第45卷 第4期 2009年7月

技术・方法(

大地电磁测深数据的时频分析

蔡剑华^{1,2},汤井田¹,雷立云²,王先春²

(1. 中南大学信息物理工程学院,湖南长沙 410083;2. 湖南文理学院,湖南常德 415000)

[摘 要]大地电磁测深(MT)数据表现出非线性、非平稳、非最小相位特征,不符合以 Fourier 变化 为基础的传统谱分析的基本要求。为寻求更好的谱分析方法,把最新发展的 Hilbert-Huang 变换(HHT) 引入到大地电磁测深数据的时频分析当中来,针对湖北宜万线实测的 MT 信号,与短时 Fourier 变换 (STFT)、Winger-Ville 分布(WVD)和小波变换(WT)进行了时频分析比较。比较分析表明: HHT 方法克 服了其它一些方法的缺陷,完全取消了窗函数的作用,其结果不受核函数影响与时频测不准原理限制, 具有完全的局部时频特性和更好的时频聚集性。分析认为 HHT 是一种全新而更优越的分析与处理大 地电磁测深信号的时频方法,能更好地提取信号的时频本质特征,用于指导生产勘测实践。

[关键词]大地电磁测深数据 Winger-Ville 分布 小波变换 Hilbert-Huang 变换 时频分析 [中图分类号]T318.2 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2009)04-0462-06

Cai Jian-hua, Tang Jing-tian, Lei Li-yun, Wang Xian-chun. Time-frequency analysis of magnetotelluric data[J]. Geology and Exploration ,2009,45(4):462-467.

近年来国内外学者已经证明,由于大地电磁信 号源本身的变化,外界、人类活动产生的电磁信号干 扰以及测量系统自身的噪声,大地电磁测深得到的 数据具有非平稳性、非线形、非最小相位特性^[1,2], 这些特性与传统基于 Fourier 变换的大地电磁测深 数据处理的要求相背离。目前对大地电磁信号进行 分析的主要工具是傅里叶变换(FFT)。傅里叶变换 是建立在稳态信号处理基础之上,它仅能给出信号 总体所包含的各种频率成分,不能解决何时出现何 频率的问题^[3,4]。随着信号分析技术的发展,信号 的时频表示法即通过时间和频率的联合函数来表示 信号的方法应用而生^[3],也在大地电磁测深数据分 析技术领域中得到一定的应用。短时 Fourier 变换 (STFT)、Winger-Ville 分布(WVD)和小波变换 (WT)是大地电磁测深数据分析与处理中常用的时 频分析方法。1998年,美籍华人 N. E. Huang 等人 提出的 Hilbert-Huang 变换(HHT) 是一种处理非线 性、非平稳信号的被验证有效的最新时频方法,已在 诸多领域得到应用与推广^[4]。但在电法勘探.尤其 是在大地电磁测深数据的处理中鲜有报道。本文把 Hilbert-Huang 变换引入到大地电磁测深数据的时频 分析当中来,采用 STFT、WVD、WT 和 HHT 四种不 同的时频分析方法对大地电磁测深数据进行分析, 寻求更好地提取信号时频本质特征的时频方法,以 用于指导生产勘测实践。

1 时频分析方法原理

短时傅立叶变换、Winger-Ville 分布和小波变换 是研究非平稳信号最广泛使用的方法,其原理在很多 文献中都有报道,限于篇幅,就不在累述。本文就最 新引入的 Hilbert-Huang 变换的原理做简要的介绍。

- 1.1 HHT 变换
- 1.1.1 Huang 变换

EMD 方法即 Huang 变换,它依据信号本身的时间尺度(信号相邻峰值点之间的时差)特征,将信号分解为含有不同时间尺度且满足以下两个定义条件的一组 IMF^[5~7]:(1)对于一列数据极值点和过零 点数目必须相等或至多相差一点;(2)在任意点, 由局部极大点和极小点构成的两条包络线的平均值 为零。每个 IMF 可以被认为是信号中固有的一个

