



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目：利用 SWOT 宽刈幅测高数据提升海洋重力场精度：与传统测高卫星的比较分析

作者：于道成，黄金维，祝会忠，罗佳，袁佳佳

DOI：10.13203/j.whugis20240120

收稿日期：2024-09-21

网络首发日期：2024-10-09

引用格式：于道成，黄金维，祝会忠，罗佳，袁佳佳. 利用 SWOT 宽刈幅测高数据提升海洋重力场精度：与传统测高卫星的比较分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240120>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240120

引用格式：

于道成, 黄金维, 祝会忠, 等. 利用 SWOT 宽刈幅测高数据提升海洋重力场精度：与传统测高卫星的比较分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,DOI: 10.13203/j.whugis20240120 (YU Daocheng, HWANG Jinway, ZHU Huizhong, et al. Enhancing Marine Gravity Field Precision Using SWOT Wide-swath Altimetry Data: a Comparative Analysis with Traditional Altimetry Satellites[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,DOI: 10.13203/j.whugis20240120)

利用 SWOT 宽刈幅测高数据提升海洋重力场精度：与传统测高卫星的比较分析

于道成¹, 黄金维², 祝会忠^{1*}, 罗佳^{3,4,5}, 袁佳佳⁶

1 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新, 123000

2 阳明交通大学土木工程系, 台湾 新竹, 300093

3 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉, 430079

4 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 湖北 武汉, 430079

5 湖北珞珈实验室, 湖北 武汉, 430079

6 安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 安徽 淮南, 232001

摘要: SWOT (Surface Water and Ocean Topography) 宽刈幅测高卫星以前所未有的空间分辨率和精度获取海面高度信息, 为提升现有海洋重力场的精度和分辨率带来机遇。但是, 目前关于 SWOT 反演海洋重力场的研究较少, 尤其缺乏基于 SWOT 构建的海洋重力场精度的量化结果, 本文基于 SWOT 模拟数据, 研究 SWOT 在解算垂线偏差分量和反演海洋重力异常方面的潜力。模拟了观测精度为 1.4 cm、空间分辨率为 2 km×2 km 的 SWOT 宽刈幅海面高观测值, 同时模拟了传统测高卫星 Jason-2 和 Cryosat-2 数据, 对比研究 SWOT 较传统测高卫星在反演海洋重力场方面的优势。利用最小二乘配置法 (least-squares collocation, LSC) 和加权最小二乘平差法 (weighted least-squares adjustment, WLSA) 解算垂线偏差南北向和东西向分量, 并利用逆 Vening-Meinesz 法反演重力异常。在 SWOT 数据模拟过程中获取的垂线偏差分量和重力异常的“真值”用于评估计算结果的精度。为充分利用 SWOT 宽刈幅测高特性, 将 SWOT 二维数据分解为沿轨迹和垂直轨迹方向的一维数据。研究表明, LSC 法解算的垂线偏差分量精度优于 WLSA 法; 平均多周期 SWOT 数据可有效削弱观测误差; SWOT 沿轨迹数据有利于解算南北向分量, 而垂直轨迹数据有利于解算东西向分量。在本研究区域, 融合 Jason-2 和 Cryosat-2 数据解算的 1'×1' 垂线偏差南北向与东西向分量的精度均约为 3 microrad, 反演的 1'×1' 海洋重力异常精度为 4.7 mgal。而 SWOT 将垂线偏差分量的精度提升至 0.7 microrad, 并将重力异常精度提升至 1 mgal。研究表明, 相较于传统测高卫星, SWOT 宽刈幅测高卫星在提升海洋垂线偏差和重力场精度方面具有显著优势。

关键词: SWOT 卫星; 宽刈幅测高; 垂线偏差; 海洋重力异常

Enhancing Marine Gravity Field Precision Using SWOT Wide-swath Altimetry Data: a Comparative Analysis with Traditional

收稿日期: 2024-09-21

基金项目: 国家自然科学基金 (42404103, 42030109, 42074012, 42174017); 辽宁省“兴辽英才计划”项目资助 (XLYC2203162)。

第一作者: 于道成, 博士, 副教授, 主要研究方向为卫星测高反演海洋重力场。yudaocheng@lntu.edu.cn

通讯作者: 祝会忠, 博士, 教授。zhuhuizhong@lntu.edu.cn

Altimetry Satellites

YU Daocheng¹, HWANG Jinway², ZHU Huizhong^{1*}, LUO Jia^{3,4,5}, YUAN Jiajia⁶

1 School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

2 Department of Civil Engineering, Yang Ming Chiao Tung University, Xinzhu 300093, China

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

4 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China

5 Hubei LuoJia Laboratory, Wuhan 430079, China

6 School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

Abstract: Objectives: Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission, a wide-swath altimeter satellite, measures sea surface heights (SSHs) with unparalleled spatial resolution and precision, offering new opportunities to enhance the precision and resolution of the existing marine gravity fields. However, there is currently limited research on recovering marine gravity fields from SWOT, particularly with respect to quantitative assessments of the accuracy of SWOT-derived marine gravity field. This study investigates the potential of SWOT in determining deflection of the vertical (DOV) and deriving marine gravity anomalies based on simulated SWOT data. **Methods:** In the northern South China Sea around Dongsha Island, we generate the high-wavenumber SSH components using multi-beam depths based on the residual depth model principle, compensating for the losing high-frequency signals of the DTU21MSS model. Then we simulate wide-swath SWOT SSH observations with 1.4cm precision and 2 km×2 km spatial resolution. In order to explore the advantages of SWOT in recovering marine gravity field over the conventional nadir-looking altimeter satellites, we also simulate SSH data for Jason-2 and Cryosat-2. To make the most of SWOT's wide-swath altimetry nature, we separate two-dimensional SSHs into along- and cross-track directions. We use least-squares collocation (LSC) and weighted least-squares adjustment (WLSA) to estimate the north and east components of DOV and derive marine gravity anomalies using inverse Vening-Meinesz formula. The “true values” of DOV components and gravity anomalies are computed within the simulation of SWOT data to evaluate the precision of the results. **Results:** The LSC method outperforms WLSA in estimating the DOV components. Averaging multi-cycle SWOT data efficiently suppresses observation errors. SWOT along-track data are beneficial for estimating the north components of DOV, while the cross-track data are useful for resolving the east components. In the study area, the precision of both the north and east components of DOV estimated from the merged Jason-2 and Cryosat-2 data is about 3 microrad, thereby deriving 1'×1' gravity anomalies with 4.7-mgal precision. Using SWOT data, the precisions of the two DOV components and gravity anomalies improve to 0.7 microrad and 1 mgal, respectively. **Conclusions:** Compared to conventional altimeters, the SWOT wide-swath altimetry significantly improves the accuracy of marine DOV and gravity fields.

Key words: SWOT satellite; wide-swath altimetry; deflection of the vertical; marine gravity anomaly

海洋重力异常反映了海洋岩石圈构造和海底地形的重要特征，可用于研究板块构造理论和解释地球内部质量迁移等多种地球物理现象^[1,2]。卫星测高技术可获取全球海面高度信息，是构建全球海洋重力场模型的主要技术手段^[1,3]。传统测高卫星仅能沿轨迹获取一维海面高观测值且相邻轨迹间隔较大，虽然可通过融合多种测高数据来提升数据的空间分辨率，但不同测高卫星数据之间存在系统误差，因此，传统测高卫星难以获取精度一致且空间分布均匀的海面高数据^[3]。目前，融合多种测高数据构建的海洋重力场模型的标称空间分辨率为 1'×1'，但实际分辨率超过 12 km，与船测重力数据比较的精度为 5-8 mgal^[4-8]。

海洋重力场模型的空间分辨率和精度有望通过最新发射的 SWOT (Surface Water and Ocean Topography) 测高任务得到进一步提升。SWOT 是宽刈幅测高卫星，于 2022 年 12 月 16 日成功发射，搭载的 Ka 波段雷达干涉仪 (Ka-band Radar Interferometer, KaRIN) 采用合成孔径雷达干涉技术在地面轨迹左右两个 50 km 宽的观测刈幅上直接获取二维海面高观测值^[9,10]。SWOT 已经完成了用于定标检验的快速采样阶段，目前正处于科学阶段，轨道高度为 890 km，轨道倾角为 77.6°，重复周期为

