

基于 Cryosat-2 数据的南海 2'×2' 重力异常计算与分析

万剑华¹, 李家军¹, 刘善伟¹, 杨俊钢²

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东青岛 266061)

摘要: 利用 Cryosat-2 数据计算南海高空间分辨率高精度重力异常, 对 Cryosat-2 level 2 SIR_GDR_2A 数据进行轨迹分析和交叉点分析。基于测高数据集(第 1~4 周期), 借助加权最小范数最小二乘解计算网格剩余垂线偏差分量, 然后计算中国南海海域(4°~24°, 105°~120°)2'×2'重力异常。结果表明, Cryosat-2 数据轨迹密度高且分布均匀规则, 交叉点不符值均方根值为 15.9 cm, 略高于同步时间段的 Jason-2 GDR 数据。与船测重力相比, 中国南海海域(4°~24°, 105°~120°)2'×2'重力异常误差为 $4.5 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

关键词: 卫星测高; Cryosat-2; 逆 Vening-Meinesz 公式; 重力异常

中图分类号: P 228.3 **文献标志码:** A

引用格式: 万剑华, 李家军, 刘善伟, 等. 基于 Cryosat-2 数据的南海 2'×2'重力异常计算与分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2015, 39(3):70-75.

WAN Jianhua, LI Jiajun, LIU Shanwei, et al. Calculation and analysis of 2'×2' gravity anomalies over the South China Sea based on Cryosat-2 satellite altimeter data[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3):70-75.

Calculation and analysis of 2'×2' gravity anomalies over the South China Sea based on Cryosat-2 satellite altimeter data

WAN Jianhua¹, LI Jiajun¹, LIU Shanwei¹, YANG Jungang²

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract: The gravity anomaly of the South China Sea was calculated with high spatial resolution and precision using the Cryosat-2 data. The tracks and crossover points of the Cryosat-2 satellite altimetry level 2 SIR_GDR_2A data were analyzed. The component of grid residual vertical deflection was calculated with the weighted minimum least squares solution method using the cycle1-cycle4 data, then the gravity anomalies in 2'×2' grid over the South China Sea between 4°~24° latitude and 105°~120° longitude were determined. The results show that the Cryosat-2 data have a high track density, and are distributed regularly and uniformly with a 15.9 cm RMS value of crossover point differences, which is slightly higher than the synchronous Jason-2 GDR data. Compared with the post-processed shipboard gravimetry, the root mean square value of the gravity anomaly in 2'×2' grid over the South China Sea is $4.5 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Keywords: satellite altimetry; Cryosat-2; inverse Vening-Meinesz formula; gravity anomaly

海洋重力场对海洋油气勘探、军事国防具有重要意义, 卫星测高技术是目前大面积、快速获取海洋重力场的最有效手段。众多学者联合多颗卫星测高

数据开展了中国南海海域重力场的计算工作^[1-6], 空间分辨率达到 2'×2', 与船测重力相比, 精度为 $(9 \sim 11) \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 但这些传统卫星测高数据空间分

收稿日期:2014-06-30

基金项目:海洋公益性行业科研专项(201305032);中欧龙计划合作项目(ID. 10466)

作者简介:万剑华(1966-),男,教授,博士,研究方向为“3S”在海洋领域中的应用和数字海洋关键技术。E-mail:wjh66310@163.com。

通讯作者:刘善伟(1982-),男,讲师,博士,研究方向为海洋遥感。E-mail:shanweiliu@163.com。

分辨率低,测高精度不同(T/P:6 cm, Geosat:10~20 cm, ERS-1/2:10 cm),且多颗卫星测高数据之间也存在一定系统性偏差,影响重力异常计算精度,而 Cryosat-2 卫星的数据轨道密集,测高精度1~3 cm^[7-8],笔者基于 Cryosat-2 测高数据计算中国南海海域 2'×2'高精度重力异常。

1 Cryosat-2 数据分析

Cryosat-2 卫星于 2010 年 4 月 8 日发射成功,重复周期为 369 d,子周期 30 d,每周期有 5344 圈轨道,在赤道上的轨道间距为 7 km。其主要载荷是合成孔径/干涉高度计(SIRAL),采用延迟多普勒雷达高度计(DDA)技术。与传统的雷达高度计相比,DDA 测高精度约为传统高度计的 2 倍,在海面平静时测高精度约为 0.5 cm,在海浪高度达 4 m 时测高精度仍能优于 1.0 cm。SIRAL 有 3 种测量模式:低分辨率测量模式(LRM),对海面和平坦的冰盖内部进行测量,沿轨分辨率为 5~7 km;合成孔径雷达(SAR)模式,对部分近岸海域和海冰进行测量,沿轨分辨率为 250 m;合成孔径雷达干涉测量(SARIn)模式,对冰盖边缘和高山冰川进行测量,沿轨分辨率为 250 m。SIRAL 载荷在沿轨方向采用 20 Hz 测量,提高了数据分辨率和精度。

