合之后，SSHA 序列和验潮站的相关性更强了。

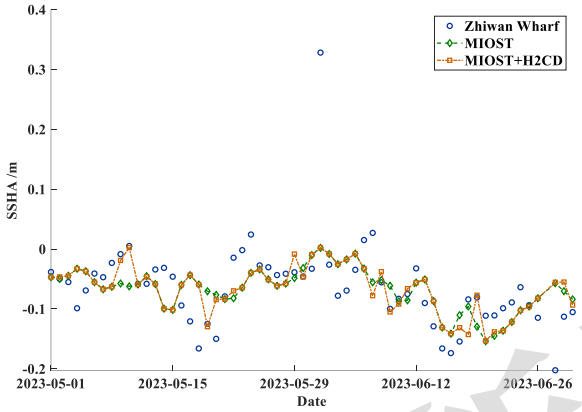


图 8 直湾岛验潮站、融合前后的逐日 SSHA 序列对比图

Fig. 8 Comparison of daily series from Zhiwan Wharf tide gauge SSHA, pre-fusion MIOST SSHA, and post-fusion SSHA.

4.5 讨论

在处理过程中，发现了 MIOST 海面高异常（未融合时），相对于验潮站有一个+6.00cm 的平均偏差；以 Jason-3 卫星观测值为基准，统计整个海域 MIOST 相对于 Jason-3 卫星高度计的平均偏差，为+6.41cm。通过对在黄海等其它海域的测试，也发现了+6~7cm 的偏差。经研究和排查，其来源在于二者使用的平均海面高（MSS）的对应时间范围不同。

由于气候变化，全球平均海平面以约 3.4 mm/a 的速度逐年上升，因此计算 MSS 对应的时间越早，其 MSS 值越低，以此基础生成的 SSHA 就越高。MIOST 模型作为最新的 AVISO 模型，沿用了 1993~2012 年的经典时间范围。但 Jason-3 卫星基于的 MSS 是以 Jason-3 卫星发射时的 2016 年为中心计算的。图 9 为 Jason-3 卫星发射后观测的海面高异常逐周期序列图，发射初期接近于 0，在全球范围内和 1993~2012 年的高程基准有平均约 5cm 的偏差，在近岸或浅海（如本文研究的南海）该偏差还会更大，这种由参考基准不同带来的偏差，可以通过基准统一来进行校正。因此，在融合前，首先对不同 MSS 引起的偏差进行校正是必要的。

表 5 中列出了在 MIOST 偏差不校正时，基于验潮站检验的结果。可以看出，由于偏差并未校正，RMSE 明显比校正时大。

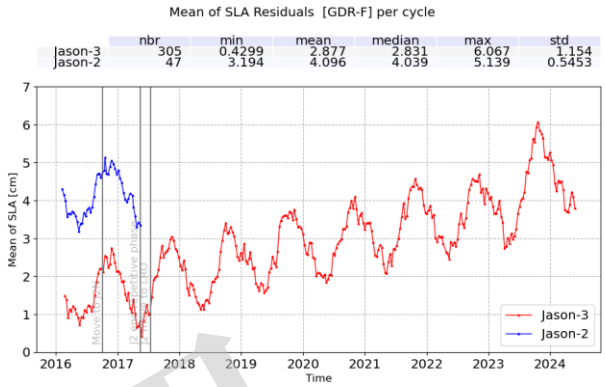


图 9 发射后 Jason-3 卫星海面高异常逐周期序列图[19]

Fig. 9 Diagram of Jason-3 cyclic SSHA since launch

此外，之前的部分检验研究中，在计算验潮站 SSHA 的过程中只考虑海潮，而忽略了动态大气效应的影响。图 10 为根据 LEGOS 发布的模型得到的验潮站所在位置处的动态大气校正序列图，从图中可以看到，南海海域的动态大气效应影响还是很大的，动态范围可达 20cm 左右，且变化较快，因此是不能忽略的。本文的研究中，不但考虑了验潮站的 DAC，也补充了 HY-2D 卫星数据产品中的动态大气校正项。表 5 中也列出了在验潮站 DAC 不校正时，基于验潮站检验的结果。可以看出，RMSE 明显比校正时大。

