

文章编号: 1671-8585(2009)04-0248-04

# 基于希尔伯特-黄变换的地震信号时频谱分析

侯 斌, 桂志先, 胡 敏, 王 鹏, 陈小军

(长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北荆州 434023)

**摘要:** 希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)是分析非线性、非稳定信号的一种新方法,能清晰地刻画地震信号的时频能量分布。首先将信号分解为有限数量的固有模态函数 IMF,再对这些 IMF 求解瞬时频率,进而获得信号的时频谱。应用理论模型和实际地震道数据进行了试算,并与 S 变换谱进行了对比,证明该方法比 S 变换具有更好的时频域刻画能力。对实际二维地震剖面做 HHT 变换求得希尔伯特谱,提取分频剖面分析认为,HHT 瞬时谱具有一定的油气检测能力。

**关键词:** 希尔伯特-黄变换;固有模态信号;经验模态分解;时频谱

**中图分类号:** P631.4

**文献标识码:** A

希尔伯特-黄变换是由华裔科学家黄锶等对瞬时频率的概念进行深入研究后提出的一种主要用于非平稳信号分析的方法。1996 年,黄锶等创造性地提出了固有模态信号(intrinsic mode functions, IMF)的概念及经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)算法,从而赋予了瞬时频率合理的定义和物理意义,初步建立了以固有模态函数为基本信号的新时频分析方法体系<sup>[1]</sup>。2003 年,黄锶等又对 Hilbert 谱的求取与分布作了进一步说明<sup>[2]</sup>。

地震信号属于非线性、非平稳信号,信号的功率谱密度是时变的。地震波在地层介质的传播过程中,除了岩石固有的散射和吸收衰减作用对频率的影响外,还有储层中的流体对高端频率能量的吸收作用。

时频分析是分析非线性、非平稳信号的有效方法,能让我们同时描述一个信号在时域和频域的能量密度。目前大部分时频分析方法,如短时傅里叶变换(STFT)、Gabor 变换、Cohen's class 分布、改良的韦格纳分布(Modified Wigner distribution)、加伯-韦格纳分布(Gabor-Wigner distribution),以及小波变换等,都是以傅里叶变换为基础发展起来的,因此同样表现出傅里叶变换的局限性。而 HHT 依据数据本身的时间尺度特征来分解,与傅里叶及小波等依赖于先验函数基的分解方法相比,有效地克服了傅里叶变换中测不准原理的限制,更适用于处理非线性、非平稳信号,从而可以获得信号任意时刻的频率分布,提供更高的时频域分辨能力。目前,HHT 已在非线性系统、生物医学、环境工程的信号识别,以及故障诊断和地震信号处理中获得了有效应用。

## 1 基本理论

HHT 由 EMD 分解及 Hilbert 变换两部分组成,其核心是 EMD 分解。首先将信号分解为固有模态函数(这样的分解过程称为 EMD 分解),然后将 IMF 作 Hilbert 变换,能正确地获得信号的瞬时频率及其他属性。

### 1.1 黄变换及 EMD 分解

固有模态函数 IMF 满足下列两个条件:

1) 局部极大值以及局部极小值的数目之和必须与零交点的数目相等或是最多差 1。

2) 在任何时间点,局部最大值所定义的上包络线与局部极小值所定义的下包络线均值为 0。

因此,一个函数若属于 IMF,代表其波形局部对称于零平均值,可以直接使用 Hilbert 变换求得有意义的瞬时频率。

建立 IMF 是为了满足 Hilbert 变换对于瞬时频率的限制条件,EMD 分解通过重复筛选逐步找出 IMF,将信号分解成数个 IMF 的组合。以信号  $s(t)$  为例,筛选过程如下。

步骤 1: 找出  $s(t)$  中的所有局部极大值以及局部极小值,利用三次样条插值,分别将局部极大值串连成上包络线,将局部极小值串连成下包络线。

步骤 2: 求出上下包络线之平均值,得到均值包络线  $m_1(t)$ 。

步骤 3: 将原始信号  $s(t)$  与均值包络线相减,

收稿日期: 2009-06-09; 改回日期: 2009-06-14。

第一作者简介: 侯斌(1984-),男,长江大学物探专业在读硕士研究生,研究方向为地震解释与储层预测。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40774072)资助。