[[]收稿日期]2008-10-30;[修订日期]2009-06-16;[责任编辑]王 梅。

[[]基金项目]国家 863 计划(2006 AA06z105);湖南省教育厅项目(08C516)资助。

[[]第一作者简介]蔡剑华(1979年—),男,2005年毕业于中科院渗流所,硕士学位,在读博士生,主要从事电法勘探及信号处理研究。

模态函数^[6]。

由 EMD 分解得到 IMF 有多种算法,其中的一种可说明如下: (1) 找出信号 x(t)的所有极大点和极小点,将其用三次样条函数分别拟合为原数据序列的上、下包络线,上、下包络线的均值为平均包络线 m_1 ,将原数据序列减去 m_1 可得到一个去掉低频的新数据序列 h_1 。一般 h_1 不是一个平稳数据序列,为此重复以上过程 n 次,使所得到的平均包络线趋于零,此时的 h_{1n} 就是第一个 IMF(c_1),它表示信号数据中的最高频成分。(2) 用 x(t)减去 c_1 得到一个去掉高频成分的新数据序列,重复步骤(1),得到一系列 c_n 和最后一个不可分解的序列 r_n , r_n 代表 x(t)的均值或趋势项。那么原序列 x(t)可表示为IMF 分量和一个残余项的和:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{n} c_i + r_n$$
 (1)

1.1.2 Hilbert 谱

信号经分解后得到多个 IMF 的组合,对每个 IMF 分量进行 Hilbert 变换,即可得到每个 IMF 分量 的瞬时频率,综合所有 IMF 分量的瞬时频谱就可获 得 Hilbert 谱^[7]。先对信号 x(t)的 IMF 分量 c(t)作 Hilbert 变换得解析信号:

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int \frac{x(t')}{t - t'} dt'$$
 (2)

$$(t) = x(t) + iy(t) = A(t)e^{i\theta(t)}$$
(3)

这里:

$$a(t) = \sqrt{x^{2}(t) + y^{2}(t)}$$
 (4)

$$\theta(t) = \operatorname{arctg}(\frac{y(t)}{x(t)}) \tag{5}$$

再求出瞬时频率:

z

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

每一个 IMF 分量进行 Hilbert 变换之后,则可把 x(t)表示成 Hilbert 谱形式:

$$H(\boldsymbol{\omega},t) = Re \sum_{j=1}^{n} a_j(t) e^{i \int \omega_j dt}$$
(7)

其数学表达式反映出 Hilbert-Huang 变换是 Fourier 变换的一种扩展形式。

上式反映了信号的幅值、时间和瞬时频率之间 的关系。信号的幅值能表示为时间、瞬时频率的函 数 *H*(ω,t),从而获得信号幅值的时间、频率分布-Hilbert 谱,更进一步的,通过对时间的积分我们可 以获得信号的 Hilbert 边际谱。

$$h(\boldsymbol{\omega}) = \int_{0}^{T} H(\boldsymbol{\omega}, t) dt \qquad (8)$$

边际谱表达了每个频率在全局上的幅度(或能量),它代表了在统计意义上的全部累加幅度

2 大地电磁测深数据的时频分析

2.1 实测大地电磁测深数据

我们以实测大地电磁测深数据(湖北宜万线测得的 EH-4 仪器低频模式信号)为例,由于数据量 非常庞大,这里只选取其中一个测点4个分量(Ex, Ey,Hx,Hy)中的一个磁场分量(Hx),如图1所示 ((a)为大地电磁测深数据,(b)为 FFT 所得的频 谱)。可以看出,由于大地电磁源本身的变化,以及 外界、人类活动产生的电磁信号干扰以及测量系统 自身的噪声所致,大地电磁测深数据为典型的非平 稳信号,其频率成分复杂;信号频谱大致显示出其频 率范围,信号频率成分丰富,主要分布在1000 Hz内 的范围(EH-4 仪器的低频模式高频截止频率 1000Hz),但没有任何时域信息。

