

利用多代卫星测高数据计算中国近海及邻域重力异常

刘善伟¹, 李家军¹, 万剑华¹, 杨俊钢²

(1. 中国石油大学(华东) 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: 为提高海洋重力场数据的精度和空间分辨率, 联合 Jason-1/2、T/P、Envisat、ERS-1/2、Geosat 等多代卫星测高数据计算中国近海及邻域(0°~42°N, 100°~140°E)2'×2'重力异常。对卫星测高数据分别进行共线处理和自交叉点平差, 并以 T/P 卫星测高数据为基准进行多星数据联合平差, 有效削弱了卫星测高数据的时变影响和不协调性; 利用逆 Vening-Meinesz 公式计算重力异常, 与船测重力相比, 均方根误差为 5.4 mgal。结果表明, 通过引入高精度的卫星测高数据, 结合多项平差处理手段, 提高了海洋重力异常的计算精度。

关键词: 卫星测高; 交叉点平差; 逆 Vening-Meinesz 公式; 重力异常

中图分类号: p228.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2015)12-0130-05

doi: 10.11759/hyxx20141023001

随着卫星测高技术的发展, 积累了大量的卫星测高数据集, 为恢复海洋重力异常提供了丰富的数据资料, 联合利用多颗卫星的测高数据是求解高精度、高分辨率海洋重力异常的主要技术。Sandwell^[1]、Andersen 等^[2]利用 ERS-1、Geosat/GM 等多颗卫星的测高数据分别解算了全球海洋重力异常; Hwang 等^[3]采用 Seasat、Geosat/GM/ERM、ERS-1 和 T/P 等多颗卫星的数据, 利用 Vening-Meinesz 公式和一维 FFT 技术得到了 2'×2'分辨率的全球海洋重力异常; 王海瑛等^[4]利用 T/P、ERS-1 和 Geosat/GM 三颗卫星的测高数据解算 2'×2'中国南海区域重力异常, 精度为 10mgal 左右; 李建成等^[5]采用 T/P、ERS-2 和 Geosat 卫星的测高资料, 确定了 2.5'×2.5'中国近海重力异常, 其精度为 9.3 mgal。以往研究所用卫星数量一般为 3~4 颗, 其重力异常计算精度偏低。

本文联合 Jason-1/2、T/P、Envisat、ERS-1/2、Geosat 等 7 颗卫星的测高资料, 利用逆 Vening-Meinesz 公式计算中国近海及邻域(0°~42°N, 100°~140°E)2'×2'重力异常。

1 研究数据与方法

1.1 研究区域与数据

研究区域为中国近海及周边邻域(0°~42°N, 100°~140°E)如图 1 所示。采用 Geosat、ERS-1/2、Envisat、T/P、Jason-1/2 等卫星的测高数据(表 1), 图

2 是图 1 方框区域对应的多星测高数据地面轨迹, 通过多星联合有效提高了测高数据的观测密度。本文选用的卫星测高数据精度为 3~20 cm, 多星数据联合平差可在一定程度上克服卫星测高数据的系统误差; 在利用逆 Vening-Meinesz 公式反演海洋重力场时, 重力异常反演精度与测高误差成正比^[6], 其通过海面高差(非海面高)推估海洋重力场, 能够进一步削弱系统误差的影响, 但不能消除偶然误差, 而不同卫星的偶然误差大小不同, 其对重力异常反演精度有一定影响。

1.2 逆 Vening-Meinesz 公式计算重力异常

逆 Vening-Meinesz 公式由垂线偏差计算转换到重力异常公式^[3]如公式(1)所示。

$$\Delta g_{pq} = \frac{\gamma_0}{4\pi} \iint \sigma H' (\xi_q \cos \alpha_{qp} + \eta_q \sin \alpha_{qp}) d\sigma_q \quad (1)$$