得到第一个分量  $h_1(t)$ , 即

$$h_1(t) = s(t) - m_1(t) \quad (1)$$

步骤 4: 检查  $h_1(t)$  是否符合 IMF 的条件, 如果不符合, 则返回步骤 1, 并且将  $h_1(t)$  当作原始信号, 进行第二次筛选。即

$$h_2(t) = h_1(t) - m_2(t) \quad (2)$$

重复筛选  $k$  次, 直到

$$h_k(t) = h_{k-1}(t) - m_k(t) \quad (3)$$

符合 IMF 的条件, 即得到第一个 IMF 分量  $c_1(t)$ 。

$$c_1(t) = h_k(t) \quad (4)$$

步骤 5: 将原始信号  $s(t)$  减去  $c_1(t)$  可得到剩余量  $r_1(t)$ , 即

$$r_1(t) = s(t) - c_1(t) \quad (5)$$

步骤 6: 将  $r_1(t)$  当作新的信号, 重新执行步骤 1~步骤 5, 得到新的剩余量  $r_2(t)$ 。如此重复  $n$  次, 当第  $n$  个剩余量  $r_n(t)$  已成为单调函数或是常数, 无法再分解 IMF 时, 整个 EMD 分解过程结束。

原始信号  $s(t)$  可以表示成  $n$  个 IMF 分量与一个平均趋势分量  $r_n(t)$  的和, 即

$$s(t) = \sum_{k=1}^n c_k(t) + r_n(t) \quad (6)$$

式中:  $c_k(t)$  为 IMF 分量;  $r_n(t)$  为残余分量, 一般为信号的平均趋势, 为常数序列或单调序列。

### 1.2 Hilbert 变换与 Hilbert 谱

Hilbert 变换对于单频率信号有很高的时间分辨率和频率分辨率。并不是任何信号都可以通过 Hilbert 变换得到瞬时频率, 严格意义上讲, 只有满

足窄带条件的一类信号, 且信号在一个时间点只包含一个频率分量时, 瞬时频率计算才有意义。对于多频率成分信号, 由于失去了物理意义, 瞬时频率属性没有任何意义。

通过 EMD 分解得到 IMF, 它属于窄带信号, 正好满足 Hilbert 变换的要求。因此, 可以对每一个 IMF 分量做 Hilbert 变换, 得到瞬时频率和幅度。设  $i$  个 IMF 分量为  $c_i(t)$ , 则 Hilbert 变换结果为:

$$H[c_i(t)] = \hat{c}_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (7)$$

其复解析信号为:

$$Z_i(t) = c_i(t) + i\hat{c}_i(t) = a_i(t)e^{j\theta_i(t)} \quad (8)$$

式中: 幅值函数  $a_i(t)$  表示信号每个采样点的瞬时振幅能量; 相位函数  $\theta_i(t)$  表示信号每个采样点的瞬时相位, 对其求导就得到瞬时频率

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (9)$$

对每个 IMF 分量做 Hilbert 变换并忽略分解余项, 得到 Hilbert 谱, 即包含时间、频率、振幅的三维离散骨架谱。信号的 Hilbert 谱  $X(\omega, t)$  可以表示为:

$$X(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\omega_i(t)t} \quad (10)$$

