

CHAMP 重力卫星结果在中国海及 邻近海域的初步分析

史红岭¹ 陆 洋^{1,2} 王 勇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开放实验室, 武汉市徐东路 174 号, 430077)

(2 中国科学院天文地球动力学联合研究中心, 上海市, 200030)

摘 要: 利用世界上第一个采用高低卫跟踪技术的 CHAMP 重力卫星计划导出的全新的高精度全球长波重力场模型 EIGEN-1S 结果, 根据二维高斯滤波原理, 基于相同空域尺度对卫星重力结果和由卫星测高解算的几种版本的海洋重力异常数据进行了长波部分的分析研究。结果表明, 在中国海及其邻近海域卫星重力数据与卫星测高解算的海洋重力异常数据之间存在明显的偏差。

关键词: 卫星测高; 卫星重力; 重力异常; 高斯滤波; 中国海

中图法分类号: P228.41

当前地球重力场的探测技术主要有地表直接重力观测、海洋雷达卫星测高和卫-卫跟踪卫星重力测量技术三种^[1~3]。在这 3 种主要的地球重力场测量技术中, 只有地面重力测量直接提供了观测点的全波段的重力场信息, 卫星测高目前最好的空域分辨率为 $2'$ (约 3.6km), 相应波长约为 7.3km。根据 Tscherning-Rapp 的全球重力场谱特性模型分析^[4], 它包含了 98.8% 的重力场信息, 而卫-卫跟踪技术提供了中长波信息。目前 CHAMP 卫星反演重力场空域分辨率可达到 500km, 相应波长约为 1000km, 仅包含约 23% 的重力场信息。可见, 不同来源的重力资料具有不同的分辨率, 包含不同波段的重力场信息, 正确分析评判它们, 对于综合利用各种类型的重力资料非常重要。

1 滤波方法

具有一定空域分辨率的网格化的重力场相当于一个数字化的二维图像函数, 因而对重力场数据的处理可参照图像处理的方法。为了提取重力场的长波部分, 我们采用高斯低通滤波器。通常二维高斯分布模型的定义可参考文献 [5, 6]。二维高斯滤波是让二维函数 (原图像) $f(x, y)$ 与高

斯函数 $g(x, y)$ 进行卷积, 从而达到抑制噪声和平滑的目的, 两者卷积的结果为 $h(x, y)$ 。根据卷积定理在频域有:

$$H(u, v) = G(u, v)F(u, v) \quad (1)$$

式中, $G(u, v)$ 、 $H(u, v)$ 、 $F(u, v)$ 分别是 $g(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 、 $f(x, y)$ 的傅立叶变换。用线性系统理论来说, $G(u, v)$ 是转移函数。由傅立叶变换可知, 高斯函数的傅立叶变换仍是同形式的高斯函数, 则通过反傅立叶变换便可得到:

$$h(x, y) = F^{-1}[G(u, v)F(u, v)] \quad (2)$$

高斯滤波算子是一个二维卷积算子, 主要用来模糊图像、移去细节和噪声, 保留相应的主体部分。高斯函数作为低通滤波器就意味着移去图像中的空域高频部分。高斯频幅响应曲线是半个高斯分布, 所以选择一个合适的高斯滤波器, 便可确保图像滤波后在一定空域频率范围的信息依然存在。

2 数据来源

本研究区域为中国海及邻域 ($105^{\circ} \sim 135^{\circ}E$, $0 \sim 40^{\circ}N$), 采用了卫星重力及卫星测高推算的重力异常数据。

2.1 卫星重力测量数据模型 EIGEN-1S

根据卫星重力任务 CHAMP 资料解算的第

一个长波重力位模型 EIGEN-1S, 由德国地球科学中心(GFZ)完成, 采用的时间段由 2002 年 7 月 30 日至 12 月 31 日共 88d 的 CHAMP GPS 卫星跟踪和加速度计数据, 并增加了 Lageos-1、Lageos-2、Starlette 和 Stella 激光跟踪数据, 最高阶次可展开到 119 阶, 但其中的前 100 阶才是完整的, 也就是说, 该模型所能提供的重力场的空域分辨率低于 1.5° (约 165km)。由于该模型仅采用了卫星数据, 因而其完全可靠的阶次仅达到 36 阶^[3], 提供的重力异常精度为 $\pm 2.5 \times 10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

