第30卷第4期
2010年8月

大地测量与地球动力学
JOURNAL OF GEODESY AND GEODYNAMICS

Vol. 30 No. 4
Aug. ,2010

文章编号:1671-5942(2010)04-0055-04

# 基于小波收缩阈值降噪的卫星重力梯度数据粗差探测方法*

吴云龙[1)] 罗志才[1,2)] 李 辉[3)] 钟 波[1)]

(1)武汉大学测绘学院,武汉 430079
2)武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,武汉 430079
3)中国地震局地震研究所,武汉 430071)

**摘 要** 基于小波分析理论,提出小波收缩阈值降噪对重力梯度测量数据的粗差探测方法,模拟生成含有白噪声和粗差的重力梯度数据,并进行粗差探测的试算和分析。模拟试算结果表明,此方法用于重力梯度测量数据的粗差探测可达到97%的成功率。

**关键词** 卫星重力梯度;粗差探测;小波收缩;阈值;Haar小波

**中图分类号**:P207 **文献标识码**:A

# OUTLIER DETECTION ALGORITHM FOR SATELLITE GRAVITY GRADIENT DATA BY USING WAVELET SHRINKAGE DENOISING

Wu Yunlong[1)], Luo Zhicai[1,2)], Li Hui[3)] and Zhong Bo[1)]

(1) *School of Geodesy and Geomatics*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430079
2) *Key Lab. of Geospace Environment and Geodesy*, *Ministry of Education*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430079
3) *Institute of Seismology*, *CEA*, *Wuhan* 430071)

**Abstract** On the basis of wavelet theory, the outlier detection algorithm in satellite gravity gradiometry using wavelet shrinkage denoising is established, and simulation data with white noise and outliers is generated. The computed and analysis results indicate that wavelet method is a novel outlier detection algorithm with 97% ratio of success.

**Key words**: satellite gravity gradiometry; outlier detection; wavelet shrinkage; threshold; Haar wavelet

## 1 引言

重力场和静态海洋环流探测卫星(GOCE:Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer)于2009年3月17日由欧洲空间局(ESA)成功发射,目前已经在轨运行1年。借助于其搭载的高精度重力梯度仪等关键载荷,该卫星的预期科学目标是以高精度和高分辨率(100 km空间分辨率和1~2 cm精度的全球大地水准面)测定全球静态地球重力场。受观测噪声、仪器故障、姿态误差、计算误差等

* **收稿日期**:2010-06-01
**基金项目**:国家自然科学基金(40874002);国家高技术研究发展计划项目(2008AA12Z105);国家科技支撑计划项目(2008BAC35B05);新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-07-0635)
**作者简介**:吴云龙,男,博士研究生,主要从事卫星重力学研究. E-mail:yunlongwu@gmail.com

多种因素的综合影响,GOCE 重力梯度测量数据中不可避免地存在粗差。模拟研究表明:即使重力梯度数据中仅存在0.2%的粗差也会对重力场模型的求解产生较大影响。因此,粗差探测是 GOCE 重力梯度数据预处理中的重要环节[1-3]。由于卫星真实运行环境中得到的实测数据不可能知道粗差的具体分布位置和数量,因此通过模拟研究,计算验证粗差探测方法的有效性与可靠性是有重要意义的,能够为真实数据预处理方案的制订提供参考。

现有模拟研究中多采用 W 检验法、Grubbs 方法、Dixon 方法等统计检验法对重力梯度测量数据进行粗差探测[2,4]。传统的统计检验法具有算法简单、快速的特点,但存在检测样本容量小、粗差探测成功率较低等不足,尤其对于受多种因素影响的重力梯度测量数据序列,单独的统计检验法往往效果不佳。因此,针对重力梯度测量的海量数据、误差来源广泛等特征,需提出更加有效的粗差探测方法。

