

高略,全海燕.基于一种新智能优化算法与谱相关方法对重力固体潮的分析[J].地震工程学报,2018,40(3):535-541.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.535

GAO Lue, QUAN Haiyan. Analysis of Gravity Earth Tide Using a New Intelligent Optimization Algorithm and Spectral Correlation Method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 535-541. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.535

基于一种新智能优化算法与谱相关方法 对重力固体潮的分析

高 略, 全海燕

(昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 根据月球与太阳相对于地球位置的关系, 建立一个三维正交分解模型来揭示重力固体潮中包含的谐波成分。在此基础上, 提出一种基于单形邻域与多角色进化策略智能优化算法的独立分量分析方法, 用以提高算法效率和全局寻优能力; 并结合谱相关方法, 对重力固体潮观测数据进行处理和分析, 观察其频域和时域的变化。最后引入理论信号和理论计算值作为参考背景, 以凸显其异常变化特征。研究表明, 利用该方法可以有效地反映出重力固体潮潮汐的日波、半日波、长周期波等特征。同时, 发现重力固体潮潮汐的异常变化中隐含有地震前兆信息, 通过对云南地区观测数据的分析, 在排除测量误差和环境影响外, 发现在地震前2~5个月内, 重力固体潮的长周期波均呈现出规律性的异常变化。这反映出地震的前兆异常信息, 可能对地震时间和地点的预测提供依据。

关键词: 重力固体潮; 正交分解模型; 智能优化算法; 谱相关

中图分类号: P312.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)03-0535-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.535

Analysis of Gravity Earth Tide Using a New Intelligent Optimization Algorithm and Spectral Correlation Method

GAO Lue, QUAN Haiyan

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: To reveal harmonic components in the Gravity Earth Tide, this paper establishes a 3D orthogonal decomposition model according to the relationship between the moon and the sun relative to the Earth's position. To improve calculation efficiency and global optimization ability, an intelligent optimization algorithm is proposed based on the surface-simplex swarm evolution algorithm. Through combing of the spectral correlation method, observation data for the Gravity Earth Tide are processed and analyzed, and changes in the frequency and time domain are observed. Furthermore, theoretical signals and calculations are introduced as a reference background to highlight abnormal variations. Through analysis of observation data recorded in the

收稿日期: 2017-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目“提取重力固体潮信号中地球物理信息和地震前兆信息的关键信号处理算法研究”(No.41364002)

作者简介: 高 略(1993-), 男, 在读硕士, 主要从事数字信号处理与地球物理信息研究。E-mail: gaolue@foxmail.com。

通信作者: 全海燕(1970-), 男, 副教授, 研究生导师, 从事信号与信息处理、智能优化与决策、地球物理信息研究等方面工作。

E-mail: quanhaiyan@163.com。

Yunnan area from April 1, 2001 to December 1, 2001, characteristics of daily wave, semi-diurnal wave, and long-period wave of Gravity Earth Tides are effectively extracted. Furthermore, hidden earthquake precursor information is found to exist in abnormal changes of the Gravity Earth Tide. After excluding measurement errors and environmental impact, long-period gravity solid tide waves are found to show regular abnormal changes within two to five months before an earthquake. The results show that the proposed method can effectively analyze Gravity Earth Tide signals and reflect abnormal precursor information occurring prior to earthquakes, thereby providing a new method of earthquake prediction.

Key words: gravity earth tide; orthogonal decomposition model; intelligent optimization algorithm; spectral correlation

0 引言

引潮力的大小是日月相对地球位置的函数^[1],地球固体潮就是由其所引起的近似黏弹性的形变现象。研究发现,地球固体潮汐中的重力场是反映地球介质密度变化和各种环境下(固体地球潮汐、内部热流、固体和液体之间质量的交换、表面负荷和地震构造运动等)地球动力学特征最基本和最直接的物理量^[2],通过提取地球固体潮汐中的观测数据可以很好地反映出其重力数值的变化^[3],即地球的重力固体潮汐,而重力固体潮的观测数据还可以分析引潮力的变化特征及地震孕育过程的中短期异常特征。此外,由于地球的重力固体潮汐具有周期性,且能量主要集中在长周期波、日波、半日波和1/3日波这几个频段^[4],所以若能将重力固体潮信号的分解到这几个主要的频段内,那么对研究地球的内部状态、提取地震发生前后的异常信息将有很大帮助。