Cryosat-2 level 2 SIR_GDR_2A 测高数据(1~4 周期,2010.7~2013.11)研究区域内地面轨迹如图 1 所示,共有升轨迹 255 条,降轨迹 234 条,红色框内数据为 SAR 模式数据,其他为 LRM 模式数据(测量模式掩膜版本为 3.3)。

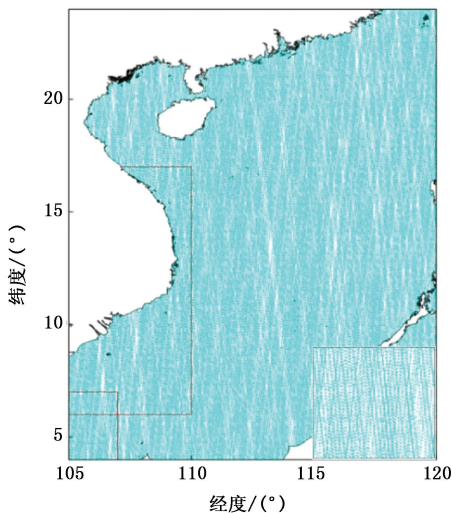


图 1 Cryosat-2 地面轨迹分布

Fig. 1 Cryosat-2 satellite altimetry data ground track distribution

1.1 轨迹密度分析

Geosat/ERM、T/P、ERS-1/2、Jason-1、Jason-2 和 Envisat 卫星重复轨道任务阶段赤道上的轨道间距分别约为 164、316、80、316、316 和 80 km。其中 T/P 和 Jason-1 卫星经历过变轨,轨道处于原来轨道的中间,使其地面轨迹覆盖率增加 1 倍。多星重复轨道数据轨迹如图 2 所示,其构成的轨迹网格间距从几千米到一百多千米不等,数据分布比较散乱;将图 1 和图 2 对比可以看出,相对于多星重复轨道联合数据,Cryosat-2 数据轨道间距小,数据密度高,且分布更加均匀规则。

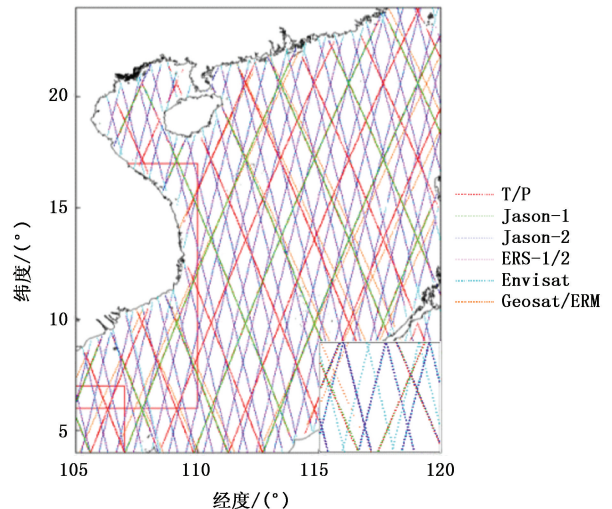


图 2 多星数据地面轨迹

Fig. 2 Multi-satellite altimetry data ground track distribution

1.2 交叉点分析

交叉点不符值主要是由径向轨道误差引起,反映了卫星测高的精度。与 Cryosat-2 同步时间段的 Jason-2 GDR 数据交叉点不符值均方根(RMS)为 15.1 cm, Cryosat-2 自交叉点不符值 RMS 为 15.9 cm,空间分布如图 3 所示,交叉点不符值分布均匀,没有明显的模式差异,LRM 模式交叉点不符值 RMS 为 15.4 cm,与 Jason-2 交叉点不符值 RMS 相当;SAR 模式交叉点不符值 RMS 为 18.2 cm,略高于 Jason-2 交叉点不符值 RMS 值。时标偏差是导致 Cryosat-2 交叉点不符值偏高的主要原因^[9-10],可通过时标偏差修正和交叉点平差以降低交叉点不符值^[10-12],本文中选择的验后条件平差法^[12]减小交叉点不符值,平差后交叉点不符值 RMS 值降至 8.6 cm。