式中, γ_0 为平均重力, p 为计算点, q 为流动点, α_{qp} 为 q 点到 p 点的方位角, ξ_q 和 η_q 分别为 q 点垂线偏差的子午分量和卯酉分量, H' 为积分核函数的导数。

收稿日期: 2014-10-23; 修回日期: 2015-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(61571009); 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: 刘善伟, 男, 山东青岛人, 博士, 讲师, 研究领域为海洋遥感与 GIS, E-mail: shanweiliu@163.com; 李家军, 通信作者, 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要研究卫星测高数据处理及应用, E-mail: lijiajuncehui@163.com

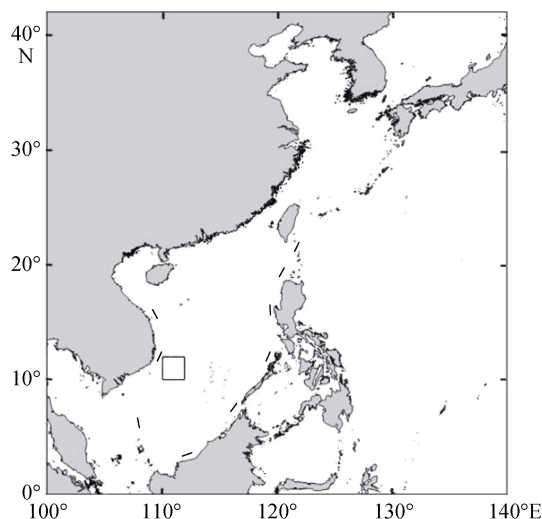


图1 研究区域
Fig.1 Study area

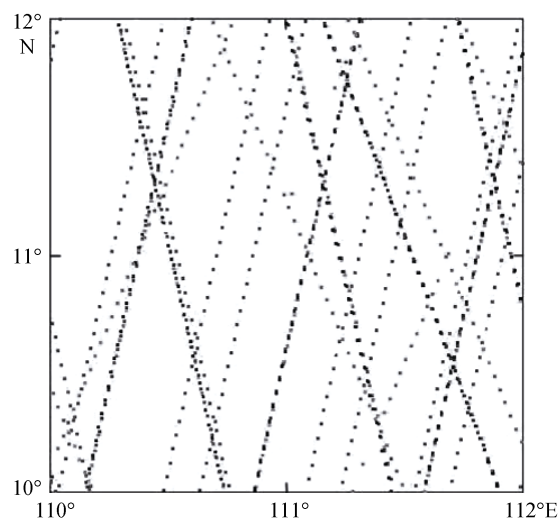


图2 多星测高数据地面轨迹
Fig.2 Multi-satellite altimetry data track

表1 卫星测高数据基本信息表

Tab.1 Basic satellite altimeter data

测高数据	时间跨度(年-月)	周期数	轨迹赤道间隔(km)	测高精度(cm)
Geosat/GM	1985-03~1986-09	1~25	4	10~20
Geosat/ERM	1986-11~1988-11	1~43	164	10~20
ERS-1/ERM	1992-04~1993-12	84~100	80	10
ERS-1/GM	1994-04~1995-03	139~144	8	10
ERS-2	1995-05~2003-06	1~85	80	10
Envisat	2002-10~2010-01	10~85	80	4.5
T/P	1992-09~2002-08	1~364	315	3
Jason-1	2001-12~2009-01	1~259	315	4.2
Jason-2	2008-06~2013-07	1~114	315	3.4

γ_0 的计算公式为

$$\gamma_0 = \frac{G_M}{R^2} \quad (2)$$

式中, G_M 为地球引力常数, 本研究以 T/P 卫星参考椭圆为基准, G_M 取值为 $398\ 600.441\ 5\ \text{km}^3/\text{s}^2$, R 为地球平均半径。

