

doi: 10.11720/wtyht.2017.1.19

刘富波,耿智,张启卯,等.接地导线源航空瞬变电磁系统 EEMD 法去除传感器运动噪声[J].物探与化探,2017,41(1):123-128.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.1.19

Liu F B, Geng Z, Zhang Q M, et al. The application of the EEMD method to the suppression of the motion induced noise in the grounded wire source airborne transient electromagnetic system [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(1): 123-128. http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.1.19

## 接地导线源航空瞬变电磁系统 EEMD 法 去除传感器运动噪声

刘富波,耿智,张启卯,黄玲,方广有

(中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室,北京 100190)

**摘要:** 航空电磁系统观测值中不仅包含了地下介质的响应,还包含多种噪声成分,其中传感器运动噪声具有频率低、幅值大、非周期等特点,是航空电磁探测系统的主要噪声源之一。针对运动噪声的上述特点,利用 EEMD 方法对随机信号的分解能力,将航空电磁信号分解为多阶 IMF 分量;利用 IMF 某阶分量拟合传感器运动噪声,并从航空电磁信号中加以去除,从而获得去除运动噪声后的信号。本文利用 EEMD 方法对航空电磁仿真信号中运动噪声加以识别和去除,取得了良好的效果。通过与传统样条插值方法去噪效果的对比,表明 EEMD 法能够有效地去除线圈中的运动噪声,同时将该方法应用于山东某地无人机半航空瞬变电磁系统实测数据处理中,取得了良好的去噪效果。

**关键词:** 接地导线源;航空瞬变电磁系统;EEMD 法;运动噪声;去噪

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)01-0123-06

### 0 引言

航空电磁法起源于 20 世纪五六十年代<sup>[1]</sup>,该方法采用飞行平台搭载电磁勘探设备,特别适合在高山、沙漠、沼泽、森林覆盖等地形复杂区域开展工作,目前已有的航空电磁系统涵盖时间域和频率域、人工源和天然源、固定翼和直升机平台等,已经广泛地应用于地质普查、环境工程、地下水与地热资源、金属矿产及油气资源勘查等诸多领域。航空电磁探测方法利用人工或天然场源产生的信号激励地下介质产生涡流电场,并对激励产生的响应场进行观测,从而获得地下介质的电导率分布。然而,在观测值中不仅包含地下介质的响应,还包含多种噪声成分,对于发射系统与接收系统位置固定的探测方法,主要噪声是天电噪声和人文噪声<sup>[2-4]</sup>;对于接收位置随时间变化的电磁探测系统而言,除上述两种主要噪声外还会产生运动噪声。运动噪声是传感器在地磁

场中运动切割磁力线,引起接收线圈内磁通量变化而产生的感应电动势,因此所有的非固定位置接收的电磁系统接收信号中均存在运动噪声,通常运动噪声的幅值比其他噪声幅值的数倍甚至数十倍<sup>[5]</sup>,因此高精度的运动噪声去除方法对于信号质量的提高具有重要意义。

运动噪声主要能量集中在低频段<sup>[6]</sup>,传统的噪声去除方法包括在系统硬件上增加补偿系统、对信号进行高通滤波、插值拟合运动噪声并从信号中剔除、将含噪信号进行小波分解去除噪声并进行信号重构等。FUGRO 公司采用在硬件上增加线圈运动补偿的方式,改善悬吊稳定性,并在数据处理中采用高通滤波的方式对运动噪声加以去除,因此运动噪声中的少量高频成分难以得到有效的去除。Munkholm 发明了一种利用三分量磁场在主场方向上的投影与运动噪声耦合最小的方法进行运动噪声压制;Lemire 等<sup>[7]</sup>利用样条插值与拉格朗日优化算法,对航空电磁数据中的基线漂移进行校正,由于插

收稿日期: 2016-05-05; 修回日期: 2016-09-27

基金项目: 国家重大科研装备研制项目“深部资源探测核心装备研发”(ZDYZ2012-1-03-05)