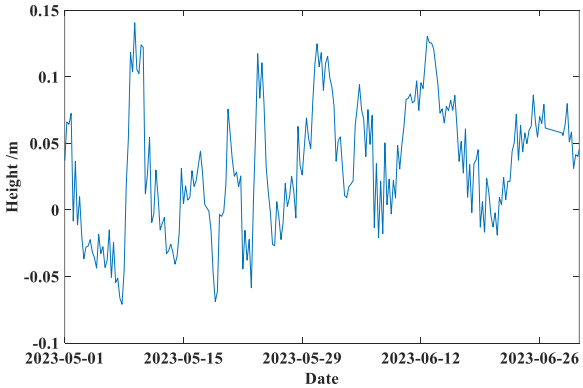


图 10 直湾岛验潮站 DAC 示意图

Fig. 10 DAC diagram of Zhiwan Wharf tide gauge

最新公告

5 结论

本文对国产 HY-2C/D 卫星雷达高度计数据经交叉定标去除偏差后，计算海面高异常，并以国际上目前最先进的 MIOST 产品作为背景场，采用最优插值法进行海面高异常场融合，取得了良好的融合效果。融合后的海面高异常序列和用于检验的验潮站观测值一致性更强，其地理分布图也呈现更多精细的中尺度特征。高度计海面高异常融合中特别需要考虑高程基准一致性的问题：一是计算海面高时采用的参考椭球面，二是计算海面高异常时采用的平均海平面。融合过程中涉及数据的高程基准各有差异，本文着重对不同基准之间的偏差进行了校正。

本研究成功验证了 HY-2C/D 雷达高度计的数据质量，对于推动中国自主卫星测高数据在国际上的进一步应用，有着重要的意义。此外，本文采用的最优插值融合方法，经优化后速度较快，未来可以推广到全球海域的数据融合，为国际卫星测高学术界提供更多可用的融合数据产品。

我国近期将发射合成孔径体制雷达高度计的 HY-2E/F 卫星，其测高精度比 HY-2A/B/C/D 卫星雷达高度计有显著提升，未来融合 HY-2E/F 卫星高度计产品之后，将进一步提升海面高异常融合产品的精度，为海洋学科学研究和业务应用做出重要贡献。合成孔径雷达高度计的观测精度更高，且相关尺度更短，其方差-协方差矩阵的形式和传统雷达高度计不同，但其方法和传统高度计的方法一致。合成孔径雷达高度计沿轨分辨率比传统雷达高度计提高了一个数量级，其在近岸海域有独特的优势，关于其近岸海域的优化处理，如进行近岸回波重跟踪等，也可纳入到未来多源卫星海面高异常融合研究计划之中。

致谢

本文中使用的 HY-2C/D 卫星数据和万山定标场检验数据是由国家卫星海洋应用中心的贾永君和张宇飞提供的；Jason-3 卫星数据是在法国航天局（CNES）资助下，由 CLS 公司生产，并由 AVISO 分发的；背景 MIOST 模式数据是在法国航天局（CNES）资助下，由 SSALTO/DUACS 生产，并由 AVISO+分发的。作者对这些机构和专家表示感谢。

参考文献

[1] FU L L, CAZENAVE A. Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications[M]. San Diego: Academic Press, 2000: 463

[2] STAMMER D, CAZENAVE A. Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017: 608

[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] JIANG Xingwei, HE Xianqiang, LIN Mingsen, *et al*. Progresses on ocean satellite remote sensing application in China[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, **41**(10): 113-124 (蒋兴伟, 何贤强, 林明森, 等. 中国海洋卫星遥感应用进展[J]. 海洋学报, 2019, **41**(10): 113-124)