本文根据重力固体潮的产生原理,建立一个正交三维的分解模型,将重力固体潮谐波分量中包含的主要频段分解到三维空间内,并通过研究大量的数字观测资料,分析各谐波的频域和时域特征,从时间和空间上实现对重力固体潮信号分析。为此,引入独立分量分析(independent component analysis, ICA)对重力固体潮信号实现正交分解,并利用谱相关的方法对分解出的独立分量进行解调。ICA的核心问题之一就是选取性能较好的智能优化算法使目标函数达到最优。但传统的智能优化算法(遗传算法、免疫算法、粒子群算法、差分进化算法、蜂群算法、焰火算法)普遍存在如下弊端:如搜索容易陷入局部最优点,无法收敛到全局最优点;算法收敛到全局最优点的性能依赖算法的控制参数;算法收敛到全局最优点的稳定性不好,方差偏大等。

针对传统智能优化算法存在的这些不足,本文提出一种基于单形邻域与多角色进化策略的智能优化算法,通过设计一个融合单形凸集逼近与随机二维度更新遗传进化的搜索算子,以多角色态实现粒子搜索多样性。这是一种结构简单的群体智能优化算法。通过运用这一方法,将重力固体潮汐分解在日波、半日波、长周期波等主要的几个频段内,且利用云南地区的重力固体潮观测数据对其进行分析,研究地震前后重力固体潮各频段在时间和空间上的变化,提取其所包含的异常信息。最后,通过理论固体潮与实际值存在的差异,排除干扰,从一个新的角度分析震前重力固体潮异常变化的规律。

1 三维正交分解模型

如图1所示,针对地球上的某观测点A,由引潮力产生的重力固体潮潮汐为 F_g 。 F_g 可以分解为分量 F_1 和分量 F_2 。 F_1 垂直于自转轴方向称其为自转轴分量, F_2 平行于地球自转轴方向称其为自转面

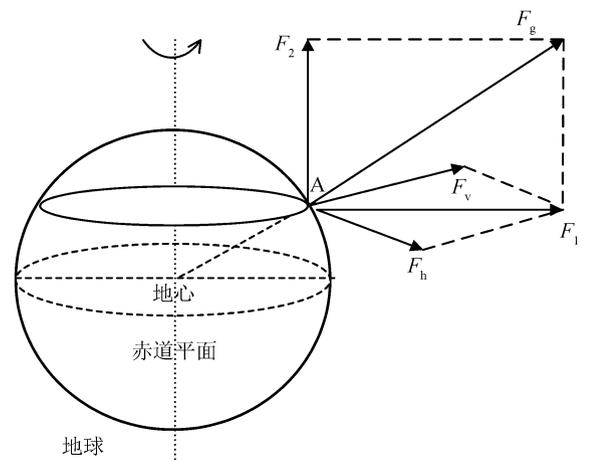


图1 三维正交分解模型

Fig.1 The 3D orthogonal decomposition model

分量,而 F_1 又可以分解为 2 个独立分量 F_v 和 F_h , 这样重力固体潮信号就可以分解为一个三维的正交向量(图 1)。根据三维正交向量分解模型,其中 F_1 既反映地球自转的变化,也反映月球轨道的变化,因此其主要体现重力固体潮信号的日波、半日波、月波、半月波等谐波成分; F_2 和地球自转轴平行,基本不反映地球自转轴的影响,反映地球自转的日波(半日波)系谐波分量很小。

通过建立引潮力的三维正交分解模型,将重力固体潮信号分别分解到自转轴方向和垂直于自转轴的平面上,这样就有效地提取出重力固体潮中能量差异较大的各频段分量。其中能量较小的长周期波分解到了自转轴方向,而能量较大的日波、半日波分解到了垂直于自转轴的平面上。这样就能更加全面地从空间上对重力固体潮观测数据进行分析。

2 一种单形邻域与多角色进化策略的智能优化算法

根据 ICA 算法的基本原理^[6],其核心就是利用性能良好的智能优化算法使目标函数达到最优。在此基础上,本文提出了一种单形邻域与多角色进化策略的智能优化算法。该算法主要包括全局优化问题的建立、粒子所在单形邻域的建立、多角色态进化搜索策略的制定、单形邻域搜索机制的建立。其首先在 R^n 空间中定义每个搜索粒子的单形邻域,并在粒子群体中设计一个多角色态进化搜索策略;然后群体利用多角色态进化搜索策略,通过单形邻域搜索机制,实现群体中的粒子向最优优点进化。

算法步骤如图 2 所示。

在对搜索空间粒子进行初始化后,搜索空间中粒子单形邻域搜索方式最终确定新粒子的方式如下^[7]:

在搜索空间 R^n 中,以均匀分布方式随机选取两个维度 p, q , 构建搜索子空间 R^2 。在此搜索子空间内,每个粒子利用单形邻域搜索算子和多角色态搜索策略搜索新位置,如下:

$$x_{ic1}^{p,q}(t+1) = r_{11} \cdot x_{ic}^{p,q}(t) + r_{12} \cdot x_{j[c,l,g]}^{p,q}(t) + (1 - r_{11} - r_{12}) \cdot x_{oc}^{p,q}(t), r_{11}, r_{12} \in [0,1], \quad (1)$$

$$x_{ic2}^{p,q}(t+1) = r_{21} \cdot x_{ic}^{p,q}(t) + r_{22} \cdot \bar{x}_{j[c,l,g]}^{p,q}(t) + (1 - r_{21} - r_{22}) \cdot x_{oc}^{p,q}(t), r_{21}, r_{22} \in [0,1], \quad (2)$$

$$x_{ic3}^{p,q}(t+1) = r_{31} \cdot x_{ic}^{p,q}(t) + r_{32} \cdot \bar{\bar{x}}_{j[c,l,g]}^{p,q}(t) + (1 - r_{31} - r_{32}) \cdot x_{oc}^{p,q}(t), r_{31}, r_{32} \in [0,1], \quad (3)$$

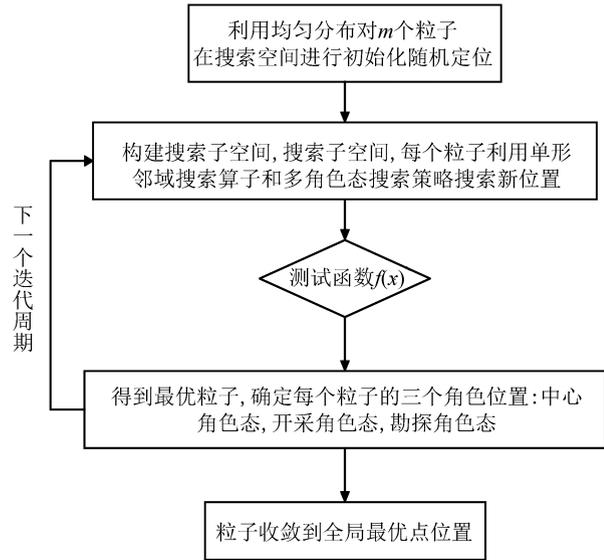


图 2 单形邻域与多角色进化策略的智能优化算法

Fig.2 The intelligent optimization algorithm based on surface-simplex swarm evolution algorithm

$$x_{ic4}^{p,q}(t+1) = r_{41} \cdot x_{ic}^{p,q}(t) + r_{42} \cdot x_{j[c,l,g]}^{p,q}(t) + (1 - r_{41} - r_{42}) \cdot \bar{\bar{x}}_{oc}^{p,q}(t), r_{41}, r_{42} \in [0,1], \quad (4)$$

式中: $x_{ic}^{p,q}(t)$ 是粒子 i 在第 t 次迭代中,在搜索子空间 R^2 上搜索到的原位置; $x_{j[c,l,g]}^{p,q}(t)$ 是粒子 j 在第 t 次迭代中,在搜索子空间 R^2 上搜索到的原位置; $x_{oc}^{p,q}(t)$ 是群中最优粒子 o 在第 t 次迭代中,在搜索子空间 R^2 上搜索到的最优位置; $\bar{x}_{j[c,l,g]}^{p,q}(t)$ 是以位置 $x_{ic}^{p,q}(t)$ 为中心,位置 $x_{j[c,l,g]}^{p,q}(t)$ 的对称位置; $\bar{\bar{x}}_{oc}^{p,q}(t)$ 是以位置 $x_{ic}^{p,q}(t)$ 为中心,位置 $x_{oc}^{p,q}(t)$ 的对称位置。 $r_{11}, r_{12}, r_{21}, r_{22}, r_{31}, r_{32}, r_{41}$ 和 r_{42} 是 8 个在区间 $[0,1]$ 上以均匀分布方式产生的随机数; $x_{ic1}^{p,q}(t+1), x_{ic2}^{p,q}(t+1), x_{ic3}^{p,q}(t+1)$ 及 $x_{ic4}^{p,q}(t+1)$ 是粒子 i 在第 $t+1$ 次迭代中,在搜索子空间 R^2 上搜索到的 4 个新位置。根据在搜索子空间 R^2 上搜索到的这 4 个新中心角色位置,在保持它们在其他维度上位置不变的情况下更新每个粒子在 R^n 上的 4 个新中心角色位置。

