



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

中国科技核心期刊

基于可调品质因子小波和簇稀疏增强的磁异常信号特征提取研究

贺王鹏 胡洁 陈彬强 张绍华 易忠

Feature extraction of abnormal magnetic signals using tunable Q -factor wavelet transform and overlapping group shrinkage algorithm

HE Wangpeng, HU Jie, CHEN Binqiang, ZHANG Shaohua, YI Zhong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2020.04.007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

航天器传动部件振动数据稀疏多分类智能故障诊断

Sparsity assisted intelligent multi-classifier for fault diagnosis using vibration data of spacecraft transmission chain
航天器环境工程. 2018, 35(4): 359–364 <https://doi.org/10.12126/see.2018.04.009>

基于集合经验模态分解和小波阈值的真空泵振动信号降噪方法

De-noising based on EEMD and wavelet threshold for vacuum pump vibration signals
航天器环境工程. 2019, 36(5): 450–457 <https://doi.org/10.12126/see.2019.05.007>

基于小波包变换及相关系数法的复合材料层合板冲击位置识别研究

The impact location identification of composite laminate based on wavelet packet transform and correlation coefficient method
航天器环境工程. 2017, 34(5): 464–470 <https://doi.org/10.12126/see.2017.05.002>

高精度微弱磁场信号采集系统的设计与实现

Design and implementation of signal acquisition system for high-precision weak magnetic field
航天器环境工程. 2020, 37(1): 60–64 <https://doi.org/10.12126/see.2020.01.010>

基于Hilbert-Huang变换的航天器发射段力学环境分析

Analysis of spacecraft mechanical environment during lift-off based on Hilbert-Huang transform
航天器环境工程. 2018, 35(3): 223–227 <https://doi.org/10.12126/see.2018.03.004>

基于江门地下中微子实验的地球中微子信号研究

Study of geo-neutrinos signals based on the data from Jiangmen underground neutrino observatory
航天器环境工程. 2018, 35(2): 158–164 <https://doi.org/10.12126/see.2018.02.010>

基于可调品质因子小波和簇稀疏增强的磁异常信号特征提取研究

贺王鹏¹, 胡洁¹, 陈彬强², 张绍华³, 易忠³

(1. 西安电子科技大学 空间科学与技术学院, 西安 710071; 2. 厦门大学 航空航天学院, 厦门 361005;
3. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 在磁异常信号目标探测中, 由于存在背景噪声的干扰, 导致采集到的磁信号中的有用特征极其微弱, 从而极大地增加了特征提取的难度。文章提出了一种基于重叠簇收缩算法的可调品质因子小波变换的稀疏特征提取方法。与传统的固定品质因子值相比, 该方法可根据信号的振荡特性调整品质因子, 从而有效地诱导稀疏; 此外, 重叠簇收缩算法可有效地从具有簇特性的信号中提取微弱特征, 从而增强特征的提取精度。经工程验证, 将该方法应用于磁异常信号特征提取, 可从复杂背景干扰信号中精确地提取出有用的稀疏目标特征。

关键词: 磁信号; 微弱特征提取; 可调品质因子小波变换; 稀疏表示; 重叠簇收缩算法

中图分类号: V416.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2020)04-0355-06

DOI: [10.12126/see.2020.04.007](https://doi.org/10.12126/see.2020.04.007)

Feature extraction of abnormal magnetic signals using tunable Q -factor wavelet transform and overlapping group shrinkage algorithm

HE Wangpeng¹, HU Jie¹, CHEN Binqiang², ZHANG Shaohua³, YI Zhong³

(1. School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: For the target detection of abnormal magnetic signals, the extracted effective features are so weak that they are easily disturbed by a strong background noise, with a great uncertainty for the quality of the measured data. To address this problem, a data-driven sparse feature extraction method based on the tunable Q -factor wavelet transform (TQWT) and the overlapping group shrinkage algorithm is developed in this paper. Compared with the traditional fixed Q -factor wavelet transform, the proposed method is superior in the fact that it allows flexibly tuning the Q -factor according to the oscillation characteristics of the useful features of the signal. In this way, the sparsity of the extracted features can be induced more effectively. In addition, with the overlapping group shrinkage (OGS) algorithm, the weak features from signals with group property can be effectively extracted, to enhance the extraction accuracy of features. Finally, the proposed method is applied to the feature extraction of the magnetic anomaly signal with a case example, which verifies the effectiveness of the method for the magnetic signal target detection.

