

文章编号:1671-8860(2008)12-1292-04

文献标志码:A

联合多种测高数据确定中国海及其邻域 $1.5' \times 1.5'$ 重力异常

王虎彪^{1,2} 王 勇¹ 陆 洋¹ 周旭华¹

(1 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学重点实验室,武汉市徐东大街 340 号,430077)

(2 中国科学院研究生院,北京市石景山区玉泉路甲 19 号,100039)

摘要:联合多种测高资料和 Geosat/GM 波形重构数据,基于 EIGEN_CG01C 重力场模型,采用沿轨迹加权最小二乘方法和逆 Vening-Meinesz 公式,确定了中国海及其邻域 $1.5' \times 1.5'$ 重力异常。将计算结果与最新船测资料进行了比较,标准差为 $3.37 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

关键词:卫星测高;沿轨迹;加权最小二乘;重力异常

中图法分类号:P223.7; P229.2

近 20 a 来,在多代卫星测高计划的支持下,海洋重力场的确定得到了迅速发展,Andersen 和 Knudsen^[1]、Sandwell^[2]、Hwang^[3] 分别联合不同的测高资料、采用不同的方法解算了全球海域 $2' \times 2'$ 海洋重力异常;我国学者黄谟涛等也利用卫星测高数据计算了中国海及其邻域的重力异常^[4];李建成等给出了中国海域分辨率为 $2.5' \times 2.5'$ 、与船测重力比较的精度为 $\pm 9 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的测高重力异常结果^[5]。过去利用卫星升弧和降弧测高剖面的交叉点计算某点的垂线偏差的方法,虽然精度较高,但是交叉点的空间分布比较稀松,限制了其空间分辨率。本文采用的沿轨迹加权最小二乘方法无需计算交叉点,而且充分利用了卫星沿轨迹上的每个海面高观测值,同时加权联合不同的测高资料,在保证精度的条件下大大提高了垂线偏差求解的空间分辨率,进而为本文计算海洋重力异常提供了高精度和高分辨率的垂线偏差数据源。

1 数据来源

由于来自 T/P 测高卫星的海面高具有最高的精度,因而本研究以 T/P 测高卫星的参考椭球

与参考框架为基准,利用转换公式和 4 个参数模型实现不同测高卫星海面高基准的统一^[6]。在中国近海区域,利用鲍李峰博士解算的 Geosat/GM 数据在中国海域的波形重构结果^[7]以及日本海洋研究所 Matsumoto 等人的 NAO99 海潮模型^[8]。

确定中国海及其邻域重力异常所用的数据为:① T/P 数据(1993-10~2001-12,第 2~333 周期);② ERS-1/GM 数据(1994-04~1995-03,共 10 周期);③ ERS-1/ERM 数据(1992-10~1993-12、1995-03~1996-06,共 26 周期);④ ERS-2/ERM 数据(1995-04~2000-12,第 0~66 周期);⑤ Geosat/ERM 数据(1986-10~1989-12,第 1~68 周期);⑥ Geosat/GM 数据(1985-03~1986-09,第 0~7 853 周期)。

2 基本原理与方法

由于重力场模型的改进,得到的模型的阶数和精度都比以前有了很大的提高,如 PGM2000A、ITG 系列、GGM 系列、EIGEN 系列等重力场模型。与卫星测高资料比较,鉴于现有的重力场模型在长波分量上的优势,本文采用移去-恢复方法分别以 EIGEN_CG01C 重力场模型

收稿日期:2008-10-15。

项目来源:中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(kzcx2-yw-125);国家自然科学基金资助项目(40704005,40674013);国家 863 计划资助项目(2006AA09Z153)。

和EGM96-SST海面地形模型作为重力场参考模型和海面地形参考模型。

2.1 测高剩余垂线偏差的计算

将观测到的海面高减去相对应的模型重力场大地水准面起伏值以及模型海面地形,解算剩余大地水准面起伏值 N_{res} ,将 N_{res} 沿卫星轨迹作距离的微分,消除轨道误差。由式(1)近似求得剩余大地水准面梯度 ϵ 和方位角 α :

$$\epsilon = \frac{\partial \text{SSH}}{\partial S} = \frac{\partial N}{\partial S} \approx \frac{N_{res_2} - N_{res_1}}{d_s} \quad (1)$$

$$\alpha = \arctan \frac{\Delta\lambda \cdot \cos\varphi_0}{\Delta\varphi}$$

式中, ϵ 对应的位置为沿轨迹连续观测两点之间的中点位置; d_s 为沿轨迹相邻两点之间的距离; $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\varphi$ 、 φ_0 分别为相邻两点的经纬度差以及中间点的纬度。

