引文格式: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[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(4):703-713.DOI:10.13203/j.whugis20240120

Citation:YU Daocheng,HWANG Jinway,ZHU Huizhong,et al.Enhancing Marine Gravity Field Precision Using SWOT Wide-Swath Altimetry Data[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(4):703-713.DOI:10.13203/j.whugis20240120

利用SWOT宽刈幅测高数据提升海洋重力场精度

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:地表水与海洋地形(surface water and ocean topography,SWOT)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。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。研究结果表明,LSC解算的垂线偏差分量精度优于WLSA,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。在所研究区域,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 μrad,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 μrad,并将重力异常精度提升至1 mGal。研究结果表明,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

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-04-11

DOI:10.13203/j.whugis20240120 **文章编号**:1671-8860(2026)04-0703-11

Enhancing Marine Gravity Field Precision Using SWOT Wide-Swath Altimetry Data

YU Daocheng[1] *HWANG Jinway*[2] *ZHU Huizhong*[1] *LUO Jia*[3,4,5] *YUAN Jiajia*[6]

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 satel-

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"(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

通信作者:祝会忠,博士,教授。zhuhuizhong@lntu.edu.cn

lite, measures sea surface heights (SSH) 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. We investigate 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 1.4 cm 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 μrad, 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 μrad 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[4-7]。

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地表水与海洋地形(surface water and ocean topography, SWOT)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[8-9]。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 d,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[9],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[10]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[10]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(inverse Vening-Meinesz, IVM)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。研究结果表明: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[11]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。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，采用残余深度模型(residual depth model，RDM)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)最新发布的平均海面高模型[12]，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，本文采用RDM概念，基于多波束测深数据制造高波数海面高分量[10]：

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

式中，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；$\rho=1.64\ \mathrm{g/cm^3}$，是海水与岩石地质密度差；$h$、$h_{\mathrm{ref}}$分别是真实海深、参考海深，$h-h_{\mathrm{ref}}$是残余海深；$(x_1,x_2)$、$(y_1,y_2)$是$p$点区域直角坐标系定义的积分区域。

RDM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。本文采用多波束海深[13]作为真实海深，位于南海北部的东沙岛(116°43′E，20°42′N)附近，海底地形复杂多样。多波束测深数据沿船测轨迹分布，数据不规则，无法应用式(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，本文利用GEBCO_2020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′×1′的DTU21MSS模型，再加入SWOT观测误差，生成一个1′×1′的海面高模型，称为SWOT_model：

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

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。文献[10]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，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