Keywords: magnetic signals; weak feature extraction; tunable Q -factor wavelet transform; sparse representation; overlapping group shrinkage algorithm

收稿日期: 2019-12-30; 修回日期: 2020-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 51805398); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(编号: 2018JQ5106); 北京卫星环境工程研究所 2019 年度创新基金资助项目(编号: CAST-BISEE 2019-043)

引用格式: 贺王鹏, 胡洁, 陈彬强, 等. 基于可调品质因子小波和簇稀疏增强的磁异常信号特征提取研究[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(4): 355-360

HE W P, HU J, CHEN B Q, et al. Feature extraction of abnormal magnetic signals using tunable Q -factor wavelet transform and overlapping group shrinkage algorithm[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(4): 355-360

0 引言

地球上的磁性物体存在固有磁场并能产生感生磁场,这些磁场与地磁场相互作用,会改变物体附近地磁场的分布情况,使得实际测量的地磁场强度和理论磁场强度有所差异,这种现象称为局部地磁异常现象。磁性运动目标产生的磁异常信号包含着很多重要信息,可反映目标的方位、距离、速度等^[1]。对磁异常信号进行探测并反演,可追踪和定位目标^[2]。然而,由于磁异常信号微弱,探测过程中信号又易受到强噪声背景的干扰,导致磁异常信号特征提取的难度极大。因此,如何从复杂的观测信号中有效地去除测量信号中的噪声,精确提取出隐藏在复杂噪声干扰中的有用特征信息,是磁异常信号探测的关键环节,对后续反演结果的准确性具有重要的意义。

信号处理与特征提取是模式识别等领域的基础和关键,在计算机视觉、语音分析等诸多方面得到了蓬勃发展。近年来,在工程中常见的傅里叶变换和小波变换等信号处理与特征提取方法,其基本思想都是对基函数进行分解以获得与特征波形相吻合的基函数,使提取的信号具有稀疏特性^[3]。其中,基于小波的特征提取方法受到了国内外学者们的青睐^[4]。2009年,小波分析领域著名学者 Mallat 从稀疏的视角阐述了小波在各个领域的应用。在理想的特征提取分析中,小波的品质因子应该和待分析信号的振荡特性具有最佳匹配。例如,具有相对低品质因子的小波适合处理分段光滑的信号,而具有较高品质因子的小波则适合分析振荡信号。然而,对于传统方法如离散小波变换,其品质因子固定且值较小,虽然能够实现分段光滑信号,如非振荡瞬态成分等的稀疏表示,但难以实现高振荡成分的稀疏表示^[5]。

可调品质因子小波变换(tunable Q -factor wavelet transform, TQWT)^[6]能避免传统离散小波变换的缺陷。TQWT 可以灵活地设置小波基函数的品质因子,来调节小波滤波器的特性,使小波的振荡特性与待分析信号的振荡特性相吻合,进而增强信号表示的稀疏性。然而,对于具有簇特性的信号,小波基函数展开方法在最大化稀疏特征提取方面仍缺乏自适应性,难以最佳匹配稀疏的特点,从而影响特征提取的性能。针对此类信号的稀疏处理,需在小波分解降噪结果的基础之上采用簇稀疏技术进

一步提高特征提取的效果。重叠簇收缩(overlapping group shrinkage, OGS)算法是一种新兴的、有效的针对具有簇特性信号的提取算法^[7-8],能充分利用特征波形具有的簇稀疏结构来增强特征提取结果。

本文提出了一种基于重叠簇收缩的可调品质因子小波域稀疏特征提取方法。该方法将 TQWT 和 OGS 相结合,首先利用 TQWT 对信号进行稀疏处理;然后,采用峭度指标对重构的信号进行优选;最后,对优选重构的信号进行 OGS 算法处理以消除无关噪声,从而提高处理精度。由于 TQWT 算法的计算时间复杂度为 $O(rM \ln M)$,而 OGS 算法的计算时间复杂度为 KN (其中 N 为信号长度, K 为簇的大小),两种算法的结合满足工程对算法实时性的要求。