21 天，观测数据基本覆盖全球。

SWOT 任务实现了卫星测高技术从一维沿轨观测到二维宽刈幅观测的突破^[10]，以前所未有的空间分辨率和精度获取海面高度信息，这将提升海洋垂线偏差的精度，从而进一步精化现有海洋重力场模型。目前，关于 SWOT 在反演海洋重力场方面的研究较少，文献[11]模拟了 SWOT 海面高观测值和观测误差，研究了 SWOT 观测误差对垂线偏差和重力异常的影响，并提出了误差削弱方法。此外，文献[11]对比研究了基于大地水准面的逆 Stokes 积分法和基于垂线偏差的逆 Vening-Meinesz (IVM) 法在反演海洋重力异常方面的优劣，并分别针对这两种方法提出了数据处理策略。研究表明，IVM 法比逆 Stokes 积分法具有更好的抗粗差特性，而逆 Stokes 积分法需要更多的数据前处理和滤波后处理；SWOT 垂直轨迹方向的海面高观测值有利于计算垂线偏差的东西向分量，进而提升重力场精度；SWOT 观测的高频海面高信号有助于反演更加精细的海洋重力异常。文献[12]基于 SWOT 模拟数据利用加权最小二乘平差法 (weighted least-squares adjustment, WLSA) 解算垂线偏差分量，并利用 EGM2008 的垂线偏差分量对解算结果进行精度评估，结果表明，与传统测高相比，SWOT 可以显著提升垂线偏差东西向分量的精度。此外，还研究了 SWOT 观测误差对垂线偏差的影响，可以通过滤波来削弱误差效应。

虽然 SWOT 数据已经公开发布，但目前仍处于调试和验证阶段，随着 SWOT 数据处理算法的不断更新，新版本的 SWOT 数据将陆续发布，因此，目前 SWOT 数据的质量尚不稳定。因此，本文基于 SWOT 模拟数据来研究 SWOT 在解算海洋垂线偏差分量和重力场方面的潜能和优势。本文采用残余深度模型概念利用多波束海深制造高波数海面高分量，模拟 SWOT 海面高观测值，利用最小二乘配置法 (least-squares collocation, LSC) 和加权最小二乘平差法 (WLSA) 解算垂线偏差分量，并采用 IVM 法反演海洋重力异常。海洋垂线偏差缺少实测数据，因此无法评估卫星测高解算的垂线偏差。然而，本文制造的用于模拟 SWOT 观测值的海面高模型，可以提供垂线偏差分量的“真值”，用于评估 SWOT 和传统测高卫星解算的垂线偏差分量的精度，进而比较分析 LSC 和 WLSA 方法的优缺点，并探究 SWOT 宽刈幅测高卫星在解算垂线偏差分量和反演海洋重力场方面的潜能。

1 SWOT 观测数据模拟

现有平均海面高 (mean sea surface, MSS) 模型的空间分辨率和精度都无法达到 SWOT 任务的水准，因此无法逼真地模拟 SWOT 海面高观测值。DTU21MSS 模型是丹麦科技大学 (Technical University of Denmark, DTU) 最新发布平均海面高模型^[13]，但模型构建过程中的滤波会削弱高频信号。为了补偿这部分高频海面高信号，本研究采用残余深度模型 (residual depth model, RDM) 概念，基于多波束测深 (multi-beam depth) 数据制造高波数海面高分量 (high-wavenumber SSH component)^[11]：

$$H_{RDM}(x_p, y_p) = \frac{G}{\gamma} \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\rho (h(x, y) - h_{ref}(x, y))}{\sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}} dx dy \quad (1)$$

其中， H_{RDM} 是高波数海面高分量， G 是万有引力常数， γ 是正常重力， $\rho = 1.64 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 是海水与岩石地质密度差， h 是真实海深， h_{ref} 是参考海深， $h - h_{ref}$ 是残余海深， (x_1, x_2) 和 (y_1, y_2) 是 P 点区域直角坐标系定义的积分区域。

残余深度模型概念与残余地形模型概念类似，后者是地形快速变化而产生的高频大地起伏，前者可以理解为：海底地形快速变化引起的高频海面高。本研究采用多波束海深^[14]作为真实海深，该数据来源于中国台湾“内政部”，位于南海北部的东沙岛 (20°42'N, 116°43'E) 附近，海底地形复杂多样。多波束测深数据沿船测轨分布，数据不规则，无法应用于式 (1) 进行二次积分。通用大洋水深制图 (the General Bathymetric Chart of the Oceans, GEBCO) 是 15"×15" 的规则格网数据，本研究利用 GEBCO_2020 (<https://www.gebco.net/>) 填充多波束测深数据的空白区域，构建 1'×1' 的格网海深，以此作为真实海深，见图 1 (a)。以 20 km 波长对其滤波后的海深作为参考海深，二者的差异是残余海深，见图 1 (b)。由式 (1) 计算得到的高波数海面高分量如图 1 (c) 所示，这是 SWOT 预期可观测到的高频海面高信号。需要注意的是，本文制造的高波数海面高分量仅考虑了地形因素，

并未考虑海底地质密度分布不均匀的影响。

DTU21MSS 模型的半波长分辨率为 6-8 km, 本文制造的高波数海面高分量 (H_{RDM}) 与残余海深具有相同的空间频率, 可以弥补 DTU21MSS 模型缺失的高频信号。将 H_{RDM} 叠加到空间分辨率为 $1' \times 1'$ 的 DTU21MSS 模型, 再加入 SWOT 观测误差, 生成一个 $1' \times 1'$ 的海面高模型, 称为 SWOT_model:

$$H_{SWOT} = H_{DTU21} + H_{RDM} + \varepsilon \quad (2)$$

其中, H_{DTU21} 是 DTU21MSS 模型的平均海面高, ε 是 SWOT 观测误差。利用 SWOT 海面高观测值反演海洋重力场时, 需要对海面高进行仪器误差、湿对流层延迟和海况偏差等改正, 这可以削弱 SWOT 的系统误差。通常还需要进行交叉点平差或共线平差来进一步削弱 SWOT 宽刈幅观测值的系统性倾斜。在我们以往的研究中^[11]模拟了 SWOT 各种观测误差, 研究了误差对海洋重力异常的影响, 系统误差对解算垂直轨迹方向的垂线偏差影响较大, 我们通过构建一个参考面来改正 SWOT 宽刈幅数据中的系统误差。对原始的 SWOT 海面高数据进行格网化, 并通过滤波来削弱误差, 以此作为参考面, 计算每条轨迹上垂直轨迹方向海面高与参考面的差异, 建立其关于经度的一次函数, 通过最小二乘法解算一次函数系数, 用于改正 SWOT 数据的系统性倾斜, 该方法可有效削弱 SWOT 系统误差^[11]。本文不再考虑 SWOT 的系统误差, 只考虑 SWOT 的偶然误差。经过各项改正后的 SWOT 单次观测值精度约为 1.4 cm ^[9], 因此, 本文模拟的 ε 是标准差为 1.4 cm 的偶然误差。

本研究根据 SWOT 轨道 (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/missions/current-missions/swot/orbit.html>) 确定 SWOT 观测数据的地面点位, 将 SWOT_model 插值在点位上模拟 SWOT 海面高数据, 共计 35 个周期 (2 年), 一个周期 SWOT 数据的分布如图 1 (d) 所示。SWOT 宽刈幅数据是 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的二维格网数据, 星下点轨迹上是间隔为 2 km 的一维数据。为了比较分析 SWOT 宽刈幅测高与传统沿轨测高的区别, 同时避免不同测高卫星误差的影响, 本研究将不含误差的 SWOT_model (即式 (2) 中的 $H_{DTU21} + H_{RDM}$) 插值在 2 年 Jason-2 大地任务 (2017.07.11–2019.10.01) 和 10 年 Cryosat-2 (2010.07.15–2021.01.01) 的 1 Hz 观测点位上, 模拟不含误差的海面高观测值, 如图 1 (e) 和 (f) 所示。模拟 SWOT 以及传统测高卫星海面高观测值的流程图如图 2 所示。后文均是基于 Jason-2 和 Cryosat-2 模拟数据来计算垂线偏差分量和重力异常, 其结果与 SWOT 模拟数据的计算结果进行对比分析。