小波分析具有良好的时频刻画和多分辨率分析的特性,在大地测量学和地球物理学等领域被广泛应用于信号降噪、滤波与预测、数值计算和数据解释等方面的研究[5-8]。本文基于小波分析理论,提出应用于卫星重力梯度测量数据粗差探测的小波收缩阈值降噪方法,并通过模拟计算和分析验证该方法的有效性和可靠性。

## 2 小波收缩阈值降噪原理与方法

利用小波分析对信号降噪的处理一般需符合以下两个准则[8]:

1)光滑性:在大部分情况下,降噪后的信号应该至少和原信号具有同等的光滑性;

2)相似性:在最坏情况下降噪后的信号和原信号的方差估计应该最小。

目前常见的小波降噪方法有:模极大值去噪、相关性去噪、小波收缩阈值去噪、平移不变量小波去噪等[7-12]。小波收缩阈值降噪法根据方差最小原则,通过对系数的无偏似然估计确定阈值,从而使得降噪后的信号能够最大程度地满足上述两个准则。小波收缩阈值降噪法较之其他降噪方法具有更好的效果,因此得到了广泛的研究和应用。

由于小波收缩阈值降噪法具有良好的时频刻画特性和自适应强的优点,在分析不同频率上的误差特性时具有独特能力,因此,本文将其应用于重力梯度测量数据的粗差定位、滤波和去噪。

设重力梯度测量数据的时间序列为 $x_i$,选取 Haar 小波作为小波基,对重力梯度数据时间序列进行小波分解,其小波系数为:

$$\begin{cases} s_{1,k} = \dfrac{1}{\sqrt{2}}(x_{2k} + x_{2k+1}) \\ d_{1,k} = \dfrac{1}{\sqrt{2}}(x_{2k} - x_{2k+1}) \end{cases} \quad (k = 1, \cdots, n/2 - 1) \quad (1)$$

式中,$s_{1,k}$为平滑系数,$d_{1,k}$为细节系数。

对小波分解得到的各分层小波系数设定阈值,进行软阈值处理,保留信号系数,而使绝大部分噪声系数置为零。对于不同的信号,需要根据其不同的信号特性选取适当的阈值,在重力梯度数据的降噪处理中,根据模拟数据的特征可恰当选取阈值。在未来的 GOCE 卫星实测数据处理中,阈值的选取可通过在数据片段中人为加入少量粗差,再通过不断变换阈值,直至认为加入的粗差能够被检测,从而达到确定阈值的目的。当然也可根据模拟数据降噪的经验选取阈值。

采用逆小波变换由经过阈值处理后的小波系数重建重力梯度信号序列 $x_i^w$,即

$$\begin{cases} x_{2k}^w = \dfrac{1}{\sqrt{2}}(s_{1,k} + d'_{1,k}) \\ x_{2k+1}^w = \dfrac{1}{\sqrt{2}}(s_{1,k} - d'_{1,k}) \end{cases} \quad (k = 1, \cdots, n/2 - 1) \quad (2)$$

式中,$d'_{1,k}$为阈值处理后的各层级细节系数,平滑系数 $s_{1,k}$保持不变。

根据降噪前后的重力梯度数据序列可计算残差 $r_i$,即

$$r_i = x_i - x_i^w, i = 1, \cdots, n \quad (3)$$

由残差序列 $r_i$ 即可确定粗差的位置。

基于上述原理,存在于重力梯度数据中的粗差因其不同于有用信号的特性而呈现尖峰状,因此能够很容易的被探测并剔除。重力梯度测量数据的小波粗差探测方案如图 1 所示。

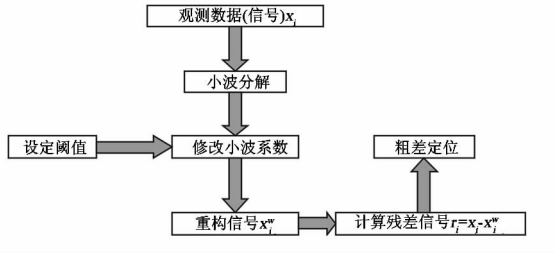



图 1 重力梯度测量数据的小波粗差探测方案

Fig. 1 Wavelet outlier detecting scheme for gravity gradiometry data

## 3 粗差探测评定指标

在卫星重力梯度数据粗差探测的模拟研究中,通常采用以下两个指标来评价粗差探测的效果[12]:

1)成功率:$ORS = n^s/n^o$ (4)

式中,$n^s$ 为探测到的粗差的个数,$n^o$ 为数据集中总的粗差个数;

2)失败率:$ORF = n^f/n$　　(5)

式中 $n+f$ 为有效数据被错误地探测为粗差的个数,$n$ 为总的数据个数。

需要指出的是,GOCE 实测数据中的粗差个数是未知的,实际数据处理中不可能获得上述两个指标。本文通过模拟计算和分析,利用上述两个指标对粗差探测方法进行评价,为 GOCE 实测数据的粗差探测提供参考依据。此外,还可以通过分析粗差探测改正前后的重力梯度数据对求解重力场模型的影响来评价粗差探测的效果,由于计算量太大,本文未采用该方法评价粗差探测的效果。

# 4　模拟计算与分析

## 4.1　模拟数据介绍

1)模型重力梯度数据

采用 300 阶的 EGM96 模型,基于正常椭球 GRS80 模拟了模型重力梯度观测值,并以此数据序列作为"纯净"数据。生成模拟梯度数据所用参数见表 1。

**表 1　模拟数据生成的相关参数**

**Tab. 1　Parameters of simulation data**

| 重力场模型及阶数 | 长半轴(km) | 偏心率 | 轨道倾角(°) | 周期(s) | 平均高度(km) |
|---|---|---|---|---|---|
| EGM96 300 阶 | 6 628 | 0.001 | 96.7 | 5 375 | 250 |

模拟计算分析中采用重力梯度径向分量,数据采样率为 5 秒,数据长度为 30 天,总共 518 401 个数据。

2)含有白噪声和粗差的重力梯度数据

计算整个数据序列的标准差 $\sigma$。以 0 为期望,$0.2\sigma$ 为标准差生成正态分布的白噪声序列,加入到模拟重力梯度数据中。再以 $2\sigma$ 为粗差值,向数据序列中加入总数 5 000 个粗差,含有粗差的数据约占总数据长度的 1%。

本文设计了两种粗差分布的类型:4 900 个粗差以随机分布的形式加入到整个数据序列中,下文称之为离散态粗差;考虑到卫星实际运行中,仪器或者卫星运行状态可能在某个时间段失稳,导致观测数据连续存在问题。因此 100 个粗差以连续的形式加入到数据序列,下文将称其为区域态粗差。

由此组成含有白噪声和粗差的重力梯度数据,用于本文的计算验证分析。

## 4.2　计算结果分析

表 2 为应用小波收缩阈值法对重力梯度数据粗差探测的结果,图 2 为截取部分数据片段的粗差探测前后效果对比。

**表 2　重力梯度数据粗差探测结果**

**Tab. 3　Results of outlier detection of gravity gradiometry data**

| | 成功率(%) | 失败率(%) |
|---|---|---|
| 离散态粗差 | 98.3 | 3.2 |
| 区域态粗差 | 63 | 1 |
| 总体粗差 | 97.6 | 3.1 |