逆 Vening-Meinesz 公式的关键是确定一个将垂线偏差转换为重力异常的合适的核函数, Hwang 给出的核函数表达式为

$$H(\psi_{pq}) = \frac{1}{\sin(\psi_{pq}/2)} + \lg\left(\frac{\sin^3(\psi_{pq}/2)}{1 + \sin(\psi_{pq}/2)}\right) \quad (3)$$

ψ_{pq} 为 p 点到 q 点的球面距离。

2 数据预处理

2.1 ERM 数据共线处理

测高卫星 ERM 任务设计为精确重复轨道, 但实

际同一测高卫星在不同周期内的地面轨迹会产生偏移, 该偏移最大不超过 1 km。卫星测高数据共线处理, 将并非严格重复的轨迹归化到同一参考轨迹上, 不仅可以压缩数据量, 还可以抑制和减小时变因素的影响, 降低随机噪声, 减弱动态海面地形的影响, 提高测高数据的精度^[7]。借鉴 Geosat/ERM 数据的共线处理方法^[8]对各卫星 ERM 数据进行共线处理, 并统计共线处理前后研究海域内交叉点处不符值的均方根(表 2), 可看出交叉点不符值显著减小, 经过共线处理后的海面高度显著削弱了海面时变的影响。

2.2 多星联合平差

通过自交叉点平差处理 Jason-1/2、T/P、Envisat、ERS-1/2、Geosat 等卫星的测高数据, 消除不同年代其内部及相互之间的不协调性。在此基础上, 以 T/P 卫星所采用的地球参考坐标框架和地球椭圆为基准,

表 2 共线处理前后交叉点不符值均方根统计

Tab.2 Statistical cross points difference RMS before and after collinear processing

卫星	交叉点数 (个)	共线前不符 值(cm)	共线后不符 值(cm)
Geosat	326	20.2	15.6
ERS-1 ERM	828	37.4	10.2
ERS-2	831	42.1	13.5
T/P	100	17.7	12.5
Jason-1	87	17.2	12.1
Envisat	723	16.4	9.1
Jason-2	104	13.4	9.5

将其它种类的卫星测高数据统一到同一基准,即固定所有的 T/P 测高弧段,逐一进行其它卫星与 T/P 卫星之间的互交叉点平差处理。平差方法采用验后条件平差法^[9-10],各卫星数据自交叉点平差前后的海面

表 4 多星交叉点平差前后交叉点不符值统计

Tab.4 Statistical cross points difference RMS before and after crossover adjustment

卫星	互交叉点数(个)	平差前均方根(cm)	平差后均方根(cm)	平差后平均值(cm)
Geosat ERM & T/P	348	26.1	7.8	0.19
Geosat GM & T/P	4352	27.3	8.7	0.07
ERS-1 ERM & T/P	751	13.2	10.8	0.02
ERS-1 GM & T/P	6830	28.1	10.4	0.15
ERS-2 & T/P	753	13.3	11.6	0.08
Jason-1 & T/P	182	11.1	7.7	-0.09
Envisat & T/P	768	13.4	8.8	-0.17
Jason-2 & T/P	201	13.7	9.6	-0.06

表 3 和表 4 说明,多星数据联合平差处理效果理想。经过交叉点平差,海面高交叉点不符值均方根由平差前 9~27 cm 下降到平差后的 5~11 cm,效果显著,基本消除了各卫星测高数据自身内部的不协调性;T/P 卫星与其它卫星数据之间存在系统误差,且大小不一,主要由于它们采用了不同的参考椭球、参考框架和改正模型,通过互交叉点平差消除了多星之间的不协调性,海面高交叉点不符值的均方根由平差前的 11~28 cm 下降到平差后的 7~11 cm,实现了多代卫星测高数据基准的统一。

3 结果与讨论

3.1 重力异常计算

基于参考模型 DOT2008A 海面地形模型和 EGM2008 重力场模型,采用移去-恢复技术,首先根据 Hwang^[3, 11]的方法计算测高点剩余沿轨垂线偏差,利用最小二乘原理,计算网格残余垂线偏差分量。选