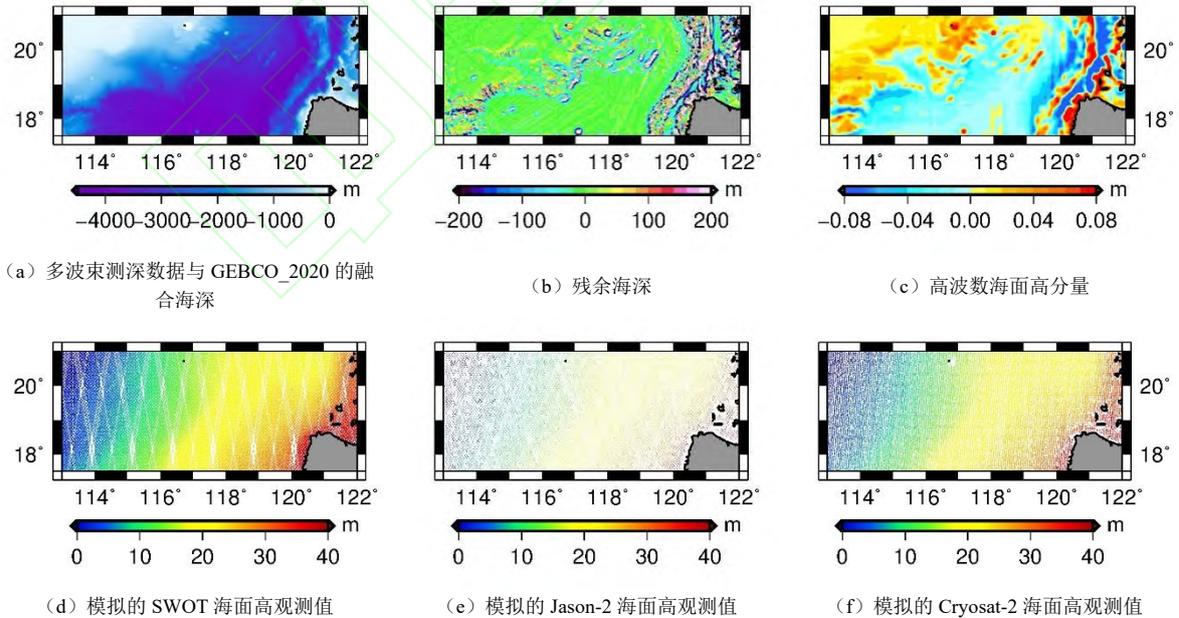


图 1 基于海深数据模拟的 SWOT, Jason-2 和 Cryosat-2 海面高数据
Fig. 1. The simulated SSH data for SWOT, Jason-2, and Cryosat-2 using bathymetry data

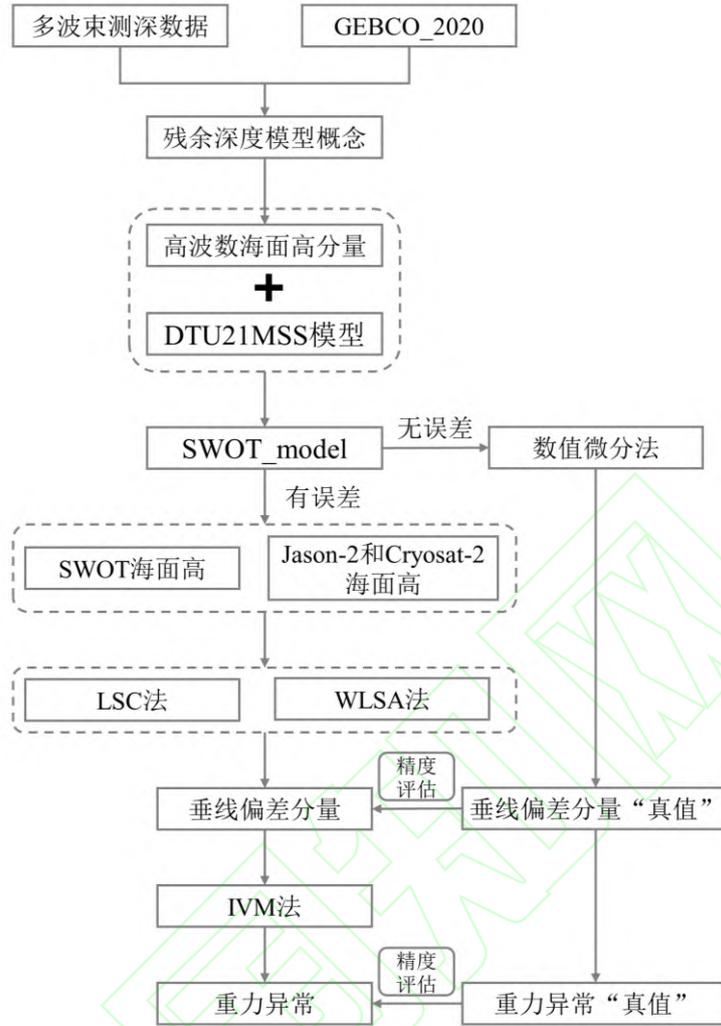


图2 基于模拟的SWOT以及传统测高数据反演海洋重力异常流程图

Fig. 2 The flowchart of deriving marine gravity anomaly from the simulated SWOT and conventional altimeter data

2 重力异常反演方法

2.1 垂线偏差分量解算方法

为了充分利用 SWOT 宽刈幅测高特性，将 SWOT 二维观测值分解为沿轨迹和垂直轨迹方向的一维数据，扣除 CNES-CLS18 平均动力地形^[15]，得到大地水准面高。本研究在模拟 SWOT 海面高观测值时未考虑海洋环流的影响，但是，SWOT 实测数据中将包含中尺度和亚中尺度的海洋环流信号，因此，在反演海洋重力异常之前，需要消除海洋环流的影响。可以采用以下两种方法：（1）从 SWOT 海面高数据中扣除海面高度异常（sea level anomaly, SLA），（2）对长期 SWOT 观测数据进行平均。为了避免在计算重力异常时进行全球积分，采用“移去-计算-恢复”原理，将 EGM2008 模型^[16]作为参考场，从 SWOT 大地水准面高中移去 EGM2008 球谐展开至 2160 阶次的大地水准面高得到残余大地水准面高。利用数值微分法计算残余大地水准面梯度^[5]：

$$\varepsilon_{\alpha, res} = \frac{N_{res2} - N_{res1}}{d} \quad (3)$$

其中， N_{res1} 和 N_{res2} 是沿轨迹或垂直轨迹上相邻两点的残余大地水准面高， d 是两点的球面距离， $\varepsilon_{\alpha, res}$ 是方位角为 α 的残余大地水准面梯度，大地水准面梯度与垂线偏差互为相反数。利用式（3）计算大地水准面梯度可有效削弱长波长误差的影响^[17-18]。

本研究利用两种方法解算残余垂线偏差的南北向（子午圈）与东西向（卯酉圈）分量。第一种方法是最小二乘配置法（LSC），在每个 $1' \times 1'$ 格网点上构建以格网点为中心的 $8' \times 8'$ 窗口，通过下式解算格网点上的残余垂线偏差分量^[17]：

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{\mathbf{sL}}(\mathbf{C}_{\mathbf{LL}} + \mathbf{D}_{\mathbf{L}})^{-1}\mathbf{L} \quad (4)$$

其中, 向量 \mathbf{s} 包含格网点上的南北向 ξ 和东西向 η 分量, \mathbf{L} 是由窗口内残余大地水准面梯度构成的向量, $\mathbf{D}_{\mathbf{L}}$ 是观测噪声协方差矩阵, 是由 \mathbf{L} 的误差方差组成的对角矩阵, 起滤波作用, $\mathbf{C}_{\mathbf{LL}}$ 是 \mathbf{L} 的自协方差矩阵, $\mathbf{C}_{\mathbf{sL}}$ 是 \mathbf{s} 与 \mathbf{L} 的互协方差矩阵。 $\mathbf{C}_{\mathbf{LL}}$ 和 $\mathbf{C}_{\mathbf{sL}}$ 均由相对于 EGM2008 参考场的全球协方差函数通过协方差传播计算得到^[17]。

文献[19]利用加权最小二乘平差法(WLSA)剔除残余大地水准面梯度中的粗差, 随后该方法被广泛应用于解算垂线偏差分量^[12,20,21]。基于垂线偏差及其分量的关系, 在 $2' \times 2'$ 窗口内建立如下的观测方程:

$$\varepsilon_i + v_i = \xi \cos\alpha_i + \eta \sin\alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

其中, ε_i 是窗口内的第 i 个残余大地水准面梯度, 其方位角为 α_i , ξ 和 η 分别是 $1' \times 1'$ 格网点上的残余南北向与东西向分量, v_i 是残差。每个大地水准面梯度的权是该点到格网点距离的倒数^[12]。利用最小二乘平差法可解算垂线偏差分量, 并且估计后验单位权中误差。

2.2 数值微分法求解垂线偏差分量“真值”

从不含误差的 SWOT_model (即式(2)中的 $H_{DTU21} + H_{RDM}$) 中扣除 CNES-CLS18 平均动力地形和参考场的大地水准面高, 得到残余大地水准面高, 结果是 $1' \times 1'$ 的规则格网, 便于利用数值微分法计算水平方向的导数, 其北向导数与东向导数即为残余大地水准面梯度的南北向与东西向分量:

$$\begin{aligned} \tilde{\xi} &= \frac{\partial N_{res}}{\partial y} \\ \tilde{\eta} &= \frac{\partial N_{res}}{\partial x} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, N_{res} 是残余大地水准面高, x 和 y 构成区域直角坐标系, x 向东为正, y 向北为正, $\tilde{\xi}$ 和 $\tilde{\eta}$ 分别是南北向与东西向分量。式(6)直接由残余大地水准面高求解残余垂线偏差分量, 不受卫星轨道倾角的影响, 因此将 $\tilde{\xi}$ 和 $\tilde{\eta}$ 看作“真值”, 用于评估 SWOT 解算结果的精度。本文仅关注残余垂线偏差分量, 利用式(6)计算的残余垂线偏差分量的“真值”来评估 SWOT 以及传统测高解算的残余垂线偏差分量, 如图2所示。因此, 后文不再严格区分残余垂线偏差分量与垂线偏差分量。