将 Cryosat-2 数据与同步时间段的 Jason-2 数据进行互交叉点比较,验证测高数据的一致性,互交叉点不符值空间分布如图 4 所示,Cryosat-2 LRM 模式数据交叉点不符值均值为 -1.32 m, RMS 为 27.1

cm; SAR 模式数据交叉点不符值均值为 -2.07 m, RMS 为 39.8 cm。由此可知, Cryosat-2 海面测高值与 Jason-2 测高值存在负的系统性偏差, 主要原因是 Cryosat-2 level 2 GDR 数据没有进行海况偏差改正和内部延迟改正。本文中利用沿轨测高数据一次差分信息, 借助移去-恢复技术计算重力异常, 由于沿轨相邻两测高点海况偏差改正和内部延迟改正接近, 故 Cryosat-2 测高数据的系统性偏差并不影响重力异常计算。

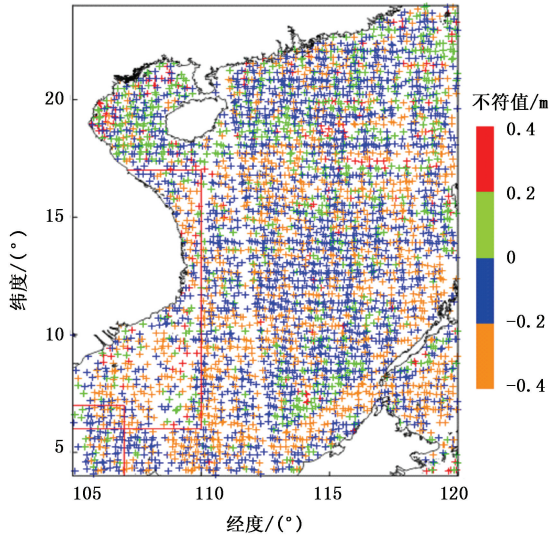


图3 Cryosat-2 自交叉点不符值

Fig. 3 Crossover difference of Cryosat-2 satellite altimeter data itself

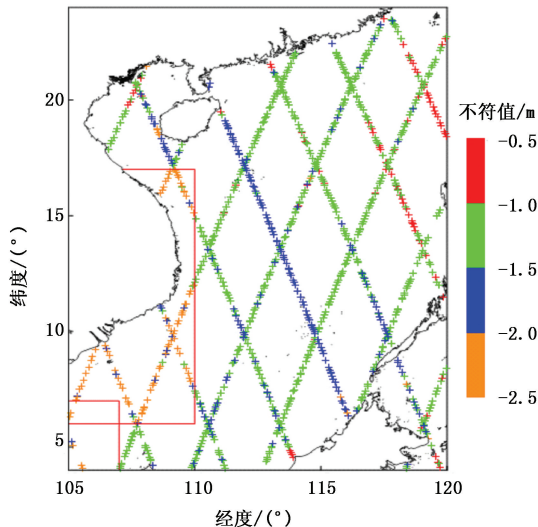


图4 Cryosat-2 与 Jason-2 互交叉点不符值

Fig. 4 Crossover difference between Cryosat-2 and Jason-2

2 垂线偏差计算方法

垂线偏差法是当前利用卫星测高技术计算海洋重力场的最优方法^[13], 由沿轨垂线偏差 ε 计算网格

点垂线偏差 $(\bar{\xi}, \bar{\eta})$ 的观测方程^[14]为

$$\varepsilon_i + v_i = \bar{\xi} \cos \alpha_i + \bar{\eta} \sin \alpha_i, i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

式中, n 为观测点的数目; v_i , α_i 和 ε_i 分别为第 i 个观测点的残差、方位角和沿迹垂线偏差。

其矩阵形式为

$$VV = AX - L. \quad (2)$$

由于系数矩阵 A 的元素扰动, 采用间接偏差方法计算会发生矩阵秩亏, 导致方程解不唯一。借助加权最小范数最小二乘解可解决矩阵秩亏问题^[15]。假设矩阵 A 为 $m \times n$ 阶矩阵, 对矩阵 A 进行奇异值分解

$$A = U \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V^H. \quad (3)$$

式中, 矩阵 U 和 V 分别为 m 阶和 n 阶酉矩阵; Σ 为对角矩阵。矩阵 A 的 M-P 广义逆 A^+ 为

$$A^+ = V \begin{bmatrix} \Sigma^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U^H. \quad (4)$$