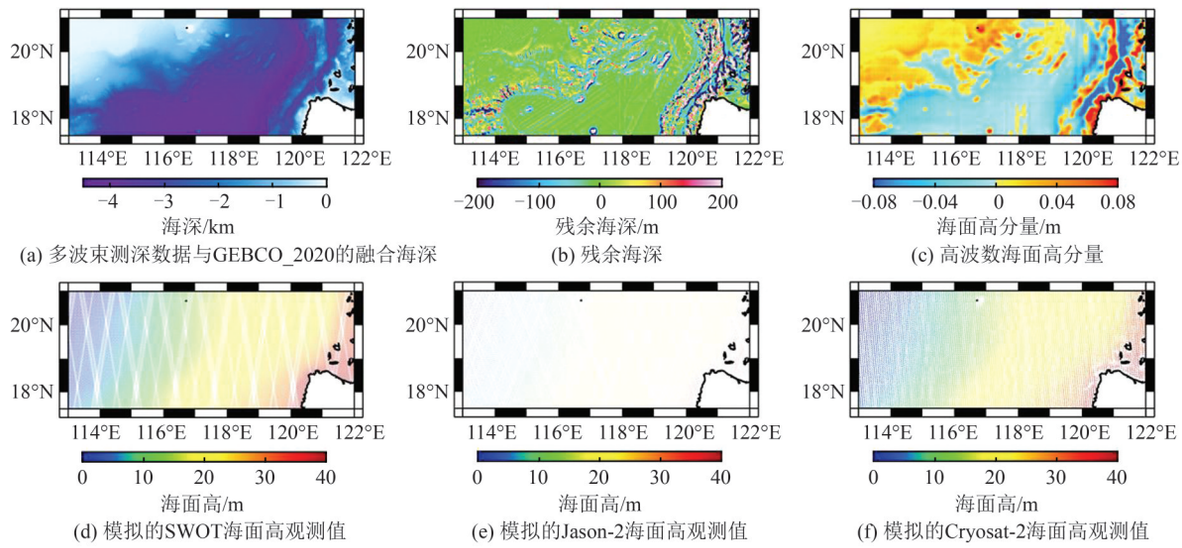


图1 基于海深数据模拟的海面高数据

Fig. 1 Simulated SSH Data Using Bathymetry Data

数,通过最小二乘平差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[10]。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[8],因此,本文模拟的ε是标准差为1.4 cm的偶然误差。

本文根据SWOT轨道确定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 a),一个周期SWOT数据的分布如图1(d)所示。SWOT宽刈幅数据是2 km×2 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,将不含误差的SWOT_model(即式(2)中的$H_{\mathrm{DTU21}}+H_{\mathrm{RDM}}$)插值在2 a Jason-2大地任务(2017-07-11—2019-10-01)和10 a 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1(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。

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[14],得到大地水准面高。本文在模拟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;(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[15]作为参考场,从SWOT大地水准面高中移去EGM2008球谐展开至2 160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]:

$$\varepsilon_{\alpha,\mathrm{res}}=\frac{N_{\mathrm{res}_2}-N_{\mathrm{res}_1}}{d} \tag{3}$$

式中,N_{res_1}和N_{res_2}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;$\varepsilon_{\alpha,\mathrm{res}}$是方位角为$\alpha$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[16-17]。本文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LSC,在每个1′×1′格网点上构建以格网点为中心的8′×8′窗口,解算格网点上的残余垂线偏差分量的计算公式为[16]:

$$s=\begin{bmatrix}\xi\\ \eta\end{bmatrix}=C_{sL}\left(C_{LL}+D_L\right)^{-1}L \tag{4}$$

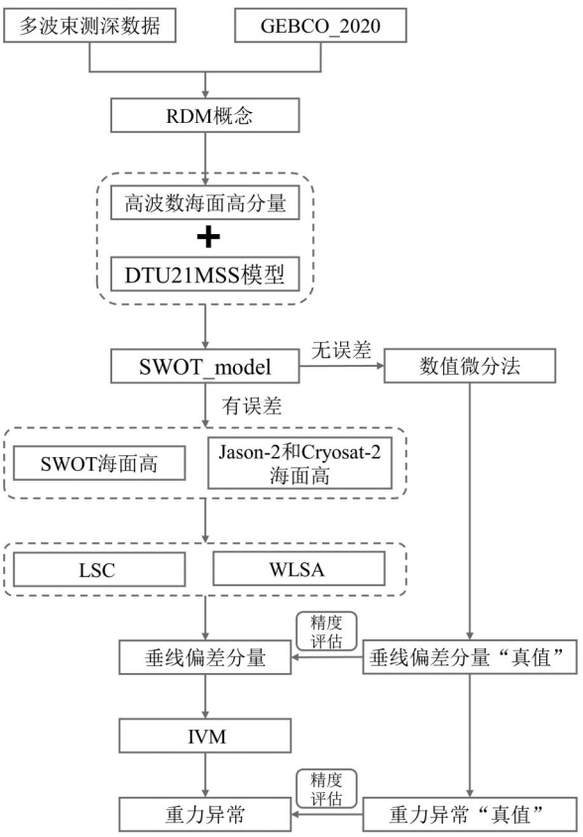


图2　基于模拟的SWOT以及传统测高数据反演海洋重力异常流程图

Fig. 2　Flowchart of Deriving Marine Gravity Anomaly from the Simulated SWOT and Conventional Altimeter Data

式中，向量s包含格网点上的南北向ξ和东西向η分量；L是由窗口内残余大地水准面梯度构成的向量；D_L是观测噪声协方差矩阵，是由L的误差方差组成的对角矩阵，起滤波作用；C_{LL}是L的自协方差矩阵；C_{sL}是s与L的互协方差矩阵。C_{LL}和C_{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[16]。

文献[18]利用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垂线偏差分量[11,19]的解算。基于垂线偏差及其分量的关系，在2′×2′窗口内建立观测方程：