根据式(2)得到剩余大地水准面梯度的子午分量 ξ 和卯酉分量 η 在选定格网区域内的中心点值:

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

式中, n 为选定的圆区域内沿轨迹海面高观测点的数目; v_i 、 α_i 和 ϵ_i 分别为第 i 个观测点的残差、方位角和沿轨迹剩余大地水准面的梯度。

为了求定某点的剩余垂线偏差,以该点为中心,选定 $3' \times 3'$ 格网区域内所有的测高沿轨迹离散点资料为起算数据。如果选定的格网区域太

$$\bar{\xi} = \frac{\sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \sin^2 \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \epsilon_i \cos \alpha_i) - \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos \alpha_i \sin \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \epsilon_i \sin \alpha_i)}{\sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos^2 \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \sin^2 \alpha_i) - \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos \alpha_i \sin \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos \alpha_i \sin \alpha_i)} \quad (4)$$

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos^2 \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \epsilon_i \sin \alpha_i) - \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos \alpha_i \sin \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos \alpha_i)}{\sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos^2 \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \sin^2 \alpha_i) - \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos \alpha_i \sin \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos \alpha_i \sin \alpha_i)} \quad (5)$$

依据上述原理,与选定的 $3' \times 3'$ 格网区域相匹配,逐点计算中国海及其邻域格网分辨率为 $1.5' \times 1.5'$ 的剩余垂线偏差。如果 $v_i \geq 3\sigma_v$,则剔除对应的观测值 ϵ_i 。

式(1)中,海面高的差分求解过程实质上是高通滤波过程,在这个过程中,扣除了几乎所有长波误差的影响,如轨道误差的影响、海面稳态地形的影响等,因而降低了测高卫星数据对数据处理中环境误差改正的要求,其缺点在于海面高的差分过程引入且放大了高频噪声。低通滤波器的截断波长可根据卫星测高数据实际能够达到的沿轨迹分辨率而定。通过对上述解算的剩余垂线偏差进行滤波以后,就得到本文计算剩余重力异常所需要的基础数据源——剩余垂线偏差。

大,则该区域内有充足的测高离散点资料,增加了可观测数据,有利于提高计算点的精度,但缺点是限制了其空间分辨率的提高;而如果选定的格网区域过小,则由于受到测高卫星本身的轨道间距以及时间采样率的限制,在中国近海及其邻域内,造成很多格网区域内的测高观测点数据的个数 n 几乎为零或过少而影响计算。在 $3' \times 3'$ 格网区域内,设定大地水准面梯度的权为:

$$P_i^j = \frac{W_s(j)}{d_i^2 \sigma_i^2} (j = 1, 2, \dots, 6; i = 1, 2, \dots, n)$$

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2} \times \text{std}}{d_s} \times 206.264.806.2 \quad (3)$$

式中, d_i 是离散点到待计算格网点的距离; σ_i 是大地水准面梯度的标准偏差;std为海面高噪声; d_s 为式(1)中相邻两点的距离; $W_s(j)$ 为测高卫星定权。

根据不同卫星测高精度的差别,采用比较可靠的先验值^[6], $W_s(j)$ 具体定权如下:T/P为1/2.51、ERS-2为1/4.5、ERS-1/GM为1/8.6、ERS-1/ERM为1/6.7、Geosat/GM为1/15.3、Geosat/ERM为1/8.0。

根据最小二乘基本原理 $\sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n P_i^j v_i^2 = \min$,解算得到该点的剩余垂线偏差分量 ξ 、 η 分别为:

$$\bar{\xi} = \frac{\sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \sin^2 \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \epsilon_i \cos \alpha_i) - \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos \alpha_i \sin \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \epsilon_i \sin \alpha_i)}{\sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos^2 \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \sin^2 \alpha_i) - \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos \alpha_i \sin \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos \alpha_i \sin \alpha_i)} \quad (4)$$

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos^2 \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \epsilon_i \sin \alpha_i) - \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos \alpha_i \sin \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos \alpha_i)}{\sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos^2 \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \sin^2 \alpha_i) - \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos \alpha_i \sin \alpha_i) \cdot \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n (P_i^j \cos \alpha_i \sin \alpha_i)} \quad (5)$$

2.2 海洋重力异常的计算

由测高资料解算的海洋重力垂线偏差,作为一种观测值,由逆Vening-Meinesz公式与快速傅立叶变换算法相结合反解重力异常,是当前利用测高数据研究海洋重力场的主要方法之一。

逆Vening-Meinesz公式由垂线偏差计算转换到重力异常公式^[3]如下:

$$\Delta g(p) = \frac{\gamma_0}{4\pi} \iint H'(\zeta_q \cos\alpha_{qp} + \eta_q \sin\alpha_{qp}) d\sigma_q \quad (6)$$

