

基于经验模态分解的地震瞬时属性提取

陈林^{1,2}, 宋海斌¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所地球深部重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 传统复地震道方法提取的地震瞬时属性存在物理意义不明确、对噪声敏感等不足, 本文探讨基于经验模态分解的地震瞬时属性提取方法, 得到不同尺度下的地震瞬时属性, 由此得到的瞬时频率在数值上与地震主频对应较好. 将该方法提取的属性应用到海上地震数据中, 显示出较好的效果.

关键词 地震瞬时属性, 经验模态分解, 瞬时频率

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)04-1179-07

Seismic instantaneous attribute extraction based on empirical mode decomposition

CHEN Lin^{1,2}, SONG Hai-bin¹

(1. Key Laboratory of the Earth's Deep Interior, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The seismic attributes from the traditional complex seismic trace method are lack of clear physical meaning and sensitive to noise. A new method of extracting seismic instantaneous attributes based on empirical mode decomposition is discussed in this paper. Seismic instantaneous attributes on different scales are gained and the instantaneous frequency accords with seismic dominant frequency well. The new method for seismic attributes is applied to marine seismic data and exhibits good performance.

Keywords seismic instantaneous attributes, empirical mode decomposition, instantaneous frequency

0 引言

在地震勘探中, 瞬时属性的提取具有十分重要的意义. 瞬时属性(主要指瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率等三瞬属性)不仅可以直接用来研究地球介质的构造、岩性等方面, 还可以反演介质的品质因子等参数^[1]. 计算信号瞬时属性有多种方法^[2,3], 常用的是 1946 年 Gabor 提出的解析信号法, 即通过 Hilbert 变换构造复信号求取瞬时属性的方法^[4]. 1979 年 Taner 等首次应用解析信号法构造复地震道求得瞬时属性, 并探讨了瞬时属性剖面在地震解释中的应用^[5]. Taner 等人的工作引发了人们研究地震属性的热情. 随后, Robertson 等人将复地震道方法应用于薄层解释^[6], Barnes 的工作进一步推动

和扩展了地震信号瞬时属性的理论基础、计算方法以及应用范围^[7,8]. 国内方面高静怀等提出了利用解析小波求地震信号瞬时属性的方法^[9], 虽然该方法对克服 Hilbert 变换对噪声干扰比较敏感等问题有一定效果, 但应用中仍有其局限性^[10,11].

事实上, 通过 Hilbert 变换求取的信号瞬时属性并非对任何信号都有明确的物理意义. 这种方法通常要求被分析信号是窄带或平稳的^[12], 而且实际信号通常含有噪声, Hilbert 变换对噪声很敏感, 如实际地震信号既非平稳又含有噪声, 因此有必要寻找新的途径来提取地震信号瞬时属性. Huang 于 1998 年提出了一种新的分析非平稳非线性信号的方法—Hilbert-Huang 变换^[12], 该方法通过经验模态分解将信号分解为有限个固有模态函数之和, 并

收稿日期 2008-03-10; 修回日期 2008-05-20.

基金项目 中国科学院知识创新工程项目重要方向项目(KZCX3-SW-224, KZCX3-SW-19)和国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411704)资助.

作者简介 陈林, 男, 1980 年生, 博士研究生, 主要从事海洋地球物理研究. (E-mail: chenlin@mail.iggcas.ac.cn)

认为这些固有模态函数均为窄带信号,利用 Hilbert 变换对其求得的瞬时频率具有明确的物理意义,本文将探讨基于 EMD 的地震瞬时属性提取方法,以期得到物理意义明确的瞬时频率属性,并将其应用到海底天然气渗漏的识别中。

1 方法原理

本文采用的做法是首先通过经验模态分解 (EMD) 将地震信号分解为窄带信号分量之和,然后对各信号分量分别用复地震道方法提取瞬时属性,以得到地震信号在不同尺度下的特征并使瞬时频率具有物理意义。下面分别对经验模态分解和地震瞬时属性提取作简单介绍。

1.1 经验模态分解 (EMD)

Huang 认为任何信号都是由不同的固有模态函数组合而成,每个固有模态函数拥有相同数目的极值点与零点并且关于局部平均对称,并将具有如下性质的信号定义为固有模态函数 (IMF)^[13]:

(1) 该信号极值点的数目与零交叉点的数目相等或至多相差一个;