1 可调品质因子小波变换和重叠簇收缩基本理论

1.1 可调品质因子小波变换 (TQWT)

1.1.1 TQWT 基本原理

TQWT 通过设置品质因子来实现小波基振荡特性可调化,有效地弥补了离散小波变换存在的不足。与传统方法相比, TQWT 在概念上更为简单,操作也更加灵活。

图 1 为 TQWT 的滤波器结构示意图,其中具体的低、高通尺度伸缩所对应的尺度参数 α 和 β 分别见图 2(a)和图 2(b)。假设原始输入离散信号的采样频率为 f_s ,则对于 TQWT 中的低通滤波通道,其输出信号的采样频率为 αf_s ;而对于高通滤波通道,输出的采样频率则为 βf_s 。

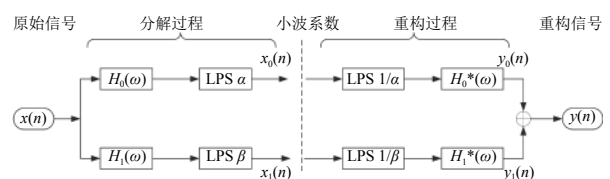


图 1 TQWT 滤波器结构示意图

Fig. 1 Block diagram of filter banks for the implementing TQWT

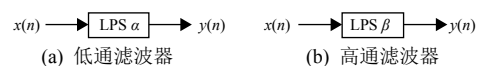


图 2 TQWT 低、高通尺度伸缩滤波器示意

Fig. 2 Block diagram of scalable low-pass and high-pass filters in the TQWT

尺度参数 α 和 β 与控制参数 Q 、 r 的关系为

$$\beta = \frac{2}{Q+1}, \quad \alpha = 1 - \frac{\beta}{r}. \quad (1)$$

1.1.2 TQWT 的滤波器组设计

如前所述, TQWT 是在频域上完成小波基的设计, 它的控制参数不仅影响小波滤波器组的变采样结构, 也决定了小波基的时域振荡特性。在 TQWT 的重构阶段, 其低、高通滤波器 $H_0(\omega)$ 和 $H_1(\omega)$ 分别为:

$$H_0(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq (1-\beta)\pi \\ \theta\left(\frac{\omega + (\beta-1)\pi}{\alpha + \beta - 1}\right), & (1-\beta)\pi < |\omega| < \alpha\pi \\ 0, & \alpha\pi \leq |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (2)$$

$$H_1(\omega) = \begin{cases} 0, & |\omega| \leq (1-\beta)\pi \\ \theta\left(\frac{\alpha\pi - \omega}{\alpha + \beta - 1}\right), & (1-\beta)\pi < |\omega| < \alpha\pi \\ 1, & \alpha\pi \leq |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$\theta(\omega) = \frac{1}{2}(1 + \cos \omega) \sqrt{2 - \cos \omega}, \quad |\omega| \leq \pi. \quad (4)$$

基于 Daubechies 规范正交基的原理, 采用函数 $\theta(\omega)$ 构造低通滤波器 $H_0(\omega)$ 和高通滤波器 $H_1(\omega)$ 的过渡带, 使其满足重构条件 $|H_0(\omega)|^2 + |H_1(\omega)|^2 = 1$ 。

1.1.3 TQWT 参数设置

品质因子 Q 、冗余度 r 和分解层数 J 为可调品质因子小波变换的主要参数。其中: $Q(Q \geq 1)$ 是小波基振荡特性的控制参数, 高品质因子的 TQWT 对应的小波基的振荡次数较多, 而低品质因子的 TQWT 对应的小波基的振荡次数则较少; r 是指变换的总过采样率; J 定义了小波变换的阶数, TQWT 是由双通道滤波器组序列组成, 每个滤波器组的低通输出作为输入到后续的过滤器组, 而参数 J 为过滤器组的数量。图 3 为 TQWT 小波函数在 2 组不同参数下的波形及频率响应。