式中, $\gamma_0 = GM/R^2$ 为平均重力; α_{qp} 代表流动点 q 至计算点 p 的方位角;核函数 H 为:

$$H(\psi_{pq}) = \frac{1}{\sin(\psi_{pq}/2)} + \lg \left(\frac{\sin^3(\psi_{pq}/2)}{1 + \sin(\psi_{pq}/2)} \right) \quad (7)$$

其中, ϕ_{pq} 为 p, q 两点的球面距离。至此, 本研究完整的测高重力异常可描述如下: 由多颗卫星测高海面高沿轨迹离散点资料, 扣除 EIGEN_CG01 参考重力场模型的大地水准面高和 EGM96_SST 海面地形模型, 得到卫星沿轨迹的剩余大地水准面高, 经过沿轨迹加权最小二乘配置以及滤波处理, 得到网格化的剩余垂线偏差; 再经由逆 Venning-Meinesz 公式计算剩余重力异常, 加上 EIGEN_CG01 参考重力场模型的重力异常, 同时顾及最内圈带的影响, 最后得到本研究中国海及其邻域测高重力异常的结果。

3 计算结果比较与分析

图 1 给出了本文解算的中国海及其邻域重力异常影像图。在中国海及其邻域, 本研究对球面距离 $\phi \rightarrow 0$ 时因为奇异效应对内圈带的影响作了初步分析, 对加入和不加入最内圈带的影响改正与船测重力差异的标准差可达到 $0.4 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 证明实施最内圈带的影响改正是必要的。

为了更加客观地评定联合多类测高资料基于本文方法求解重力异常的精度, 将本文测高重力异常、三种国际上的测高重力异常与船测重力资料进行外部检核和对比分析, 结果见表 1, 船测轨迹路线如图 2 所示。GMGA97_G、KMS01_G、Sandwell_V. 9. 2_G 分别为 Hwang、Knudsen、Scripps 和 Sandwell 提供的 $2' \times 2'$ 测高重力异常; IGG2007_G 为本研究计算的测高重力异常;

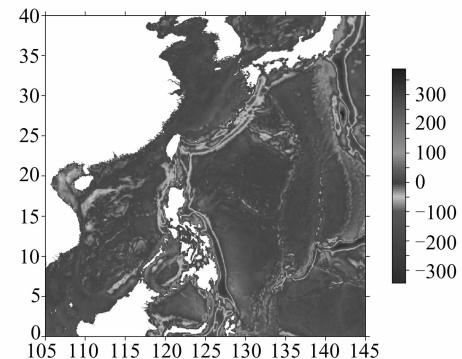


图 1 中国海及其邻域 $1.5' \times 1.5'$ 重力异常

Fig. 1 Gravity Anomaly in China

Sea and Its Vicinity

Ship_G 为船测重力异常。其中, A 区有 9 619 个船测点 (2005 年船测资料), B 区有 52 741 个船测点 (1990 年前船测资料)。

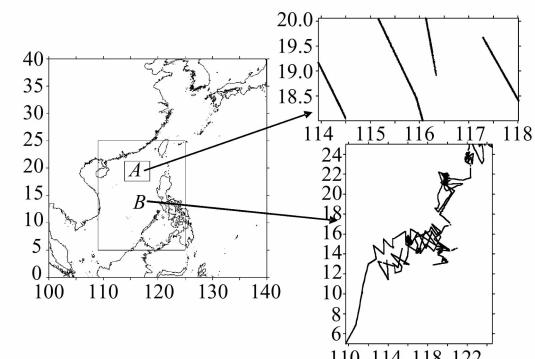


图 2 中国南海海域船测轨迹

Fig. 2 Track of the Shipborne Gravity in South China Sea

表 1 测高重力异常与船测重力异常的比较/mGal

Tab. 1 Comparison of Gravity Anomaly Derived from Altimeter and That from Shipborne Gravity Data/mGal

	A 区				B 区			
	最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差
GMGA97_G-Ship_G	-14.13	7.44	-1.62	3.83	-50.37	40.84	-4.5	7.72
KMS01_G-Ship_G	-11.14	8.28	-0.64	2.89	-46.08	33.12	-3.57	6.60
Sandwell_V. 9. 2_G-Ship_G	-11.58	11.53	-0.92	3.46	-43.22	32.89	-4.30	7.12
IGG2007_G-Ship_G	-16.90	8.56	-0.52	3.37	-41.41	35.18	-3.94	7.82