作者简介: 刘富波(1983-),男,硕士,助理研究员,主要从事电磁法仪器研发及电磁数据处理研究。Email: fbliu@mail.ie.ac.cn

值拟合类方法在端点处拟合精度易出现较大偏差,因此需要在信号端点位置进行特殊处理; Davies等<sup>[8]</sup>发现线圈运动会导致高度误差,并设计了滤波器进行校正;王远等<sup>[9]</sup>利用小波变换对接地导线源航空瞬变电磁信号进行了基线校正和运动噪声的去除,小波变换具有良好的时频局部化特性,但对于不同电磁环境条件下的信号难以选择合适的小波基进行分析,同时应用小波变换消除信号噪声时,阈值的选取也是一个难点;尹大伟等<sup>[10]</sup>采用多项式拟合对时间域航空电磁数据运动噪声进行仿真研究,同样需要解决插值拟合类方法在信号端点处拟合精度差的问题。

笔者综合考虑接地导线源电磁信号及线圈运动噪声的特点,将采集的原始电磁信号利用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)法进行信号分解,将含有运动噪声的固有模态函数(intrinsic mode functions, IMFs)加以

识别和去除,将剩余IMFs分量与残余信号进行重构以获得去噪后的信号。利用该方法对含有运动噪声的仿真信号和实测电磁数据进行处理,实验结果表明该方法能够有效地识别和分离运动噪声,提高数据质量。

## 1 接地导线源航空电磁系统的运动噪声

### 1.1 接地导线源航空电磁系统观测方式

如图1所示,位于地面的发射系统通过数千米至数十千米长的接地导线向地下发射一定频率、一定占空比的双极性方波信号,信号在地下介质传导过程中激励具有不同电导率的地质体产生涡流电场,并向空中辐射二次磁场,通过位于空中的接收系统采集被激励产生的二次场信息,经过数据处理可以获得地下介质的电导率分布情况,从而达到勘探地下目标体的目的。

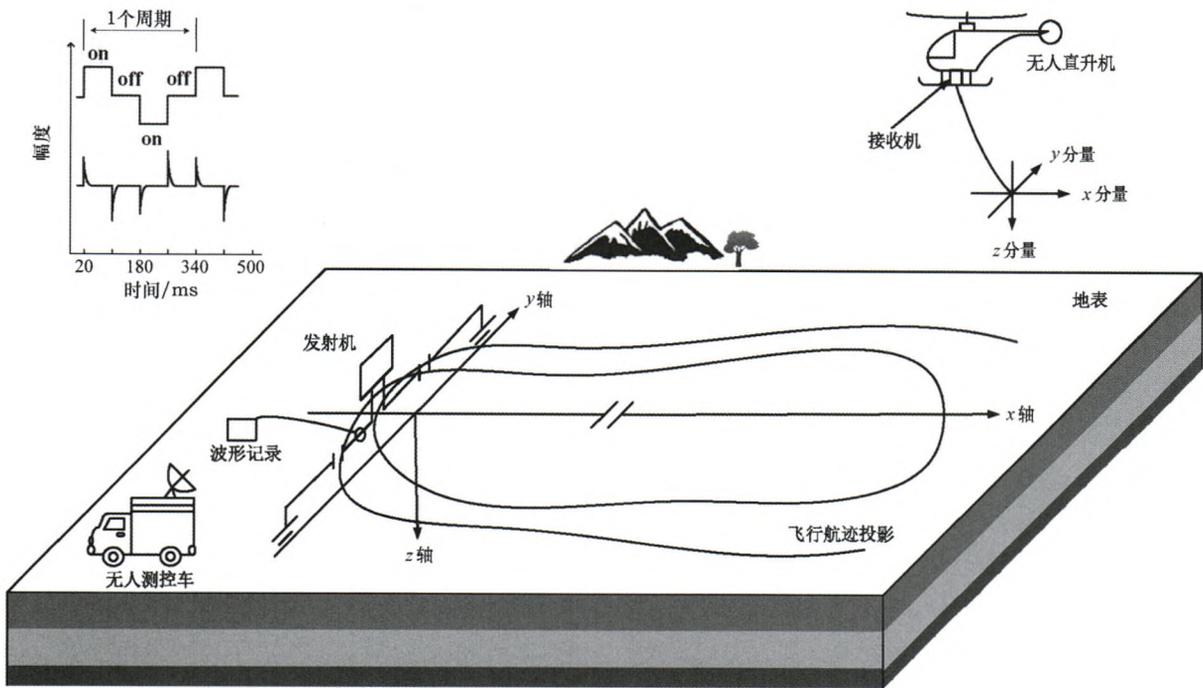


图1 接地导线源航空电磁系统示意

### 1.2 传感器运动噪声机理及特征

运动噪声广泛存在于任意形式的运动电磁系统中,包括航空电磁系统或地面拖曳电磁系统。运动平台在运动过程中由于平台震动、速度变化等影响,导致传感器高度、轨迹、姿态等发生变化,这些物理量的变化导致传感器切割大地磁场,引起磁通量改变而产生感应电动势,这部分感应电动势叠加在大地的电磁感应电动势曲线上,会令测得的电磁信号发生严重的基线漂移,降低电磁数据的信噪比。运动噪声的幅度和频率分布取决于系统的结构、运动

