文章编号:1671-8860(2012)02-0187-04　　**文献标志码**:A

利用小波变换分离俯冲带重力异常

王　伟[1,2]　宁津生[2,3]　罗志才[2,3]　汪海洪[2,3]

(1　中国测绘科学研究院,北京市海淀区莲花池西路 28 号,100039)
(2　武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(3　武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘　要:综合应用小波多重分解法和小波多尺度边缘重构方法研究了重力异常的分离,发现该方法可以同时进行纵向和横向影响的有效分离,为复杂地区重力异常的合理分离提供了参考。在模拟实验的基础上,应用该分离方法对琉球俯冲带地区的重力异常进行了分离。在纵向分离中,提出根据重力异常和海底地形的相关性确定合适的分离尺度。在小波多尺度边缘分析中,通过选择合适的尺度范围同样可以达到分离横向重力异常的效果,而且比多尺度边缘重构方法简单。

关键词:重力异常分离;俯冲带;小波变换;小波多尺度;多尺度边缘

中图法分类号:P223.7; P227.1

重力异常数据是研究地球科学问题的重要数据,它包含了大量复杂的地球物理信息。俯冲带地区的重力异常影响更加复杂,包括海水、海底沉积物、海底地形和地壳等的影响。为了研究俯冲带的构造特征,必须对重力异常进行分离,去掉海水和地形等其他干扰的影响。重力异常的分离方法有解析延拓法、频率域滤波法等,这些方法一般只针对横向或者纵向分离,同时有一定的局限性[1-3]。小波分析是一种有效的数学工具,Fedi 和杨文采等采用小波多尺度分解研究了纵向场源的分离;Boschetti 等应用小波多尺度边缘研究了横向场源间的分离[3-6]。本文综合采用小波多尺度分解重构和多尺度边缘重构分离重力异常,在模拟实验的基础上对琉球俯冲带地区的重力异常进行了实际分离实验。

1　多重分解法和小波多尺度边缘重构

小波多尺度分析是将函数表示为一系列近似函数的逼近极限,其中每一个近似函数都是原函数在不同分辨率子空间上的投影。对于重力异常函数 $\Delta g(x)\in L^2(R)$,有:

$$\Delta g(x)=\sum_{k\in Z}c_{j,k}\varphi_{j,k}(x)+\sum_{l=1}^{j}\sum_{k\in Z}d_{l,k}\psi_{j,k}(x) \tag{1}$$

其中,c、d 分别为低频和高频系数;φ 为小波函数;ψ 为尺度函数。

根据 Mallat 算法,小波多尺度重构时,

$$c_{j,k}=\sum_{n\in Z}c_{j+1,k}h(k-2n)+\sum_{n\in Z}d_{j+1,k}g(k-2n) \tag{2}$$

其中,h、g 分别为高频和低频滤波器系数。

异常场是地下不同深度层次和规模的场源引起的异常叠加,并且包含了不同程度的噪声干扰。多重分解法就是根据重力异常的小波多尺度分解重构达到分离噪声等目的[3]。在实际重力异常分离中,需要确定干扰源所在的尺度,如海水、海底地形等对重力异常的影响。通过不同尺度上的信号低频重构,可以去掉一些干扰影响,达到分离异常的目的。但是,重构尺度的合理确定是一个难点。在俯冲带重力异常分离中,本文根据重力异常和海底地形的相关性确定合适的分离尺度。

小波多尺度边缘是不同尺度上的小波系数模极大值点连成的线,它通常是重要结构的边界,含有信号的主要信息,通过这些边缘点就可以根据

收稿日期:2011-12-15。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(40704003);极地测绘科学国家测绘局重点实验室开放研究基金资助项目(200802)。

相应的小波进行信号重构[7]。基于小波多尺度边缘重构的重力异常分离可分为两步[5]：① 通过对信号进行向上延拓或微分进行小波变换，将获得的多尺度边缘作为小波变换的局部极大值；② 通过选择合适的小波多尺度边缘逆小波变换获得重构信号，达到横向分离的目的。