根据适应度函数得到的最优粒子,确定每个粒子的三个角色态:

中心角色态:定义为每个粒子搜索到的最优位置 $x_{oc}(t)$;

开采角色态:以最近性为原则,定义为每个粒子搜索到的最新位置 $x_{it}(t+1)$;

勘探角色态:以均匀分布的随机性为原则,定义

为每个粒子以均匀分布在搜索空间随机定位的位置 $x_{ig}(t)$ 。

该算法的优点^[7]：

(1) 在全局搜索性能方面,利用该领域中经典的测试函数对这一智能优化算法的性能进行测试。测试结果表明:对于所有测试函数,尤其是多模态测试函数,该算法均以高精度收敛到了全局最优点。说明该算法在全局搜索性能方面较好。

(2) 在局部收敛性能方面,利用此领域中经典的测试函数对这一智能优化算法的性能进行测试。测试结果表明:与其他经典智能优化算法及其改进算法相比,对于所有测试函数,该算法的收敛速度均达到与它们一致或优于它们。

(3) 在算法控制参数方面,该算法只有一个控制参数——群体数量。相较其他经典与改进的智能优化算法有较多控制参数,而且其性能与其控制参数相关,本算法体现了较强优势。

(4) 在算法可靠性方面,利用此领域中经典的测试函数对这一智能优化算法的性能进行测试。测试结果表明:在50次不同随机初始化下,该算法均未出现偏离全局最优点的例外。相较其他经典与改进的智能优化算法在不同随机初始化下会出现例外性收敛,表明该算法收敛性能的方差指标较好,有较高的可靠性。

3 谱相关方法

由于利用ICA仅实现了重力固体潮信号的加性正交分解,并未揭示重力固体潮信号中的乘性调制关系。而在循环平稳理论中,谱相关描述了信号频谱间的乘性调制关系^[8],所以本文引入谱相关方法对重力固体潮中的独立分量进行乘性解调。

首先根据式(1)求出周期为 T_0 的非平稳随机信号 $x(t)$ 的循环自相关函数:

$$R_x(t, \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum x(t+nT_0+\tau/2)x^*(t+nT_0-\tau/2) \quad (5)$$

对式(1)展开为Fourier级数:

$$R_x^\alpha(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t+\tau/2)x^*(t-\tau/2)e^{-j2\pi\alpha t} dt, \quad (6)$$

式中: $\alpha = n/T_0$ 为循环频率。对式(2)做傅里叶变换,得到

$$S_x^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau)e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (7)$$

$S_x^\alpha(f)$ 为信号 $x(t)$ 的谱相关,它描述了被调制到循环频率 α 上的信号的功率谱分布,因此信号频率分量间的乘性调制关系通过谱相关图被揭示出来。

4 基于新智能优化算法和谱相关方法对重力固体潮信号的解调

4.1 重力固体潮信号的选取

根据重力固体潮的产生机制及本文提出的引潮力三维正交分解模型,经过ICA输出的独立分量应为三维空间上的三个分量(分别为自转轴方向的自转轴分量 F_2 ,和垂直于自转轴平面上的自转面分量 F_3 和 F_g)。由于ICA不会使信号降维,且考虑到实际信号中存在噪声等趋势信号,所以选择三路理论信号作为参考背景,选择一路实测信号作为研究对象。

根据重力固体潮的正交分解模型,若选取同一纬度、不同经度的重力固体潮信号作为输入,那么该信号分解到自转轴二维平面时,由于经度的不同,分解出的信号分量相位也将不同。为解混这些相位上有差异的二维信号分量,需要更多路数的信号输入。同理选取不同经度、不同纬度的重力固体潮信号也会出现相同的情况。但若是选取同经度、不同纬度的重力固体潮信号作为输入,那么分解出的分量只在自转轴一个纬度有相位差异,解混它们不需多余路数的信号输入。所以为了减少ICA算法的信号输入路数,降低实验的复杂性,使实验结果更加准确,本文选取三路同经度、不同纬度的理论重力固体潮信号作为输入。其中三路信号的经纬度分别为: $s_1(t)$:102.746 94°E,25.148 3°N; $s_2(t)$:102.746 94°E,35°N; $s_3(t)$:102.746 94°E,45°N。第四路为实测信号 $s_4(t)$ 。

4.2 重力固体潮信号的处理

本文选取昆明基准地震台(25.148 3°N;102.746 94°E)2001年4月1日至2001年12月1日间的重力固体潮观测数据进行处理和分析。其采样频率为每小时一个采样点。通过提高采样频率以丰富重力固体潮的震前变化信息,有助于震前异常信息的提取和识别。如图3所示为输入的4路重力固体潮信号,图4为输出的独立分量。