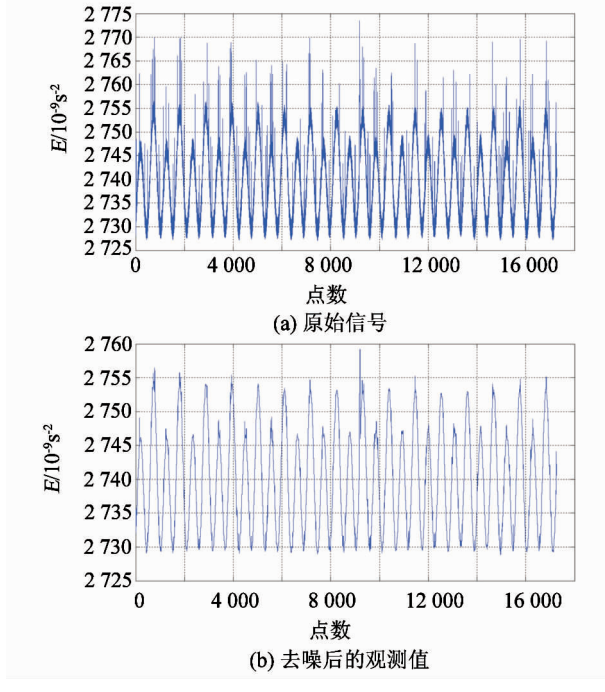



图 2　重力梯度数据粗差探测前后的对比(片段)

Fig. 2　Original data and the data after outlier detection

从上述计算结果可以看出,采用小波收缩阈值方法能够有效地探测绝大部分粗差,整体探测成功率接近 98%;与此同时仅有 3.1% 的观测值被误判为粗差,这是由于测量噪声的影响,部分粗差与正常观测值无法正确区分,从而导致误判。而对于区域态粗差,小波分析方法就显得稍有不足,从结果可以看到,大部分未能被成功探测出来的粗差都集中于区域态粗差。这主要是由于在小波收缩阈值降噪处理中,区域态粗差在特征识别中没有离散态粗差敏感,从而导致探测成功率相对不高。与文献[7 - 12]中所述几种统计方法的研究结果相比较,小波收缩阈值降噪法应用在重力梯度数据粗差探测中初步验证是有效可行的。

# 5　结束语

基于小波收缩阈值降噪的方法对重力梯度测量模拟数据进行粗差探测,并做了相应模拟计算。结

果显示,采用小波方法的粗差探测成功率很高,并能适应多种粗差分布类型,能够有效地应用于重力梯度数据预处理计算中。

未来的研究工作还将对小波基和小波分解层数进行探讨,以获得最适用于重力梯度数据粗差探测的小波分析方法。

## 参 考 文 献


1 ESA. Gravity field and steady-state ocean circulation mission [R]. Reports for mission selection, the four candidate earth explorer core missions, ESA SP-1233(1), 1999.

2 Kern M, et al. Outlier detection algorithms and their performance in GOCE gravity field processing[J]. Journal of Geodesy, 2005, 78: 509-519.

3 罗志才,等. GOCE 卫星重力梯度测量数据的预处理[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2009,34(10):1 163-1 167. (Luo Zhicai, et al. Pre-processing of the GOCE satellite gravity gradiometry data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(10): 1 163-1 167)

4 Bouman J. Quick-look outlier detection for GOCE gravity gradients[J]. Newton's Bulletin 2, 2004: 78-87.

5 朱桂芝,等. 河西地区重力动态变化的二维离散小波多尺度分解[J]. 大地测量与地球动力学,2004,(1):46-49. (Zhu Guizhi, et al. Multi-scale decomposition of 2-D discrete wavelet of dynamic gravity variation in Hexi region[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, (1):46-49)

6 宁津生, 汪海洪, 罗志才. 小波分析在大地测量中的应用及其进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2004,29(8):659-664(Nin Jinsheng, et al. Applications of wavelet analysis in geodesy and its progress[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(8):659-664)

7 曲国庆,等. 小波包消噪方法分析及改进[J]. 大地测量与地球动力学,2008,(4):102-106. (Qu Guoqing, et al. Analysis and improvement of de-noising method for wavelet packet[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, (4):102-106)

8 高志, 余啸海. Matlab 小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004. (Gao Zhi and Yu Xiaohai. Theory and application of Matlab wavelet analysis[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004)

9 何永红,文鸿雁,靳鹏伟. 一种基于小波模极大值去噪的改进算法[J]. 大地测量与地球动力学,2007,(2):94-98. (He Yonghong, Wen Hongyan and Jin Pengwei. An improved de-noising algorithm based on wavelet modular maximum[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, (2): 94-98)