图 1 和表 1 中, 最大值和最小值明显偏大, 这是由于测高回波信号在一些陆地、岛屿附近受到干扰而使观测数据质量显著下降所致的。表 1 中, 测高重力异常和船测重力异常相比较, 存在一个负的系统差, 其原因还有待进一步研究。将本文解算的重力异常与国外的研究成果相比, 其总体计算精度相当, 其中以 KMS01 为最优。但是, IGG2007_G 的分辨率为 $2' \times 2'$, 其他测高重力异常结果的分辨率为 $2' \times 2'$ 。一般而言, 随着

分辨率的提高, 反演精度会有所下降。此外, 使用不同年代的船测资料以及在不同的海域与船测重力进行比较, 结果也会有所差异, 如表 1 中, A 区的精度高于 B 区的原因可能是由于 A 区相比 B 区更靠近开阔的海洋区域, 以及 A 区采用的是最近的船测重力结果, 而最近几年的船测重力仪器相比 90 年代, 其精度明显提高。本文成果是以船测重力为精度评估标准的, 然而, 船测重力精度难以评估, 其成果只能从客观角度来看待, 故在选择

评估精度的船测资料时,能使用到近十年来的船测资料是较为理想的,如A区的船测资料。

4 结语

本文使用中国海及其邻域的Geosat/GM波形重构数据,消除了由于卫星回波信号受到干扰而导致观测数据质量下降的影响,同时对测高数据作了更适合于日本海及中国近海海域的全球海潮模型改正,进一步提高了近海海域的海面高精度。此外,本研究对不同的测高资料进行了加权联合配置,优化和完善了测高垂线偏差方法;充分利用经过各种地球物理环境改正后的沿轨迹离散测高数据,采用沿轨迹加权最小二乘方法,无需求解测高轨迹交叠点;最后解算了中国海域高分辨率、高精度的重力异常结果($1.5' \times 1.5'$),为科学地利用测高资料反演海洋重力场提供借鉴。

随着卫星测高资料的不断补充和积累,以及波形重构数据等处理手段的提出和改进,卫星测高技术的研究和应用领域将得到进一步的拓宽和深化。在今后一段时期,利用卫星测高资料反演重力异常的主要工作将着重于高精度、高分辨率以及时变重力场的确定等。

参考文献

- [1] Andersen O B, Knudsen P, Trimmer R. The KMS2001 Global Mean Sea Surface and Gravity Field[C]. IAG2001 Scientific Assembly, Budapest, Hungary, 2001

- [2] Sandwell D T, Smith W H F. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (B5): 10 039-10 054
- [3] Hwang C, Kao E C, Parson B. Global Anomalies Derivation of Marine Gravity Anomalies from Seasat, Geosat, ERS-1 and Topex/Poseidon Altimeter Data [J]. Geophysical Journal International, 1998 (34): 449-460
- [4] 黄漠涛,翟国君,管铮,等.利用卫星测高数据反演海洋重力异常研究[J].测绘学报,2001,30(2):179-183
- [5] 李建成,宁津生,陈俊勇,等.中国海域大地水准面和重力异常的确定[J].测绘学报,2003,32(2):114-119
- [6] 姜卫平,李建成,王正涛.联合多种测高数据确定全球平均海面 WHU2000[J].科学通报,2002,47 (15):1 187-1 191
- [7] 鲍李峰.卫星测高波形重构及测高数据应用研究[D].武汉:中国科学院测量与地球物理研究所,2005
- [8] Koji M, Takashi T, Masatsugu O. Ocean Tide Models Developed by Assimilating Topex/Poseidon Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan [J]. Journal of Oceanography, 2000, 56(5): 567-581

第一作者简介:王虎彪,博士生。研究方向为卫星测高与地球重力场。

E-mail: wanghb@asch.whigg.ac.cn

Gravity Anomalies with Resolution of $1.5' \times 1.5'$ Over China Sea and Its Vicinity Derived from Multi-Satellite Altimeter

WANG Hubiao^{1,2} WANG Yong¹ LU Yang¹ ZHOU Xuhua¹

(1) Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 340 Xudong Street, Wuhan 430077, China)

(2) School of Graduate, Chinese Academy of Sciences, A19 Yuquan Road, Shijingshan District, Beijing 100039, China)

Abstract: On the basis of gravity field model (EIGEN_CG01C), together with multi-altimeter data, the improved gravity anomalies gridded in $1.5' \times 1.5'$ in China sea and vicinity are determined using the weighted method of along-track least squares and inverse Vening-Meinesz formula. Compared with the shipboard gravimetry in South China Sea; the results show that the accuracy of the gravity anomalies computed with the altimeter data is $3.37 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Key words: altimetry; along-track; weighted least-squares; gravity anomaly