的方式和方向,相比于其他噪声,运动噪声具有幅值较大、分布范围广、频率低等特点,同时运动噪声具有方向性,电磁信号垂直分量运动噪声的幅度要小于水平分量运动噪声的幅度<sup>[11]</sup>。

## 2 传感器运动噪声的仿真与去除

### 2.1 EEMD方法的原理

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法能将信号自适应地分解到不同的尺度

上,非常适合非线性、非平稳信号的处理,但其重要的缺陷就是会产生模态混叠现象<sup>[12-14]</sup>。为克服模态混叠问题,以 Flandrin 为首的研究小组和 Huang 本人的研究小组通过对 EMD 分解白噪声结果统计特性的大量研究,提出通过加噪声辅助分析的 EEMD 方法,将白噪声加入信号来补充一些缺失的尺度,在信号分解中取得良好的表现。

EMD 方法将任意非线性、非平稳信号分解为若干个固有模态函数和一个余项,EEMD 方法在原信号中加入若干次白噪声,把信号和噪声的组合作为一个待分解信号,利用白噪声频谱的均匀分布特性,当信号加载遍布整个时频空间分布一致的白噪声背景上时,不同时间尺度的信号会自动分布到合适的参考尺度上,并且由于零均值噪声的特性,再分别进行 EMD 处理,最后求平均得到逼近的真实模态。

EEMD 算法的具体步骤如下:

1) 在原始信号  $s(t)$  中加入一组正态分布的白噪声  $x(t)$  来得到一个总体信号  $S(t)$ :

$$S(t) = s(t) + x(t) \quad (1)$$

2) 采用标准的 EMD 对  $S(t)$  进行分解,把带白噪声的信号  $S(t)$  分解为多个 IMF 分量  $c_i$  和一个残差量  $r_n$ :

$$S(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n \quad (2)$$

3) 重复步骤 1、步骤  $2N$  次,每次都向待分析信号中加入随机生成的与步骤 1 具有相同统计特性的不同的白噪声,并分别对其进行 EMD 分解:

$$S_i(t) = s(t) + x_i(t) \quad (3)$$

$$S_i(t) = \sum_{j=1}^n c_{ij} + r_{in} \quad (4)$$

4) 加入的  $N$  个随机白噪声是不相关的,其统计均值必然为零,对各分量做整体平均抵消高斯白噪声的影响,得到最后的分解结果:

$$c_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_{ij} \quad (5)$$

式中  $N$  为所加入的白噪声的数目。由于白噪声的零均值特性,将这些多次分解的结果取平均后,噪声最终将被最大限度的抵消而达到消除的效果,总体平均的结果就可以被当作真实信号。

5) 确定包含运动噪声的  $c_j$ ,将其从原始信号中去除,并将剩余  $c_j$  分量及  $r_i$  分量进行信号重构,从而获得去除噪声后的信号。

## 2.2 线圈运动噪声仿真

本次仿真研究使用重复频率 6.25 Hz 的双极性方波作为发射信号,发射信号占空比 50%,周期脉冲宽度 160 ms,信号峰峰值为 2 mV。图 2a 所示为接收信号,加入如图 2b 所示的实测运动噪声数据,加入如图 2c 的所示峰峰值为 0.2 mV 的 50 Hz 正弦