(2) 在任何时间点上,由该信号的局部极大值点形成的包络线和由局部极小值点形成的包络线的平均值为零。

Huang 认为 Hilbert 变换作用到具有上述性质的信号上时,便能给出物理意义明确的瞬时频率。由于大多数信号不满足上述条件,可能包含不止一个振荡模态,为此需要通过经验模态分解 (EMD) 将信号分解为固有模态函数之和。给定实信号 $x(t)$, EMD 算法如下:

① 找出信号 $x(t)$ 所有的极值点,然后用三次样条函数拟合所有局部极大值点,得到上包络线,同理,由局部极小值产生下包络线,上下包络线应该将所有数据点包含在它们之间;求得上下包络线的平均值,记为 $m_1(t)$,将原信号 $x(t)$ 减去 $m_1(t)$ 得到一个新信号 $h_1(t)$,

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t). \quad (1)$$

这个过程称为筛分 (sifting)。如果 $h_1(t)$ 满足 IMF 条件,则 $h_1(t)$ 即为第一个固有模态函数。一般说来, $h_1(t)$ 不满足 IMF 条件,转入下面的步骤。

② 将 $h_1(t)$ 作为待处理数据,重复上述筛分,得到上下包络的平均值 $m_{11}(t)$,再判断 $h_{11} = h_1(t) - m_{11}(t)$ 是否满足 IMF 条件,如果不满足重复循环 k 次,

$$h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) = h_{1k}(t). \quad (2)$$

使得 $h_{1k}(t)$ 满足 IMF 条件,得到信号 $x(t)$ 的第

一个固有模态函数,记为 c_1 , c_1 代表原信号中最高频率的 IMF 分量。

$$c_1 = h_{1k}(t). \quad (3)$$

③ 将 c_1 从 $x(t)$ 中分离出来,得到去除高频成分的残余信号

$$r_1 = x(t) - c_1. \quad (4)$$

将 r_1 作为原始数据重复以上步骤,得到 $x(t)$ 的第二个固有模态函数 c_2 ,然后将 r_1 减去 c_2 得到 r_2 ,如此重复下去

$$r_1 - c_2 = r_2, r_2 - c_3 = r_3, \dots, r_{n-1} - c_n = r_n. \quad (5)$$

直到分量 c_n 或剩余分量 r_n 比预定值小,或当 r_n 变成单调函数,不能再筛选出固有模态函数时停止上述分解过程。

④ 最后,原信号可表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t). \quad (6)$$

通过 EMD 方法可以把任何一个信号 $x(t)$ 分解为数个固有模态函数和一个残量 r_n 之和,其中分量 c_1, c_2, \dots, c_n 分别包含了信号从高到低不同频率段的成分,而 r_n 则为信号的平均趋势^[11]。

1.2 地震瞬时属性提取

通过复地震道分析可以提取传统的三瞬属性,即瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率^[5]。

设 $\tilde{x}(t)$ 是原始地震记录 $x(t)$ 的希尔伯特变换,通过复地震道分析技术,可以得到三瞬属性:

瞬时振幅:

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)}, \quad (7)$$

瞬时相位:

$$\varphi(t) = \arctan \frac{\tilde{x}(t)}{x(t)}, \quad (8)$$

瞬时频率:

$$\omega(t) = d\varphi/dt. \quad (9)$$

本文在通过 EMD 将地震信号分解为窄带信号之和的基础上,利用 (7)~(9) 式提取个分量的瞬时地震属性,以期得到地震信号在不同尺度下的特征和物理意义明确的瞬时频率属性。

2 基于 EMD 的地震瞬时属性提取及其在海底天然气渗漏识别中的应用

地震数据来自 Cadiz 湾 (葡萄牙合作者 Pinheiro 教授提供),为单道采集的地震数据,在第 430 道附近有一个隆起,可能代表海底天然气渗漏的产物—泥火山,见图 2(a)。图 1 为第 430 道记录经验