参数 X 的解为

$$X = PA^+L = PV \begin{bmatrix} \Sigma^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U^HL. \quad (5)$$

式中, P 为与距离有关的权阵。

3 重力异常计算

由于垂线偏差含有丰富的重力场高频成分以及 EGM2008 重力场模型在长波分量上的优势, 实验中采用移去-恢复方法^[5], 利用沿轨迹一次差分信息, 以计算网格点为中心, 选取 $4' \times 4'$ 窗口内的测高观测点, 应用公式 (1) ~ (5) 计算 $2' \times 2'$ 网格剩余垂线偏差分量, 共得到 251 040 个点。

采用逆 Vening-Meinesz 公式反演海洋重力异常时, 剩余垂线偏差的范围会影响重力异常计算的精度。文献 [4] 中选取不同范围的剩余垂线偏差分量计算海洋重力场, 结果表明选取 $5''$ 内剩余垂线偏差分量计算的海洋重力场能够有效利用数据和保证海洋重力场的精度。据此, 选取剩余垂线偏差分量绝对值小于 $5''$ 的点, 选择后得到 232 948 个点, 数据剔除率为 7.2%。

积分半径同样影响重力异常精度, 积分半径太小, 则区域内可用于计算的测高点太少, 甚至没有; 积分半径太大, 虽然用于计算的测高点增多, 但引入的海面地形影响变大, 导致产生更大误差^[16]。经试验比较, 本文中选择的积分半径为 $30'$ 。由逆 Vening-Meinesz 公式得到中国南海海域 ($4^\circ \sim 24^\circ$, $105^\circ \sim 120^\circ$) $2' \times 2'$ 重力异常, 结果如图 5 所示。

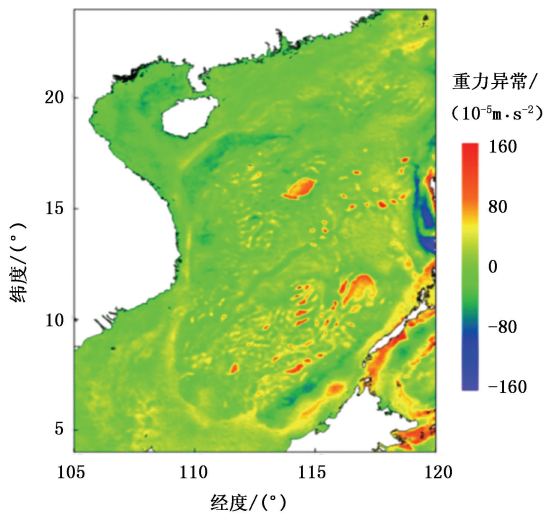


图 5 重力异常计算结果

Fig. 5 Gravity anomalies

4 结果分析

本文中采用船测重力数据检验重力异常计算结果的精度,经过精度控制和网格化处理,精度为 $(1 \sim 3) \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,数据范围如图 6 所示,红色点代表船测重力异常点,相邻数据点距离为 30'。

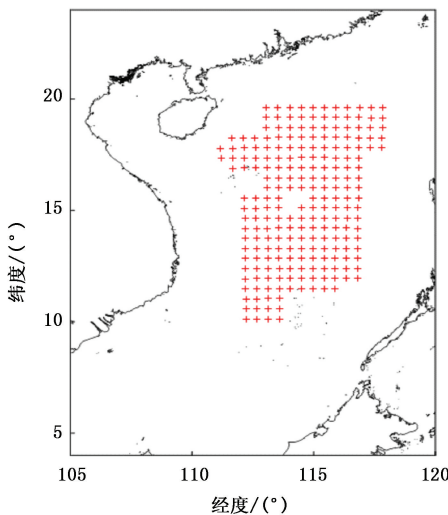


图 6 船测重力数据点

Fig. 6 Shipboard gravity data points

以卫星测高数据计算的 2'×2'重力异常网格数据为基础数据,内插出船测数据点重力异常,与船测数据作差比较,结果见图 7。从图 7 中可看出,由卫星测高数据计算的重力异常与船测重力异常值非常接近,但并不完全相等。将本文重力异常结果与船测重力作差比较,差值最大值为 $18.9 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,最小值为 $-11.8 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,RMS 为 $4.5 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,考虑到船测重力精度,由卫星测高数据计算的

