

汤井田, 化希瑞, 曹哲民等. Hilbert-Huang 变换与大地电磁噪声压制. 地球物理学报, 2008, 51(2): 603 ~ 610

Tang J T, Hua X R, Cao Z M, et al. Hilbert-Huang transformation and noise suppression of magnetotelluric sounding data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(2): 603 ~ 610

# Hilbert-Huang 变换与大地电磁噪声压制

汤井田<sup>1</sup>, 化希瑞<sup>1, 2\*</sup>, 曹哲民<sup>2</sup>, 任政勇<sup>1</sup>, 段圣龙<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中南大学信息物理工程学院, 长沙 410083

<sup>2</sup> 铁道第四勘察设计院, 武汉 430063

**摘 要** 大地电磁信号具有非线性、非平稳、非最小相位特征, 不符合以 Fourier 变换为基础的传统功率谱估计的基本要求. Hilbert-Huang 变换是近年发展起来的处理非线性、非平稳信号的完全局部时频分析方法. 本文在简要介绍 Hilbert-Huang 变换基本原理与算法基础上, 以实际数据分析为例, 探讨了它在大地电磁信号处理及噪声压制中的应用. 提出利用 Hilbert 时-频能量谱对大地电磁信号进行时段筛选, 以提高信号品质, 增强数据处理的质量和资料的可解释性. 利用经验模态分解方法及其多尺度滤波特征, 可以有效地分析 MT 信号中的噪声分布特征, 并进行干扰压制.

**关键词** Hilbert-Huang 变换, 经验模态分解, 固有模态函数, 大地电磁, 噪声压制

文章编号 0001-5733(2008)02-0603-08

中图分类号 P631

收稿日期 2007-06-18, 2007-12-25 收修定稿

## Hilbert-Huang transformation and noise suppression of magnetotelluric sounding data

TANG Jing-Tian<sup>1</sup>, HUA Xi-Rui<sup>1, 2\*</sup>, CAO Zhe-Min<sup>2</sup>, REN Zheng-Yong<sup>1</sup>, DUAN Sheng-Long<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Info-physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

<sup>2</sup> The Fourth Survey and Design Institute of China Railway, Wuhan 430063, China

**Abstract** Magnetotelluric signals are nonlinear, non-stationary, non-minimum phase, they do not meet the basic requirements of the Fourier transform based on the traditional power spectrum estimation. Hilbert-Huang Transformation is an entirely local time-frequency analysis method developed in recent years for dealing with non-linear, non-stationary signals. This paper briefly introduced the Hilbert-Huang Transform basic principles and algorithms. Based on the analysis of actual data examples, we discussed its application in magnetotelluric signal processing and noise suppression. It has been founded that selecting magnetotelluric signal sessions using Hilbert time-frequency energy spectrum is helpful to improve signal quality and enhance the quality of data processing and information interpretability. Using empirical mode decomposition method and multi-scale filter characteristics can effectively analyze the noise distribution of MT signal and suppress interference.

**Keywords** Hilbert-Huang transformation, Empirical mode decomposition, Magnetotelluric sounding, Noise suppression

## 1 引言

大地电磁法 (MT) 传统的数据处理是基于 Fourier 变换 - 功率谱估计的<sup>[1,2]</sup>, 这种方法假设 MT 信号具有平稳性、线性和最小相位等特征. 近年来很多学者已经证明大地电磁信号具有非平稳性、非线性、非最小相位特性<sup>[3,4]</sup>. 传统方法在处理这类信号时存在如下问题 (1) Fourier 变换不能反映非平稳信号的局部特性, 即不能指示出某种频率分量发生在哪些时间内 (2) 无法充分获取隐含在非线性、非高斯数据中的频谱信息 (3) 若信号同时是非高斯和非最小相位的, 则处理结果反映不出原信号的非最小相位特点. 对于这类信号, 通常是对信号进行线性化处理, 且假定信号为平稳或分段平稳, 然后采用适当的分析方法如短时 Fourier 变换、小波变换<sup>[5]</sup>等. Hilbert 瞬时频率是描述这类信号的另一种有力工具. 它首先对信号进行 Hilbert 变换, 然后再对其相位求导, 从而得到一个频率量纲的参量, 在满足单值性的条件下, 这个参量可以定义为瞬时频率, 这种情况下瞬时频率与常规频率是相互兼容的. 瞬时频率不是对任何信号都适用的, 它只对单分量信号有意义. 显然地, 一般非平稳信号不是单分量信号, 其 Hilbert 变换的相位导数不满足单值性条件. 黄锬 (N. E. Huang) 对此进行了深入研究, 于 1998 年提出了希尔伯特 - 黄变换 (Hilbert-Huang Transformation, HHT)<sup>[6]</sup>. HHT 首先对信号进行经验模态分解 (Empirical mode decomposition method, EMD), 以获得有限数目的固有模态函数 (Intrinsic mode function, IMF), 且 IMF 是单分量函数. 然后对每一个 IMF 进行 Hilbert 变换, 并定义瞬时频率, 分析其时 - 频谱. 因此, EMD 就是将一般信号分解为许多单分量信号的组合, 同样具有多尺度滤波的特点, 是处理非平稳、非线性信号的有效方法, 已在流体力学、地震信号分析、基础结构监测、故障诊断等领域得到广泛应用. 本文主要讨论 HHT 在 MT 信号分析与噪声压制中的效果.