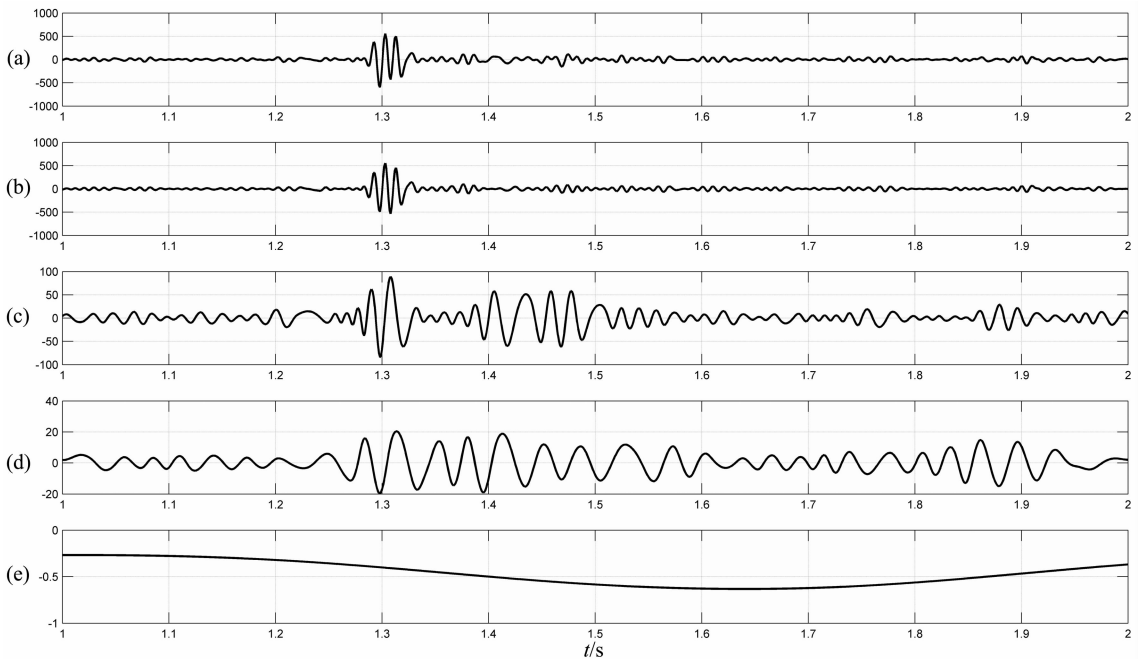


图 1 第 430 道地震数据经验模态分解的结果,仅显示前三个 IMF

Fig. 1 The EMD results of the 430th seismic trace, only the first three IMF shown

模态分解的结果,可以看到频率成分随着分量阶数的增加移向低频,第一阶分量(imf1)频率最高,最先提取出来,可能包含了高频噪声,前阶分量代表了原地震道的主要成分,到第三阶分量时幅度已经 $[-25, 25]$ 之内了,IMF3 之后的分量幅度要比前三个分量小得多,不是主要成分,余量表示了信号的平均趋势.事实上,EMD 方法是一种新的主成分分析方法,即主要成分优先分解出来,这一点不同于小波分解^[14].

图 2 为原始地震剖面以及从中提取前三个分量所生成的分量剖面,图 2(a)为原始地震剖面,海底表层沉积成层明显,隆起两边不对称地分布着两个“V”字型凹陷;图 2(b)为对图 2(a)做 EMD 得到的第一阶 IMF 形成的剖面,为地震数据中频率成分最高的部分,反映出了一些细节,同时可能包含高频噪声;图 2(c)为第二阶 IMF 形成的剖面,突出了海底沉积层理,与图 2(a)相比尺度变大.随着 IMF 阶数增高,信号幅度迅速减小,主成分主要反映在前几个模态分量上,因此三阶以后的模态函数剖面变模糊,如图 2(d).

图 3 为原始地震剖面 and 前三阶固有模态分量(IMF1-2)所生成的分量剖面的瞬时振幅图,原始地震剖面瞬时振幅图 3(a)反映的是原始地震数据总体的能量,在海底隆起部分(特别是两侧)的能量较两旁要小. IMF1-3 的瞬时振幅图 3(b)~(d)分别显示原

地震数据不同尺度上的能量,随着尺度的变大(即 IMF 阶数的变高),瞬时振幅值依次减小,分辨率也显著降低.这说明地震数据低频能量较弱.

图 4 为原始地震剖面 and 前三阶固有模态分量(IMF1-3)所生成的分量剖面的瞬时相位图.在原始地震剖面的瞬时相位图 4(a)上可以看到,除了 1400~1500 ms 之间反射层的横向连续性较好以外,在海水和深部显示的都是杂乱反射,这与地震主频较高(100 Hz 左右),穿透深度较浅有关.同时可以看到隆起带内部有层状结构,且与两旁同相轴的连续性较好,据此可以推断该隆起是下部柔性物质上涌或侧向挤压造成的. IMF1-IMF3 的瞬时相位图 4(b)~(d)分别反映了不同尺度上的特征,IMF1 反映的是细节信息,IMF2 和 IMF3 尺度较大,反映原始地震剖面瞬时相位的主要特征.

图 5 是用短时傅里叶变换计算的该剖面上第 430 道地震信号的时频分布图,可以看到地震信号的频率主要集中于 80~120 Hz 之间,这也可以从下面的瞬时频率剖面中得到验证.