2.2 信号的 STFT 分析

图1中的大地电磁测深数据经 STFT 变换后的时 频谱如图2。从图中可知,STFT 时频谱使得信号的能 量可表示为时间-频率的联合分布。可以看出信号的 能量不均匀地分布在4096 采样点内的时间范围内; 频率主要集中在0.05 的归一化频率线内。STFT 虽 然显示了一定的时频信息,但其受 Heisenberg 测不准 原理的限制,时间分辨率和频率分辨率需要折衷,且 STFT 使用的短时窗函数固定,分辨率单一,从而时频 聚集性不高,不能显示大地电磁测深数据的能量细 节,因此 STFT 不适合类似 MT 信号的时频分析。







2.3 信号的 Winger-Ville 分布

Winger-Ville \Im \Im (WVD) 可以看作信号在时间 -频率平面上的两维能量分布,具有明确的物理意 义,但由于 WVD 的双线性会引起交叉项出现。可 通过对 WVD 的平滑来实现对交叉项的消除,在频 域加一个平滑的窗函数,便得到了伪 Wigner-Ville 分布(PWVD)。同时能在时间方向上也进行平滑, 效果更好,这就是平滑的伪 WVD(SPWVD)^[8]。信 号的 WVD,PWVD 和 SPWVD 时频分布图,分别见 图 3(a),(b)和(c)所示。从图 3 中可得到如下结 论: (1) WVD 中的能量分布杂乱,没有正确的显示 出信号的能量分布,这主要是因为 WVD 中包含大 量的交叉项,这些交叉项的幅值甚至超过了真正的 信号项的幅值,因此严重干扰了信号能量的正确分 布,也难以给出对地层分析有用的特性。

(2) PWVD 是改进了的 WVD,它相当于在频域 中对 WVD 进行了平滑。从图 3(b)中很明显可以 看出 PWVD 的交叉项干扰得到了很好的改善,但是 同时,信号时频谱的时频聚集性下降了,由于在频率 上加窗对信号进行平滑,所以,信号的频率分辨率变 差了。交叉项的减轻是用分辨率的降低作为代价 的。

(3) 在图 3(c) SPWVD 图(平滑伪 WVD)中,与 WVD 相比虽然交叉项得到一定的抑制,与 PWVD 谱图相比时频聚集性有所提高,但折中效果不明显, 仅仅能大概看出信号的能量分布,SPWVD 中的交叉 项干扰是最小的,但是与此同时,由于在时间和频率 两个方向都进行了平滑,它的时间分辨率和频率分 辨率在三种分布中是最差的。以上说明该时频分布 在交叉项和时频聚集性的折中效果不好。

2.4 信号的 WT 分析

仍选用图 1 中给出的大地电磁测深数据利用 sym5 小波基进行 CWT 和二进 DWT 的小波分解,相 应的结果如图 4,图 5 为时频分布。可以看出:





(1) a6 及 dl ~ d6 是利用 DWT 分解后得到的小 波分量,图中的 a6 及 d1 ~ d6 为小波分量,其中 a6 为低频分量、d1 ~ d6 为高频分量。各层系数对应于 从高频到低频的滤波过程,信号的能量在时域上不 均匀的分布在几段采样点的范围内,在频域上主要 集中在 d4~d6 的分量上。

(2) CWT 和 DWT 都表现出良好的局部化特征,较具体地描述了非平稳信号的时频分布,是分析 大地电磁测深数据较好的时频方法。但是从本质上 WT 仍受 Fourier 变换的局限,同时,小波基的有限长







会造成信号能量的泄漏。小波基的选择是实际应用 中的一个重要问题,不同的小波基会有不同的结果, 有时甚至差别很大,并且小波基一旦选定,在整个信 号分析过程中只能采用这同一个小波基,从这方面 讲 WT 是非适应性的.