## 2 HHT 基本原理

HHT 主要由以下两个步骤组成<sup>[7-9]</sup>:

(1) 对信号进行经验模态分解 (EMD), 获得有限

数目的固有模态函数 (IMF);

(2) 对每一个 IMF 进行 Hilbert 变换, 求得瞬时频率, 从而获得信号的时 - 频谱 (Hilbert 谱).

为保证 IMF 是单分量函数, 它必须满足下列条件:

(1) 在整个信号长度上, 一个 IMF 的极值点和过零点数目必须相等或至多只相差一点;

(2) 在任意时刻, 由极大值点定义的上包络线和由极小值点定义的下包络线的平均值为 0, 也就是说上下包络线对称于时间轴.

因此 HHT 的关键是 EMD 分解. 首先找到信号的极大值和极小值, 通过三次样条拟合, 获得信号的上包络线和下包络线, 计算上下包络线在每点的平均值, 从而获得一平均值曲线  $m_1$ . 假设分析信号为  $x(t)$ , 则

$$x(t) - m_1 = C_1. \quad (1)$$

理论上  $C_1$  为第一阶 IMF 分量, 然后从原始信号中减去  $C_1$  即可得到信号的逼近分量  $R_1$ .

$$x(t) - C_1 = R_1. \quad (2)$$

对  $R_1$  重复上述过程, 就可以获得第二阶 IMF 分量. 当余量  $R$  为直线或波动非常缓慢, 幅度和频率都没有物理意义时, 分解结束.

上述分解过程可以理解为尺度滤波的过程, 每一个 IMF 分量都反映了信号的特征尺度, 代表着非线性信号的内在模态特征. 通过 EMD 的一次次筛选, 就可以获得信号的多个 IMF 分量和一个逼近分量  $R_n$ , 从而信号可表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n C_i + R_n. \quad (3)$$

显然利用 (3) 式可以对信号完全重构, 没有能量损失.

获得 IMF 分量后, 就可以对每一阶 IMF 作 Hilbert 变换:

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int \frac{x(t')}{t-t'} dt'. \quad (4)$$

$x(t)$  和  $y(t)$  共同组合为一解析信号  $z(t)$ , 采用极坐标形式表示:

$$z(t) = x(t) + iy(t) = A(t)e^{i\alpha(t)}, \quad (5)$$

这里

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}.$$

$$\alpha(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right).$$

解析信号的极坐标形式反映了 Hilbert 变换的物理含义:它是通过一正弦曲线的频率和幅值调制获得信号局部最佳逼近。根据瞬时频率的定义:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}. \quad (6)$$

对每一阶 IMF 作 Hilbert 变换,并求出相应解析函数的幅值谱和瞬时频率,从而原始信号可以表示为

$$x(t) = \sum_{j=1}^n a_j(t) \exp[i \int \omega_j(t) dt], \quad (7)$$

其中  $a_j(t)$  是第  $j$  阶固有模态函数  $C_j(t)$  的解析信号的幅值。对照式(3),这里省略了第  $n$  阶残差  $R_n$ ,因为  $R_n$  是单调函数或常数的缘故。 $x(t)$  也可以表示为以下傅里叶变换形式:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n a_j \exp(i\omega_j t), \quad (8)$$

式中的  $a_j$  和  $\omega_j$  都是常数。对比式(7)和式(8),两者有相似的形式,可以说式(7)是一种广义的傅里叶变换。实际上,式(7)的  $x(t)$  既是时间  $t$  的函数,又是瞬时频率  $\omega$  的函数,而瞬时频率  $\omega$  也是时间的函数,因此,取式(7)的实部,定义它为 Hilbert 谱,记作  $H(\omega, t)$ 。更进一步的,通过对时间的积分可以获得信号的 Hilbert 边际谱:

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt. \quad (9)$$

HHT 能自适应地提取非平稳数据的局部均值曲线,将复杂的叠加信号分解成有限数量的、且有物理意义的内蕴模式分量函数,从而得到有意义的瞬时频率和 Hilbert 时频谱。