基于本文所建立的三维正交分解模型,利用ICA将重力固体潮观测信号分解为4个分量 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ 、 $y_3(t)$ 、 $y_4(t)$ 。其中分量 $y_1(t)$ 和 $y_4(t)$ 分别体现了重力固体潮信号的日波和半日波特征, $y_2(t)$ 为体现噪声的一路趋势信号分量, $y_3(t)$ 则体现了重力固体潮潮汐的长周期波特征。

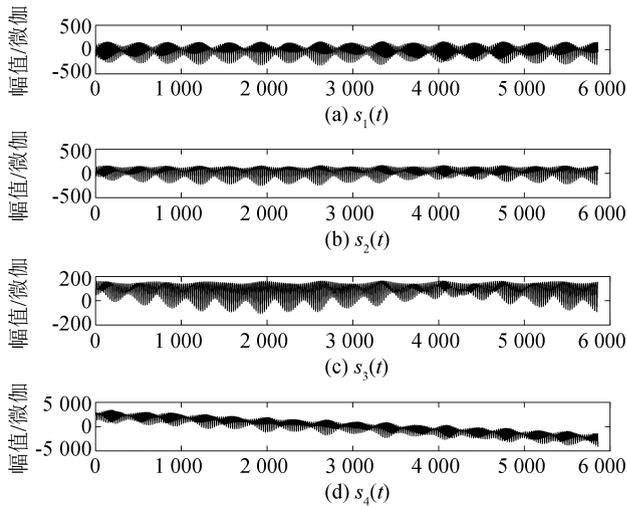


图 3 重力固体潮信号
Fig.3 Gravity tide signals

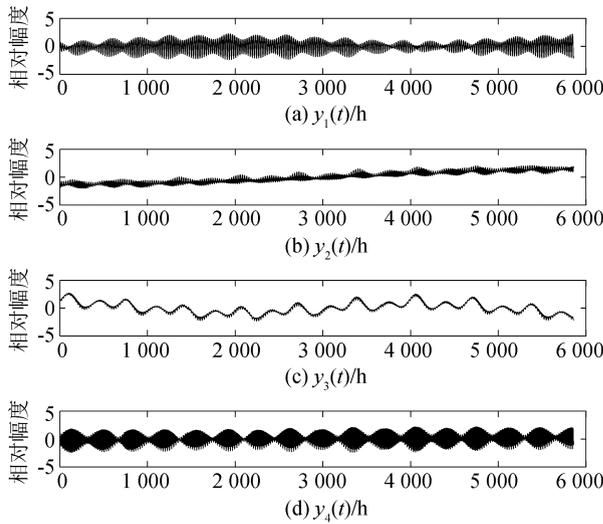


图 4 独立成分

Fig.4 Independent components

4.3 异常分析

通过对观测信号的长周期波做谱相关计算得到相应的频谱分布图[图 5(a)].引入相应的理论信号,得到理论长周期波的频谱分布图[图 5(b)].对比图 5(a)、(b),我们发现理论信号与观测信号的谱相关图中频谱的幅度、数目、位置都存在明显的差异,这意味着观测重力固体潮信号的长周期波中很可能有异常信息的介入。

我们从异常频谱处提取出了长周期波的实测频率值和相对应的理论频率值,并利用理想模型下的计算值作对比(表 1)。其理想模型下计算出的地球固体潮汐理论计算值是由杜德森展开公式求得的潮汐谐波角频率^[3]。