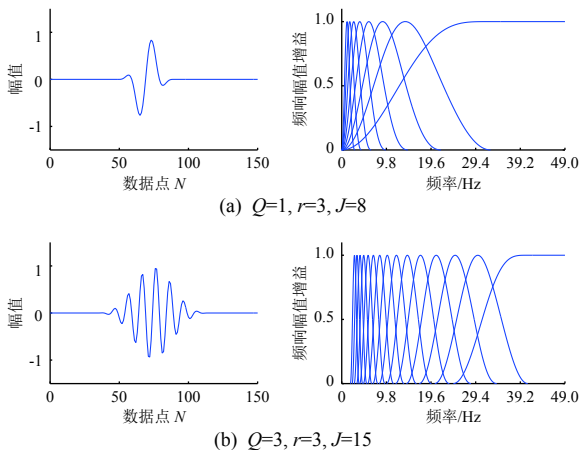


图3 TQWT 小波函数在 2 组不同参数下的波形及频率响应
Fig. 3 TQWT wavelets and frequency responses for two sets of factors

1.2 重叠簇收缩 (OGS) 算法

本文研究磁异常信号微弱特征的提取问题, 假设观测到的含噪信号 \mathbf{y} 可表示为

$$\mathbf{y}(i) = \mathbf{x}(i) + \mathbf{w}(i), \quad i \in I, \quad (5)$$

其中: $\mathbf{x}(i)$ 表示具有簇稀疏特性的信号; $\mathbf{w}(i)$ 表示背景噪声, 一般为高斯白噪声。由于信号具有簇稀疏特性, 故将信号 \mathbf{x} 视为一个整体, ℓ_1 范数和 ℓ_2 范数相结合可得到如下惩罚函数:

$$R(\mathbf{x}) = \sum_{i \in I} \left[\sum_{j \in J} |\mathbf{x}(i+j)|^2 \right]^{1/2}. \quad (6)$$

其中: i 为簇的索引值; j 为第 i 组中系数的索引值。对于一个长度为 N 且簇大小为 M 的矢量 \mathbf{x} , 我们可以设 I 和 J 分别为:

$$I = \{0, \dots, N-1\}, \quad (7)$$

$$J = \{0, \dots, K-1\}. \quad (8)$$

因此, 该问题的目标函数可构造为

$$F(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2 + \lambda R(\mathbf{x}), \quad (9)$$

其中, λ 为正 regularization 参数。

对式 (9) 中的 $\mathbf{x}(i)$ 进行一阶求导, 可得其最优解:

$$\frac{\partial F(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}(i)} = \mathbf{x}(i) - \mathbf{y}(i) + \lambda \mathbf{x}(i) r(i; \mathbf{x}). \quad (10)$$

其中,

$$r(i; \mathbf{x}) := \sum_{j \in J} \left[\sum_{k \in J} |\mathbf{x}(i-j+k)|^2 \right]^{-1/2}. \quad (11)$$

令式 (10) 等于 0, 则有

$$\mathbf{y}(i) = \mathbf{x}(i) + \lambda \mathbf{x}(i) r(i; \mathbf{x}). \quad (12)$$

因此, 求解式 (12) 即可得到 \mathbf{x} 的最优解:

$$\mathbf{x}(i) = \frac{\mathbf{y}(i)}{1 + \lambda r(i; \mathbf{x})}, \quad i \in I. \quad (13)$$

这一连续迭代的方法就是重叠簇收缩 (OGS) 算法, 以此来求出目标函数式 (9) 的最优解。OGS 算法的参数主要包括: 正则化参数 λ 、簇的大小 M 以及迭代次数 N_{it} 。由于 OGS 算法具有严格的凸性, 所以其最优解唯一。

1.3 峭度指标

峭度 K (Kurtosis) 是信号分析与特征提取中的重要统计指标之一, 反映了信号分布特点^[9-10]。 K 对较大值的数据特别灵敏, 容易捕捉到探测信号中的