## 3 HHT 在 MT 信号处理中应用

### 3.1 HHT 与 MT 数据品质

EMD 是以信号的极值特征尺度为度量的筛分过程,信号从最小的特征尺度进行筛分,从而获得最短周期的固有模态函数。经过层层筛分,从而获得周期长度逐渐增大的多阶 IMF。图 1 给出了某区实测 MT 信号经 EMD 分解后的 IMF 及其频谱图。该信号由 EMD 自适应地分解为 9 阶 IMF,在时间域中(图 1a)表现为小尺度到大尺度的层层分解,频率域(图 1b)则对应于从高频到低频的滤波过程。

MT 数据品质严重影响功率谱和视电阻率估计结果。由于 MT 信号具有非平稳特征,数据采集过程

可能出现某一时段信号强度大,信噪比较高,在另一时段信号强度小,信噪比较低的现象。通常的处理方法是进行多次采集<sup>[10,11]</sup>,并相干平均以保证数据质量。显然,如果能够在 MT 时间序列中筛选出信号强度大的时段数据,而舍弃信号强度小的时段资料,可以极大地提高数据处理质量。图 2(a,b)是同一测点上不同时段信号经 HHT 得到的能量随时间-频率分布图。图中亮度表示磁场能量,越亮的部分代表较高的能量,反之能量较低。图 2a 显示出整个时段内 0~1000 Hz 的能量较强,且分布基本均匀,但在 1000 Hz 以上能量较弱,且分布不均匀。由于数据采集使用的是 EH-4 仪器的低频模式,高频截止频率为 1000 Hz,因此上述结果是容易理解的。图 2b 说明另一时段上在仪器工作频率范围内能量小且分布不均匀,预期数据处理结果差,应该舍弃该段资料。图 3 对比了经筛选的信号和对所有时段信号相干平均后的数据处理结果。图 3a 反映出经筛选后信号的相关度基本在 0.9 以上,明显优于原始信号相关度。图 3b 显示经筛选后估计的电阻率曲线较为平稳,比原始信号处理结果有明显改善。

### 3.2 HHT 与 MT 噪声压制

#### 3.2.1 工频电干扰矫正

MT 信号受工频干扰影响严重,在采集数据时尽可能要远离高压线,或协调当地政府停电。即使如此,消除工频干扰在 MT 信号处理中也是十分重要的<sup>[12,13]</sup>。

图 4a 为 EH-4 系统实测的含工频干扰的 MT 信号,图 4b 是磁场信号( $H_y$ )的 HHT 能量时-频分布图。可以看出,在整个时段上 50 Hz 左右能量最强,且频率在 200~400 Hz 范围内能量也较强,应该是 50 Hz 及谐波的影响,而其他频率上能量基本上被掩盖。图 4c 是对磁场信号进行 EMD 分解后的各阶 IMF 对应的频谱。原始信号(0 阶 IMF)在 52 Hz 出现峰值,它基本掩盖了信号的其他频率成分。一阶和二阶 IMF 刻画了原始信号的细节信息,是信号的有效成分,在频率域属高频。IMF3 在 52 Hz 能量最强,应为工频干扰产生的。将该阶 IMF 全部置零,然后利用(3)式进行信号重构,就可以一定程度上消除工频干扰。图 4d 显示了重构后的信号。显然,工频干扰得到了很好压制,突出了 MT 信号的有效信息。