## 2 理论模型测试

图 1a 为设计的理论模型道。考虑到地震波在

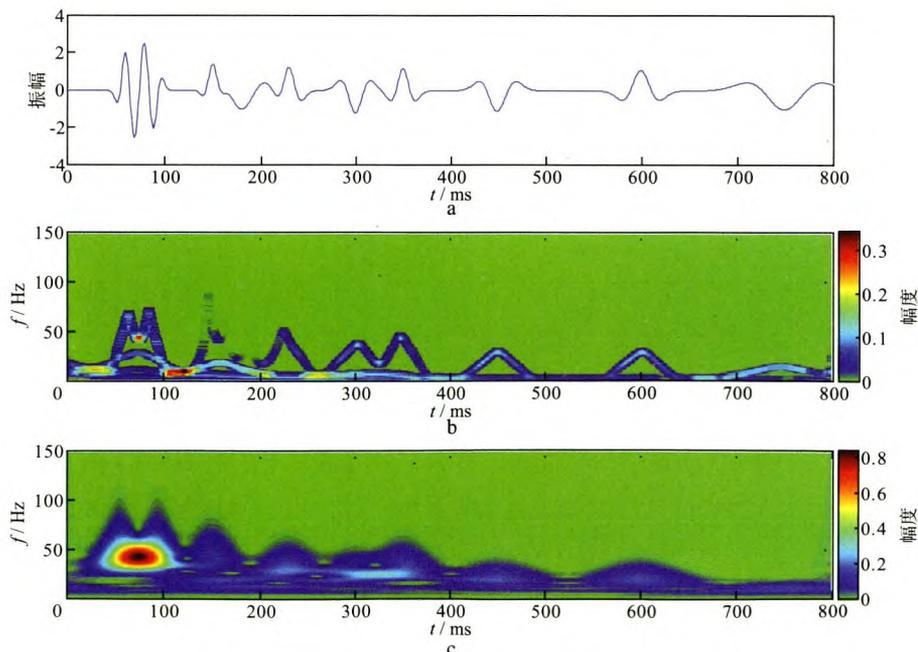


图 1 合成地震记录(a)与 Hilbert 谱(b)和 S 谱(c)

传播过程中的衰减吸收,由数个不同主频的雷克子波(主频分别为 50,40,30,20,10 Hz),与反射系数褶积得到理论合成记录。

图 1b 是用希尔伯特-黄变换得到的 Hilbert 时频谱经过加权高斯滤波平滑后的结果,图 1c 为用 S 变换得到的 S 时频谱。对两种时频谱进行比较可以看出,S 时频谱能量分布边界较模糊,当子波叠加在一起时,不能较好地分开;Hilbert 时频谱能量分布边界清楚,比 S 时频谱具有更好的时频域刻画能力。

### 3 应用实例

实际资料为来自里海卡拉赞巴斯油田的一个高分辨率地震资料,图 2 为提取的二维地震剖面。该资料主频为 67 Hz,频带宽度 10~117 Hz,产油层埋藏较浅,厚度较厚,位于 380~440 ms,分布在 580~738 道,油藏性质为稠油。图 3 是抽取第 680 道,做 EMD 分解形成的 7 个 IMF 分量和 1 个残余量。图 4 是对该地震道做希尔伯特-黄变换和 S 变