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

式中，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；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[11]。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$H_{\mathrm{DTU21}} + H_{\mathrm{RDM}}$）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′×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：

$$\begin{cases} \tilde{\xi} = \dfrac{\partial N_{\mathrm{res}}}{\partial y} \\ \tilde{\eta} = \dfrac{\partial N_{\mathrm{res}}}{\partial x} \end{cases} \quad (6)$$

式中，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反演重力异常

由垂线偏差分量计算重力异常的IVM公式为[20]：

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

式中，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；$\mathrm{d}\sigma_Q$是单位球的面元素；$H' = -2/\psi_{PQ}^2$为核函数。在P点的邻近区内，P、Q两点的球面距离$\psi_{PQ} \to 0$，核函数奇异，无法计算式(7)。为避免精度损失，邻近区的重力异常计算公式为[20]：

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

式中，$\xi_y = \partial\xi/\partial y$；$\eta_x = \partial\eta/\partial x$；$(x,y)$构成区域直角坐标系；$s_0 = \sqrt{\dfrac{\Delta x\Delta y}{\pi}}$是邻近区半径；$\Delta x$和$\Delta y$分别是$\xi$和$\eta$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)、3(b)所示,二者均为1′×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′×1′的格网数据。用于解算垂线偏差分量的SWOT数据分为3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解算的垂线偏差分量与“真值”的差异如图3(c)~3(h)所示,采用均方根误差(root mean square error, RMSE)作为评价精度的指标,结果见表1。