2.2 海洋卫星测高数据模型

IGG97 是中国科学院测量与地球物理研究所根据 ERS-1 和 T/P 两颗测高卫星的 CORSSH 产品经过数据处理得到的。CORSSH 由 CLS 空间海洋处提供(AVISO/ALTIMETRY, 1996), 这些数据已经过固体潮、海潮和负荷潮改正及干湿对流层、电离层、电磁偏差和反气压计改正。IGG97 首先是对测高数据进行 Stacking 处理, 得到沿共线轨迹的平均海面高, 然后扣除海面地形得到卫星测高大水水准面。重力异常恢复主要采用 Stokes 公式的逆运算方法, 使用 FFT 得到重力异常的推算值, 扣除边界效应影响后得到中国近海及邻域 $30' \times 30'$ 的重力异常格网模型^[4]。

KMS01 重力异常为 $2' \times 2'$ 格网^[5,6], KMS01 采用了 ERS-1 和 Geosat 卫星测高数据, 通过 Stokes 公式逆运算计算得到。利用了 AG95 潮汐模型来减小海面变化, 剩余海洋大地水准面高(参考于 EGM96 模型)通过最小二乘配置内插到格网上, 剩余重力异常便可以利用 Stokes 公式逆运算和 FFT 反演得到, 其中包括维纳滤波。

Sandwell V9.2 的 $2' \times 2'$ 格网是 Sandwell 海洋重力异常格网系列中的最新版本^[7], 使用了 Geost、ERS-1 和 Topex 测高卫星数据, 在格网化和 FFT 变换时进行了滤波处理, 运用了维纳滤波器、CSR V3.0 海潮模型, 没有使用海面地形, 在重力异常反演中利用了 FFT、维纳滤波和 EGM96 模型。

GMGA97 海洋重力异常模型是 $2' \times 2'$ 的格网^[8], 使用了 Seasat、Geosat、ERS-1 和 T/P 卫星测高数据, 平均海面通过 Levitus 海面地形模型转化为大地水准面高, 同样用 CSR V3.0 海潮模型减小海面变化的影响, 垂线偏差利用最小二乘配置格网化, 然后利用逆 Vening-Meinesz 公式 FFT 和维纳滤波转变为重力异常, 在移去-恢复技术中使用了 EGM96 模型^[9]。

3 比较分析

3.1 数据滤波

由于数据量较大, 统一将它们转换为 $30' \times 30'$ 格网数据, EIGEN-1S 模型计算的重力异常也计算到同样大小的格网上。这样的处理不会影响长波信息的提取, 但并不意味着 EIGEN-1S 模型计算的重力场达到此空域分辨率。卫星重力测量和卫星测高分别得到的重力异常源数据的分布情况如图 1(a)~1(e) 所示。图 1(a) 为卫星重力 EIGEN-1S 模型展开到 119 阶计算的重力异常; 图 1(b)~1(e) 分别为 IGG97、GMGA97、Sandwell V9.2 和 KMS01 卫星测高数据。根据二维高斯滤波方法, 在相同的框架下分别对卫星重力和卫星测高得到的重力异常进行滤波计算, 设定数值采样间隔大小, 便可以得到空域分辨率约为 5° 的滤波结果, 如图 1(f)~1(j) 所示。

从图 1(b)~1(e) 可以看出, 几种版本的卫星测高数据反映的重力异常信息基本上是一致的, 在琉球群岛和菲律宾群岛附近等值线密集, 与这一区域复杂的海底构造相对应。而海底地形较为平坦的太平洋区域和有平缓大陆架的东海、黄海等值线平缓。与卫星测高格网明显不同, EIGEN-1S 模型所描绘的图形仅粗略地表示重力场的大概情况, 不能反映细节, 它的空域分辨率不会好于 1.5° , 相应的空域波长大于 3° (330km), 但包含有较为可靠的空域波长约为 10° 的重力场信息。然而, 从图形上不能很清楚地了解这些信息。通过高斯低通滤波得到其长波部分, 如图 1(f) 所示, 它与同样滤波后的卫星测高结果(图 1(g)~1(j)) 的形态分布、异常大小的变化趋势基本相同, 即经过高斯低通滤波处理, 得到了卫星重力和卫星测高共同具有的空域尺度部分的信息, 即长波信息。基于此, 可在相同的空域尺度下对卫星重力和卫星测高解算的重力异常进行比较。