#### 3.2.2 振动干扰信号矫正

MT 数据采集,磁探头的灵敏度很高,地表的

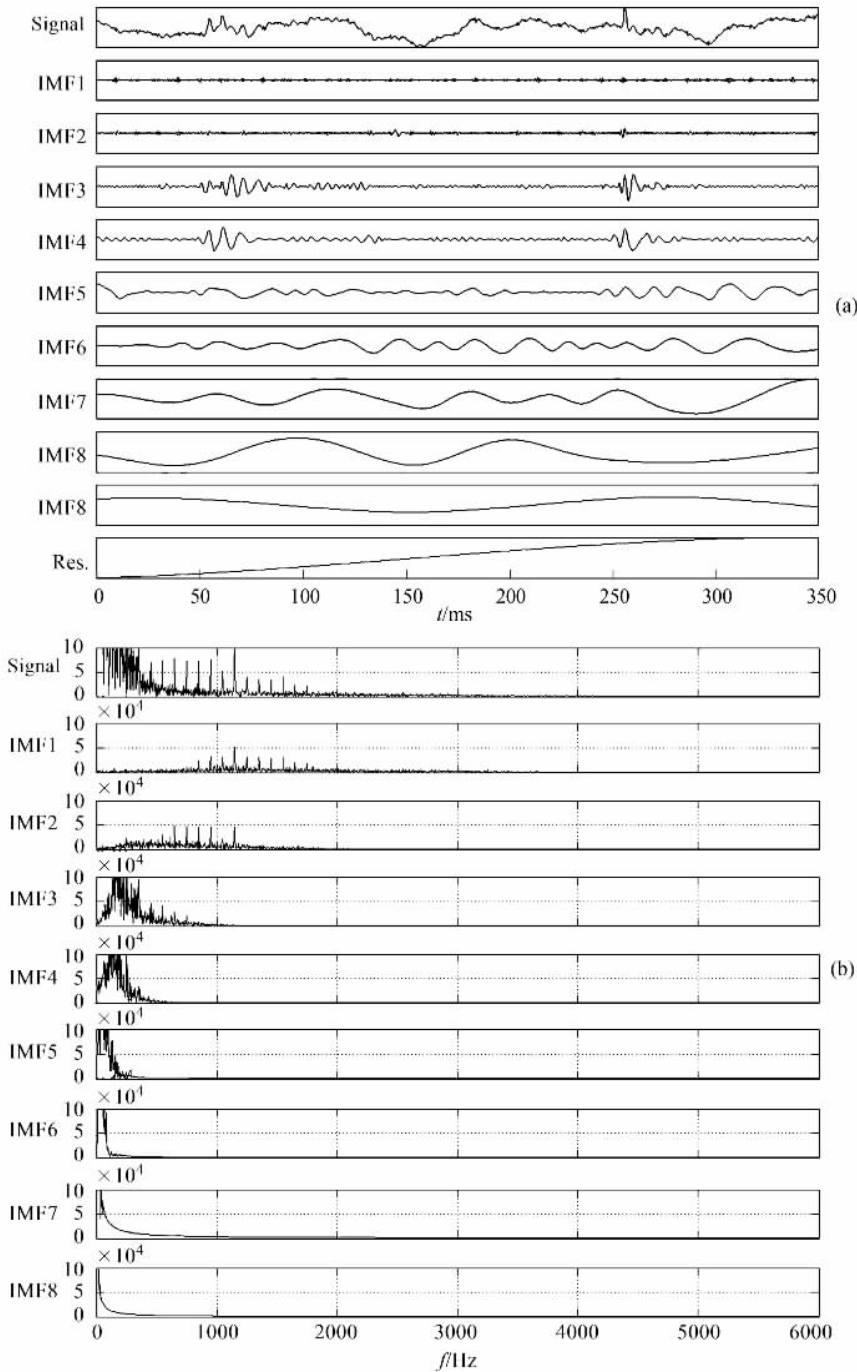


图 1 实测 MT 信号的 EMD 分解及各阶 IMF 的频谱图

(a) 阶 IMF ;(b) 各阶 IMF 振幅谱.

Fig. 1 EMD decomposition and the frequency spectrum of IMF based on measured MT signal

轻微震动会引起磁道信号不规则的扰动. 一般地, 应将磁探头埋在地下. 实际操作中, 由于受地形地质条件影响, 如在山坡上或地表都是岩石等情况下, 深埋磁探头是困难的, 只能尽可能将其保持水平摆放在地表上. 采集的信号难免受到振动干扰. 图 5a 是受振动影响的一组磁场信号, 特别是  $H_x$ , 明显存

在缓慢漂移. 图 5b 是对  $H_x$  进行 EMD 分解后的各阶 IMF. 由于振动干扰信号具有大尺度模态特征, 主要存在于最后的分解残差中. 将残差置零, 然后利用(3)式重构信号, 就可以压制磁道信号中的振动干扰. 图 6 对比了  $H_x$  原始信号与经振动矫正后的信号. 显然, 原始信号中存在明显漂移, 而改正后的