图 6 为原始地震剖面 and 前三阶固有模态分量(IMF1-3)所生成的分量剖面的瞬时频率图,原剖面的瞬时频率与地震主频(100 Hz)对应不上,IMF1 的瞬时频率数值总体上与地震主频(100 Hz)一致,IMF2 和 IMF3 反映的是较低频率的信息.由于这里

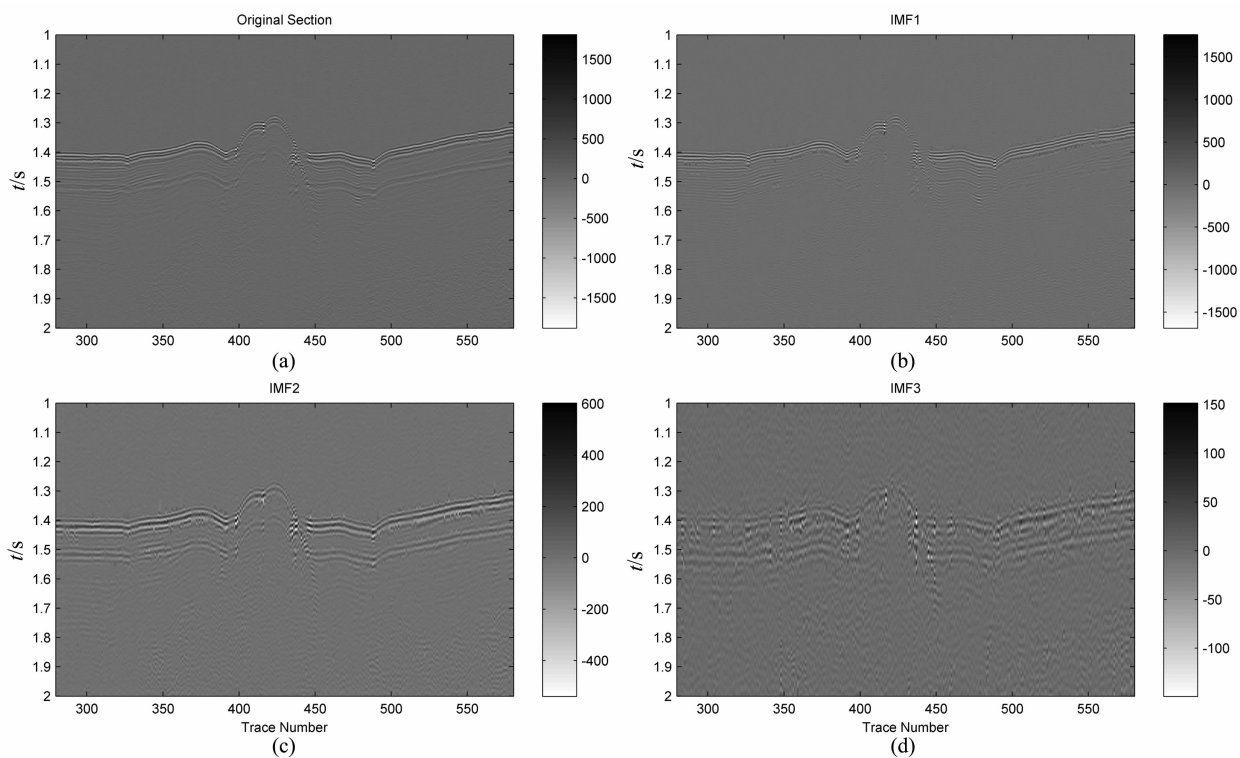


图 2 原地震剖面 and 前三阶 IMF 剖面

Fig. 2 The original seismic section and the first three IMF sections

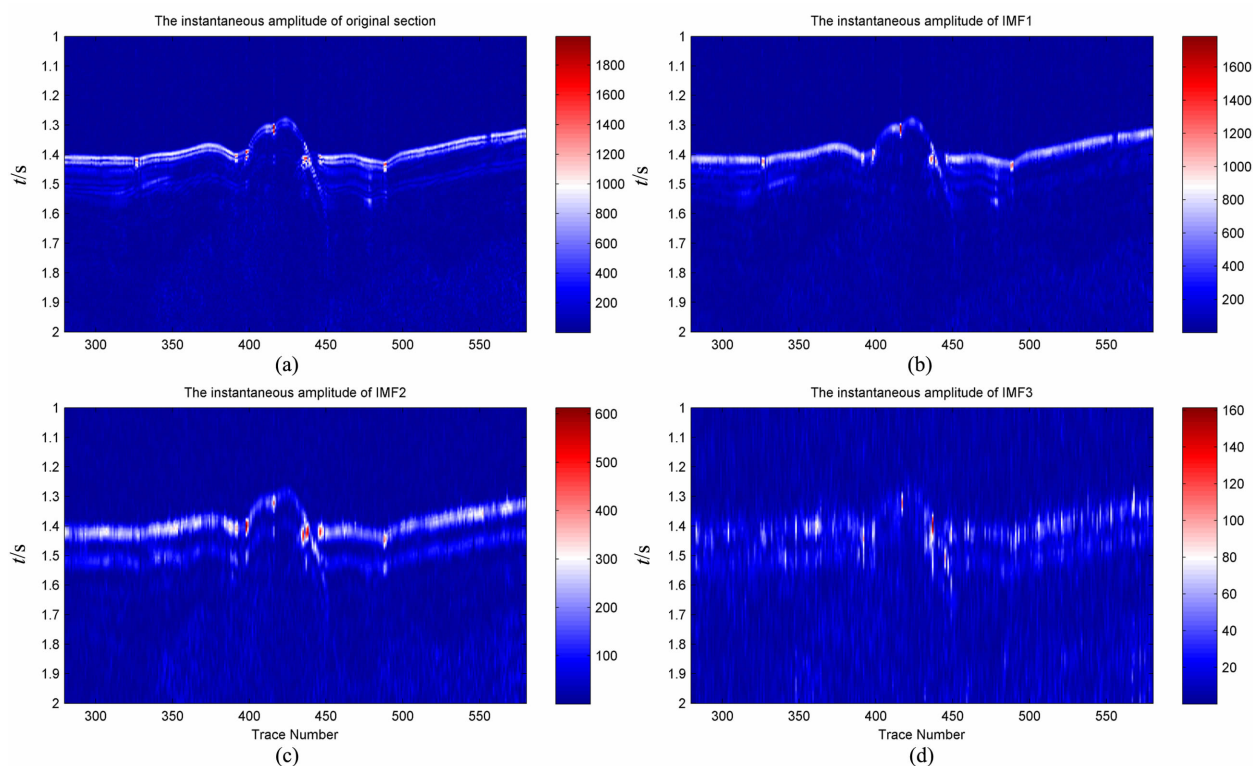


图 3 原地震剖面 and 前三阶 IMF 的瞬时振幅图