高不符值统计如表 3 所示,T/P 卫星与其他卫星互交叉点平差前后的海面高不符值的统计结果如表 4 所示。

表 3 自交叉点平差前后交叉点不符值均方根统计

Tab.3 Statistical cross points difference RMS before and after crossover adjustment

卫星	交叉点数 (个)	平差前不符 值(cm)	平差后不符 值(cm)
Geosat ERM	326	15.6	10.6
Geosat GM	111462	26.3	11.2
T/P	100	12.5	10.9
ERS-1 ERM	828	10.2	6.4
ERS-1 GM	67031	27.5	9.8
ERS-2	831	13.5	10.3
Jason-1	87	12.1	5.1
Envisat	723	9.1	5.4
Jason-2	104	9.5	5.5

择残余垂线偏差范围为 0~3",积分半径为 30'^[12],将网格残余垂线偏差分量带入逆 Vening-Meinesz 公式计算中国近海及邻域 2'×2'分辨率的残余重力异常,然后借助 EGM2008 重力场模型恢复 2'×2'的重力异常,计算结果如图 3 和图 4 所示。

3.2 结果讨论

为检验重力异常计算结果的可靠性,采用船测重力数据(由美国国家海洋与大气机构 NOAA 提供, http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gdas/ims/trk_cri.html)检验重力异常计算结果的精度,分布范围见图 5,红色点代表船测重力异常点,共 17 536 个。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,针对反演重力异常和船测数据制作散点图(图 6)和重力异常差值直方图(图 7),并在此基础上进行误差统计(表 5)。

由图 6 看出,反演重力异常和船测数据相近,围绕 $y=x$ 直线分布,表明两者数值相符,但同时存在误

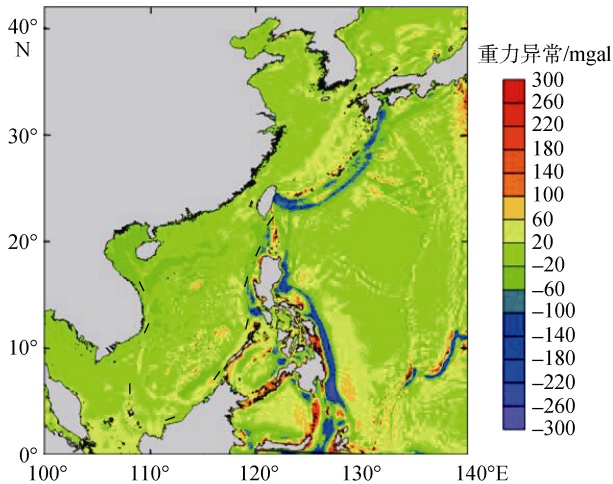


图3 重力异常

Fig.3 Gravity anomalies

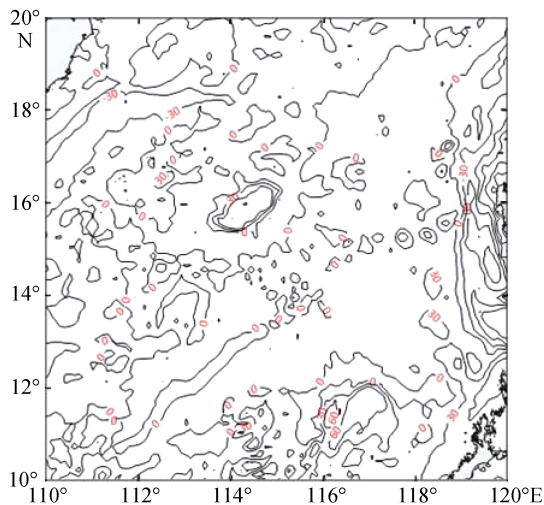


图4 局部重力异常等值线图(mgal)