3.2 长波重力异常比较分析

通过高斯低通滤波后, 得到了中国海及邻域空域波长为 10° 的重力异常。基于相同的空域尺度, 将卫星测高解算数据和卫星重力解算数据进行比较, 得到了 4 个版本的卫星测高重力异常与卫星重力异常的差异图, 如图 2 所示。从图 2 来看, 几种卫星测高与卫星重力得到的重力异常的差异其长波部分具有相同的特征, 差异较大的地方基本上集中在菲律宾群岛、马来西亚和印度尼西亚附近(约 $117^\circ \text{E} \sim 130^\circ \text{E}$, $0 \sim 18^\circ \text{N}$)。从海洋

向近海岸, 两者的差值呈现出骤然增大趋势, 反映比较明显, 呈现强烈的负值, 即卫星测高重力异常数值要比卫星重力得到的重力异常小。在这一区域, 岛屿和暗礁较多, 造成了卫星测高原始数据的不准确, 导致重力异常解算结果不佳, 而在大洋的广阔区域里重力异常的差异起伏较小。差异的最大正值出现在琉球群岛一带, 可能与该地区复杂的海底构造有关。

数值比较的统计结果列于表 1, 4 种卫星测高解算结果与卫星重力结果的长波差异差不多, 偏差的中误差在 $\pm 5.0 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 左右, 扣除卫星重力本身误差后, 为 $\pm 4.28 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; 差值均值在 $-2.0 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 左右, 表明卫星重力异常与测高重力异常之间存在着一定的偏差和系统差。

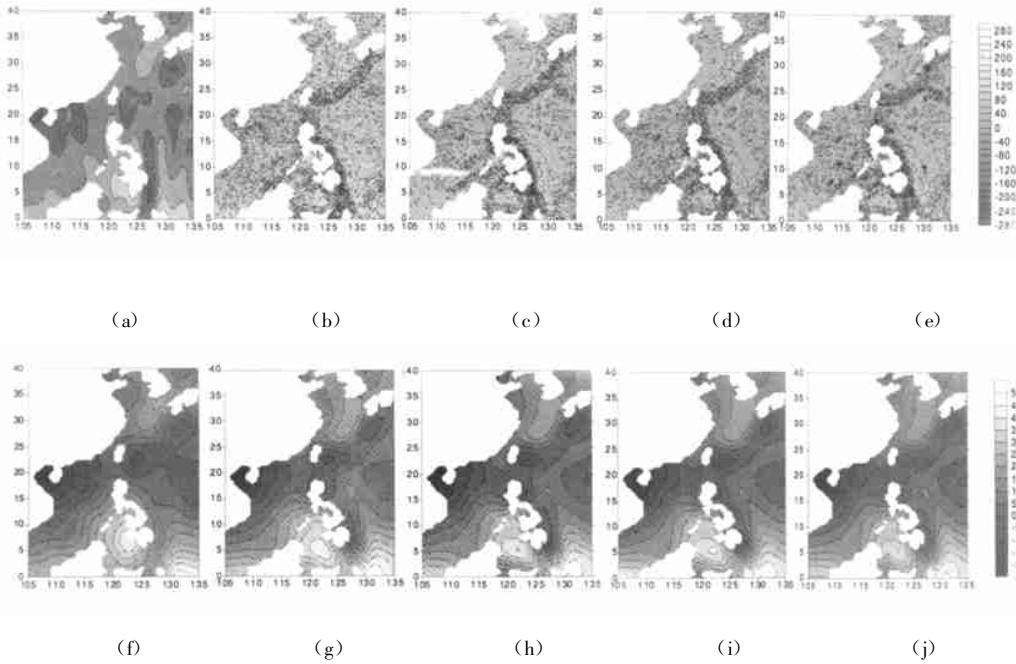
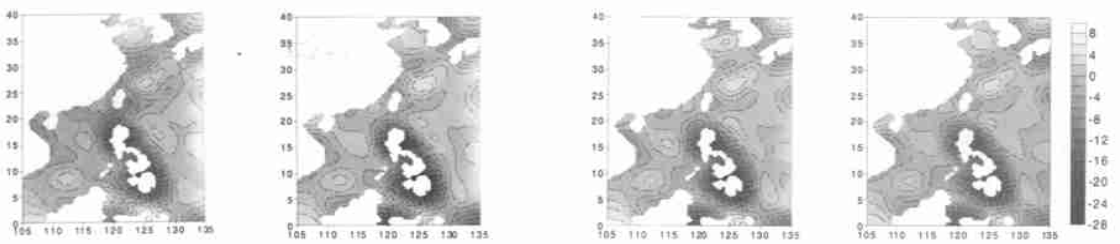


图 1 滤波前后的重力异常/ $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Fig. 1 Gravity Anomalies Before and After Filtering