Fig. 3 The instantaneous amplitude of original section and the first three IMFs

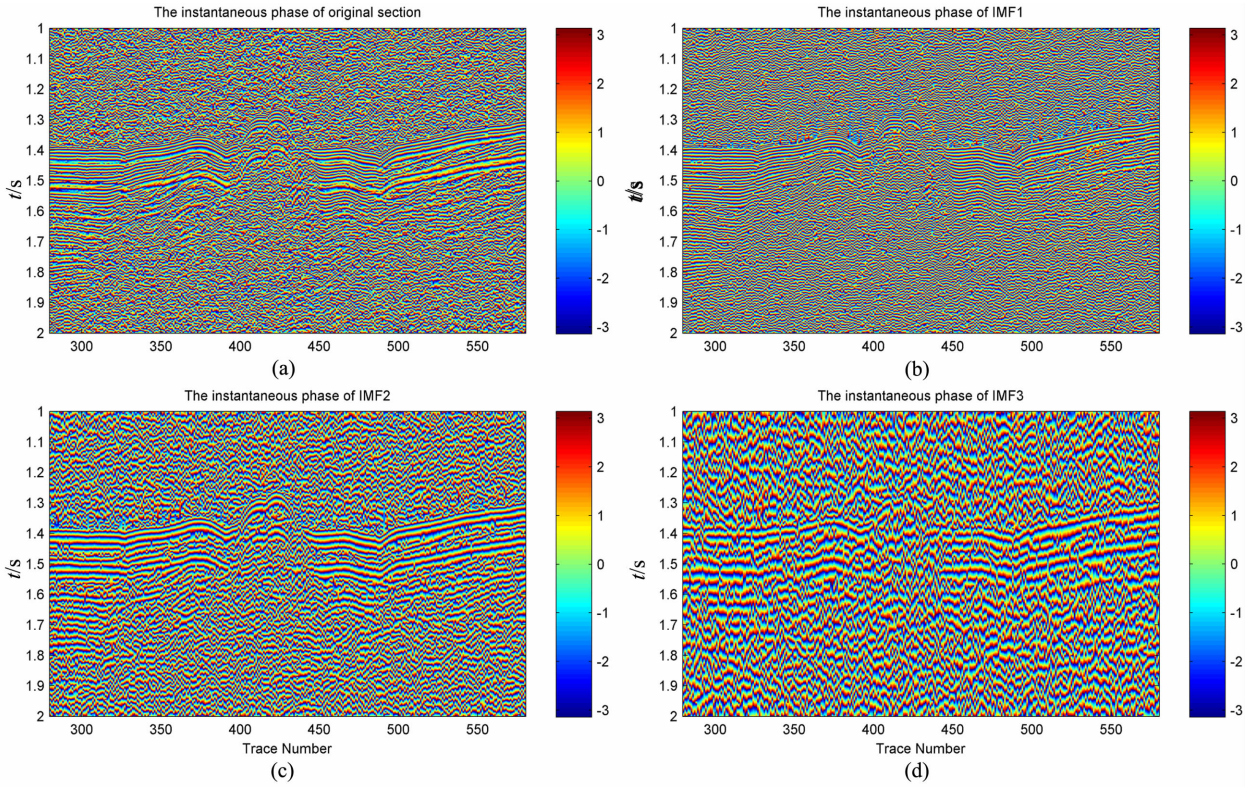


图 4 原地震剖面 and 前三阶 IMF 的瞬时相位图

Fig. 4 The instantaneous phase of original section and the first three IMFs

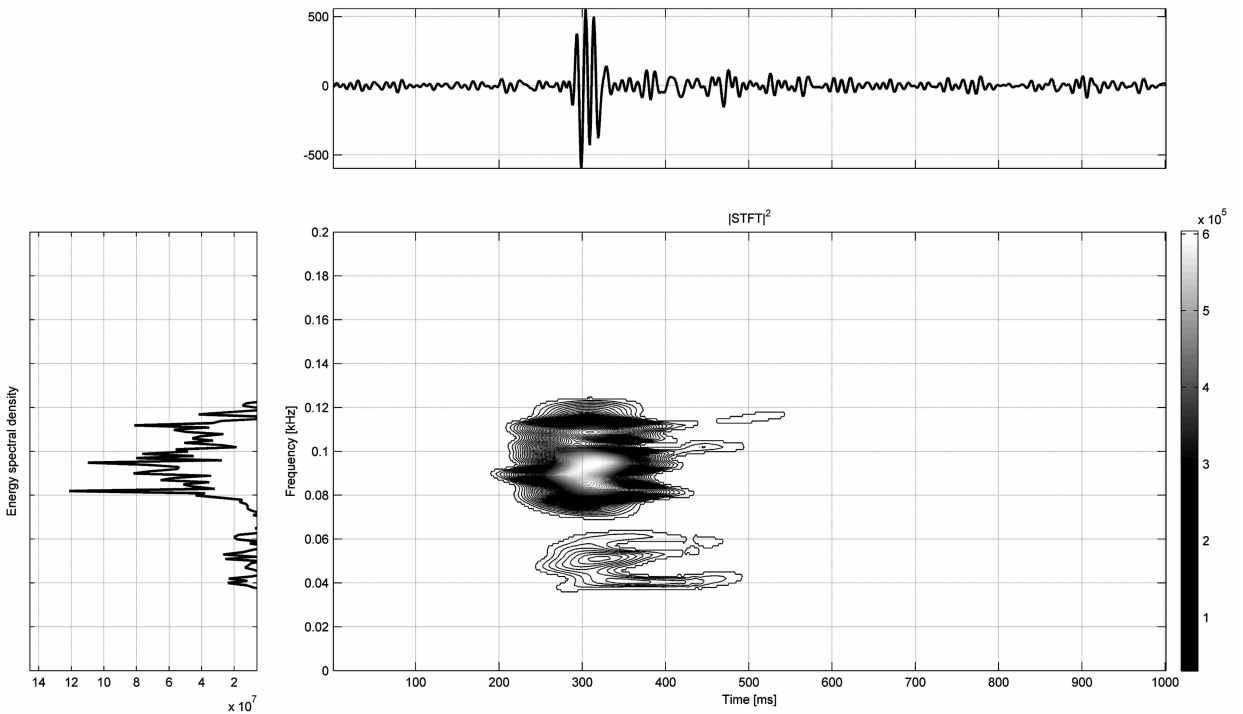


图 5 由短时傅里叶变换计算得到的第 430 道地震信号的时频分布