2 模拟实验

2.1 纵向场源分离

设存在质量为 10^{12} kg 的地下点质量场源 M_1，其(x, z)坐标为(350，−300)m，同时存在两个质量都是 10^8 kg 的干扰源 M_2 和 M_3，其(x, z)坐标分别为(128，−5)m 和(484，−5)m。计算场源和干扰源在x轴上1～512 m之间产生的重力异常，采样间隔为 1 m。根据数据特点和各类小波的性质[8]，采用 db5 小波进行 8 尺度分解，根据各尺度重构后的误差，在第 7 尺度上进行低频重构，如图 1 所示，低频重构后的各项误差如表 1 所示。

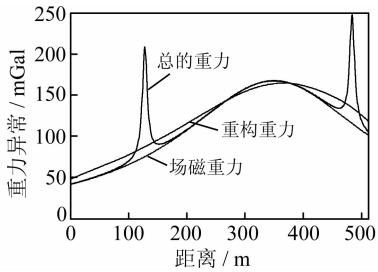

图 1 原始重力异常与重构重力异常图

Fig. 1 Original Gravity Anomaly and Reconstructed Gravity Anomaly

表 1 低频重构后的各项误差/mGal

Tab. 1 Error of Reconstructed Low Frequency Signal/mGal

	尺度 1	尺度 2	尺度 3	尺度 4	尺度 5	尺度 6	尺度 7
平均误差	−7.882 4	−7.882 5	−7.886 8	−7.969 2	−7.916 3	−7.668 3	−7.298 5
标准差/10^{-14}	7.002 6	8.792 5	6.845 6	3.744 7	12.396	7.379 4	20.474
均方差	23.382 8	23.357 4	23.066 4	22.051 8	17.982 9	14.507 0	9.940 0

研究发现，小波多尺度分解重构对于纵向场源的分离有较好的效果，但是重构时的尺度需要具体数据具体分析，一般通过预估埋深和数据量来确定。

2.2 横向场源分离

设存在质量为 10^{11} kg 的点质量场源 M_4 和质量为 10^8 kg 的干扰源 M_5，它们的(x, z)坐标分别为(350，−100)m 和(50，−100)m。计算它们在 x 轴上 1～512 m 之间产生的重力异常，采样间隔为 1 m。实验发现，小波多重分解法对于横向场源的分离效果不好。采用一阶位场小波对总的重力异常进行连续小波变换[9]，获得重力异常的多尺度边缘如图 2 所示。

根据多尺度边缘的特征，选取图 2(a)中右边的两组多尺度边缘线进行信号重构，采用迭代逼近的方法得到分离后的重力异常如图 3 所示。同层场源分离误差如表 2 所示。

表 2 同层场源分离误差表/mGal

Tab. 2 Error of the Same Layer Source After Separation/mGal

	最大值	最小值	标准差	均方差
原始信号	667.42	50.64	0	0
分离信号	694.94	65.79	4.29	19.04

研究发现，小波多尺度边缘重构能够比较有效地分离横向干扰源的影响，但精度不高。通过多尺度边缘还可以推测场源的位置，作为限制条件，有利于场源的进一步反演。

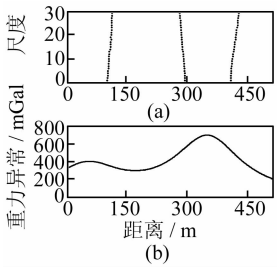

图 2 总的重力异常和对应的小波多尺度边缘

Fig. 2 Total Gravity Anomaly and the Corresponding Wavelet Multi-scale Edges

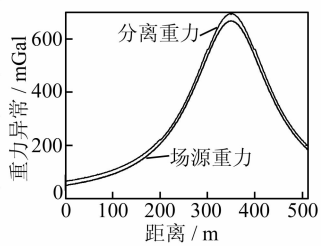

图 3 场源重力异常和分离后的重力异常

Fig. 3 Gravity Anomaly of Field Source and Separated Gravity Anomaly

2.3 混合干扰源分离

如果在§2.2的实验中除横向干扰源 M_5 外，还存在一个质量为 10^8 kg 的点质量纵向干扰源 M_6，其(x, z)坐标为(300，−5)m。计算场源 M_4 和干扰源 M_5、M_6 产生的重力异常。

首先进行小波多尺度分解，根据数据特征采用 db5 小波分解 8 层，并在第 5 尺度上重构信号。如图 4 所示，小波多尺度重构有效地分离了浅层干扰源 M_6 的影响。然后采用小波多尺度边缘重构进行横向场源的分离，最终的分离结果如图 5 所示。