2.3 IVM 法反演重力异常

由垂线偏差分量计算重力异常的 IVM 公式如下^[22]:

$$\Delta g_P = \frac{\gamma_0}{4\pi} \iint_{\sigma} H'(\xi_Q \cos\alpha_{QP} + \eta_Q \sin\alpha_{QP}) d\sigma_Q \quad (7)$$

其中, P 是计算点, Q 是贡献点, Δg_P 是 P 点残余重力异常, γ_0 是正常重力, σ 是单位球, ξ_Q 和 η_Q 分别是 Q 点垂线偏差的南北向与东西向分量, α_{QP} 是从 Q 点到 P 点的方位角, $d\sigma_Q$ 是单位球的面元素, $H' = -\frac{2}{\psi_{PQ}^2}$ 为核函数。在 P 点的临近区内, P 、 Q 两点的球面距离 $\psi_{PQ} \rightarrow 0$, 核函数奇异, 无法计算式(7)。为避免精度损失, 临近区的重力异常利用下式计算^[22]:

$$\Delta g_i = \frac{s_0 \gamma_0}{2} (\xi_y + \eta_x) \quad (8)$$

其中, $\xi_y = \partial \xi / \partial y$, $\eta_x = \partial \eta / \partial x$, (x, y) 构成区域直角坐标系, $s_0 = \sqrt{\frac{\Delta x \Delta y}{\pi}}$ 是临近区半径, Δx 和 Δy 分别是 ξ 和 η 的格网间隔。

本文仅研究独立于参考重力场的残余重力异常。式(6)计算的残余垂线偏差分量的“真值”可计算残余重力异常的“真值”, 用于评估 SWOT 反演的残余重力异常精度, 如图2所示。因此, 后文不再严格区分残余重力异常与重力异常。

3 结果与讨论

3.1 垂线偏差分量精度评估

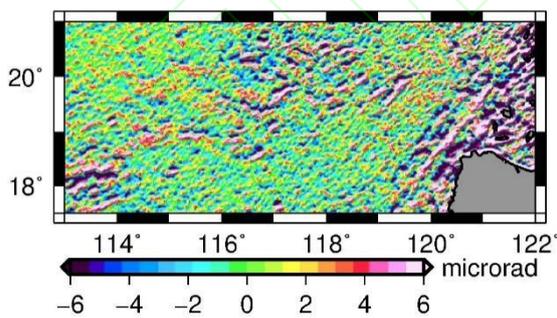
3.1.1 LSC 解算结果

利用数值微分法(式(6))计算的残余垂线偏差南北向与东西向分量的“真值”分别如图3(a)和(b)所示,二者均为 $1' \times 1'$ 的格网数据。基于SWOT与传统测高数据解算的残余垂线偏差分量也是 $1' \times 1'$ 的格网数据。用于解算垂线偏差分量的SWOT数据分为三种情况:(1)1个周期含有误差的沿轨迹和垂直轨迹海面高数据;(2)35个周期平均沿轨迹海面高数据;(3)35个周期平均沿轨迹和垂直轨迹海面高数据。LSC法解算的垂线偏差分量与“真值”的差异如图3(c)-(h)所示,采用均方根误差(root-mean-squared deviations, RMSD)作为评价精度的指标,结果见表1。

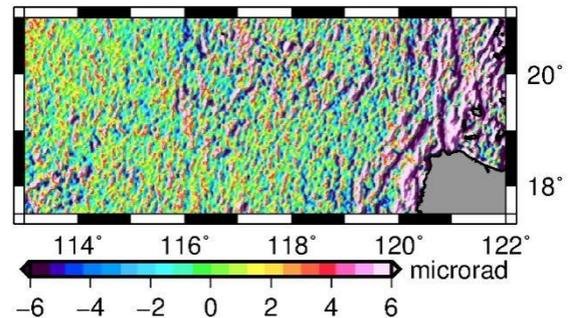
图3(c)和(d)是基于1个周期含有误差的SWOT数据解算的 ξ 和 η 与各自“真值”的差异,是SWOT观测误差对 ξ 和 η 的影响,这种影响表现出随机性。对35个周期SWOT数据进行平均,可有效减弱SWOT观测误差的影响。基于35个周期的平均数据解算的垂线偏差分量与“真值”的差异(图3(g)和(h))比图3(c)和(d)中的差异明显减小, ξ 和 η 的均方根误差从2.53和2.72 microrad降低至0.81和1.25 microrad(表1),并且该结果比10个周期的平均数据解算结果(未展示与“真值”差异的分布图)的均方根误差(1.16和1.50 microrad,表1)小,这表明利用越多周期的平均数据解算的垂线偏差分量的精度越高。

表1 LSC法解算的残余垂线偏差分量及其反演的重力异常的均方根误差。括号中的值是剔除SWOT钻石型空白区域的结果
Table 1 Root-mean-squared deviations (RMSDs) of residual geoid gradient components estimated by LSC and derived gravity anomalies. The RMSDs in parentheses are computed without considering the results within diamond-like gaps of the SWOT mission.

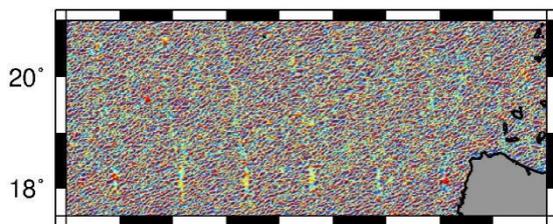
统计值	SWOT				Jason-2	Cryosat-2	Jason-2 和 Cryosat-2
	1个周期	10个周期	35个周期				
	沿轨迹和垂直 轨迹	沿轨迹和垂 直轨迹	沿轨迹	沿轨迹和垂 直轨迹			
ξ /microrad	2.53 (2.52)	1.16 (1.11)	0.88 (0.80)	0.81 (0.72)	3.46	3.12	3.06
η /microrad	2.72 (2.58)	1.50 (1.14)	3.76 (3.71)	1.25 (0.75)	3.67	4.06	2.93
Δg /mgal	2.83 (2.73)	1.69 (1.50)	3.89 (3.89)	1.41 (1.16)	5.31	5.37	4.67



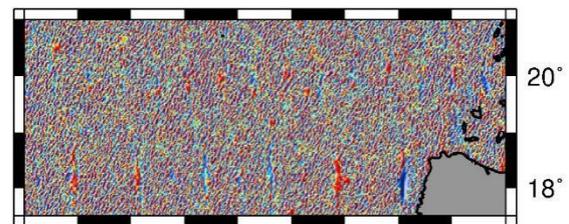
(a) 残余垂线偏差南北向分量 ξ 的“真值”



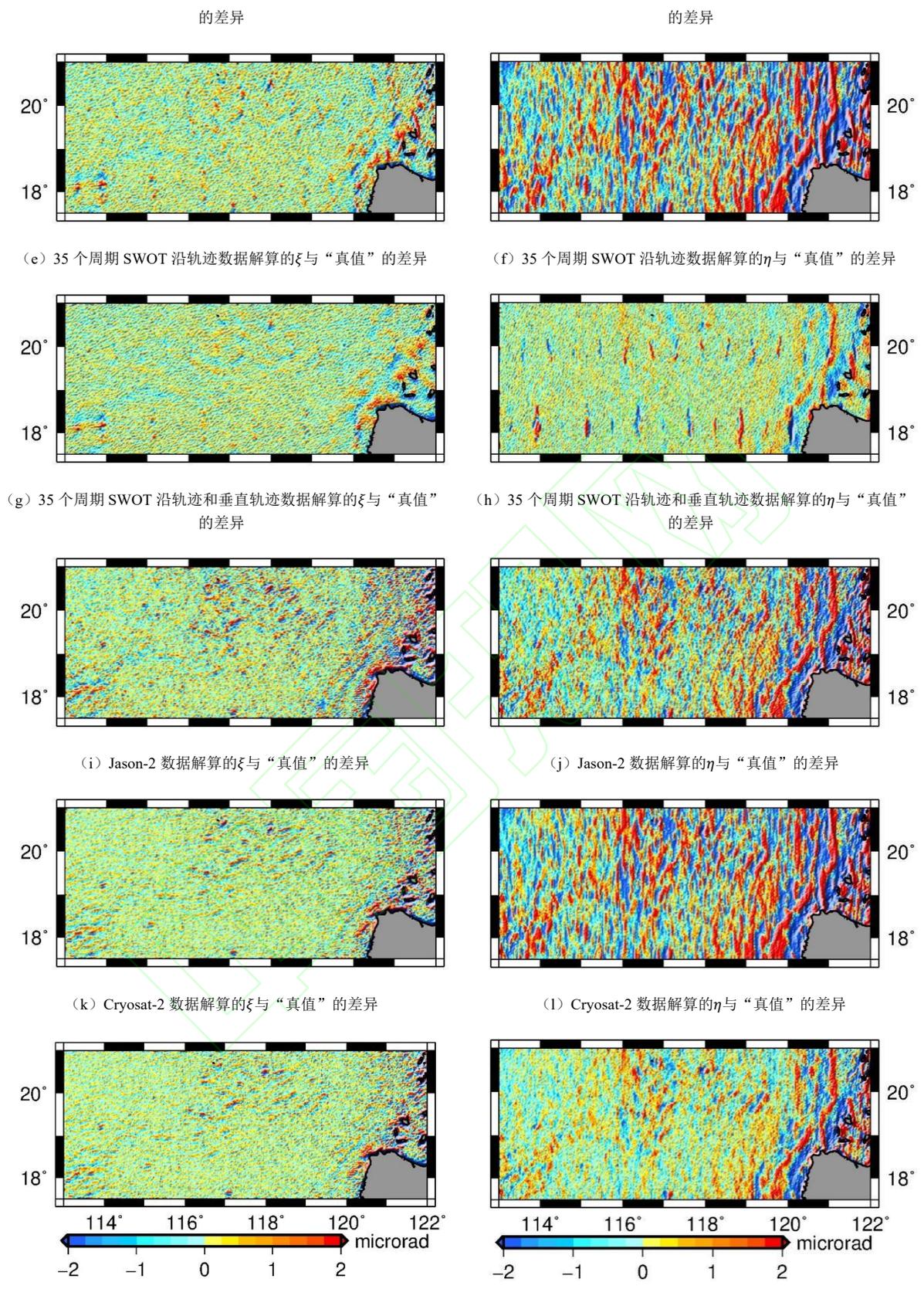
(b) 残余垂线偏差东西向分量 η 的“真值”