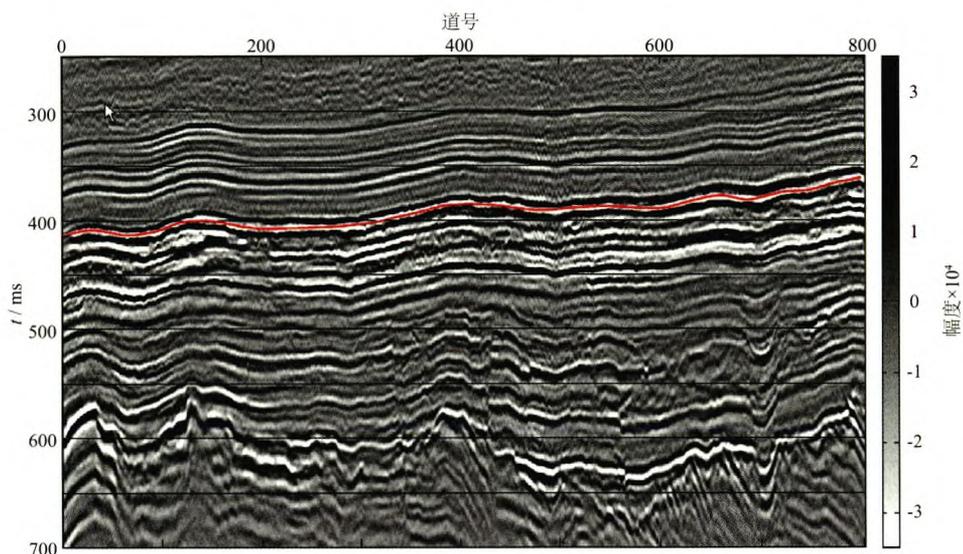


图 2 实际地震剖面

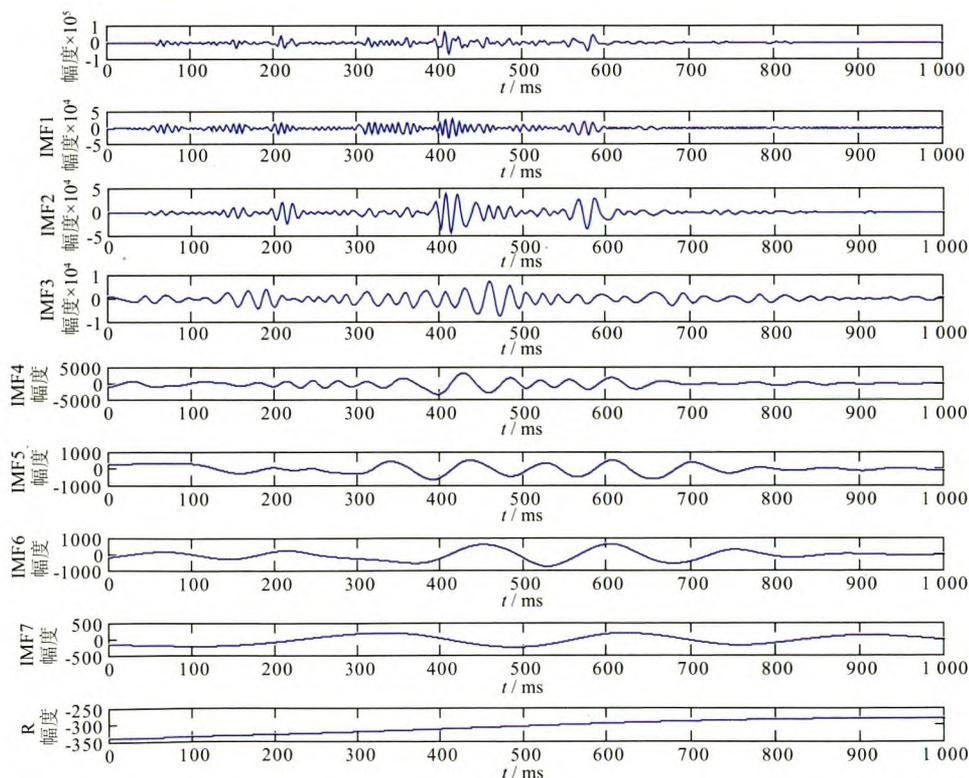


图 3 地震信号的经验模式分解

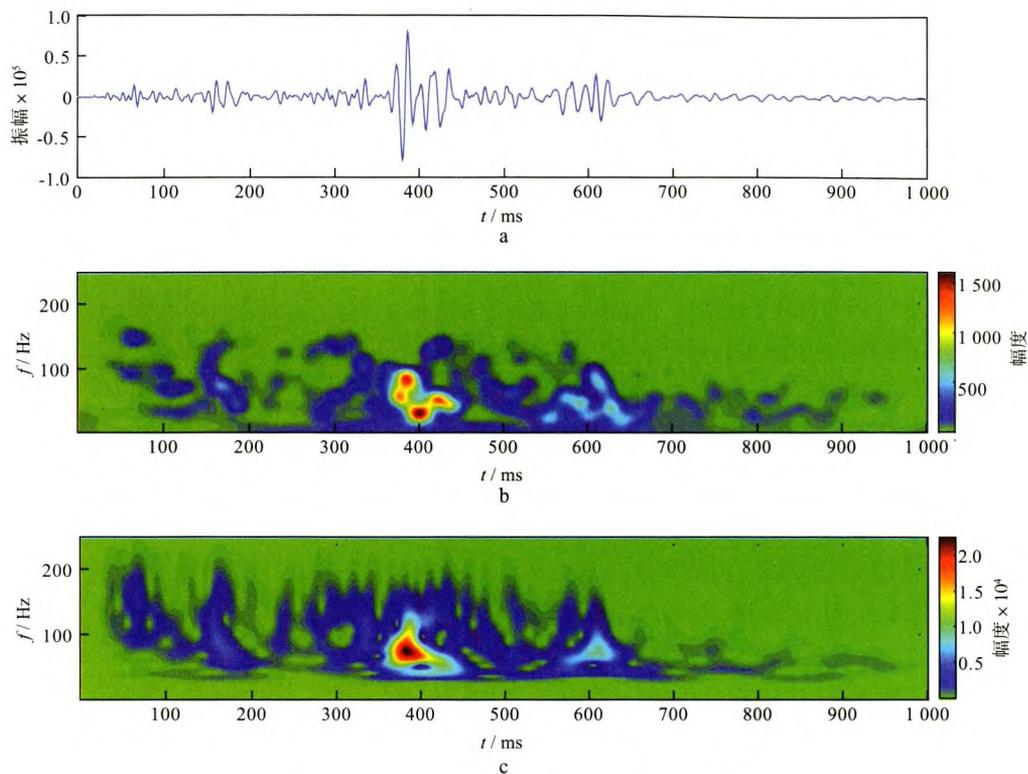


图 4 地震信号(a)与 HHT 谱(b)和 S 谱(c)

换得到的时频谱。正如理论模型结果显示的那样，HHT 谱在时频域的瞬时能量分布较 S 时频谱清晰，我们可以清楚地发现地震波在穿过较厚油层时（即在 370~430 ms 之间），频率成分及能量发生了显著改变。油层在 HHT 谱上表现为高频能量被明显吸收，频率成分降低，低频能量相对增强，而在 S 谱上只有模糊的反映。