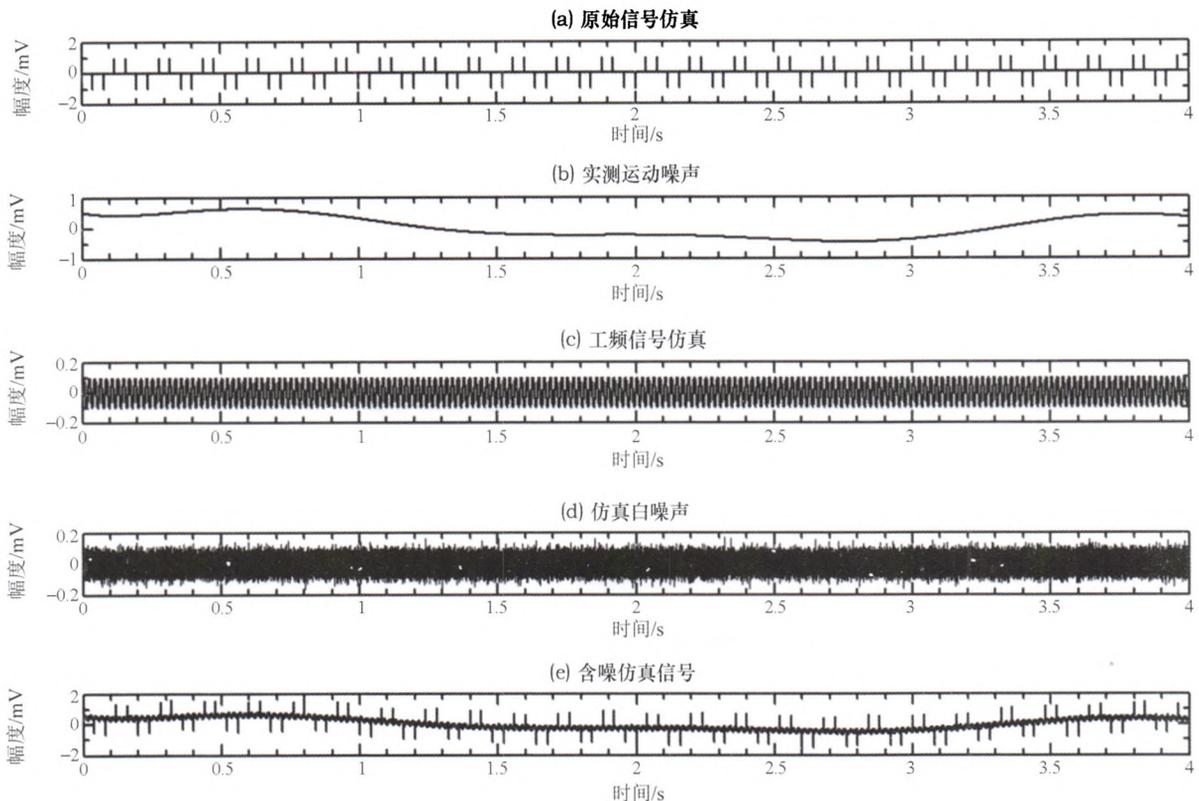


图 2 含运动噪声信号仿真

信号模拟工业频率噪声,加入如图 2d 所示的 0.033 dBW 高斯白噪声模拟天然电磁场噪声,将图 2a~d 合成如图 2e 所示的含多种噪声仿真信号。

### 2.3 线圈运动噪声去除方法的比较

应用文中所提出的 EEMD 方法对图 2e 中的仿真信号进行分解,分解结果如图 3 所示。图 3a~l 为信号分解的 12 阶 IMF 分量。如图 3l 所示,第 12 阶 IMF 分量的幅度和频率能够很好地拟合图 2b 中所示的运动噪声,拟合效果如图 4 中长实线所示。将图 2e 所示的仿真信号利用传统样条插值拟合方法

进行运动噪声的拟合,运动噪声的拟合结果如图 4 中长虚线所示。由图可知,样条插值方法的拟合结果中还包含一个较运动噪声频率略高的振荡,这主要是由于仿真数据中加入了 50 Hz 正弦信号和白噪声,导致插值方法在拟合时出现较大误差,样条插值方法在处理图 5a 实际数据时处理效果相对较为理想(图 5b),原因是图 5a 中实测信号的信噪比较高,因此可知样条插值方法对待处理信号的信噪比要求较高,对噪声特征较为敏感,因此对实用条件有一定的限制。