(c) 1个周期SWOT沿轨迹和垂直轨迹数据解算的 ξ 与“真值”



(d) 1个周期SWOT沿轨迹和垂直轨迹数据解算的 η 与“真值”



(m) 联合 Jason-2 与 Cryosat-2 数据解算的 ξ 与“真值”的差异
 (n) 联合 Jason-2 与 Cryosat-2 数据解算的 η 与“真值”的差异

图 3 LSC 法解算的残余垂线偏差南北向 ξ 与东西向 η 分量与各自“真值”的差异

Fig. 3 The differences between the “true” and estimated residual north (ξ) and east (η) gradient components using LSC

图 3 (f) 是基于 SWOT 沿轨迹数据解算的东西向分量 η 与“真值”的差异，存在明显南北走向

的条带状结构。图 3 (h) 是利用 SWOT 沿轨迹和垂直轨迹数据解算的 η 与“真值”的差异，条带状结构不明显且差值较小。图 3 (f) 和 (h) 的对比结果表明，SWOT 垂直轨迹数据可有效提升 η 的精度，均方根误差从 3.76 microrad 降低至 1.25 microrad (表 1)，但对南北向分量 ξ 的精度提升有限，图 3 (e) 和 (g) 中的信号分布基本相同，且均方根误差仅相差 0.07 microrad (表 1)。原因是 SWOT 的 77.6°轨道倾角决定了沿轨迹数据有利于解算南北向分量，不利于解算东西向分量^[11]，而垂直轨迹接近于东西方向，有利于东西向分量的计算。值得注意的是，仅利用 1 个周期的 SWOT 沿轨迹和垂直轨迹数据解算的 ξ 和 η ，虽然受误差影响较大，但 η 的精度 (2.72 microrad) 仍然高于 35 个周期平均沿轨迹数据的解算结果 (3.76 microrad)，这更加突出了 SWOT 垂直轨迹数据的重要性。

SWOT 宽刈幅数据比传统测高数据在解算垂线偏差分量方面具有优势。基于 Jason-2 和 Cryosat-2 模拟数据解算的垂线偏差分量与“真值”的差异如图 3 (i) - (n) 所示，均方根误差见表 1。Jason-2 和 Cryosat-2 各自解算的东西向分量 η 与“真值”的差异 (图 3 (j) 和 (l)) 比南北向分量 ξ 与“真值”的差异 (图 3 (i) 和 (k)) 大，且 η 的均方根误差 (3.67 和 4.06 microrad) 比 ξ 的均方根误差 (3.46 和 3.12 microrad) 大，这是因为 Jason-2 和 Cryosat-2 的轨道倾角较高，分别为 66°和 92°，有利于解算南北向分量，而不利于解算东西向分量。Cryosat-2 的轨道倾角比 Jason-2 的更高，因此 Cryosat-2 解算的南北向分量的精度更高。虽然 SWOT 轨道倾角比 Cryosat-2 的低，但是仅利用 35 个周期 SWOT 沿轨迹数据解算的南北向分量的精度 (0.88 microrad) 却远高于 Cryosat-2 的结果 (3.12 microrad)，并且 SWOT 数据中含有误差而 Cryosat-2 是无误差的数据，这表明 SWOT 数据的高空间分辨率特性可以弥补轨道倾角的缺陷。因此，轨道倾角和数据空间分辨率对解算高质量的垂线偏差分量都至关重要。联合 Jason-2 和 Cryosat-2 模拟数据解算的 ξ 和 η 的精度约为 3 microrad，优于单颗卫星的解算精度，但远低于 35 个周期 SWOT 数据的解算精度 (约 1 microrad)，并且还低于未抑制 SWOT 观测误差 (即 1 个周期数据) 的解算精度 (约 2.5 microrad)。整体来看，联合 Jason-2 和 Cryosat-2 解算的 ξ 与“真值”的差异 (图 3 (m)) 明显小于 η 与“真值”的差异 (图 3 (n))，这表明 ξ 的精度高。但在吕宋岛北部海域， ξ 的差异存在特别大的值，因此导致表 1 中 ξ 的精度 (3.06 microrad) 比 η 的精度 (2.93 microrad) 略低。传统测高数据解算的南北向分量 ξ 与“真值”的差异所表现出的信号分布模式 (图 3 (i), (k) 和 (m)) 与其“真值” (图 3 (a)) 相似，原因是 Jason-2 与 Cryosat-2 数据的空间分辨率有限，难以解算 ξ 的高频信号。

SWOT 数据中存在钻石型空白区域 (见图 1 (d))，导致解算的垂线偏差分量的质量较差，尤其对于东西向分量 (见图 3 (h))。当忽略钻石型区域的结果，均方根误差是表 1 中括号内的值， ξ 和 η 的均方根误差基本相同 (0.72 和 0.75 microrad)，表明 SWOT 测高数据可解算具有相同精度的垂线偏差分量。传统测高卫星基本为近极地轨道卫星，轨道倾角较高，即使是拥有最低轨道倾角 (66°) 的 Jason 系列卫星也不利于解算垂线偏差的东西向分量。文献[18]和[23]指出，当测高卫星的升轨道和降轨道互相垂直时才有利于解算相同精度的垂线偏差分量。SWOT 宽刈幅观测数据分解的沿轨迹和垂直轨迹数据互相垂直，突破了传统测高卫星解算的东西向分量精度低于南北向分量的瓶颈，获得相同精度的垂线偏差分量。对于 SWOT 钻石型空白区域，可以利用传统测高数据进行填补，或者利用 SWOT 任务后期的非重复轨道数据进行填补，又或者直接利用空白区域周围的 SWOT 数据进行插值^[11]。