(3)利用 CWT 可显示出在连续尺度空间中信号 能量随时频的分布情况,表现出良好的局部化特征, 描述了非平稳信号的时频分布。在小波谱中,除主成 分外,还存在大量的谐波成分,是由于小波基有限长 并受到测不准原理的限制^[9,10],使得时频域同时为紧 支区间,从而发生能量泄漏,造成小波谱上的能量呈 分散特征其对应的频率范围也最宽;CWT 存在一定 的冗余,除主成分外,还存在大量的谐波成分^[11-13]。 2.5 信号的 HHT 分析

利用 EMD 分解图 1 中的原信号后得到如图 6 所 示的 IMF 分量,再按式(7)和式(8)得到信号的 Hilbert 能量谱、边际谱,如图 7 所示。从图中可以得出:



图 6 EMD 分解

Fig. 6 EMD decomposition



图 7 HHT 时频谱图

Fig. 7 Spectrum plotted in time-frequency based on HHT

(a) 二维 HHT 时频谱;(b) HHT 边际谱;(c) 三维 HHT 时频谱值图

(a) 2D HHT time-frequency spectrum; (b) HHT marginal spectrum; (c) 3D HHT time-frequency spectrum

(1)图6中EMD分解无需选择基函数,可按频率从高至低顺序进行分解,分解所得的每一个IMF 分量都有不同振幅和频率(时间特征尺度),并且所获得的IMF分量大都具有物理意义^[7,14]。

(2) Hilbert 能量谱清晰而详细地显示了能量随 时频的具体分布;具有更好的局部化能力,更好的 时频聚集性,其能量主要集中在有限的能量谱线上; 瞬时能量谱更直观地表明了能量主要不均匀地分布 在几个时间区间内,显然0~500Hz 频段内在整个 时域能量较强,且基本均匀分布,在1000Hz 以上能 量较弱,且分布不均匀,呈毛绒状。

(3)边际谱的优势频率与信号的 FFT 优势频 率是一致的,在 Fourier 谱中某一频率口处能量的存 在代表一个正弦或余弦波在整个时间长度上都存 在,而边际谱中某一频率仅代表有这样频率的信号 存在的可能性。从信号频谱中可看出 FFT 变换的 频谱存在高频扩大和低频抑制的现象。

(4) EMD 是一种自适应强和分解高效的方法, Hilbert 谱具有更好的局部化能力。HHT 方法对 MT 数据的动态变化过程刻画得比较清楚,反应了 MT 数据的非线性、非平稳性,每时段都有各自的频率特 性、能量差异,其它方法难于揭示出这些细微性变 化;在时频谱值图像中,MT 数据的突变点、持续时 段和频带能量分布均能够清晰地显现,验证了 HHT 方法具有完全局部时频特性。

3 讨论

通过针对具体的大地电磁测深数据,用短时 Fourier 变换(STFT)、Winger-Ville 分布(WVD)、小 波变换(WT)和 HHT 进行时频分析比较研究,可看 到 HHT 方法的高精度分解优势与非线性动态数据 时频刻画能力。但要真正有效地用好 HHT 方法,还 应注意以下几点:

(1)筛选停止准则。IMF 分量必须满足的条件 决定了 EMD 分解必须要经历一个筛选过程,对于 大地电磁信号的分解筛选过程尤为重要,筛选次数 过多将会降低计算效率,反之则有可能使局部对称 性得不到保证^[14,15],不满足瞬时谱分析中窄带信号 的要求。

(2) HHT 方法算得的结果是离散骨架谱。在 EMD 分解基础上,进行 Hilbert 变换得到的时频谱 阵是离散谱^[15-17],它与其它方法算得的时频谱不一 样,由此会引起频谱值的地质解释方式可能有所不 同。 (3) 波动现象。HHT 方法多次用到三次样条 函数,这可能会引起过冲或欠冲现象。如高阶 IMF 序列(大地电磁信号的低频部分)可能会出现不应 有的波动现象。选择一定的 IMF 序列进行 Hilbert 变换,可在一定程度上避免样条函数造成的波动影 响。