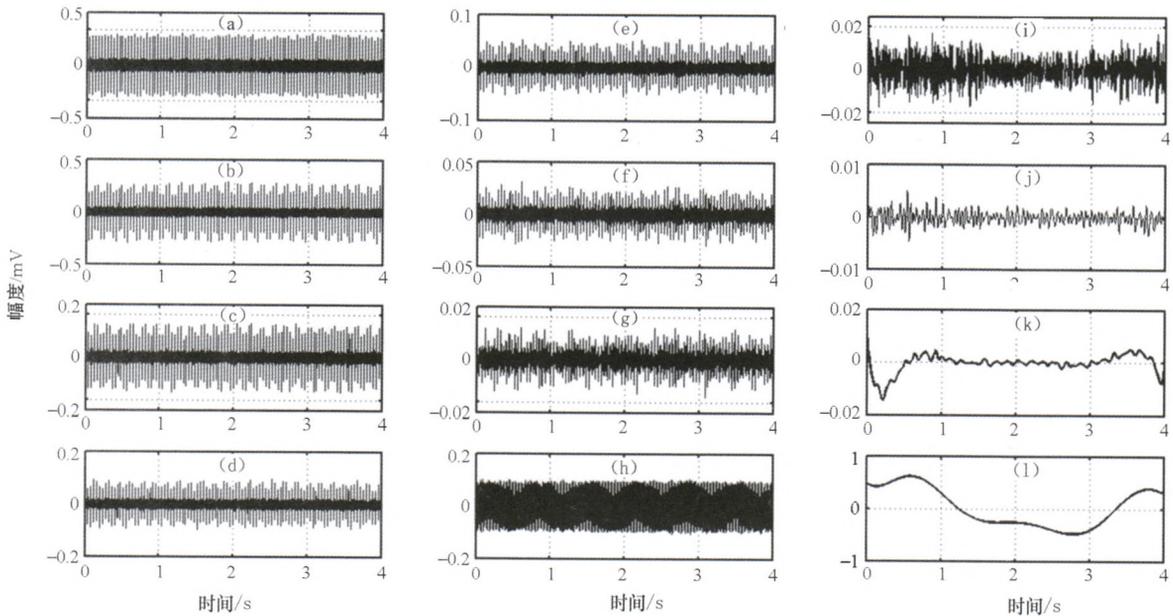


图 3 仿真含噪声信号 1~12 阶 (a~l) IMF 分量

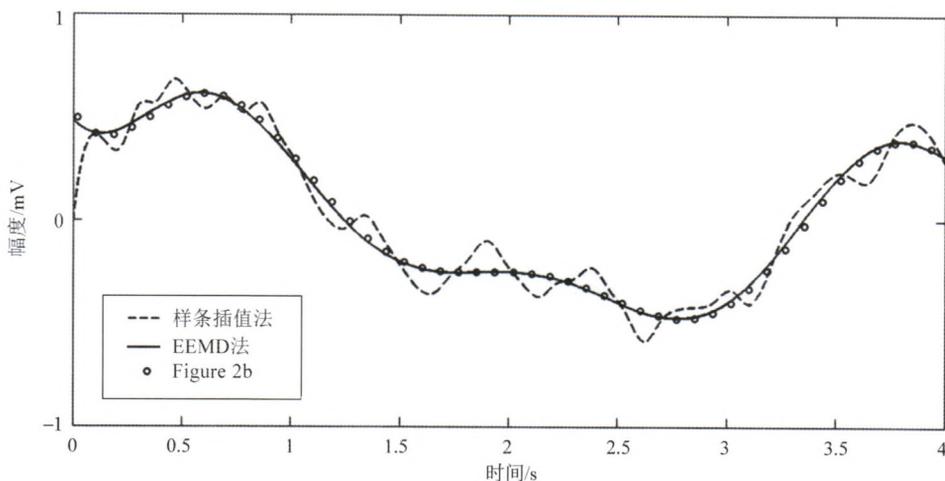


图 4 两种去噪方法拟合运动噪声效果比较

为定量描述两种方法对运动噪声的拟合和去除效果,定义拟合误差率(fitness error ratio, FER)用以衡量不同去噪方法对噪声的拟合程度,同时使用信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)作为噪声去除效果

的评价依据。FER 和 SNR 的计算公式为

$$FER = \left[ 1 - \frac{\sum_{n=1}^N |f(n) - s(n)|}{N} \right] \times 100\% \tag{6}$$

$$SNR = 20\log_{10} \left( \frac{\sum_{n=1}^N \hat{s}^2(n)}{\sum_{n=1}^N |\hat{s}^2(n) - \hat{f}^2(n)|} \right), \quad (7)$$