瞬态冲击信息。峭度的定义为

$$K = \int_{-\infty}^{+\infty} [z(t) - \bar{z}]^4 w(z) dz, \quad (14)$$

式中: $z(t)$ 为信号的幅值; \bar{z} 为信号幅值的均值; $w(z)$ 为概率密度函数。 K 的离散化公式为

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z}_i)^4, \quad (15)$$

式中 N 为采样长度。

当信号中存在较大的脉冲时, 常采用峭度指标 K_V 作为特征导引指标,

$$K_V = \frac{K}{\sigma^4}, \quad (16)$$

其中 σ 为标准差。

2 磁异常信号的小波域稀疏优化特征提取算法

本文针对复杂背景下磁异常信号微弱特征提取难题, 结合目标特征提取的 TQWT 和 OGS 算法, 提出了一种基于 OGS 的 TQWT 簇稀疏特征提取方法, 建立目标函数

$$F(x) = \frac{1}{2} \|y - \phi x\|_2^2 + \lambda R(x). \quad (17)$$

其中: ϕ 为 TQWT 变换; $R(x)$ 为根据 OGS 算法构造的惩罚函数。

该算法的详细流程如图 4 所示, 具体步骤如下:

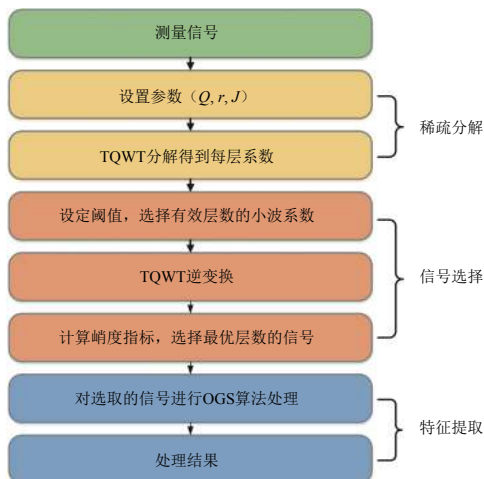


图 4 基于 OGS 的 TQWT 算法流程

Fig. 4 Flowchart of the TQWT algorithm based on OGS

1) 设置参数 (Q, r, J) , 利用可调品质因子小波变换对测量信号进行分解, 得到详细系数以及每层系数所占的能量比。

2) 第一次层级筛选。针对能量百分比设定阈

值, 认为超过阈值的能量为有效能量, 去除无效小波系数。

3) 第二次层级筛选。对有效能量所对应层级的小波系数进行 TQWT 逆变换, 采用峭度指标分别对其进行计算, 并选取最优层级的信号。

4) 运用 OGS 算法对选取的信号进行收缩降噪处理。

3 工程验证

近年来, 随着地磁场探测技术的大幅提升与广泛应用, 对磁性运动目标产生磁异常信号的探测已成为目标识别的研究热点^[11]。然而, 在对此目标进行测量过程中, 磁异常数据很容易受到外界各种干扰影响。因此, 对于高精度的测量来说, 有效地消除数据中的噪声就十分关键。

当前, 磁异常探测的常用方法主要分为标量方法和矢量方法。与标量相比, 矢量方法的信息采集能力更强, 是目前磁异常探测领域的主流方法^[12]。为了验证本文所研究方法的有效性, 将其应用于海洋磁场某矢量磁力仪的观测数据处理, 采样频率为 250 Hz。该观测数据是由目标信号以不同磁矩大小沿着不同航迹匀速通过探测器附近所得到。选用方均根误差 (root-mean-square error, RMSE) 和信噪比 (signal-noise ratio, SNR)^[13] 对提取结果进行性能评估。

图 5(a) 为海洋磁场中目标信号的仿真, 图 5(b) 为采用海洋磁场某矢量磁力仪对目标进行观测得到的数据。从图 5(b) 可以看出, 信号中包含大量噪声且具有极低频的趋势项, 各种干扰使得测量得到的数据与原目标信号波形相比存在严重失真, 其 $RMSE=1.7922$ 、 $SNR=-18.6898$ dB。采用可调品质因子小波变换对该信号进行 29 层分解, 其中参数设为 $Q=1$ 、 $r=3$ 、 $J=28$, 得到每层子带的小波系数波形以及小波系数的能量百分比, 结果如图 6 所示。