重力异常精度可能会更高,且两者之间存在正的系统偏差,偏差值为 $1.4 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

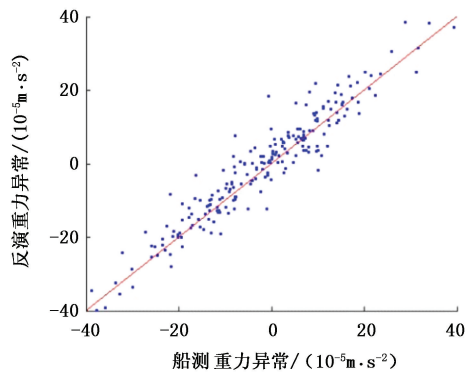


图 7 重力异常比较散点图

Fig. 7 Diagram of gravity anomaly comparison

(1)与文献[2-4]结果相比,重力异常空间分辨率相当,与船测数据差值绝对值的最大值明显减小,减小了约 $20 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,RMS 由 $(9 \sim 11) \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 降低到 $4.5 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,精度明显提高,与文献[6]结果相比,RMS 减小 $1.2 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,但空间分辨率由 $2.5' \times 2.5'$ 提高到 $2' \times 2'$ 。相较于多星数据联合计算海洋重力异常,Cryosat-2 测高数据轨道密集,精度高,并避免了多颗卫星数据之间参考椭球和参考框架不统一的问题,这是本实验取得高精度结果的主要原因。

(2)为研究卫星测高重力与船测重力差值的分布特点,本文中对差值数据进行统计分析,统计直方图如图 8 所示,分级统计结果如表 1 所示。由图 8 和表 1 可知,差值主要集中在 $(7 \sim 8) \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,占全部测点数的 90.5%,小于 $-7 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 或大于 $8 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的点数只有 21 个点。本文结果与国内外同行结果相比,差值绝对值明显减小,减小了约 $20 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

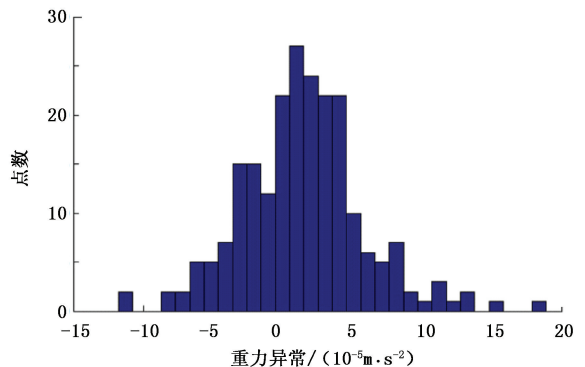


图 8 重力异常比较差值分布直方图

Fig. 8 Histogram of gravity anomaly difference

本文中仅用了 4 个周期的测高数据,随着 Cryo-

sat-2 卫星测高数据的积累和数据质量的改善及卫星测高数据处理技术的进步,可进一步提高重力异常计算的精度。另外,在 Cryosat-2 测高数据基础上,联合其他测高精度较高的卫星测高数据,有望进一步提高海洋重力异常的空间分辨率和精度。

表 1 测高重力异常与船测数据差值分级统计

Table 1 Comparison between altimeter-derived and shipboard gravity anomalies with different ranges

| 卫星测高重力-船测重力/(10 ⁻⁵ m · s ⁻²) | 测点数 | 所占百分比/% |
|---|-----|---------|
| -12 ~ -7 | 6 | 2.7 |
| -7 ~ -2 | 39 | 17.6 |
| -2 ~ 3 | 99 | 44.8 |
| 3 ~ 8 | 62 | 28.1 |
| 8 ~ 13 | 11 | 5.0 |
| 13 ~ 19 | 4 | 1.8 |

5 结 论

(1)在网格剩余垂线偏差分量计算中,利用加权最小范数最小二乘解的奇异值分解方法求解方程,能有效解决因系数矩阵秩亏导致的方程解不唯一问题。

(2)Cryosat-2 测高数据空间分辨率和测高精度高于传统卫星测高数据,基于该测高数据的南海海域 2'×2'重力异常计算精度为 4.5×10⁻⁵ m · s⁻²,较国内外同行提高(4~6)×10⁻⁵ m · s⁻²。

致谢 感谢欧空局(EESA)提供 Cryosat-2 卫星数据。

参考文献:

[1] 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.