Fig.4 Local map of gravity anomaly contours

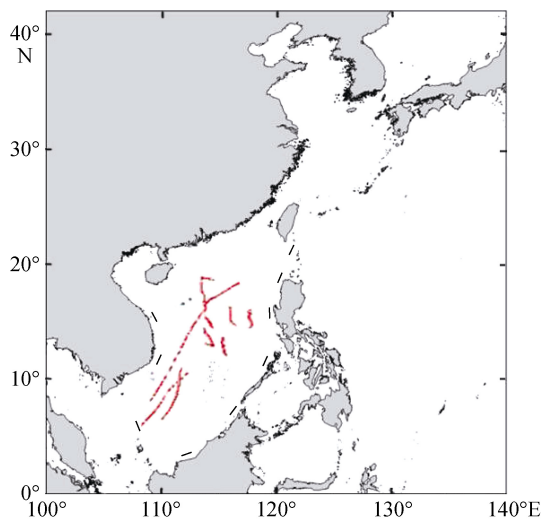


图5 船测重力数据点

Fig.5 Shipboard gravity data points

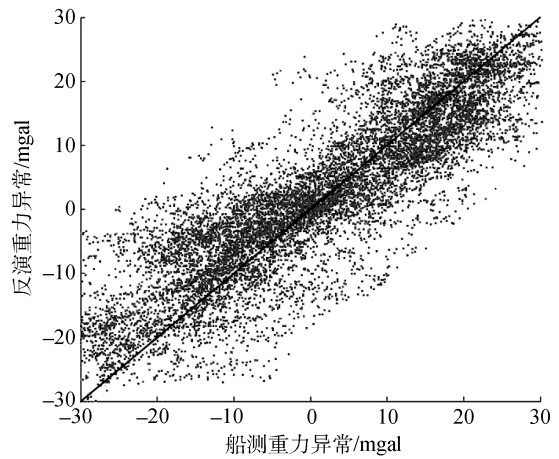


图6 重力异常比较散点图

Fig.6 Gravity anomaly comparison scatter

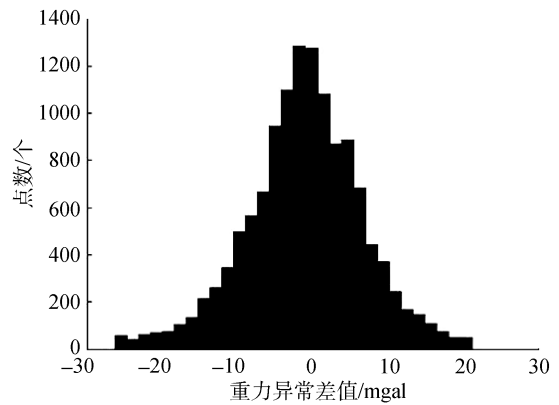


图7 重力异常差值直方图

Fig.7 Gravity anomaly difference histogram

差较大的点; 由图 7 看出, 差值基本围绕 $x=0$ 对称分布, 且差值多分布于 $-10 \sim 10$ mgal 之间, 有较强的集中性; 由表 5 看出, 卫星测高反演重力异常与船观测测值之间存在负的系统性偏差, 可能与参考场误差、坐标及重力系统转换误差有关。本文利用卫星测高数据反演海洋重力异常值精度为 5.4 mgal, 计算精度与文献[13]提及的理论估算水平(5.4 mgal)一致, 略高于前人成果^[4, 5, 13-14]。原因有以下几点: (1)较以往研究, 选择的卫星数量多且精度高, 引入了 Jason-1/2、TP 高精度测高数据, 并且除 Geosat 外, 测高精度都在 10 cm 以内; (2)卫星测高数据集时间跨度大(1985 年 3 月~2013 年 7 月), 有助于削弱短波信号误差; (3)以最高精度的 T/P 卫星测高数据为基准开展了多星数据的联合平差处理, 削弱了不同卫星测高数据之间的不协调性。