4 结论

(1) STFT 克服了 FFT 的不足,对大地电磁测深 数据给出了时频描述,但其时频聚集性低下,其分析 结果能大致反映信号能量随时间的变化,但对于大 地电磁测深数据这类具有复杂、不规则和突变等特 点的非平稳信号,要求信号在剧变时刻有较高的时 间分辨率,而在缓变时刻有较高的频率分辨率,而由 于受测不准原理的限制,STFT 无法两者兼顾,即 STFT 不适合类似大地电磁测深数据的时频分析。

(2) Winger-Ville 分布具有较强的时频聚集性, 但对于多成分信号却存在严重的交叉项,这给信号 能量的正确分析观察带来诸多不便。实测信号的构 成很复杂,必然导致其 Winger 分布中存在大量的 交叉项,影响了对非平稳、非线性 MT 信号的精确 分析,使其应用受到很大限制。

(3) WT 是一种以小波基为变换基础的多分辨 率时频分析方法。CWT 和 DWT 都表现出良好的局 部化特征,较具体地描述了非平稳信号的时频分布, 说明 WT 较 STFT 的分析结果更能揭示电磁波在介 质中的传播特性。但 STFT 和 WT 没有从根本上摆 脱 Fourier 变换的局限,小波谱的能量在频率范围内 分布较宽,并存在小波基选择的问题。

(4) HHT 是一种全新的分析大地电磁测深数 据的时频方法。EMD 依据信号本身的固有特性进 行分解,保证了信号分解后的非平稳特性,具有自适 应性强和高效的优点; HHT 方法克服了其它一些方 法的缺陷,完全取消了窗函数的作用,其结果不受核 函数影响与时频测不准原理限制,具有完全的局部 时频特性,可准确描述大地电磁信号的时变特征; Hilbert 能量谱能清晰地表明能量随时频的具体分 布,有很好的时频聚集性。HHT 较其他方法更具适 应性,能更好地揭示电磁场的分布规律,有利于更好 地指导工程勘察设计与研究。

[参考文献]

 [1] 沙成满,王恩德,杨冬梅. 岩土工程勘测 EH-4 观测信号的频 谱分析[J]. 岩土工程学报,2005,27(2):193~197.
 Sha Cheng-Man, Wang Eng-de, Yang Dong-mei. The frequency spectral analysis of EH-4 signals in exploration of geotechnical en-

466

gineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2):193~197.

- [2] 王书明,王家映.大地电磁信号统计特征分析[J].地震学报
 [J],2004,26(6):669~674.
 Wang Shu-ming, Wang Jia-ying. Analysis on statistic characteristics of magnetotelluric signal[J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(6):669~674.
- [3] 科恩 L. 白居宪译. 时-频分析:理论与应用 [M]. 西安:西安 交通大学出版社,1998:56~60.

Cohen L. Translated by Bai Ju-xian. Time-frequency Analysis: Theory and Applications [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998:56 ~ 60.

 [4] 张海勇. 一种新的非平稳信号分析方法-局域波分析[J]. 电子 与信息学报,2003,25 (10):1327~1334.
 Zhang Hai-yong. A new method for non-stationary signal analysis-

Local wave analysis [J]. Journal of Electronics and Information Technology,2003,25 (10):1327 ~1334.

- [5] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-station time series analysis [M]. Proc R Soc London , 1998, 45(4):903 ~995.
- [6] Yue H Y, Guo H D, H an C M, et al. A SAR interferogram filter based on the empirical mode decomposition method [C]. Geosoience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 01, 2001: 2060 ~2063.
- [7] 钟佑明,秦树人,汤宝平. Hilbert-Huang 变换中的理论研究
 [J]. 振动与冲击,2002,21(4):13~18.
 Zhong You-ming, Qin Shu-ren, Tang Bao-ping. Study on the theory of Hilbert-Huang transform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(4):13~18.
- [8] 陈明生,李正斌,闫述. 瞬变电磁法资料的联合时-频分析初探
 [J]. 煤田地质与勘探,1993,27(3):55~57.
 Chen Ming-sheng, Li Zheng-bin, Yan Shu. Preliminary study on

joint time-frequency analysis of transient electromagnetic fields [J]. Coal & Gology & exploration, 1993, 27(3):55 ~ 57.