[2] 王海瑛,王广运. 卫星测高数据的沿轨迹重力异常反演法及其应用[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 21-26.

WANG Haiying, WANG Guangyun. Inversion of gravity anomalies from along-track vertical deflections with satellite altimeter data and its applications[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(1): 21-26.

[3] 李建成, 宁津生, 陈俊勇, 等. 联合 TOPEX/Poseidon, ERS2 和 Geosat 卫星测高资料确定中国近海重力异常[J]. 测绘学报, 2001, 30(3): 197-202.

LI Jiancheng, NING Jinsheng, CHEN Junyong, et al. Determination of gravity anomalies over the South China Sea by combination of topeX/poseidon, ERS2 and Geosat altimeter data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,

ica, 2001, 30(3):197-202.

[4] 胡淑梅,文汉江,李洪超,等. 利用多种测高数据反演中国南海海域重力异常[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(4):56-59.

HU Shumei, WEN Hanjiang, LI Hongchao, et al. Inversion of gravity anomalies over South China Sea by use of combination of multi-satellite altimeter data[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(4):56-59.

[5] 王虎彪. 用卫星测高和船测重力资料联合反演海洋重力场[D]. 武汉:中国科学院测量与地球物理研究所, 2005.

WANG Hubiao. Inversion of marine gravity anomalies by combining multi-altimeter data and shipborne gravimetric data[D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2005.

[6] DADZIE I, LI J, CHU Y. Prediction of gravity anomalies over the South China and Philippine seas from multi-satellite altimeter sea surface heights[J]. Geo-Spatial Information Science, 2008, 11(3):174-179.

[7] SANDWELL D, GARCIA E, SOOFI K, et al. Toward 1-mgal accuracy in global marine gravity from Cryosat-2, envisat, and Jason-1 [J]. The Leading Edge, 2013, 32(8):892-899.

[8] STENSENG L, ANDERSEN O B. Preliminary gravity recovery from Cryosat-2 data in the Baffin Bay [J]. Advances in Space Research, 2012, 50(8):1158-1163.

[9] GOMMENDINGER C, MARTIN-PUIG C, DINARDO S, et al. Improved altimetric performance of Cryosat-2 sar mode over the open ocean and the coastal zone[C]. Vienna: European Geosciences Union, c2012.

[10] 汪栋,范陈清,贾永君,等. HY-2 卫星雷达高度计时标偏差估算[J]. 海洋学报, 2013, 35(5):87-94.

WANG Dong, FAN Chenqing, JIA Yongjun, et al. The time tag bias estimation of hy-2 satellite radar altimeter [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(5):87-94.

[11] 翟国君,黄谟涛,谢锡君,等. 卫星测高数据处理理论与方法[M]. 北京:测绘出版社, 2000:119-123.

[12] 刘传勇,暴景阳,黄谟涛,等. 验后平差方法在 Geosat/ERM 卫星测高数据处理中的应用[J]. 海洋测绘, 2008, 28(1):5-8.

LIU Chuanyong, BAO Jingyang, HUANG Motao, et al. The application of posteriori compensation theory of error in altimeter data set from geosat/erm crossover adjustment[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2008, 28(1):5-8.

[13] 彭富清,夏哲仁. 卫星测高中的垂线偏差法[J]. 海洋测绘, 2004, 24(2):5-9.

PENG Fuqing, XIA Zheren. Vertical deflection theorem

- of satellite altimetry [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*,2004,24(2):5-9.
- [14] HWANG C, Eu-CHI K, BARRY P. Global derivation of marine gravity anomalies from seasat, geosat, ers-1 and topex/poseidon altimeter data [J]. *Geophys J Int*, 1998(134):449-459.
- [15] 鲁铁定,陶本藻,周世健. 矩阵的 SVD 分解性质及其在秩亏网平差中的应用[J]. *大地测量与地球动力学*,2007,27(5):63-67.
- LU Tieding, TAO Benzao, ZHOU Shijian. Characteristics of matrix SVD and its applications to rank deficiency free network adjustment [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*,2007,27(5):63-67.
- [16] 李娜,章传银. 用逆 Vening-Meinesz 公式反演海洋重力场时积分半径的选择[J]. *大地测量与地球动力学*,2009,29(6):126-129.
- LI Na, ZHANG Chuanyin. Option of integral radius in inversion of sea gravity with inverse vening-meinesz formula [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*,2009, 29(6):126-129.

(编辑 修荣荣)