实验发现,综合应用小波多重分解法和小波多尺度边缘重构能比较有效地分离纵向和横向干扰源的影响,但是对于横向干扰源的影响分离精度较低,这也是重力异常分离中普遍存在的难点问题,迄今为止在这方面还没有完全解决[1,10]。

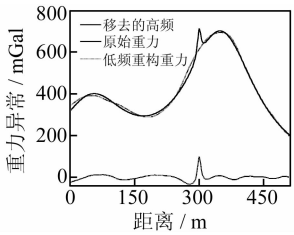

图 4　纵向分离后重力异常对比图

Fig. 4　Comparison Chart of Gravity Anomaly After the Longitudinal Separation

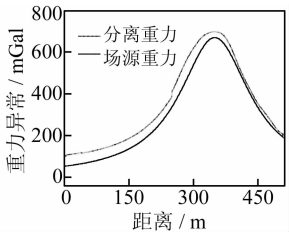

图 5　场源重力异常和分离后重力异常

Fig. 5　Gravity Anomaly of Field Source and Separated Gravity Anomaly

3　俯冲带重力异常分离

选取琉球俯冲带地区东经 122.5°线上根据卫星测高数据和船测重力等计算获得的分辨率为 1′的 256 个空间重力异常数据进行实际重力异常分离实验。根据俯冲带地区重力异常的特征分析,发现前 5 个尺度上主要是 Moho 面上部质量异常的影响,包括海水、海底沉积物、海底地形等的影响[11]。因此在研究俯冲带构造特征时,可以通过在第 5 或第 6 尺度上进行低频重构信号来分离这些纵向影响。

由于采用的数据量较少,首先采用支撑矩较小的 db4 小波对实际重力异常进行 8 尺度分解,根据重力异常和海底地形的相关关系,在第 5 尺度上进行重构,得到重构后的重力异常如图 6 所示。然后采用一阶位场小波对重构后的重力异常进行连续小波变换,得到相应的多尺度边缘,选择图 7(a)中左边两条靠近俯冲带地区的多尺度边缘线进行信号重构,并进行平滑处理,获得分离后的重力异常如图 7(b)所示。

上面的实验是在小尺度范围内进行的,更换小波多尺度边缘分析的尺度范围再次进行实验。对多重分解后的重力异常进行 1～60 尺度的小波多尺度边缘分析,如图 8 所示。将图 8 与图 7 中的多尺度边缘线进行对比发现,在多尺度边缘分析中选择大的尺度范围能够去掉一些横向影响和边缘影响,同样可达到重力异常横向分离的效果。

由于多尺度边缘重构分离横向干扰的精度不高,而且计算较复杂,因此对于大范围的俯冲带重

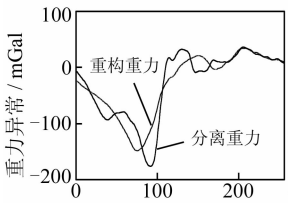

图 6　原始重力异常与重构重力异常

Fig. 6　Original Gravity Anomaly and Reconstructed Gravity Anomaly

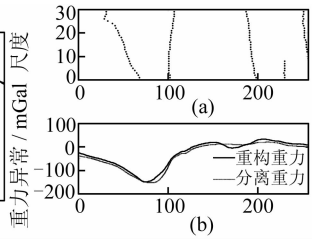

图 7　原始重力小波多尺度边缘和分离后的重力异常

Fig. 7　Wavelet Multi-scale Edges of Original Gravity and Separated Gravity Anomaly

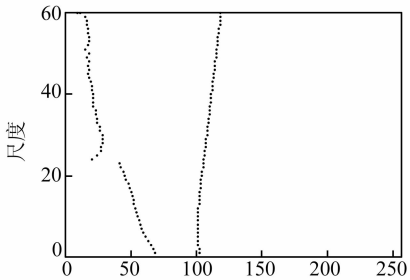

图 8　重构重力异常 1～60 尺度小波多尺度边缘

Fig. 8　Wavelet Multiscale Edges of Reconstructed Gravity Anomaly from 1 to 60 Scales

力异常的横向分离可以采用大尺度范围的多尺度边缘分析方法。故在实际的俯冲带反演中,重力异常可采用只是进行纵向分离后的数据。经过分离后的重力异常反映了俯冲带地区的深部构造,为进一步反演俯冲带的形状或倾角等构造特征提供了数据基础[12]。