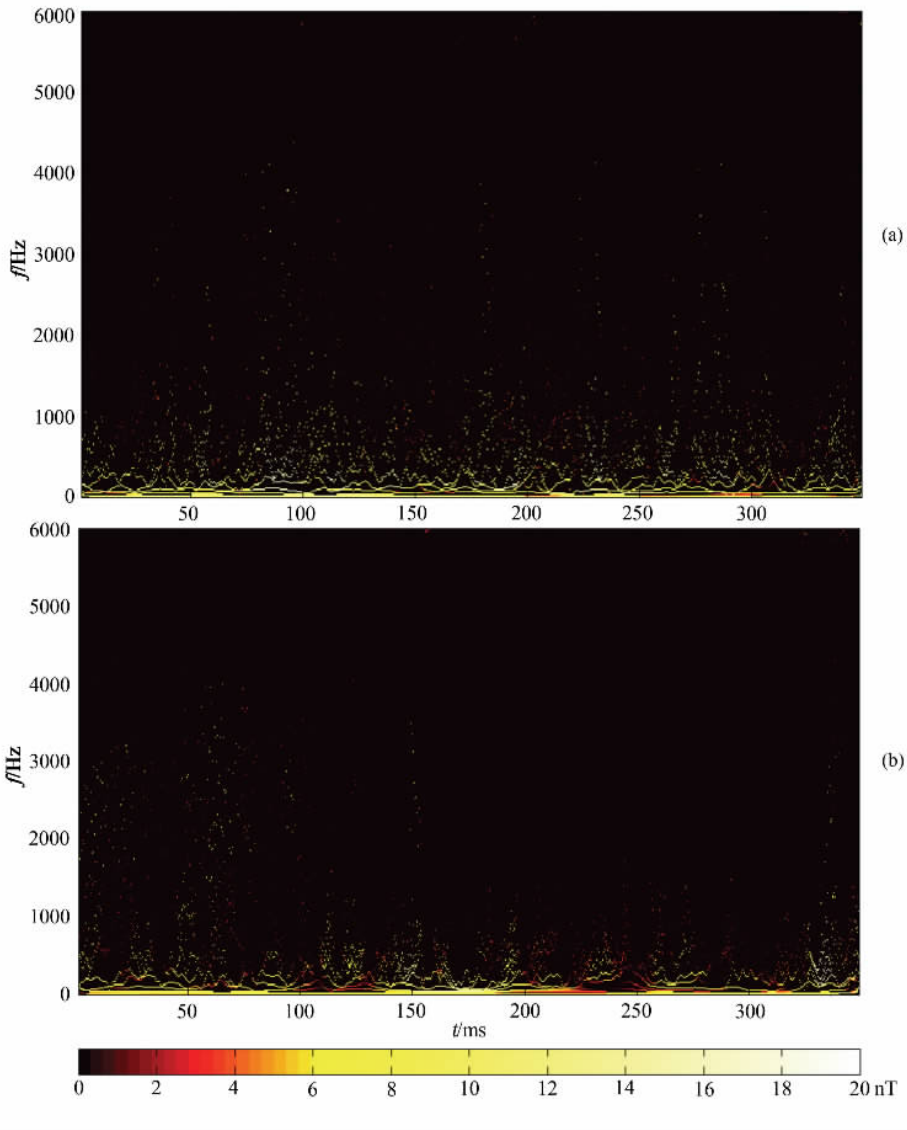


图 2 不同时段上 MT 信号的 HHT 时 - 频能量谱

Fig.2 HHT time-frequency energy spectrum of MT signal in different time series

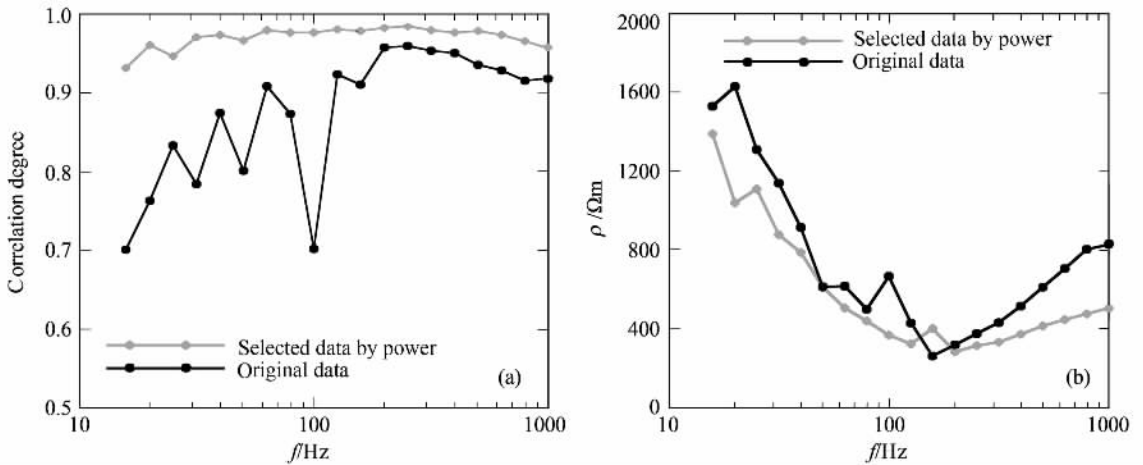


图 3 经筛选的 MT 信号与原始数据处理结果对比

(a) 相关度 ;(b) TM 模式电阻率 .

Fig.3 Contrast of MT data process result between selected and original data

(a) Correlation degree ;(b) TM mode resistivity .