10 李海东,等. 基于阈值法的小波去噪算法研究[J]. 计算机技术与发展,2009,19(7):56-58. (Li Haidong, et al. Wavelet denoising based on technique of threshold[J]. Computer Technology and Development, 2009, 19(7):56-58)

11 柳建新,等. 小波分析在地震资料去噪中的应用[J]. 地球物理学进展,2006,21(2):541-545. (Liu Jianxin, et al. Application of wavelet analysis in seismic data denoising [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2):541-545)

12 秦前清,等. 实用小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1994. (Qing Qianqing, et al. Applications of wavelet analysis[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1994)


(上接第 54 页)


4 祝意青. 1993 年祁连 6.0 级地震前后重力与断层形变异常分析[J]. 高原地震,1997,9(1):59-64. (Zhu Yiqing. Analysis on gravity and fault deformation anomalous variation before and after Qilian earthquake with MS6.0 in 1993[J]. Earthquake Research In Plateau, 1997, 9(1):59-64)

5 祝意青,胡斌,张永志. 永登 5.8 级地震前后的重力场动态图像特征研究[J]. 地壳形变与地震,1999,(1):71-77. (Zhu Yiqing, Hu Bin and Zhang Yongzhi. Study of the dynamic pattern characteristics of gravity field around Yongdeng earthquake of *M*s5.8[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1999, (1):71-77)

6 付广裕,等. 昆仑山口西 8.1 级地震前后重力场动态变化[J]. 大地测量与地球动力学,2003,(1):42-46. (Fu Guangyu, et al. Dynamic gravity changes before and after earthquake of *M*s8.1 occurred in west to Kunlun mountain pass[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, (1): 42-46)

7 Zhang Weimin, et al. Test of the uplift of Tibetan Plateau by FG5 absolute gravimeter at Lhasa station[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(3), 256-258.

8 王勇,等. 重复绝对重力观测的滇西地区和拉萨点的重力变化及其意义[J]. 地球物理学报, 2004, 47(1):95-100. (Wang Yong, et al. Gravity change detected by repeated absolute gravity measurements in the western Yunnan and Lhasa, China and its implication[J]. Chinese J. Geophys., 2004, 47(1):95-100)

9 Tanaka Y, et al. First detection of absolute gravity change caused by earthquake[J]. Geophy. Res. Lett., 2001, 28(15), 2 929-2 981.

10 Han S C and Shum C K. Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake[J]. Science, 2006, 313:658-662.

11 方剑. 利用卫星重力数据计算地球内部密度异常[J]. 地球物理学进展,1994,9(3):60-65. (Fang Jian. Investigation of anomaly density by using satellite gravity data[J]. Progress In Geophysics, 1994, 9(3):60-65)

12 董瑞树,冉洪流. 青藏高原周缘地区大地震发生的地球物理条件的新认识[J]. 山西地震,2003,4:40-42. (Dong Ruishu and Ran Hongliu. A new viewpoint about geophysical condition for strong earthquake occurrence in periphery of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Earthquake Research In Shanxi, 2003, 4:40-42)

13 Sun W and Okubo S. Surface potential and gravity changes due to internal dislocations in a spherical Earth-Ⅰ. Theory for a point dislocation[J]. Geophys. J. Int., 1993, 114: 569-592.

14 李瑞浩. 重力学引论[M]. 北京:地震出版社,1988. (Li Ruihao. Gravitation introduction[M]. Beijing: Seismolgical Press, 1988)

15 邢乐林,等. Sumatra-Adaman 大地震同震和震后形变的 GRACE 卫星检测[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2009,34(9):1 080-1 084. (Xing Lelin, et al. Detection of co-seismic and post-seismic deformation caused by the Sumatra-Andaman earthquake using GRACE[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(9):1 080-1 084)

16 Chen J L, et al. GRACE detects coseismic and postseismic deformation from the Sumatra-Andaman earthquake[J]. Geophys. Res. Lett., 34, 2007, L13302, doi: 10.1029/2007GL030356.