4　结　语

本文综合采用小波多重分解法和小波多尺度边缘重构方法分别进行了纵向、横向和混合干扰源分离的模拟实验。实验发现,综合方法能有效地分离复杂干扰的重力异常,但是横向分离的精度不高。在俯冲带地区的实测重力异常分离实验中,提出根据重力异常和海底地形的相关性确定多重分解在第 5 或第 6 尺度进行,根据多尺度边缘分析的尺度范围选择来替代多尺度边缘重构方法,达到横向分离的目的。

参　考　文　献

[1]　Zhang Lili, Hao Tianyao, Jiang Weiwei. Separation of Potential Field Data Using 3-D Principal Component Analysis and Textural Analysis[J]. Geophysical Journal International, 2009, 179(3):1 397-1 413

[2] 郭良辉，梦小红，石磊，等. 重力异常分离的相关法[J]. 地球物理学进展，2008，23(5)：1 425-1 430

[3] 杨文采，施志群，侯遵泽，等. 离散小波变换与重力异常多重分解[J]. 地球物理学报，2001，44(4)：534-542

[4] Maurizio F，Tatiana O. Wavelet Analysis for the Regional-Residual and Local Separation of Potential Field Anomalies [J]. Geophysical Prospecting，1998，46(5)：507-525

[5] Boschetti F，Therond V，Hornby P. Feature Removal and Isolation in Potential Field Data[J]. Geophysical Journal International，2004，159(3)：833-841

[6] 汪海洪，宁津生，罗志才，等. 基于多尺度边缘的重力异常分离方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版，2009，34(1)：109-112

[7] Mallat S，Zhong S. Characterization of Signals from Multiscale Edges[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence，1992，14(7)：710-732

[8] Ingrid D. 小波十讲[M]. 李建平，杨万年. 北京：国防工业出版社，2004

[9] Hornby P，Boschetti F，Horowitz F G. Analysis of Potential Field Data in the Wavelet Domain[J]. Geophysical Journal International，1999，137(1)：175-196

[10] Xu Ya，Hao Tianyao，Li Zhiwei，et al. Regional Gravity Anomaly Separation Using Wavelet Transform and Spectrum Analysis[J]. Journal of Geophysics and Engineering，2009，6(3)：279-287

[11] 王伟，宁津生，汪海洪，等. 俯冲带重力异常的地形影响分析[J]. 大地测量与地球动力学，2009，29(3)：67-69

[12] 宁津生，王伟，汪海洪，等. 应用小波变换确定琉球俯冲带的深部特征[J]. 武汉大学学报·信息科学版，2010，35(10)：1 135-1 137

第一作者简介：王伟，博士生，研究方向为物理大地测量。
E-mail：wwang. geodesy@gmail. com

Gravity Anomaly Separation of the Subduction Zone Based on Wavelet Transform

WANG Wei[1,2] *NING Jinsheng*[2,3] *LUO Zhicai*[2,3] *WANG Haihong*[2,3]

(1 Chinese Academy of Surveying and Mapping，28 West Lianhuachi，Haidian District，Beijing 100039，China)

(2 School of Geodesy and Geomatics，Wuhan University，129 Luoyu Road，Wuhan 430079，China)

(3 Laboratory of Geospace Environment and Geodesy，Ministry of Education，Wuhan University，129 Luoyu Road，Wuhan 430079，China)

Abstract：The separation of the gravity anomaly using wavelet multiple decomposition and wavelet multiscale edges reconstruction are studied. The vertical and horizontal influence can be separated simultaneously by this method，which provides a reasonable reference for the separation of complex regional gravity anomaly. The gravity anomalies of the Ryukyu subduction zone are separated base on simulation experiment. In the vertical gravity anomalies separation，the separation scales can be determined，based on the correlation between gravity anomaly and topography. Wavelet multiscale edge analysis by selecting appropriate scales range can achieve the effect of gravity horizontal separation，which is simpler than multiscale edges reconstruction. The data used to inverse structure of the subduction zone can be got through the separation.

Key words：gravity anomaly separation；subduction zone；wavelet transform；wavelet multiscales；multiscale edge

About the first author：WANG Wei，Ph. D candidate，majors in physical geodesy.
E-mail：wwang. geodesy@gmail. com