Fig. 5 The time-frequency distribution of the 430th trace with STFT

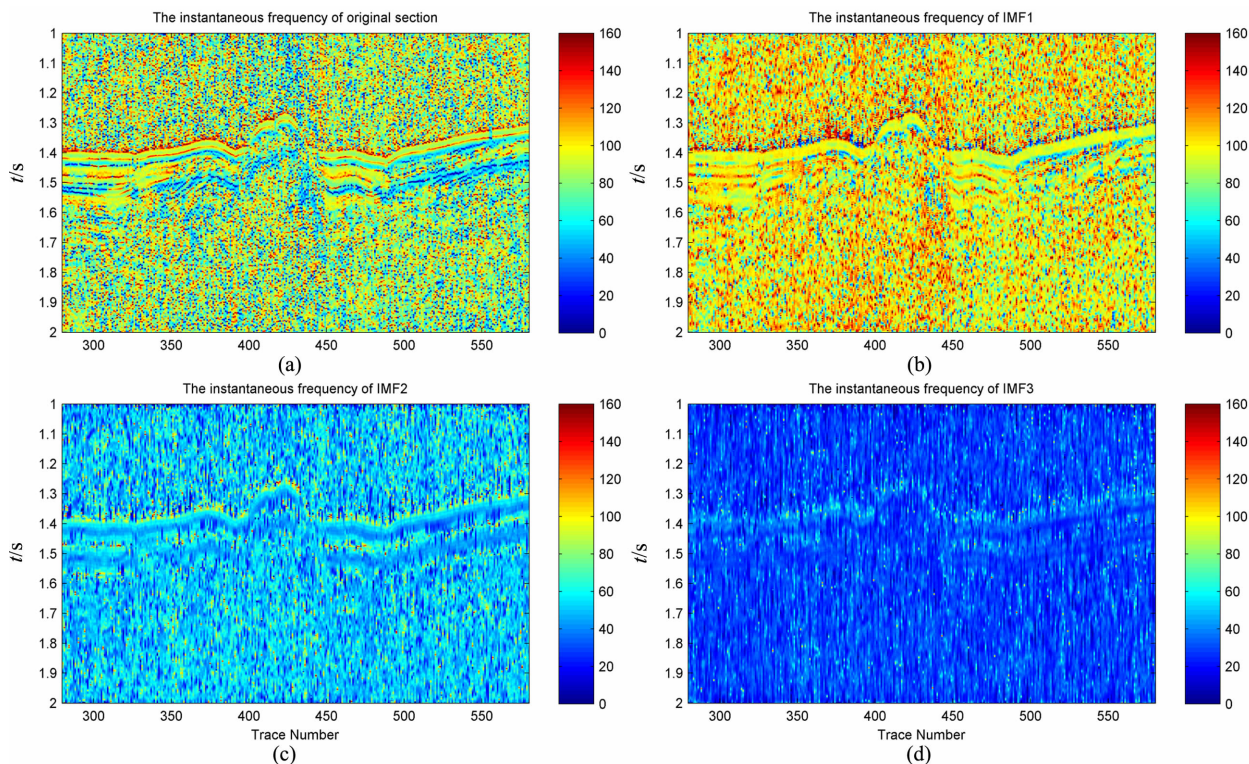


图 6 原地震剖面 and 前三阶 IMF 的瞬时频率图

Fig. 6 The instantaneous frequency of original section and the first three IMFs

瞬时频率是由瞬时相位的导数求得,因此对噪声很敏感.该地震数据为单道采集,未做叠加,信噪比低,不仅使得原地震剖面的瞬时频率(如图 6(a))特征淹没在噪声背景中,而且 IMF1-IMF3 的瞬时频率(如图 6(b)~(d))亦如此.在 IMF1 瞬时频率图(如图 6(b))中 440 道 1500 ms 附近出现的低频影区和 IMF1 瞬时振幅图中相应处出现的高振幅值相对应,据此可判断该处可能为含气层^[15].

3 结论与认识

希尔伯特-黄变换是近年发展起来的分析非线性非平稳信号的方法,该方法通过 EMD 将信号分解为窄带分量之和,进而可得到物理意义明确的瞬时频率.地震信号是典型的非平稳信号,直接用复地震道方法求得的瞬时频率物理意义不明确,表现在与地震主频对应不上,而在 EMD 的基础上求得的瞬时频率则与地震主频对应较好,具有物理意义.瞬时振幅的高值处如果与瞬时频率的低频区对应,则可初步推断该处为含气层.海底浅部的含气层通常与海底天然气渗漏有关^[16~19],因此提取物理意义明确的地震属性有助于识别海底天然气渗漏.