3.1.2 WLSA 解算结果

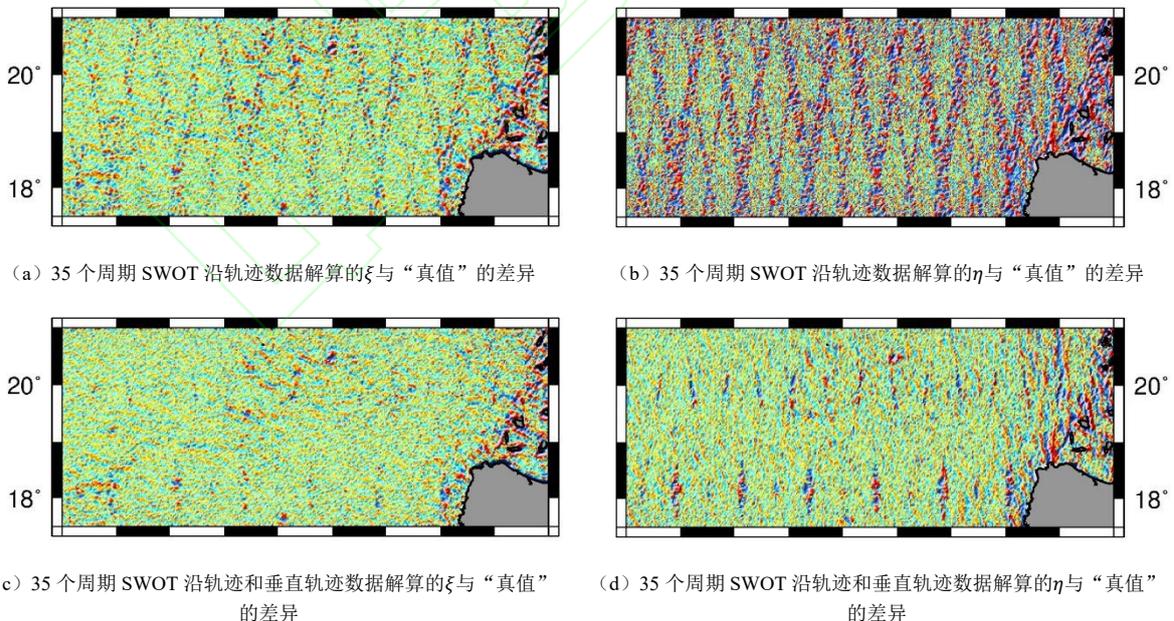
本节分析 WLSA 法解算的垂线偏差分量。该方法解算的垂线偏差分量的分辨率是 1'×1'，用于解算垂线偏差分量的 SWOT 数据分为两种情况：(1) 35 个周期平均沿轨迹数据和 (2) 35 个周期平均沿轨迹和垂直轨迹数据。同时给出了 Jason-2 与 Cryosat-2 联合数据的解算结果。解算的 ξ 和 η 与各自“真值”的差异如图 4 所示，均方根误差见表 2，图 5 给出了窗口内大地水准面梯度的数量以及后验单位权中误差的分布情况。

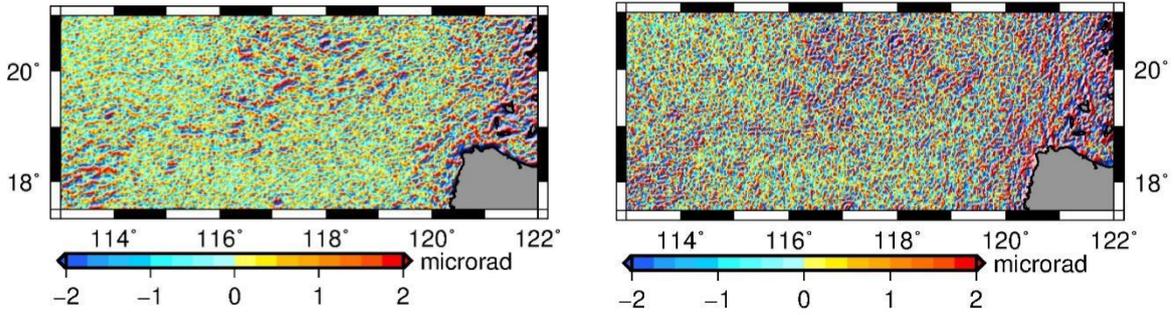
利用 WLSA 法，基于 35 个周期 SWOT 平均沿轨迹海面高数据解算的垂线偏差南北向 ξ 与东西

向 η 分量与各自“真值”的差异分别如图4(a)和(b)所示,结果中存在明显的条带状结构,尤其在 η 中更为明显。这种结构与SWOT数据的分布特征有关(图1(d)),SWOT升轨或降轨数据中存在两种条带状的空白区域:(1)每条轨迹上左右两个刈幅存在20 km的间隔;(2)不同轨迹刈幅之间存在较窄的间隔。对于SWOT沿轨迹数据而言,升轨的条带状空白区域由降轨数据填充,而降轨的条带状空白区域由升轨数据填充。因此利用WLSA法解算这些条带状区域内的垂线偏差分量时,2'×2'窗口内仅有升轨或降轨的沿轨迹大地水准面梯度,数据量少(图5(a))且方向单一,不利于解算 ξ 和 η ,尤其不利于解算 η ,且无法计算后验单位权中误差(图5(d))。35个周期SWOT沿轨迹数据解算的 ξ 和 η 的精度分别为2.44和3.86 microrad(表2),剔除钻石型区域的结果对精度的提升有限。

SWOT垂直轨迹数据可有效提升WLSA法解算的 ξ 和 η 的质量。基于SWOT沿轨迹和垂直轨迹数据解算 ξ 和 η 时,2'×2'窗口内大地水准面梯度的数量(图5(b))约为SWOT沿轨迹数据(图5(a))的2倍,解算的 ξ 和 η 无条带状结构(图4(c)和(d)),且 η 的精度大幅提升,从3.86 microrad(仅利用沿轨迹数据)提升至1.86 microrad(表2),并优于 ξ 的精度(2.21 microrad)。对比图3(g)、(h)与图4(c)、(d),WLSA法解算的 ξ 和 η 与“真值”的差异大于LSC的结果。对比表1和表2,当不考虑SWOT钻石型空白区域时,WLSA法解算的 ξ 和 η 的精度约为2 microrad,低于LSC法解算结果的精度(约0.7 microrad)。文献[12]利用WLSA法基于无误差的SWOT沿轨迹数据解算了垂线偏差分量,利用EGM2008球谐展开至2160阶次的垂线偏差分量对结果进行精度评估, ξ 和 η 的均方根误差分别为0.33 arcsec(1.59 microrad)和0.43 arcsec(2.07 microrad),与本文结果较为接近。

与SWOT数据相比,Jason-2与Cryosat-2的联合数据比较稀疏,因此应用WLSA法时选取4'×4'的窗口,窗口内大地水准面梯度的数量如图5(c)所示。WLSA解算的 ξ 和 η 与“真值”的差异分别如图4(e)和(f)所示,与SWOT结果(图4(c)和(d))相比,差异较大且精度较低(表2)。与LSC法相比,WLSA法解算的 η 与“真值”的差异表现出随机性,而LSC法解算的结果(图3(n))表现出南北走向的条带状结构,WLSA法解算的 ξ 和 η 的精度(3.43和3.66 microrad,表2)比LSC法解算结果的精度(3.06和2.93 microrad,表1)低。





(e) 联合 Jason-2 与 Cryosat-2 数据解算的 ξ 与“真值”的差异 (f) 联合 Jason-2 与 Cryosat-2 数据解算的 η 与“真值”的差异
图 4 WLSA 法解算的残余垂线偏差南北向 ξ 与东西向 η 分量与各自“真值”的差异

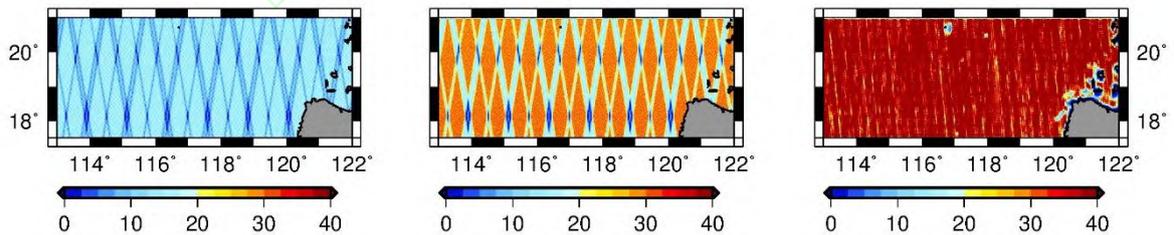
Fig. 4 The differences between the “true” and estimated residual north (ξ) and east (η) gradient components using WLSA

上述结果表明在解算垂线偏差分量方面，LSC 法优于 WLSA 法。实际上，WLSA 法建立的观测方程（式（5））存在缺陷，垂线偏差与其分量的关系仅在一个点上才是严格成立的，而式（5）给出的是格网点上的 ξ 和 η 与窗口内所有大地水准面梯度的方程，这导致解算的 ξ 和 η 具有平均性质，可以将其看作窗口内各点 ξ 和 η 的平均值。因此，利用 WLSA 方法时，选取的窗口不能过大，否则解算的 ξ 和 η 过于平均。SWOT 数据空间分辨率高，较小的窗口内有足够的数据来解算 ξ 和 η ，而对于传统测高数据，需要选取较大的窗口来保证观测值的数量。WLSA 法比 LSC 法具有一定的优势，LSC 法需要构建协方差矩阵（式（4）中的 C_{LL} 和 C_{sL} ），构建过程极其复杂，且协方差矩阵通常是大型矩阵，求逆过程可能不稳定且费时。WLSA 法只需要对 2×2 的矩阵求逆，简单省时。

利用 WLSA 法解算垂线偏差分量的后验单位权中误差（图 5（d）-（f））的分布与 ξ 和 η 的“真值”（图 3（a）和（b））的分布类似，在 ξ 和 η “真值”绝对值较大区域，也是海底地形起伏较大的区域，后验单位权中误差较大，如马尼拉海沟及其东部区域。原因是这些区域的 ξ 和 η 具有高频特性，求解更加困难，解算精度较差。LSC 法也面临同样的困难，例如 LSC 法解算的 ξ 和 η 与“真值”的差异（图 3（e）-（n））在上述区域较大。

表 2 WLSA 法解算的残余垂线偏差分量及其反演的重力异常的均方根误差。括号中的值是剔除 SWOT 钻石型空白区域的结果
Table 2 Root-mean-squared deviations (RMSDs) of residual geoid gradient components estimated by WLSA and derived gravity anomalies. The RMSDs in parentheses are computed without considering the results within diamond-like gaps of the SWOT mission.