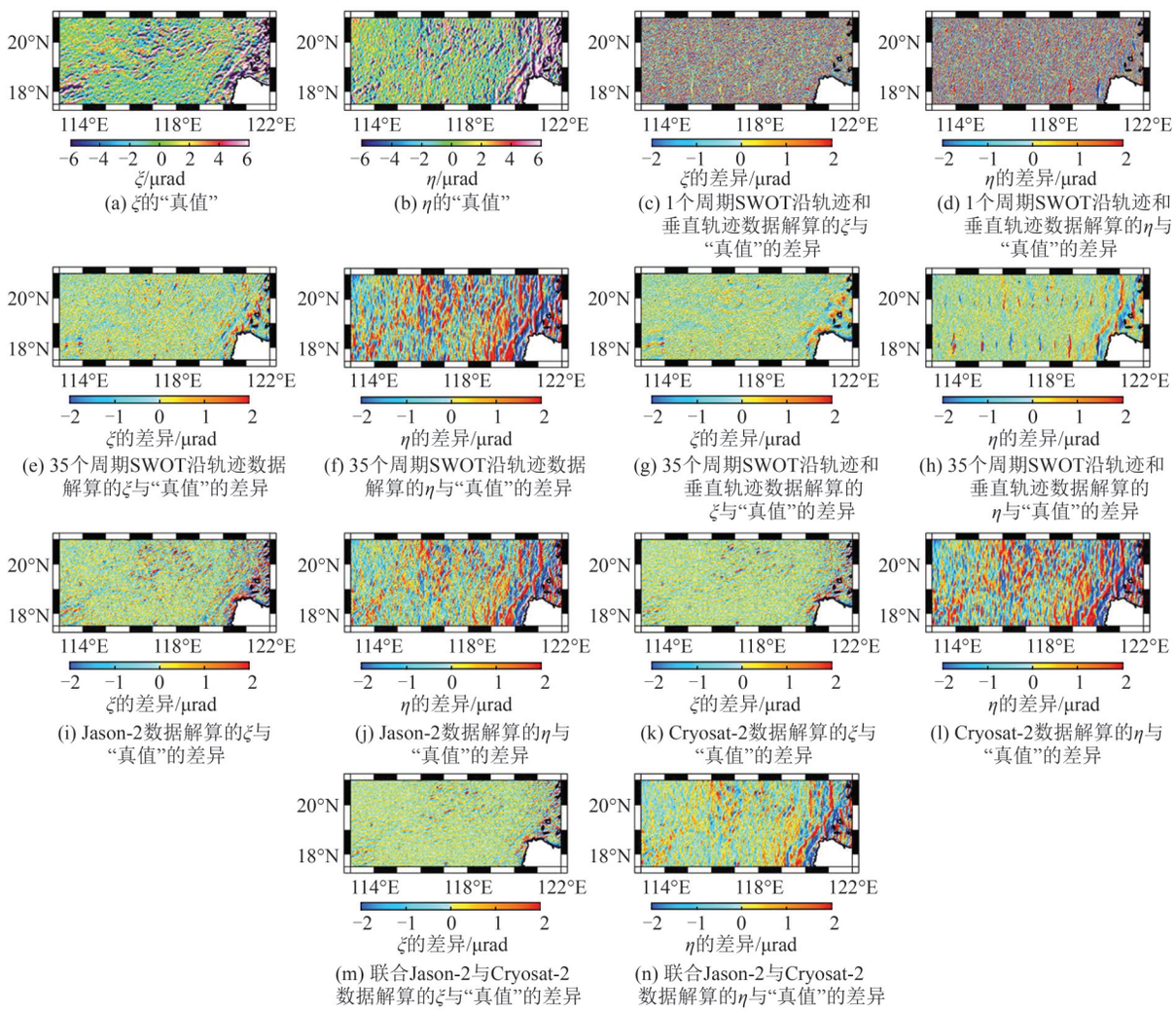


图3 LSC解算的ξ与η与各自“真值”的差异

Fig. 3 Differences Between the “True” and Estimated ξ and η Gradient Components Using LSC

表1 LSC解算的残余垂线偏差分量及其反演的重力异常RMSE

Table 1 RMSE of Residual Geoid Gradient Components Estimated by LSC and Derived Gravity Anomalies

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

注:括号中的值是剔除SWOT钻石形空白区域的结果。

图 3(c)和 3(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)、3(h))比图 3(c)、3(d)中的差异明显减小,ξ和η的 RMSE 从 2.53 和 2.72 μrad 降低至 0.81 和 1.25 μrad(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 RMSE(1.16 和 1.50 μrad)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。

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)、3(h)的对比结果表明,SWOT 垂直轨迹数据可有效提升η的精度,RMSE 从 3.76 μrad 降低至 1.25 μrad(表 1),但对南北向分量ξ的精度提升有限,图 3(e)、3(g)中的信号分布基本相同,且 RMSE 仅相差 0.07 μrad(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[10],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 μrad)仍然高于 35 个周期平均沿轨迹数据的解算结果(3.76 μrad),这更加突出了 SWOT 垂直轨迹数据的重要性。

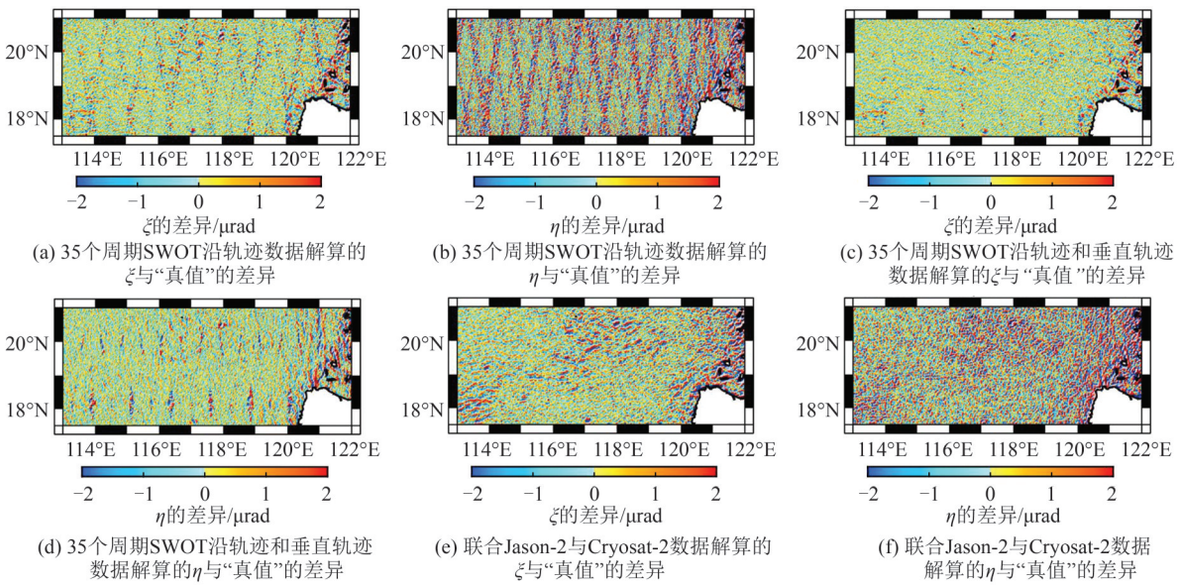
SWOT 宽刈幅数据比传统测高数据在解算垂线偏差分量方面具有优势。基于 Jason-2 和 Cryosat-2 模拟数据解算的垂线偏差分量与“真值”的差异如图 3(i)~3(n)所示,RMSE 见表 1。Jason-2 和 Cryosat-2 各自解算的东西向分量η与“真值”的差异(图 3(j)、3(l))比南北向分量ξ与“真值”的差异(图 3(i)、3(k))大,且η的 RMSE(3.67、4.06 μrad)比ξ的 RMSE(3.46、3.12 μrad)大,这是因为 Jason-2 和 Cryosat-2 的轨道倾角较高,分别为 66°和 92°,有利于解算南北向分量,而不利于解算东西向分量。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 μrad)却远高于 Cryosat-2 的结果(3.12 μrad),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 μrad,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 μrad),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 μrad)。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 μrad)比η的精度(2.93 μrad)略低。传统测高数据解算的南北向分量ξ与“真值”的差异表现出的信号分布模式(图 3(i)、3(k)和 3(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 数据中存在钻石形空白区域(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))。当忽略钻石形区域的结果时,RMSE 是表 1 中括号内的值,ξ和η的 RMSE 基本相同(0.72、0.75 μrad),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[11,21]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 钻石形空白区域,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,再或者直接利用空白区域周围的 SWOT 数据进行插值[10]。