致谢 感谢葡萄牙 Aveiro 大学 Pinheiro 教授提供地震数据.

参 考 文 献 (References):

- [1] Matheny M P, Nowack R L. Seismic attenuation values obtained from instantaneous-frequency matching and spectral ratios[J]. *Geophys. J. Int.* 1995, 123:1~15.
- [2] Vakman D. On the analytic signal, the Teager-Kaiser energy algorithm, and other methods for defining amplitude and frequency[J]. *IEEE Transactions on signal processing*, 1996, 44(4): 791~797.
- [3] 李世雄,陈东方. 信号瞬时参数计算方法评价[J]. *信号处理*, 2003,19 (1): 59~63.
Li S X, Chen D F. Comments on the methods of defining the instantaneous parameters[J]. *Signal Processing*, 2003, 19(1): 59~63.
- [4] Gabor D. Theory of communication[J]. *J. IEE*, 1946, 93(3): 429~457.
- [5] Taner M T, Koehler F, Sheriff R E. Complex seismic trace analysis[J]. *Geophysics*, 1979, 44(6): 1041~1063.
- [6] Robertson J D, Nogmi H H. Complex trace analysis of thin beds[J]. *Geophysics*, 1984, 49(4): 344~352.
- [7] Barnes A E. The calculation of instantaneous frequency and instantaneous bandwidth [J]. *Geophysics*, 1992, 57: 1520 ~ 1524.
- [8] Barnes A E. Weighted average seismic attributes[J]. *Geophys-*

- ics, 2000, 65: 275~285.
- [9] 高静怀,汪文秉,朱光明. 小波变换与信号瞬时特征分析[J]. 地球物理学报, 1997, 40(6): 821~832.
Gao J H, Wang W B, Zhu G M. Wavelet transform and instantaneous attributes analysis[J]. Acta Geophysica Sinica, 1997, 40(6): 821~832.
- [10] 李世雄,汪继文. 信号的瞬时参数与正交小波基[J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 97~104.
Li S X, Wang J W. Instantaneous parameters of signal and orthogonal bases of wavelets[J]. Chinese Journal of geophysics, 2000, 43(1): 97~104.
- [11] 程军圣,于德介,杨宇. 基于 EMD 的信号瞬时特征的小波分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 181~186.
Cheng J S, Yu D J, Yang Y. Signal instantaneous attribute analysis using wavelet transform based on EMD[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(2): 181~186.
- [12] Huang N E, Shen Z, Long S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series[J]. Proceedings of the Royal Society of London, A, 1998, 454: 903~995.
- [13] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annu. Rev. Fluid Mech. 1999, 31: 417~457.
- [14] 龚志强,邹明玮,高新全,等. 基于非线性时间序列分析经验模态分解和小波分解异同性的研究[J]. 物理学报, 2005, 54(8): 2005, 54(8): 3947~3957.
Gong Z Q, Zou M W, Gao X Q, *et al.* On the difference between empirical mode decomposition and wavelet decomposition in the nonlinear time series[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(8): 2005, 54(8): 3947~3957.
- [15] Taylor M H, Dillon W P, *et al.* Trapping and migration of methane associated with the gas hydrate stability zone at the Blake Ridge Diapir: new insights from seismic data [J]. Marine Geology, 2000, 164: 79~89.
- [16] 陈林,宋海斌. 海底天然气渗漏的地球物理特征及识别方法[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 1067~1073.
Chen L, Song H B. Geophysical features and identification of natural gas seepage in marine environment[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(4): 1067~1073.
- [17] 陈林,宋海斌. 海底天然气渗漏地震探测方法的研究进展[J]. 天然气工业, 2006, 26(7): 35~39.
Chen L, Song H B. Research progress on seismic detection methods of natural gas seepage on the seabed[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(7): 35~39.
- [18] 陈林. 地震时频属性提取及其在海底天然气渗漏识别中的应用[D]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所, 2007.
Chen Lin. The extraction of time-frequency seismic attributes and its application in the detection of submarine natural gas seepage[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [19] 李列,宋海斌,杨计海. 莺歌海盆地中央坳陷带海底天然气渗漏系统初探[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1244~1247.
Li L, Song H B, Yang J H. A preliminary study of seafloor gas seepage in central sag zone of Yinggehai Basin[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(4): 1244~1247.
- [20] 王淑红,宋海斌,颜文. 地球系统中的天然气水合物—天然气体系研究展望[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 232~243.
Wang S H, Song H B, Yan W. Study expectation of gas hydrate-gas system in earth system[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1): 232~243.