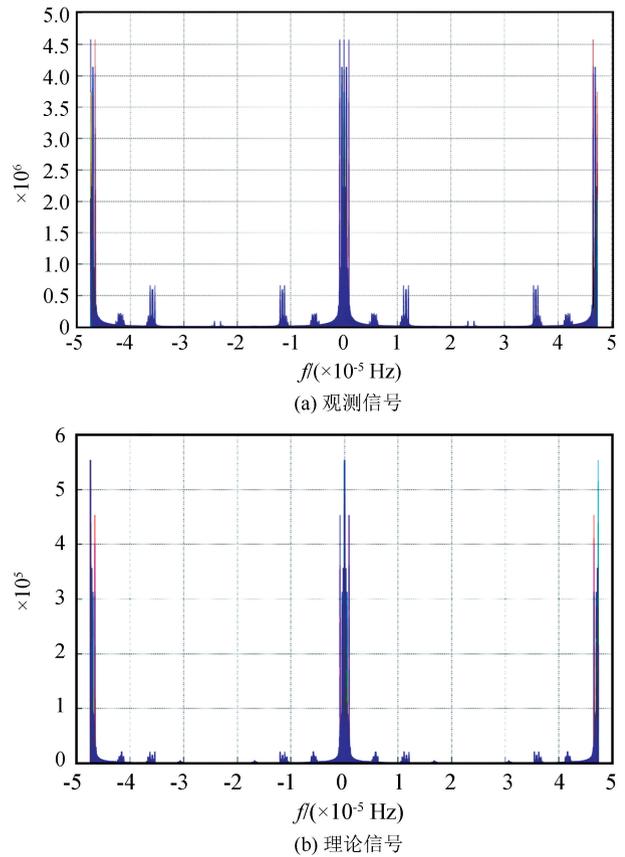


图 5 观测信号和理论信号循环频率 $\alpha=0$ Hz 时的频谱分布图

Fig.5 Frequency spectrum distribution of observed and theoretical signals with the cyclic frequency $\alpha=0$ Hz

通过表 1 可知,实测信号长周期波所解调出的信号频率与理论计算值的最大误差率高达 55%,而理论信号长周期波所解调出的信号误差率均不超过 5%。同时对日波和半日波的研究发现,其实观测频率值与理论固体潮频率值成分一致,且仪器记录到清晰的重力固体潮信息,这说明仪器正常,排除了仪器故障的可能。这进一步说明了长周期波中含有地震的异常信息。于是我们在时域上对其进行分析,发现了震前的长周期时域波形出现了短临异常(图 6)。

通过表 2 可知,2001 年 4 月 1 日至 2001 年 12 月 1 日间云南地区共发生了 3 次地震。通过对其重力固体潮观测数据长周期波的时域进行分析发现,每次地震发生前其长周期波都会发生不同程度的短临异常(图 5)。我们对多个异常点进行研究时发现,这些异常点平均都出现在地震前的 2~5 个月。且震后其完全恢复到正常形态,这很有可能就是震前的异常信息变化。

表1 观测信号及理论信号长周期波的谱相关分析

Table 1 Spectral correlation analysis of long-period waves from observed and theoretical signals

异常分析	乘性调制频率成分 /Hz	解调对应的加性傅里叶 频率成分/Hz	理论计算频率 /Hz	误差率/%	所属波系
观测信号	$f_1 = 4.268 \ 4e-07$	$9.485 \ 3e-07$	$8.472 \ 5e-7(M_f)$	11.9	长周期波
	$\alpha_1 = 5.216 \ 9e-07$	$9.485e-08$	$6.337 \ 7e-8(M_{sa})$	49.7	
	$f_2 = 2.845 \ 6e-07$	$9.011 \ 1e-07$	$8.472 \ 5e-7(M_f)$	6.4	
	$\alpha_2 = 6.165 \ 5e-07$	$3.319 \ 9e-07$	$4.200 \ 4e-7(M_m)$	21	
	$f_3 = 2.845 \ 6e-07$	$6.165 \ 5e-07$	$8.472 \ 5e-7(M_f)$	27.2	
	$\alpha_3 = 3.794 \ 1e-07$	$1.897 \ 1e-07$	$4.200 \ 4e-7(M_m)$	54.8	
	$f_4 = 2.845 \ 3e-07$	$6.639 \ 4e-07$	$8.472 \ 5e-7(M_f)$	21.6	
	$\alpha_4 = 3.794 \ 1e-07$	$9.488e-08$	$6.337 \ 7e-8(M_{sa})$	49.7	
	$f_5 = 1.897 \ 1e-07$	$2.846e-07$	$4.200 \ 4e-7(M_m)$	32.2	
	$\alpha_5 = 1.422 \ 8e-07$	$9.485 \ 7e-08$	$6.337 \ 7e-8(M_{sa})$	49.7	
	$f_6 = 1.422 \ 8e-07$	$4.138 \ 6e-07$	$4.200 \ 4e-7(M_m)$	1.5	
	$\alpha_6 = 9.485 \ 3e-08$	$4.743e-08$	$3.168 \ 7e-8(Sa)$	50	
理论信号	$f_1' = 3.815 \ 2e-07$	$8.266 \ 3e-07$	$8.472 \ 5e-7(M_f)$	2.4	长周期波
	$\alpha_1' = 4.451 \ 1e-07$	$6.359e-08$	$6.337 \ 7e-8(M_{sa})$	0.03	
	$f_2' = 1.907 \ 6e-07$	$4.451 \ 1e-07$	$4.200 \ 4e-7(M_m)$	6	
	$\alpha_2' = 2.543 \ 5e-07$	$6.359e-08$	$6.337 \ 7e-8(M_{sa})$	0.03	
	$f_3' = 2.225 \ 5e-07$	$8.584 \ 2e-07$	$8.472 \ 5e-7(M_f)$	1.3	
	$\alpha_3' = 6.358 \ 7e-07$	$4.133 \ 1e-07$	$4.200 \ 4e-7(M_m)$	1.6	