式中: $\hat{s}(n)$ 为仿真信号, $s(n)$ 为实测信号提取的运动噪声, $\hat{f}(n)$ 为去除运动噪声后的仿真信号, $f(n)$ 为算法拟合运动噪声, $N$ 为采样点数。FER的结果越接近100%表示该方法对运动噪声的拟合结果越好,SNR分贝越高表示该方法对运动噪声去除效果越好。对比结果如表1所示。EEMD方法拟合运动噪声效果较传统样条插值方法有很大提高,证明了EEMD方法识别运动噪声的能力,同时,EEMD法对数据信噪比提高也远远好于传统的样条插值方法,证明了EEMD法能够有效的去除数据中的运动噪声,提高数据质量。

表1 EEMD法和样条插值法拟合效果比较

方法	FER/%	SNR/dB
EEMD法	99.78	29.758
样条插值法	93.66	0.4428

### 3 EEMD法应用实例

2016年1月,在山东昌邑地区进行了半航空瞬变电磁勘探系统(semi-airborne transient electromagnetic, S-ATEM)验证实验。本次实验发射线长度为2.7 km,发射电流20 A,发射波型为12.5 Hz双极性方波,发射波形的占空比为50%。接收机使用24位AD采样,采样率48 kHz,使用三轴感应式矢量磁场传感器,传感器接收高度115 m,传感器运动速度15 m/s。图5a为截取的昌邑实验某一测线Z分量实测电磁数据,数据长度10 s,从图中可知,该接收数据因运动噪声的存在导致了接收信号的基线漂移,这必然会对信号质量和数据解释造成影响。

分别利用前述EEMD法和样条插值法对图5a数据进行运动噪声校正。图5b为使用样条插值拟合去除信号运动噪声后的结果,由图可知,样条插值方法对运动噪声有一定的去除作用,但去噪后的数据仍能够看到较为明显的基线漂移,并且漂移的幅度随时间轴变化自20~30 s有逐渐变大的趋势,验证了样条插值方法去噪效果受数据信噪比影响,数据信噪比越弱,校正效果也越差。图5c为使用EEMD方法去除信号运动噪声后的结果,由图可知,使用EEMD方法去噪后的数据基线漂移基本被消除,数据外包络线比较圆滑,证明了EEMD方法去噪具有受数据信噪比影响小、去噪效果稳定的特点。

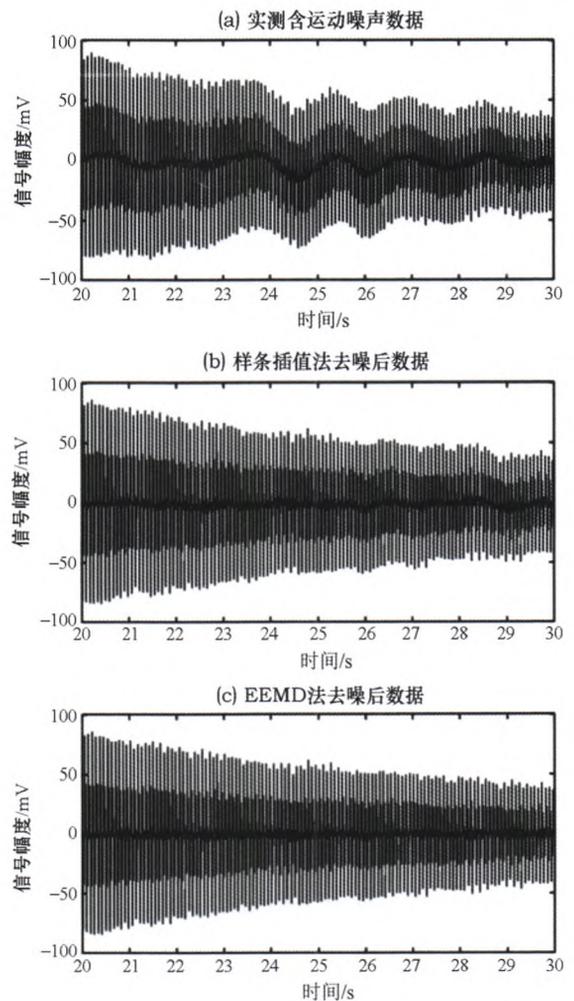


图5 实测含运动噪声数据及去噪结果比较

### 4 结论

运动噪声具有频率低、幅度大、非周期噪声等特点,且对于所有采用动态接收方式的地球物理方法都不可避免,因此需要高精度方法加以去除。EEMD方法是一种有效的信号分解方法,能够将不同的频谱成分分解到不同的尺度上,因此在航空电磁信号运动噪声校正时需要利用飞行平台电磁信号与地面基站电磁信号频谱的差异选择合理的分解阶数并对包含运动噪声的IMF分量加以识别和去除,并在最大程度上减小有效信号损失。