统计值	35 个周期 SWOT		
	(2'×2'窗口)		Jason-2 和 Cryosat-2 (4'×4'窗口)
	沿轨迹	沿轨迹和垂直轨迹	
ξ /microrad	2.44 (2.40)	2.21 (2.21)	3.43
η /microrad	3.86 (3.64)	1.86 (1.64)	3.66
Δg /mgal	3.90 (3.82)	3.17 (3.15)	4.98



(a) 2'×2'窗口内 35 个周期 SWOT 沿轨迹大地水准面梯度数量 (b) 2'×2'窗口内 35 个周期 SWOT 沿轨迹和垂直轨迹大地水准面梯度数量 (c) 4'×4'窗口内 Jason-2 和 Cryosat-2 联合大地水准面梯度数量

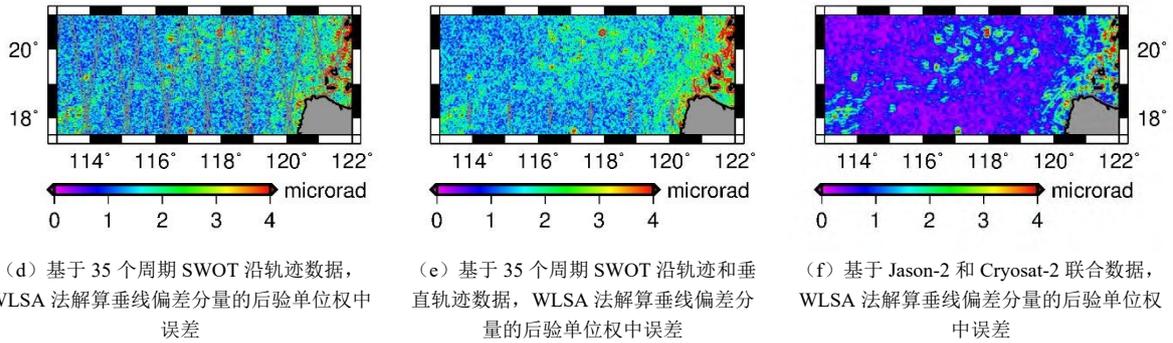


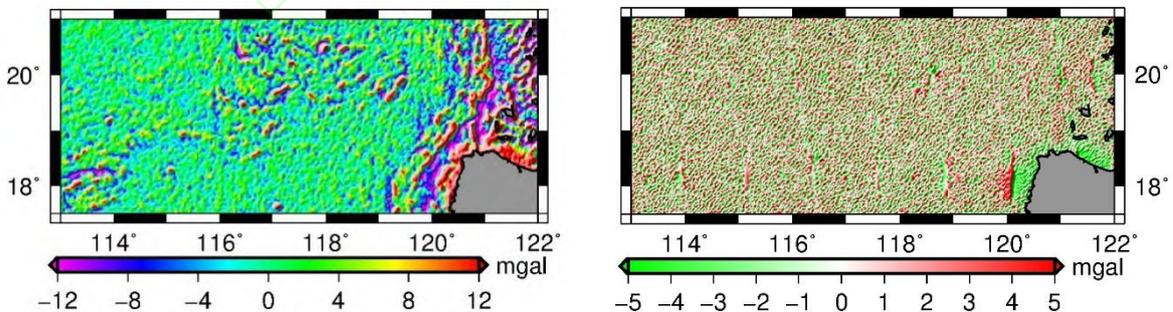
图 5 计算窗口内大地水准面梯度数量及 WLSA 法解算垂线偏差分量的后验单位权中误差 (图 (d) 和 (e) 中的灰色区域内没有结果)

Fig. 5 The number of geoid gradients in the window and the *a posteriori* unit weight mean square error of WLSA estimated gradient components (The areas without data in Figs. (d) and (e) shaded by gray)

3.2 重力异常精度评估

3.1 节阐明了 SWOT 垂直轨迹数据对解算高精度垂线偏差分量的重要性，因此本节利用 SWOT 沿轨迹和垂直轨迹数据反演重力异常。将式 (6) 计算的残余垂线偏差分量“真值”带入式 (7) 可得到残余重力异常的“真值”，其空间分辨率为 $1' \times 1'$ ，结果如图 6 (a) 所示。将利用 LSC 法 (式 (4)) 基于一个周期 SWOT 数据解算的残余垂线偏差分量带入式 (7)，可得到 SWOT 反演的 $1' \times 1'$ 残余重力异常，与其“真值” (图 6 (a)) 的差异如图 6 (b) 所示，这便是 SWOT 观测误差对重力异常的影响。图 6 (c) 和 (d) 是基于 35 个周期 SWOT 平均数据，分别利用 LSC 法和 WLSA 法解算的垂线偏差分量反演的重力异常 (式 (7)) 与“真值”的差异，结果表明 SWOT 观测误差的影响得到有效抑制，较大的差异主要位于钻石型数据空白区域、马尼拉海沟以及菲律宾近岸海域。对比图 6 (c) 和 (d)，图 6 (c) 中的信号更高频，而图 6 (d) 的信号相对平滑，原因是 WLSA 法解算的垂线偏差分量是平均意义上的结果，削弱了高频信号。不考虑 SWOT 数据空白区域，利用 LSC 法解算的垂线偏差分量反演的重力异常的精度为 1.16 mgal (表 1)，而利用 WLSA 法解算的垂线偏差分量反演的重力异常的精度为 3.15 mgal (表 2)，这比利用 LSC 法基于 1 个周期 SWOT 数据解算的垂线偏差分量反演的重力异常的精度还低 (2.73 mgal ，表 1)。上述结果表明，LSC 法解算的垂线偏差分量比 WLSA 法解算结果在反演重力异常方面具有绝对的优势，可以构建精度接近 1 mgal 的海洋重力场。

基于 Jason-2 和 Cryosat-2 联合数据，利用 LSC 法和 WLSA 法解算的垂线偏差分量反演的重力异常 (式 (7)) 与“真值”差异分别如图 6 (e) 和 (f) 所示，差异比 SWOT 的反演结果 (图 6 (c) 和 (d)) 大，且精度低 (约 5 mgal ，表 1 和表 2)。融合多种传统测高数据构建的海洋重力场的精度为 $5\text{-}8 \text{ mgal}$ ^[4-8,24-26]，与本文的模拟结果较为接近，证明本研究模拟的 Jason-2 和 Cryosat-2 数据是合理的。



(a) 残余重力异常“真值”

(b) 基于 1 个周期 SWOT 沿轨迹和垂直轨迹数据，利用 LSC 法解算的垂线偏差分量反演的残余重力异常与“真值”的差异

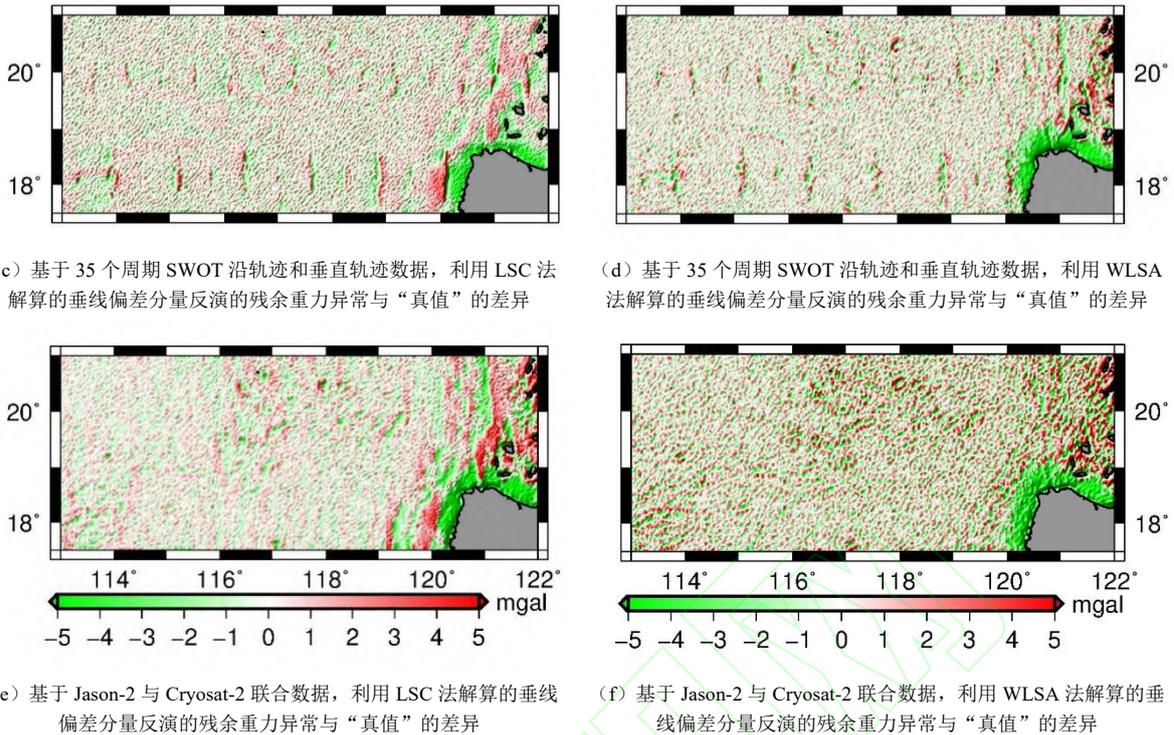


图 6 SWOT 和传统测高数据反演的残余重力异常与其“真值”的差异

Fig. 6 The differences between the SWOT-derived and conventional altimeter-derived residual gravity anomalies and their “true values”