3.1.2　WLSA 解算结果

WLSA 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;(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,RMSE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。



(a) 35个周期SWOT沿轨迹数据解算的ξ与“真值”的差异 (b) 35个周期SWOT沿轨迹数据解算的η与“真值”的差异 (c) 35个周期SWOT沿轨迹和垂直轨迹数据解算的ξ与“真值”的差异

(d) 35个周期SWOT沿轨迹和垂直轨迹数据解算的η与“真值”的差异 (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解算的ξ与η与各自“真值”的差异

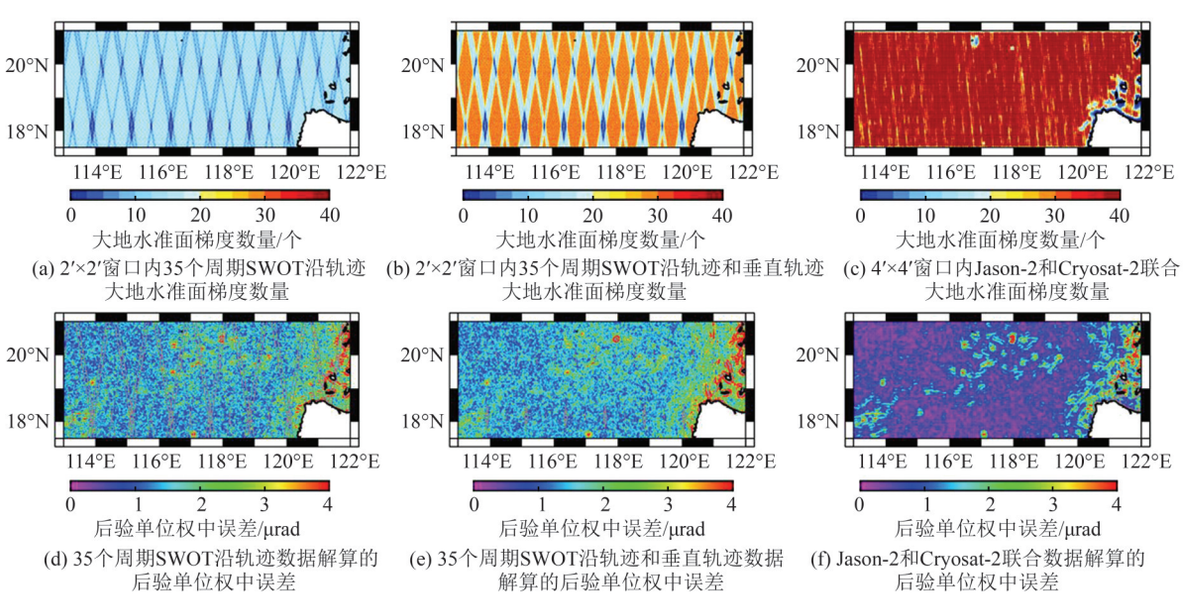
Fig. 4 Differences Between the “True” and Estimated ξ and η Using WLSA