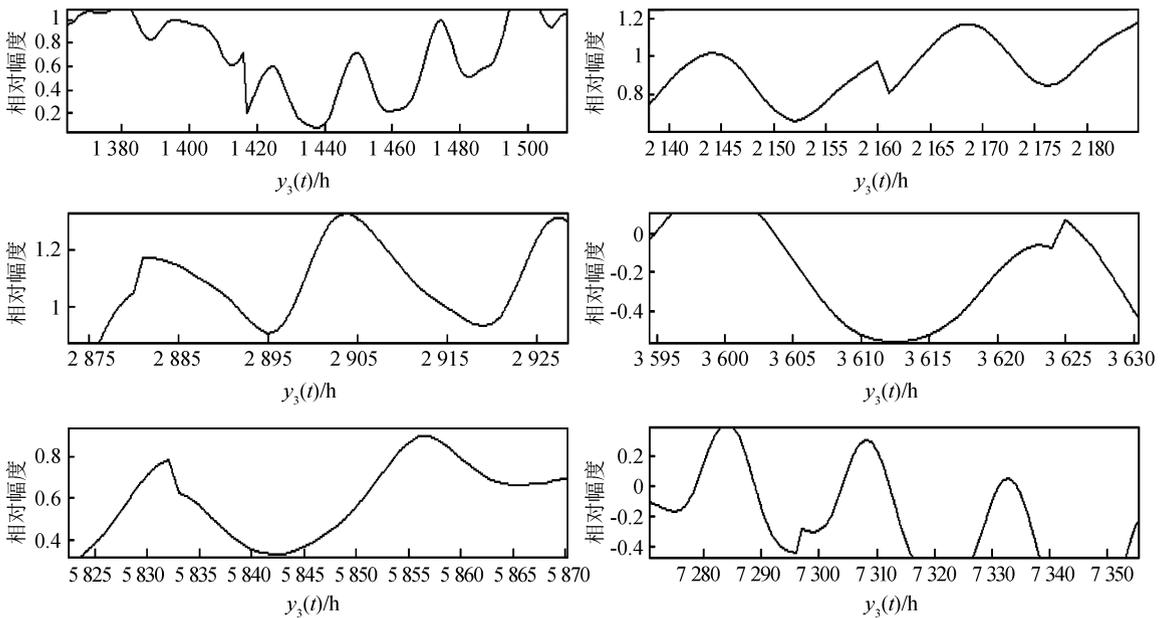


图6 异常点波形

Fig.6 Waveform of anomalous points

5 结论

实验证明,本文所提出的基于单形邻域与多角色进化策略的智能优化算法与传统的智能优化算法相比,不但提高了全局搜索性能和局部收敛性能,而且简化了算法控制参数,加强了算法的可靠性。在基于这一优化算法的ICA基础上我们对重力固体潮信号很好地实现了加性分解,且利用谱相关方法

对分解出的独立分量实现了乘性解调。

通过对云南地区重力固体潮观测数据的研究,我们得到了地震时重力固体潮长周期波异常的频谱分布图。在排除了仪器问题和环境因素的影响外,其分布图中体现出了地震前的异常信息。通过对其时域进行研究,发现地震前2~5个月长周期波均会发生短临异常,且其随地震频率的增加而增多。这很有可能就是我们所需的地震前兆信息,证明本文

表 2 地震前异常

Table 2 Anomalies before earthquakes

时间	地点	地震信息			异常点 /h	震前天数 /天
		震中位置	震中距/km	震级		
2001-07-10	楚雄	24.93°N,101.38°E	139.59	5.3	1 416	161
					2 160	130
2001-07-15	江川	24.33°N,102.63°E	92.08	5.1	2 880	105
					3 624	74
2001-10-27	永胜	26.23°N,100.57°E	248.91	5.9	5 832	84
					7 296	23

所提出的方法对重力固体潮信号的分析 and 震前异常信息的提取行之有效,且为地震异常信息的识别提供了一条新的思路。

参考文献(References)