4 结语

基于 Jason-1/2、T/P、Envisat、ERS-1/2、Geosat 等卫星测高数据, 利用逆 Vening-Meinesz 公式计算

表 5 反演重力异常与船测数据的总体比较

Tab.5 Total comparison of study results and that of shipborne data

	点数(个)	差值最大值(mgal)	差值最小值(mgal)	差值平均值(mgal)	均方根误差(mgal)
结果-船测数据	17536	21.3	-26.2	-2.2	5.4

中国近海及邻域($0^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$) $2'\times 2'$ 重力异常,精度为 5.4 mgal,表明 Jason-1/2、T/P 等高精度卫星测高数据的引入可提高海洋重力场计算精度。

多项平差处理是提高海洋重力场计算精度的重要手段。ERM 数据共线处理能够明显减弱测高数据自身时变因素影响,而多星数据联合平差处理则能够削弱测高数据内部和相互之间的数据不协调性,有效降低交叉点不符值的均方根。

参考文献:

- [1] Sandwell D T. Antarctic marine gravity field from high-density satellite altimetry[J]. *Geophys J Int*, 1992, 109: 437-448.
- [2] Andersen O B, Knudsen P. Global marine gravity field from the ERS-1 and Geosat geodetic mission altimetry[J]. *Geophys J Res*, 1998, 103(C4): 8129-8137.
- [3] Hwang C, Eu C 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 彭富清,陈双军,金群峰. 卫星测高误差对海洋重力场反演的影响[J]. *测绘学报*, 2014, 43(4): 337-340.
- [7] Yale M M, Sandwell D T, Smith W H F. Comparison of along-track resolution of stacked Geosat, ERS 1, and TOPEX satellite altimeters[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 1995, 100(B8): 15117-15127.
- [8] 褚坤. Geosat 高度计数据处理与南海重力异常反演精度评价[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
- [9] 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.
- [10] 黄谟涛,王瑞,翟国君,等. 多代卫星测高数据联合平差及重力场反演[J]. *武汉大学学报*, 2007, 32(11): 988-993.
- [11] Hwang C, Hsu H Y, Jang R J. Global mean sea surface and marine gravity anomaly from multi-satellite altimetry: applications of deflection-geoid and inverse Vening Meinesz formulae[J]. *Journal of Geodesy*, 2002, 76(8): 407-418.
- [12] 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.
- [13] 黄谟涛,翟国君,欧阳永忠,等. 利用多代卫星测高数据反演海洋重力场[J]. *测绘科学*, 2006, 31(6): 37-39.
- [14] 黄谟涛,王瑞,翟国君,等. 多代卫星测高数据联合平差及重力场反演[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2007, 32(11): 988-993.

Calculation of gravity anomalies over China Sea and its vicinity based on multi-generation satellite altimetry data

LIU Shan-wei¹, LI Jia-jun¹, WAN Jian-hua¹, YANG Jun-gang²

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

Received: Oct., 23, 2014

Key words: satellite altimetry; crossover adjustment; inverse Vening-Meinesz formula; gravity anomaly

Abstract: To improve the accuracy and spatial resolution of marine gravity field data, we jointly used satellite altimetry data from Geosat, ERS-1/2, ENVISAT, T/P, Jason-1, and Jason-2 to calculate $2\text{ ft} \times 2\text{ ft}$ gravity anomalies over China's offshore and adjacent areas ($0^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$). After performing collinear processing and self-crossover adjustments to these satellite altimetry data, we took the T/P data as the reference data for the multi-satellite data combined adjustment to weaken the time-varying influence and coordination. Then, we calculated gravity anomalies using the inverse Vening Meinesz formula. Compared with shipborne gravity data, the accuracy was 5.4 mgal. The results showed that the determination of marine gravity anomalies could be improved using multi-satellite altimetry data and making corresponding adjustments.

(本文编辑: 李晓燕)