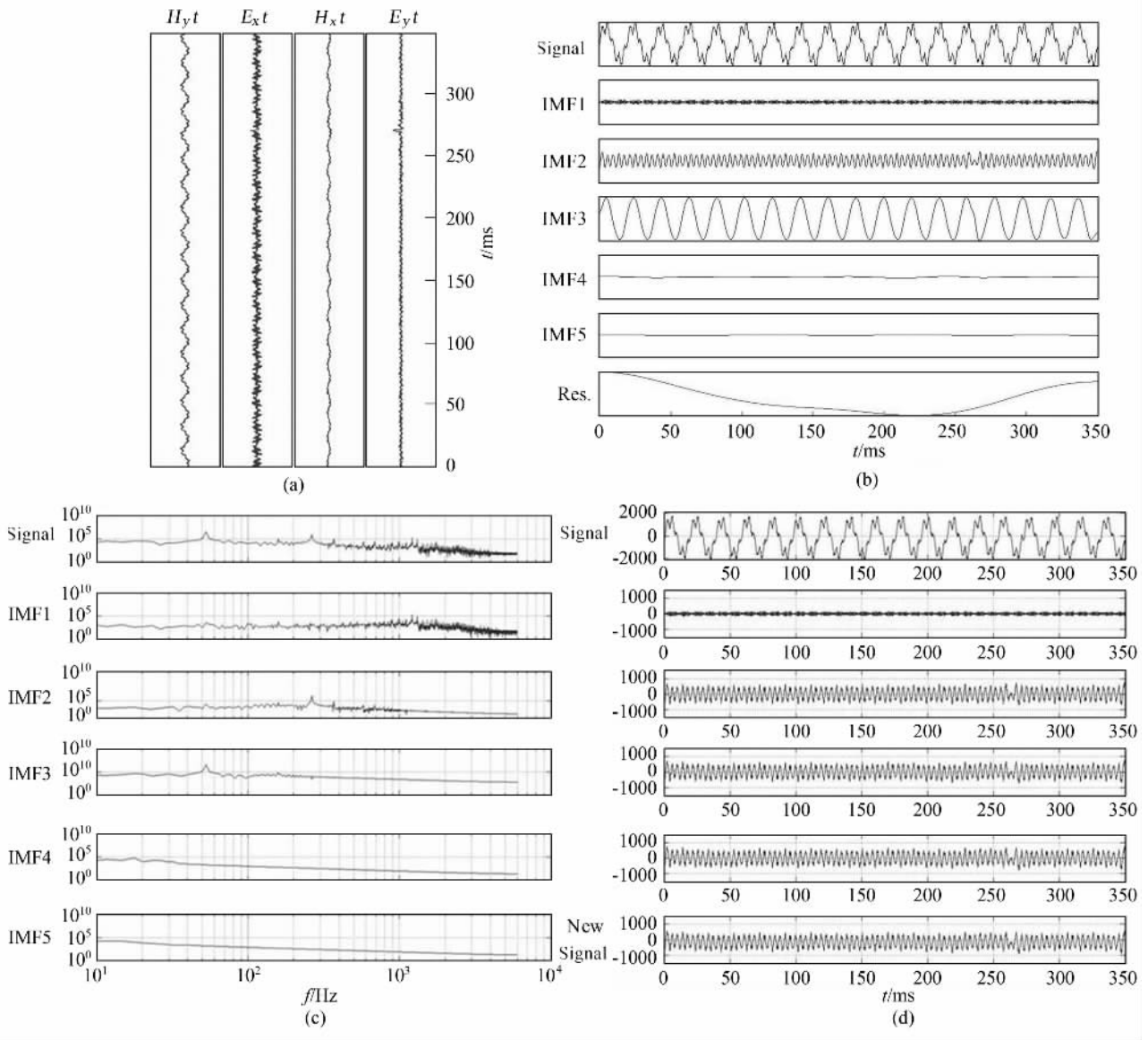


图 4 利用 EMD 压制 MT 信号的工频干扰

(a) 含工频干扰的 MT 信号 ;(b) 原始信号的 HHT 时 - 频能量分布 ;  
(c) 各阶 IMF 分量的 Fourier 振幅谱 ;(d) 将 3 阶 IMF 置零后的重构信号 .

Fig.4 EMD suppress the current industry interference of MT signals

(a) Current industry interference of MT signals (b) EMD decomposition of original signal ;  
(c) Fourier spectrum of each IMF ;(d) Reconfigurable signal .

信号则基本沿零基线分布,有效地消除了大尺度干扰,突出了  $H_x$  信号的细节特征.