当储层中含有流体时，会引起地震波能量和频率的变化，表现为高频能量衰减和低频能量增强，由此形成低频阴影。对整个地震剖面做 HHT 变换，求得 Hilbert 谱后，抽取两个分频剖面进行对比。图 5 为 22 Hz 的能量分布，图 6 为 52 Hz 的能量分布，我们能在油层下方清楚地发现低频阴

影。在 22 Hz 低频剖面上，位于椭圆内的低频有较强的能量分布，但在 52 Hz 高频剖面上，能量已经被基本吸收。分析表明，HHT 瞬时谱具有一定的油气检测能力。

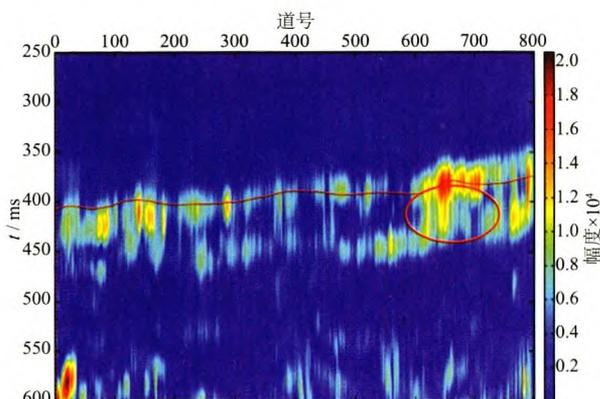


图 5 地震剖面的 22 Hz 分频剖面

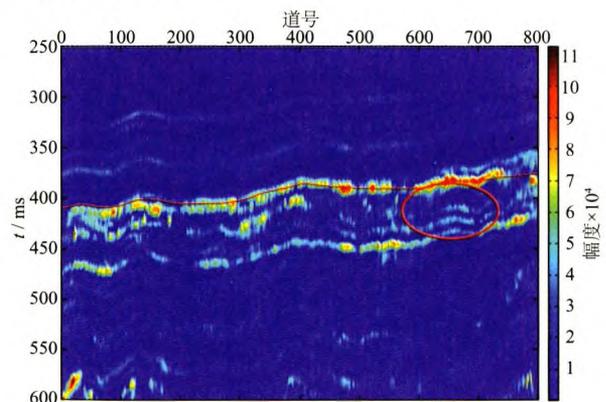


图 6 地震剖面的 52 Hz 分频剖面

### 4 结论

1) HHT 变换是一种全新、高效的非线性、非平稳信号时频分析方法，它扩展了 Hilbert 变换的使用范围，克服了传统时频分析方法的缺陷，其结果不受核函数的影响和时频测不准原理的限制。