对每层小波系数进行 TQWT 逆变换后, 分别进行峭度指标计算, 得到每层信号的峭度指标值。由于在图 6 中可以发现, 在 19 层以前, 小波系数的能量几乎为 0, 所包含的信号信息可忽略不计, 故在之后根据峭度指标选取层级时不考虑这些层级; 在 19 至 29 层中, 根据峭度指标最大值原则, 选取 19 至 21 层为最优层级。图 7 为峭度指标计算结果。

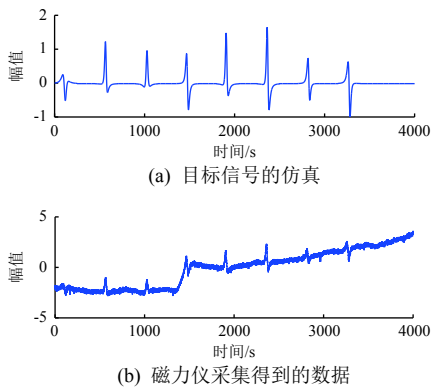


图 5 目标信号仿真结果与实测磁信号数据

Fig. 5 The simulated signal and the measured magnetic signal

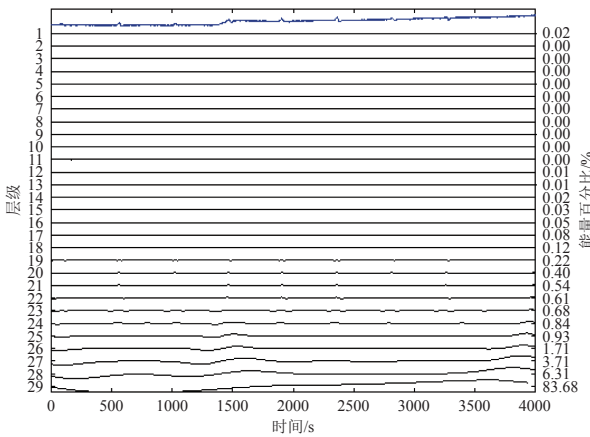


图 6 TQWT 分解后每层波形及其能量

Fig. 6 Wave and energy for each subband in percentages of the total energy

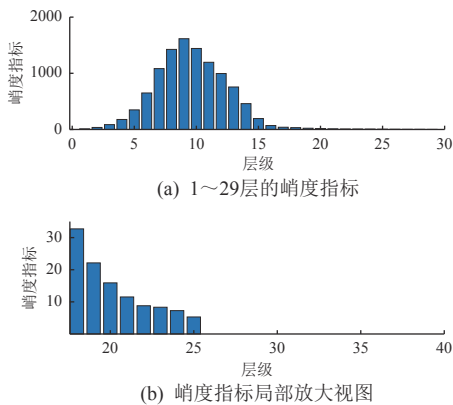


图 7 小波子波带重构信号的峭度指标计算结果

Fig. 7 The kurtosis values of the reconstructed signal from the single subband wavelet

对所选取的 19~21 层进行 TWQT 逆变换，得到重构结果如图 8 所示。可以看出，由 TQWT 基本提取出了所需要的目标信号，但仍存在部分噪声干扰。由于该信号具有簇特性，故可采用 OGS 方法进一步进行特征信号提取。根据信号的特性，将簇的大小 M 设置为 5，正则化参数 λ 设为 0.0095，迭代次数

N_{it} 设为 100，处理结果如图 9 所示，其 $RMSE=0.1418$ 、 $SNR=3.3421$ dB。

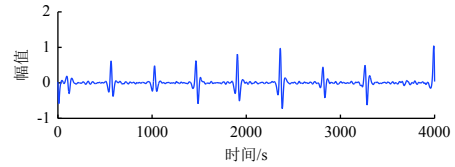


图 8 19~21 层小波系数重构结果

Fig. 8 Signal reconstruction by the wavelet coefficient for 19 to 21 layers

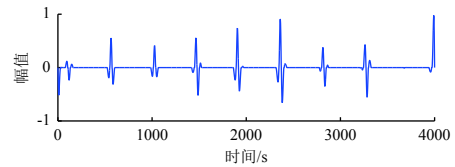


图 9 采用 OGS 进一步降噪处理结果

Fig. 9 The denoised result by the OGS algorithm

作为对比，仅采用 OGS 算法和采用传统的 l_1 范数分别对信号进行处理。仅采用 OGS 算法时，将簇的大小 M 设置为 5，正则化参数 λ 设为 0.3，迭代次数 N_{it} 设为 100，特征波形提取结果如图 10 所示，其 $RMSE=1.2431$ 、 $SNR=-15.5121$ dB。采用传统的 l_1 范数的处理结果如图 11 所示，其 $RMSE=1.7655$ 、 $SNR=-18.5594$ dB。