[5] LI Luya. Research on the Application of HY-2 Series Satellite in Sea Surface Height Data Fusion [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2023. 李露雅. HY-2 系列卫星在海面高度数据融合中的应用研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023

[6] UBELMANN C, DIBARBOURE G, GAULTIER L, *et al*. Reconstructing ocean surface current combining altimetry and future spaceborne Doppler data[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Oceans*, 2021, **126**(3): e2020JC016560

[7] UBELMANN C, CARRERE L, DURAND C, *et al*. Simultaneous estimation of ocean mesoscale and coherent internal tide sea surface height signatures from the global altimetry record[J]. *Ocean Science*, 2022, **18**(2): 469-481

[8] SSALTO/DUACS. SSALTO/DUACS Experimental Product Handbook: Gridded Sea Level Heights and Geostrophic Velocities Computed with SWOT Level-3 Products (Using Both KaRIn and Nadir Instruments)[R]. SALP-MU-P-EA-23661-CLS, 2024 [2025-06-20].https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/hdbk_duacs_experimental_miost_4dvarnet_4dvarqg_swot.pdf

[9] CARLI E, MORROW R, VERGARA O, *et al*. Ocean 2D eddy energy fluxes from small mesoscale processes with SWOT[J]. *Ocean Science*, 2023, **19**(5): 1413-1435

[10] FU L L, PAVELSKY T, CRETAUX J F, *et al*. The surface water and Ocean Topography mission: a breakthrough in radar remote sensing of the ocean and land surface water[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(4): e2023GL107652

[11] 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 Science Edition*), 2023, **32**(3): 65-72 (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): 65-72)

[12] 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)

[13] XU Xi-Yu, LIU Qiankun, WANG Te, *et al*. Analysis of the consistency between sentinel-3A & B altimeters during the tandem mission[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Kuala Lumpur: IEEE, 2022

[14] MENG Ju, YU Fangjie, ZHUANG Zhiyuan, *et al*. Quality analysis of sea level height data of HY-2C satellite[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, **44**(10): 173-181 (孟菊, 于方杰, 庄志远, 等. HY-2C 卫星海面高度数据的质量分析[J]. 海洋学报, 2022, **44**(10): 173-181)

[15] KOCHA C, PAGEOT Y, RUBIN C, *et al*. 30 years of sea level anomaly reprocessed to improve climate and mesoscale satellite data record[C]//Proceedings of the OSTST Conference 2023. 2023 [2025-06-20].https://ostst.aviso.altimetry.fr/fileadmin/user_upload/OSTST2023/Presentations/CVL2023-30_years_of_sea_level_anomaly_reprocessed_to_improve_climate_and_mesoscale_satellite_data_record_.pdf

[16] BIGNALET-CAZALET F, ROINARD H, TRAN N, *et al*. Jason-3 GDR-F standard: ready for operational switch[C]//Proceedings of the OSTST Conference 2020. 2020 [2025-06-20].https://ostst.aviso.altimetry.fr/fileadmin/user_upload/tx_ausyclsseminar/files/CVL_J3_GDRF_ready_v02_ostst2020_02.pdf

[17] GREENSLADE D J M, YOUNG I R. Background errors in a global wave model determined from altimeter data[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Oceans*, 2004, **109**(C9): C09007

[18] LYARD F, LEFEVRE F, LETELLIER T, *et al*. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004[J]. *Ocean Dynamics*, 2006, **56**(5): 394-415

[19] CNES/CLS. Jason-3 GDR Quality Assessment Report Cycle 377[R]. SALP-RP-JALT3-EX-23103-CLS377, 2024 [2025-06-20]. https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/calval/cyclic_validation_report/J3/BilanCalval_J3_Cycle_377.pdf

作者简介



郭　畅　男，1999 年出生于江苏省徐州市，现为中国科学院大学硕士研究生（培养单位为中国科学院国家空间科学中心），主要研究方向为卫星测高数据处理及海洋应用.

E-mail: guochang22@mails.ucas.ac.cn



徐曦煜（通信作者）　男，1979 年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