本文利用EEMD方法对接地导线源航空电磁仿真信号进行分解,利用低频IMF分量拟合传感器运动噪声,实现运动噪声的识别与去除。将EEMD方法与传统的样条插值方法进行对比,结果显示EEMD方法对运动噪声的拟合精度可高达99.78%,远远高于传统样条插值方法的拟合精度,表明EEMD方法对运动噪声具有更高的识别率。利用该方法对S-ATEM系统实测数据进行了校正,取得了满

意的校正效果。

### 参考文献:

- [1] Fountain D. Airborne electromagnetic systems-50 years of development[J]. Exploration Geophysics, 1998, 29(2): 1-11.
- [2] Buselli G, Hwang H S, Pik J P. AEM noise reduction with remote referencing[J]. Exploration Geophysics, 1998, 29: 71-76.
- [3] Abderrezak B, Micheal C, Pierre K, et al. Sferics noise reduction in time-domain electromagnetic systems: application to MegaTEM II signal enhancement[J]. Exploration Geophysics, 2010, 41: 225-239.
- [4] Macnae J, Lamontagne Y, West G. Noise processing techniques for time-domain EM system[J]. Geophysics, 1984, 49: 934-948.
- [5] Munkholm M. Motion-induced noise from vibration of moving TEM detector coil: characterisation and suppression[J]. Journal of Applied Geophysics, 1997, 37: 21-29.
- [6] Lane R, Green A, Golding C, et al. An example of 3D conductivity mapping using the TEMPEST airborne electromagnetic system[J]. Exploration Geophysics, 2000, 31: 162-172.
- [7] Lemire D. Baseline asymmetry, Tau projection, B-field estimation and automatic half-cycle rejection[R]. THEM Geophysics Inc, 2001.
- [8] Davies A, Macnae J, Robb T. Pendulum motion in airborne HEM system[J]. Exploration Geophysics, 2006, 37: 355-362.
- [9] Wang Y, Ji Y J, Li S Y, et al. A wavelet-based baseline drift correction method for grounded electrical source airborne transient electromagnetic signals[J]. Exploration Geophysics, 2013, 44: 229-237.
- [10] 尹大伟, 林君, 朱凯光, 等. 时间域航空电磁数据线圈运动噪声去除方法仿真研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(5): 1639-1645.
- [11] McCracken K, Oristialio M, Hohmann G. Minimization of noise in electromagnetic exploration systems[J]. Geophysics, 1986, 51: 819-832.
- [12] Flandrin P, Rilling G, Goncalves P. Empirical mode decomposition as a filter bank[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2): 112-114.
- [13] Wu Z, Huang N. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [14] Huang N, Shen Z, Long S. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1998, 454: 903-995.

## The application of the EEMD method to the suppression of the motion induced noise in the grounded wire source airborne transient electromagnetic system

LIU Fu-Bo, GENG Zhi, ZHANG Qi-Mao, HUANG Ling, FANG Guang-You

(Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The observation of airborne electromagnetic (AEM) system not only includes the response of the underground media but also comprises various kinds of noise. The motion-induced noise is the main source of AEM system with the characteristics of lower frequency, higher amplitude and non-periodicity. The ensemble empirical mode decomposition (EEMD) method is an effective method for random signal decomposition which decomposes the signal into N-level intrinsic mode functions (IMF) components and residual component. The high level IMF component of low frequency is used to fit the motion-induced noise, and the noise-free signal can be obtained by reconstructing the remaining IMF component and the residual component. In this study, the authors used EEMD method to distinguish and suppress motion-induced noise for both the simulation data and the survey data, and compared the denoising result between the EEMD method and the traditional spline method. The comparison result shows that the EEMD method can remove the motion-induced noise effectively due to the high fitting ratio and thus can get higher signal-to-noise ratio.

**Key words:** grounded wire source; S-AEM system; EEMD method; motion induced noise; denoising

(本文编辑:沈效群)