- [1] 李智蓉,张晓东.潮汐应力与大震关系研究[J].地震,2011,31(4):48-57.
LI Zhirong,ZHANG Xiaodong.Relationship of Tidal Stress and Large Earthquakes[J].Earthquake,2011,31(4):48-57.
- [2] 孟建国,李惠玲,李峰,等.泰安地震台重力异常信息提取初步分析[J].大地测量与地球动力学,2017,37(5):526-530.
MENG Jianguo,LI Huiling LI Feng,et al.Preliminary Analysis of the Factors of Tai'an Seismic Gravity Anomaly Information Extraction and Influence[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2017,37(5):526-530.
- [3] 李希亮,刘希强,张玲,等.高阶统计量在形变固体潮汐异常信息提取中的应用[J].西北地震学报,2012,34(4):359-364.
LI Xiliang,LIU Xiqiang,ZHANG Ling,et al.Application of Higher-order Statistics on Extracting the Tidal Deformation Anomalies [J].Northwestern Seismological Journal,2012,34(4):359-364.
- [4] 许厚泽.固体地球潮汐[M].武汉:湖北科学技术出版社,2010.
XU Houze.The Tides of the Solid Earth[M].Wuhan:Hubei Science and Technology Press,2010.
- [5] 赵栋,易立新,王广才,等.地下水地中地震前兆信息提取方法研究[J].地震工程学报,2013,35(2):334-341.
ZHAO Dong,YI Lixin,WANG Guangcai,et al.Research on the Technology of Extracting Earthquake Precursor Information from Ground Water Level[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(2):334-341.
- [6] 余先川,胡丹.盲源分离理论与应用[M].北京:科学出版社,2011.
YU Xianchuan,Hu Dan.Theory and Application of Blind Source Separation[M].Beijing:Science Press,2011.
- [7] QUAN Haiyan,SHI Xinling.A Surface-Simplex Swarm Evolution Algorithm[J].Wuhan University Journal of Natural Sciences,2017,22(1):38-50.
- [8] 王洪.谱相关的数学关系与物理意义[J].电子学报,2015,43(4):810-815.
WANG Hong.Mathematical Relationships and Physical Functions of Spectral Correlation[J].Acta Electronica Sinica,2015,43(4):810-815.
- [9] 张晶,张立.中强震前形变固体潮汐资料短期信息的提取[J].地震,2003,23(3):71-78.
ZHANG Jing,ZHANG Li.Short-term Anomaly Extracted from Tidal Deformation Data Before Moderately Strong Earthquakes[J].Earthquake,2003,23(3):71-78.
- [10] 张晶,牛安福,高福旺,等.数字化形变观测提取的地震短临异常特征[J].地震,2003,23(1):71-76.
ZHANG Jing,NIU Anfu,GAO Fuwang,et al.On the Imminent and Short-term Characteristics of Earthquake Anomalies Obtained from the Digital Deformation Observations [J].Earthquake,2003,23(1):71-76.
- [11] 黄知涛.循环平稳信号处理及应用[M].北京:科学出版社,2006.
HUANG Zhitao.The Processing and Application of Cyclic Stationary Signals[M].Beijing:Science Press,2006.
- [12] 周江存,孙和平,徐建桥,等.地球内部应变与应力固体潮[J].地球物理学报,2013,56(11):3779-3786.
ZHOU Jiangcun,SUN Heping,XU Jianqi,et al.Tidal Strain and Tidal Stress in the Earth's Interior[J].Chinese Journal of Geophysics,2013,56(11):3779-3786.
- [13] MELEHIOR P.The Tides of the Planet Earth[M].Oxford:Pergamon Press,1987.
- [14] YOSHIKI Sue,MASASHI Hayakawa.An Approach to the Validation of Thermal and Electromagnetic Earthquake Precursors:Effects of Earth Tides[J].Journal of Asian Earth Sciences,2011,41:428-433.
- [15] 李希亮.高阶统计量在地震前兆数字化资料分析中的应用[D].合肥:中国科学技术大学,2009.
LI Xiliang.Application of High-order Statistics in Digital Data Analysis of Earthquake Precursors[D].Hefei:University of Science and Technology of China,2009.
- [16] LAURENT Metivier,OLIVIER De Viron,CLINTON P Conrad,et al.Evidence of Earthquake Triggering by the Solid Earth Tides[J].Earth and Planetary Science Letters,2009,278:370-375.
- [17] 蒋骏,张雁滨,林钢,等.固体潮观测中的震颤异常波[J].地球物理学报,2012,55(2):462-471.
JIANG Jun,ZHANG Yanbin,LIN Gang,et al.The Tidal Instruments Recorded Abnormal Tremor Wave [J].Chinese Journal of Geophysics,2012,55(2):462-471.