(a) IGG97 与 EIGEN-1S 之差; (b) Sandwell V9.2 与 EIGEN-1S 之差; (c) KMS01 与 EIGEN-1S 之差; (d) GMGA97 与 EIGEN-1S 之差
图 2 长波重力异常的比较/ $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Fig. 2 Comparison Between the Long Wavelength Components of Gravity Anomalies

表 1 中国海及邻域长波重力异常的比较/ $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Tab. 1 Comparison Between the Long Wavelength Components of Gravity Anomalies in the China Sea and Its Vicinity

数据类型	点数	最小差值	最大差值	均值	标准偏差	中误差
IGG97-EIGEN-1S	3 263	-21.71	8.15	-1.81	3.98	4.37
GMGA97-EIGEN-1S	3 263	-25.26	7.04	-2.22	4.70	5.20
Sandwell-EIGEN-1S	3 263	-24.20	6.20	-2.06	4.63	5.06
KMS01-EIGEN-1S	3 263	-27.36	6.87	-2.19	4.74	5.22
平均		-24.63	7.07	-2.07	4.51	4.96

4 结 语

通过实际的比较计算发现, 在 CHAMP 的第一个重力异常结果和卫星测高解算的结果之间普遍存在着一个约 $-2.0 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的系统偏差, 同时存在着中误差为 $\pm 4.28 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的偏差。这些偏差的存在有多方面的原因, 而主要的原因来自于卫星测高, 一是卫星测高本身的误差, 二是由测高资料解算重力异常过程的误差。特别是在菲律宾群岛一带出现较大的偏差, 为卫星测高误差的典型表现。

参 考 文 献

- 1 许厚泽. 卫星重力研究: 21 世纪大地测量研究的新热点. 测绘科学, 2001, 26(3): 1~3
- 2 宁津生. 卫星重力探测技术与地球重力场研究. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(1): 501~505
- 3 Reigber C, Balmino G, Schwintzer P, et al. A High Quality Global Gravity Field Model from CHAMP GPS Tracking Data and Accelerometry (EIGEN-1S). Geophysical Research Letters 2002, 29(14): 371~374
- 4 许厚泽, 王海瑛, 陆 洋, 等. 利用卫星测高数据推求中国近海及邻域大地水准面起伏和重力异常研究. 地球物理学报, 1999, 42(4): 465~471
- 5 Andersen O B, Knudsen P. Globe Marine Gravity Field from the ERS-1 and GEOSAT Geodetic Mission Altimetry. J. Geophys. Res., 1998, 103(C4): 8 129~8 137
- 6 Andersen O B, Knudsen P, Trimmer R. The KMS2001 Global Mean Sea Surface and Gravity Field. IAG2001 Scientific Assembly, Budapest, Hungary, 2001
- 7 Sandwell D T, Smith W H F. Marine Gravity Anomaly from GEOSAT and ERS-1 Satellite Altimetry, J. Geophys. Res., 1997, 102(B5): 10 039~10 054
- 8 Hwang C. Inverse Vening Meinesz Formula and Deflection-Geoid over the South China Sea. J. Geod., 1998, 72: 304~312
- 9 Hwang C, Kao E C, Parsons B E. Global Derivation of Marine Gravity Anomalies from SEASAT, GEOSAT, ERS-1 and TOPEX/POSEIDON Altimeter Data. Geophys. J. Int., 1998, 134: 449~459
- 10 章毓晋. 图像工程(上)——图像处理和分析. 北京: 清华大学出版社, 1998
- 11 丁月蓉. 天文数据处理方法. 南京: 南京大学出版社, 1998

第一作者简介: 史红岭, 硕士生. 研究方向为大地测量与测量工程.

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

Evaluation of Gravity Data by CHAMP on the China Sea

SHI Hongling¹ LU Yang^{1,2} WANG Yong¹

(1 Key Laboratory of Dynamic Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics Chinese Academy of Sciences, 174 Xudong Road, Wuhan, China 430077)

(2 United Center for Astrogeodynamics Research, Shanghai, China, 200030)

Abstract: This paper compares the long wavelength components of gravity anomalies derived from satellite altimetry with ones from the new global gravity field model EIGEN-1S of the CHAMP within the same spatial resolution, based on 2-D Gauss filter.

Key words: satellite altimetry; satellite gravity; gravity anomalies; Gauss filter; China Sea

About the first author: SHI Hongling, postgraduate. He majors in geodesy and survey engineering.

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