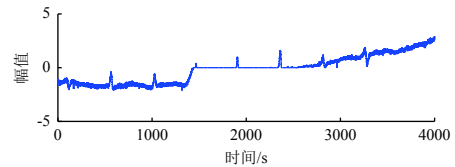


图 10 仅采用 OGS 进行降噪处理结果

Fig. 10 The denoised result using only the OGS algorithm

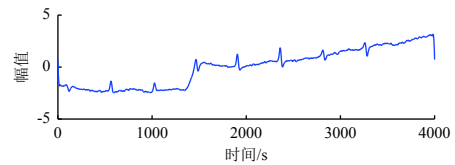


图 11 采用 l_1 范数进行降噪处理结果

Fig. 11 The denoised result by the l_1 norm

对比本文提出的方法，采用以上两种方法仅提取出少量特征信号，且提取出的信号较原目标信号波形仍严重失真，而本文方法可以极大地消除背景噪声的干扰，更为精确地提取出有用特征信号。

4 结束语

为有效地从含噪信号中提取磁异常信号特征波形，本文提出了基于重叠簇收缩的可调品质因子

小波域稀疏特征提取方法——重叠簇收缩(OGS)算法,其能够快速求解,并收敛于全局最优解。将该方法应用于海洋磁场目标信号特征提取中,通过方均根误差和信噪比指标定量分析其有效性,进一步验证了该方法在微弱特征提取中表现优越。

参考文献 (References)

- [1] 孙晓永. 磁目标探测联合仿真技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016: 1-5
- [2] 樊黎明. 地磁总场阵列对磁性目标定位研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018: 1-2
- [3] HE W P, CHEN B Q, ZENG N Y, et al. Sparsity-based signal extraction using dual Q-factors for gearbox fault detection[J]. ISA Transactions, 2018, 79: 147-160
- [4] YAN R, GUO R X, CHEN X. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: a review with applications[J]. Signal Processing, 2014, 96(5): 1-15
- [5] LU Y, DU J, TAO X. Fault diagnosis of rolling bearing based on resonance-based sparse signal decomposition with optimal Q-factor[J]. Measurement and Control, 2019, 52(7/8): 1111-1121
- [6] SELESNICK I W. Wavelet transform with tunable Q-factor[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(8): 3560-3575
- [7] CHEN P Y, SELESNICK I W. Translation-invariant shrinkage/thresholding of group sparse signals[J]. Signal Processing, 2013, 94(1): 476-489
- [8] CHEN P Y, SELESNICK I W. Group-sparse signal denoising: non-convex regularization, convex optimization[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(13): 3464-3478
- [9] WANG Y, XIANG J, MARKET R, et al. Spectral kurtosis for fault detection, diagnosis and prognostics of rotating machines: a review with applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 66: 679-698
- [10] BARSZCZ T, RANDALL R B. Application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4): 1352-1365
- [11] LAN J, XIANG Y, WANG L, et al. Vehicle detection and classification by measuring and processing magnetic signal[J]. Measurement, 2011, 44(1): 174-180
- [12] 银鸿, 文轩, 杨生胜, 等. 基于磁异常检测的磁性运动目标识别方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 258-264
- [12] YIN H, WEN X, YANG S S, et al. Research on the moving ferromagnetic object recognition method based on magnetic anomaly detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 258-264
- [13] 陈保家, 贺王鹏, 胡洁, 等. 数据驱动的 GMC 稀疏增强诊断方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2019, 46(4): 74-79
- [13] CHEN B J, HE W P, HU J, et al. Method for diagnosis of data-driven GMC sparse enhancement[J]. Journal of Xidian University, 2019, 46(4): 74-79

(编辑: 许京媛)