### 4 结 论

HHT 是近 10 年发展起来的处理非线性、非平稳信号的时频分析方法,本文探讨了它在大地电磁信号处理及噪声压制中的应用. 提出利用 Hilbert 时 -

频能量谱对大地电磁信号进行时段筛选,以提高信号品质,增强数据处理的质量和资料的可解释性. 利用经验模态分解方法(EMD)及其多尺度滤波特征,还可以有效地分析 MT 信号中的噪声分布特征,并进行干扰压制. 进一步地,利用门限阈方法,可以达到较理想的去噪效果.

HHT 方法克服了其他一些方法的缺点,完全取消了谱分析中的窗函数,结果不受核函数影响与时

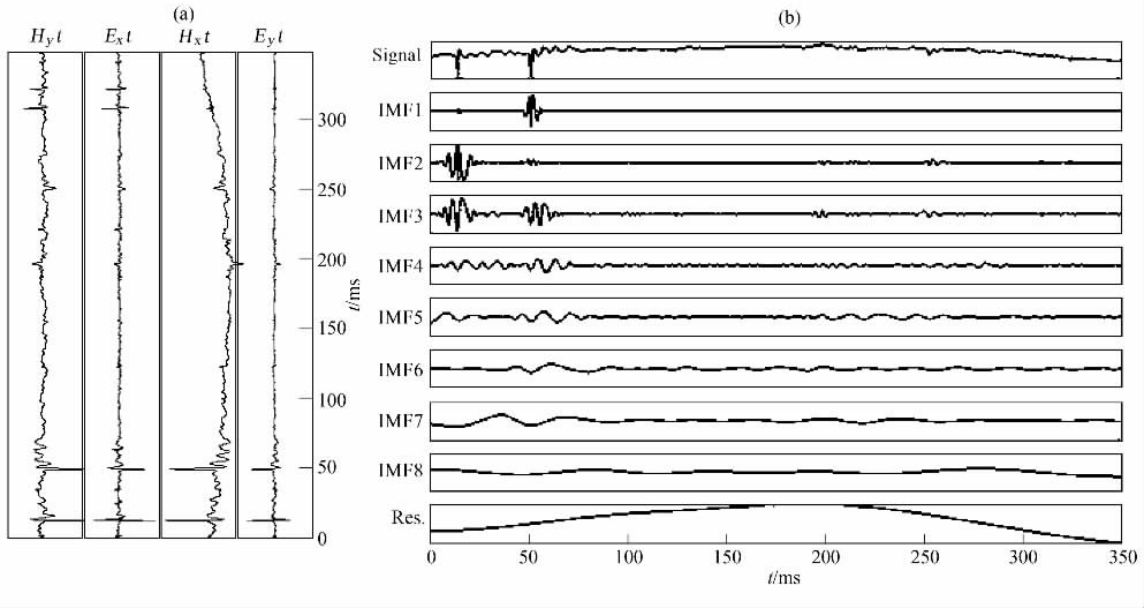


图 5 磁场中的振动干扰及 EMD 分解

(a)含振动干扰的 MT 信号 (b) $H_x$  分量的各阶 IMF 分解.

Fig.5 Vibration interference in magnetic field and EMD decomposition

(a)Vibration interference MT signal (b)EMD decomposition of  $H_x$ .