[9] 林大超,施惠基,白春华.基于小波变换的爆破振动时频特征 分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(1):101~106. Lin Da-chao, Shi Hui-ji ,Bai Chun-hua. Time-frequency characteristic analysis of blasting vibration based on wavelet transform [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1); 101 ~106.

- [10] 严家斌,刘贵忠,柳建新.小波变换在天然电磁场信号时间 序列处理中的应用[J].地质与勘探,2008,44(3):75~78. Yan Jia-bin, Liu Gui-zhong, Liu Jian-xin. Application of wavelet transform in processing nature electromagnetic field time series
 [J]. Geology and prospecting, 2008, 44(3): 75~78.
- [11] Mioara A lexandrescu. Detection of Geomagnetic Jerks using Wavelet analysis [J]. Jourial of Geophysical Research, 1995, V100(87): 12557 ~ 12572.
- [12] G Stanartao. U Spagnolini Canceling directional EM noise in magnetotellurics[J]. Geophysics Prospecting, 1995, V43: 606 ~621.
- [13] M Yu Smirnov. Magnetotelluric Data Processing with a Robust Statistical Procedure Having a High Break Point[J]. Geophysic, 2003, V152: 1~7.
- [14] Bradley Matthew Battista, Camelia Knapp. Application of the empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform to reflection seismic data[J]. Geophysics, 2007,72(3):29~37.
- [15] 林君,项葵葵,朱宝龙. MT 信号现场处理的实现技术研究
 [J].数据采集与处理,1997,12(1):52~55.
 Lin Jun, Xang Kui-kui, Zhu Bao-long. Study on implementation of MT signal processing in situ[J]. Journal of Data Acquisition & Processing,1997,12(1):52~55.
- [16] 杨 生,张少云. MT 法中利用阻抗相位资料对畸变视电阻率 曲线的校正[J]. 地质与勘探,2001,37(6):42-45.
 Yang Sheng, Zhang Shao-yun. The correction to aberrant appearance resistivity curve by using impedance phase data in magenetotelluric method[J]. Geology and Exploration,2001,37(6):42-45.
- [17] 胡玉平,鲍光淑. 一种改善 MT 低频数据质量的方法及其应用
 [J]. 地质与勘探,2002,38(3):46-48.
 HU Yu ping,,BAO Guang shu. A method to enhance quality of low frequnce MT data and its application[J]. Geology and Exploration,2002,38(3):46-48.

Time-Frequency Analysis of Magnetotelluric Data

CAI Jian-Hua^{1,2}, TANG Jing-Tian¹, LEI LI-Yun², WANG Xian-Chun²

(1. School of Info-physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha Huna, 410083 China;

2. Hunan University of Arts and Science, Changde Hunan, 415000 China)

Abstract: Magnetotelluric (MT) signals are non-liner, non-stationary and non-minimum phase, they do not meet the basic requirements of the Fourier transform based on the traditional power spectrum estimation. The Hilbert-Huang transform is applied as a tool of time-frequency analysis in MT signal processing in this paper. The recorded MT signals from HuBei was analyzed in time and frequency domains by means of short time Fourier transform (STFT), Winger-Ville Distribution (WVD), wavelet transform (WT) and Hilbert-Huang transform (HHT). The results show that HHT Method overcome some shortcomings of other ways, completely abolished the role of the window function and not restricted with core function and Heisenberg principle. They had local time-frequency characteristics and better time-frequency aggregation. Therefore HHT is a kind of new time-frequency method for analyzing and processing MT signals. HHT is better to extract the nature of time-frequency characteristics to guide the production practice.

Key words: magnetotelluric data, Winger-Ville distribution, wavelet transform, Hilbert-Huang transform, time-frequency analysis