表2 WLSA解算的残余垂线偏差分量及其反演的重力异常RMSE

Table 2 RMSE of Residual Geoid Gradient Components Estimated by WLSA and Derived Gravity Anomalies

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

注:括号中的值是剔除SWOT钻石形空白区域的结果。



(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

(d) 35个周期SWOT沿轨迹数据解算的后验单位权中误差 (e) 35个周期SWOT沿轨迹和垂直轨迹数据解算的后验单位权中误差 (f) Jason-2和Cryosat-2联合数据解算的后验单位权中误差

图5 计算窗口内大地水准面梯度数量及WLSA解算垂线偏差分量的后验单位权中误差

Fig. 5 The Number of Geoid Gradients in the Window and the a Posterior *i* Unit Weight Mean Square Error of WLSA Estimated Gradient Components

利用WLSA,基于35个周期SWOT平均沿轨迹海面高数据解算的ξ与η与各自“真值”的差异分别如图4(a)、4(b)所示,结果中存在明显的条带状结构,η尤其明显。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、3.86 μrad(表2),剔除钻石形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4(d)),且η的精度大幅提升,从3.86 μrad(仅利用沿轨迹数据)提升至1.86 μrad(表2),并优于ξ的精度(2.21 μrad)。对比图3(g)、3(h)与图4(c)、4(d),WLSA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钻石形空白区域时,WLSA法解算的ξ和η的精度约为2 μrad,低于LSC解算结果的精度(约0.7 μrad)。文献[11]利用WLSA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2 160阶次的垂线偏差分量对结果进行精度评估,ξ和η的RMSE分别为0.33″(1.59 μrad)和0.43″(2.07 μrad),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)、4(f)所示,与SWOT结果(见图4(c)、4(d))相比,差异较大且精度较低(表2)。与LSC相比,WLSA解算的η与"真值"的差异表现出随机性,而LSC解算的结果(图3(n))表现出南北走向的条带状结构,WLSA解算的ξ和η的精度(3.43和3.66 μrad)比LSC解算结果的精度(3.06和2.93 μrad)低。

上述结果表明,在解算垂线偏差分量方面,LSC优于WLSA。实际上,WLSA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,采用WLSA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比LSC具有一定的优势,LSC需要构建协方差矩阵(式(4)中的$\boldsymbol{C}_{LL}$和$\boldsymbol{C}_{sL}$),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只需要对2×2的矩阵求逆,简单省时。

利用WLSA解算垂线偏差分量的后验单位权中误差(图5(d)~5(f))的分布与ξ和η的"真值"(图3(a)、3(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也面临同样的困难,例如LSC解算的ξ和η与"真值"的差异(图3(e)~3(n))在上述区域较大。

3.2　重力异常精度评估

§3.1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"代入式(7)可得到残余重力异常的"真值",其空间分辨率为1′×1′,结果如图6(a)所示。将利用LSC(式(4))基于1个周期SWOT数据解算的残余垂线偏差分量代入式(7),可得到SWOT反演的1′×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)、6(d)是基于35个周期SWOT平均数据,分别利用LSC和WLSA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形数据空白区域、马尼拉海沟以及菲律宾近岸海域。对比图6(c)、6(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,见表1)。上述结果表明,LSC解算的垂线偏差分量比WLSA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和WLSA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)、6(f)所示,差异比SWOT的反演结果(图6(c)、6(d))大,且精度低(约5 mGal)。融合多种传统测高数据构建的海洋重力场的精度为5~8 mGal[4-7,21-23],与本文的模拟结果较为接近,证明本文模拟的Jason-2和Cryosat-2数据是合理的。