2) 实际应用结果表明，Hilbert 能量谱能清晰地刻画地震信号能量随时频的分布，挖掘更多地震（下转第 290 页）

江组地层底界面和目标界面反射波组的连续性明显较好。而以椭圆形区域左侧目标界面为代表的很多反射波也都由两个波组变为一个波组,背景总体噪声较弱,从而有利于对资料的解释。

#### 4 结束语

本文主要研究了复杂膏盐覆盖区深层成像困难的问题,采用粘弹介质模拟的方法,通过对不同深度反射信号的频率与成像质量之间关系的分析和实际资料的处理结果可以得出如下结论:

1) 膏盐层对地震波场的强烈吸收和散射作用是引起复杂膏盐层覆盖区深层成像困难的主要原因;

2) 介质对波场的吸收和散射作用是传播信号的频率密切相关的,低频信号具有较强的抗吸收和抗散射能力,易于穿透膏盐覆盖层;

3) 利用低频信号可以提高膏盐覆盖区深层的成像质量。

#### 参 考 文 献

- 1 郭彦如,王新民,张竟廉,等. 膏盐矿床与大气田的关系

[J]. 天然气地球科学,1998,9(5):18~27

- 2 Criss C J, Kiger C, Maxwell P, et al. Full-wave seismic acquisition and processing, the onshore requirement[J]. First Break, 2005, 23(2): 53~61
- 3 余德平,吴继敏,李佩,等. 利用低频信号提高膏盐区成像质量[J]. 石油物探,2006,45(3):472~477
- 4 She D P, Zhu H L. Using low-frequency signals to improve imaging quality under basalt[J]. Expanded Abstracts of 77<sup>th</sup> Annual International SEG Meeting, 2007, 2 417~2 421
- 5 Ziolkowski A, Hanssen P, Gatliff R, et al. Use of low frequencies for sub-basalt imaging [J]. Geophysical Prospecting, 2003, 51(1): 169~182
- 6 Carcione J M, Herman G C, Kroodeten A P E. Seismic modeling[J]. Geophysics, 2002, 67(4): 1 304~1 325
- 7 袁静,覃克. 东营凹陷沙四段深水成因蒸发岩特征及其与油气藏的关系[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(1): 9~15
- 8 邹才能,张颖. 油气勘探开发实用地震技术[M]. 北京:石油工业出版社,2002. 64
- 9 李庆忠. 走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析[M]. 北京:石油工业出版社,1993. 30~43

(编辑:任 鹏)

(上接第 251 页)

信号蕴含的信息,在地球物理领域有着广阔的应用前景。

#### 参 考 文 献

- 1 Huang N E, Zheng Shen, Long S R, et al. 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
- 2 Huang N E, Wu M C, Long S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 2003, 459: 2 317~2 345
- 3 Huang N E, Zheng Shen, Long S R. A new view of

nonlinear water waves; the Hilbert Spectrum[J]. Annu Rev Fluid Mech, 1999; 31: 417~457

- 4 黄中玉,王子静,孙显义,等. 分频技术在气层识别中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2008, 31(1): 73~76, 79
- 5 刘喜武,宁俊瑞. 地震时频属性及其在油气地震地质技术中应用的综述[J]. 勘探地球物理进展, 2009, 32(1): 18~22
- 6 钟佑明,秦树人,汤宝平. 一种振动信号新变换法的研究[J]. 振动工程学报, 2002, 15(2): 233~238
- 7 赵知劲,袁慧琴,郭殿武. 基于 Hilbert-Huang 的信号瞬时参数提取[J]. 信号处理, 2005, 21(4A): 423~426
- 8 钟佑明,秦树人. 希尔伯特-黄变换的统一理论依据研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(3): 40~43

(编辑:戴春秋)