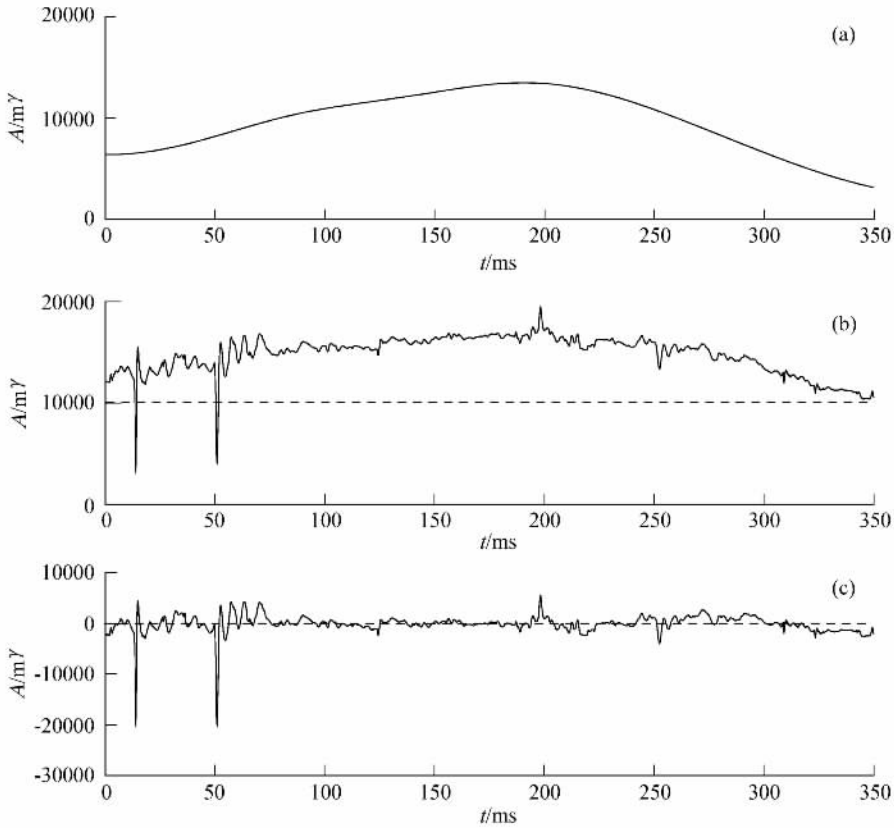


图 6  $H_x$  原始信号与振动干扰的矫正

(a) $H_x$  的 EMD 分解残差 (b) $H_x$  原始信号 (c)振动干扰矫正后的  $H_x$  信号.

Fig. 6 Original signal of  $H_x$  and the correction of vibration interference

(a)Residual of EMD decomposition (b)Original signal of  $H_x$  ;(c)Signal of correction.

频测不准原理限制,具有完全的局部时频特性.它在大地电磁信号处理方面的潜在应用有待更进一步的深入研究.

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] A A 考夫曼,凯勒.大地电磁测深法.北京:地质出版社,1987  
Kaufman A A, Keller G V. Magnetotelluric Sounding Method. Beijing: Geological Publishing House, 1987
- [ 2 ] 汤井田,何继善.可控源音频大地电磁法及其应用.长沙:中南大学出版社,2005  
Tang J T, He J S. Controllable Source Audio Magnetotelluric Method and Its Application (in Chinese). Changsha: Central South University Press, 2005
- [ 3 ] 王书明,王家映.大地电磁信号统计特征分析.地震学报,2004,26(6):669~674  
Wang S M, Wang J Y. Analysis on statistic characteristics of magnetotelluric signal. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2004, 26(6): 669~674
- [ 4 ] 王书明,王家映.关于大地电磁信号非最小相位性的讨论.地球物理学进展,2004,19(2):216~221  
Wang S M, Wang J Y. Discussion on the non-minimum phase of magnetotelluric signals. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2004, 19(2): 216~221
- [ 5 ] Trad D O, Travassos J M. Wavelet filtering of magnetotelluric data. *Geophysics*, 2000, 65(4): 482~491
- [ 6 ] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc R Soc London*, 1998, 45(4): 903~995
- [ 7 ] 钟佑明,秦树人,汤宝平. Hilbert-Huang 变换中的理论研究. 振动与冲击, 2002, 21(4): 13~18  
Zhong Y M, Qin S R, Tang B P. Study on the theory of Hilbert-Huang transform. *Journal of Vibration and Shock* (in Chinese), 2002, 21(4): 13~18
- [ 8 ] 石春香,罗奇峰.时程信号的 Hilbert-Huang 变换与小波分析.地震学报,2003,25(4):398~405  
Shi C X, Luo Q F. Hilbert-Huang transform and wavelet analysis of time history signal. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2003, 25(4): 398~405
- [ 9 ] Bradley Matthew Battista, Camelia Knapp. Application of the empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform to seismic reflection data. *Geophysics*, 2007, 72(3): H29~H37
- [ 10 ] 林君,项葵葵,朱宝龙等. MT 信号现场处理的实现技术研究. 数据采集与处理, 1997, 12(1): 52~55  
Lin J, Xiang K K, Zhu B L, et al. Study on implementation of MT signal processing in situ. *Journal of Data Acquisition & Processing* (in Chinese), 1997, 12(1): 52~55
- [ 11 ] 李丽清,余钦范,李辉.大地电磁资料的分形特征.物探与化探计算技术,1997,19(4):312~316  
Li L Q, Yu Q F, Li H. Fractal features of the MT data. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 1997, 19(4): 312~316
- [ 12 ] 张全胜,王家映.大地电磁资料的去噪方法.石油地球物理勘探,2004,39(增刊):17~23  
Zhang Q S, Wang J Y. An method of noise elimination for magnetotelluric sounding data. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2004, 39(Suppl.): 17~23
- [ 13 ] 刘洋.强工频干扰波的提取与消除方法.石油物探,2003,42(2):154~159  
Liu Y. Extraction and removal of strong power interference. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2003, 42(2): 154~159

(本文编辑 汪海英)