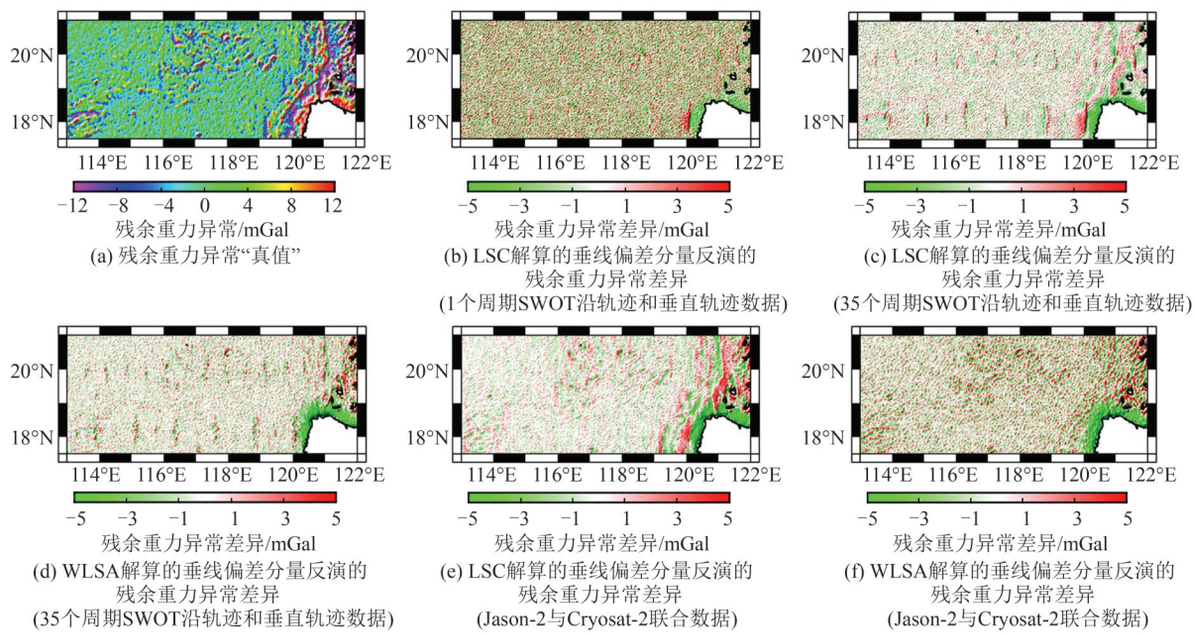


图6 SWOT和传统测高数据反演的残余重力异常与其"真值"的差异

Fig. 6 Differences Between the SWOT-Derived and Conventional Altimeter-Derived Residual Gravity Anomalies and Their "True Values"

4 结 语

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。研究结果表明,在解算垂线偏差分量方面,LSC比WLSA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。在本文研究区域,联合Jason-2和Cryosat-2数据解算的1′×1′ ξ和η的最高精度均约为3 μrad,低于SWOT宽刈幅数据解算的精度(约0.7 μrad)。基于SWOT宽刈幅测高数据有望构建空间分辨率为1′×1′、精度为1 mGal的海洋重力场模型。

参 考 文 献

[1] GUO J Y, LUO H X, ZHU C 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] WEN X, ZAI X, XIA Z, 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 J, GUO J Y, ZHU C 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): e2020JB020396.

[5] YU D C, 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): 61.

[6] ZHANG S J, SANDWELL D T, JIN T Y, 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 C, GUO J Y, GAO J Y, et al. Marine Gravity Determined from Multi-satellite GM/ERM Altimeter Data over the South China Sea: SCSGA $V_{1.0}$[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(5): 50.

[8] PERAL E, ESTEBAN-FERNANDEZ D. Swot Mission Performance and Error Budget[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018.

[9] 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.
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.

[10] YU D C, 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.

[11] JIN T Y, 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): 30.

[12] 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, 15(9): 4065-4075.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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): 2011JB008916.

[16] 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.

[17] SANDWELL D T. Antarctic Marine Gravity Field from High-Density Satellite Altimetry[J]. *Geophysical Journal International*, 1992, 109(2): 437-448.

[18] 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.

[19] 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.
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.

[20] 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(5): 304-312.

[21] 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.

[22] ZHU C C, GUO J Y, YUAN J J, et al. SDUST2021GRA: Global Marine Gravity Anomaly Model Recovered from Ka-Band and Ku-Band Satellite Altimeter Data[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(10): 4589-4606.

[23] 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), 2025, 50(1): 30-41.
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*, 2025, 50(1): 30-41.