4 结论

本文基于模拟的 SWOT 宽刈幅海面高数据研究了 SWOT 在解算垂线偏差分量和反演海洋重力异常方面的潜力。研究表明, 在解算垂线偏差分量方面, LSC 法比 WLSA 法的效果更佳。对 35 个周期 SWOT 数据进行平均可有效削弱 SWOT 观测误差对垂线偏差分量和重力异常的影响。SWOT 垂直轨迹数据可有效提升垂线偏差东西向分量的精度, 解算具有相同精度的 ξ 和 η 。在本研究区域, 联合 Jason-2 和 Cryosat-2 数据解算的 $1' \times 1'$ ξ 和 η 的最高精度均约为 3 microrad, 低于 SWOT 宽刈幅数据解算的精度 (约 0.7 microrad)。基于 SWOT 宽刈幅测高数据有望构建空间分辨率为 $1' \times 1'$ 、精度为 1 mgal 的海洋重力场模型。本研究可为基于 SWOT 真实数据解算垂线偏差分量和反演海洋重力异常提供科学参考。

参考文献

- [1] GUO J, LUO H, ZHU C, et al. Accuracy comparison of marine gravity derived from HY-2A/GM and CryoSat-2 altimetry data: a case study in the Gulf of Mexico[J]. *Geophysical Journal International*, 2022, 230.2: 1267-1279.
- [2] FAN D, LI S, MENG S, et al. Bathymetric Prediction from Multi-source Satellite Altimetry Gravity Data[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2019, 2(1): 49-58.
- [3] YUAN J, GUO J, ZHU C, et al. High-resolution sea level change around China seas revealed through multi-satellite altimeter data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 102: 102433.
- [4] WATTS A B, TOZER B, HARPER H, et al. Evaluation of shipboard and satellite-derived bathymetry and gravity data over seamounts in the northwest Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(10): 1-18.
- [5] YU D, HWANG C. Calibrating error variance and scaling global covariance function of geoid gradients for optimal determinations of gravity anomaly and gravity gradient from altimetry[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(9): 1-21.
- [6] ZHANG S, SANDWELL D T, JIN T, et al. Inversion of marine gravity anomalies over southeastern China seas from multi-satellite altimeter vertical deflections[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 137: 128-137.
- [7] ZHU C, GUO J, GAO J, et al. Marine gravity determined from multi-satellite GM/ERM altimeter data over the South China Sea: SCSGA V1.0[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(5): 1-16.
- [8] ZHANG Shengjun, LI Jiancheng, KONG Xiangxue. Inversion of global marine gravity anomalies with vertical deflection method deduced from Laplace equation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(4): 452-460. (张胜军, 李建成, 孔祥雪. 基于Laplace方程的垂线偏差法反演全球海域重力异常[J]. *测绘学报*, 2020, 49(4): 452-460.)
- [9] PERAL E, ESTEBAN-FERNANDEZ D. SWOT mission performance and error budget[C]// IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018: 8625-8628.
- [10] XU Yongsheng, GAO Le, ZHANG Yunhua. 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——评述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.)

- [11] YU D, HWANG C, ANDERSEN O B, et al. Gravity recovery from SWOT altimetry using geoid height and geoid gradient[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 265: 112650.
- [12] JIN T, ZHOU M, ZHANG H, et al. Analysis of vertical deflections determined from one cycle of simulated SWOT wide-swath altimeter data[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(4): 1–13.
- [13] ANDERSEN O B, ROSE S K, ABULAITIJIANG A, et al. The DTU21 Global Mean Sea Surface and First Evaluation[J]. *Earth System Science Data*, 2023: 1–19.
- [14] HSIAO Y S, HWANG C, CHENG Y S, et al. High-resolution depth and coastline over major atolls of South China Sea from satellite altimetry and imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 176: 69–83.
- [15] MULET S, RIO M H, ETIENNE H, et al. The new CNES-CLS18 global mean dynamic topography[J]. *Ocean Science*, 2021, 17(3): 789–808.
- [16] PAVLIS N K, HOLMES S A, KENYON S C, et al. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B4).
- [17] HWANG C, PARSONS B. Gravity anomalies derived from Seasat, Geosat, ERS - 1 and TOPEX/POSEIDON altimetry and ship gravity: a case study over the Reykjanes Ridge[J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 122(2): 551–568.
- [18] SANDWELL D T. Antarctic marine gravity field from high - density satellite altimetry[J]. *Geophysical Journal International*, 1992, 109(2): 437–448.
- [19] HWANG C, KAO E C, PARSONS B. Global derivation of marine gravity anomalies from Seasat, Geosat, ERS-1 and TOPEX/POSEIDON altimeter data[J]. *Geophysical Journal International*, 1998, 134(2): 449–459.
- [20] WANG Hubiao, WANG Yong, CHAI Hua, et al. $1' \times 1'$ vertical deflection and its precision evaluation on China West Pacific Ocean region[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(9): 1073–1079. (王虎彪, 王勇, 柴华, 等. 中国西太平洋海域 $1' \times 1'$ 垂线偏差模型及精度评估[J]. *测绘学报*, 2017, 46(9): 1073–1079.)
- [21] WANG Hubiao, WANG Yong, LU Yang. High precision vertical deflection over China marginal sea and global sea derived from multi-satellite altimeter[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(9): 770–773. (王虎彪, 王勇, 陆洋. 联合多种测高数据确定中国边缘海及全球海域的垂线偏差[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2007, 32(9): 770–773.)
- [22] HWANG C. Inverse Vening Meinesz formula and deflection-geoid formula: applications to the predictions of gravity and geoid over the South China Sea[J]. *Journal of Geodesy*, 1998, 72: 304–312.
- [23] SANDWELL D T, SMITH W H F. Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B5): 10039–10054.
- [24] LI Zhen, GUO Jinyun, SUN Zhongmiao, et al. Global marine gravity anomalies recovered from multi-beam laser altimeter data of ICESat-2[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 53(2): 252–262. (李真, 郭金运, 孙中苗, 等. 基于ICESat-2多波束激光测高数据的全球海洋重力异常反演分析[J]. *测绘学报*, 2023, 53(2): 252–262.)
- [25] ZHU C, GUO J, YUAN 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.
- [26] ZHANG Feifei, WANG Hao, ZHANG Yimi, et al. Accuracy analysis of satellite altimetry gravity data in the Western Pacific Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. DOI: 10.13203/j.whugis20220429 (张菲菲, 王皓, 张义蜜, 等. 西太平洋海域卫星测高重力数据精度分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*. DOI: 10.13203/j.whugis20220429)

网络首发:

标题: 利用 SWOT 宽刈幅测高数据提升海洋重力场精度: 与传统测高卫星的比较分析

作者: 于道成, 黄金维, 祝会忠, 罗佳, 袁佳佳

收稿日期: 2024-09-21

DOI:10.13203/j.whugis20240120

引用格式:

于道成, 黄金维, 祝会忠, 等. 利用 SWOT 宽刈幅测高数据提升海洋重力场精度: 与传统测高卫星的比较分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240120 (YU Daocheng, HWANG Jinway, ZHU Huizhong, et al. Enhancing Marine Gravity Field Precision Using SWOT Wide-swath Altimetry Data: a Comparative Analysis with Traditional Altimetry Satellites[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240120)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

下一代重力卫星任务研究概述与未来展望

冉将军, 闫政文, 吴云龙, 钟敏, 肖云, 楼立志, 王长青

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(6): 841–857.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220629>

基于“浅层海水”质量法确定海洋内部层面重力值

王正涛, 倪港骅, 申文斌, 刘聪

武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1766-1774.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220616>

海洋重力场特征统计模型计算与分析

黄谟涛, 刘敏, 欧阳永忠, 邓凯亮, 马越原, 翟国君, 吴太旗

武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(3): 317-327.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20160529>

