

希尔伯特—黄变换在地震资料处理中的应用^①

刘庆敏¹, 杨午阳¹, 李书平², 何欣¹

(1. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃 兰州 730020;

2. 中国石油玉门油田分公司勘探开发研究院, 甘肃 酒泉 735019)

摘要: 希尔伯特—黄变换是最新发展起来的处理非线性非平稳信号的时频分析方法。本文介绍了该方法的基本原理和几个关键技术, 以及其优势所在, 并将它应用于含随机噪音的地震信号和实际地震资料的分解。分解后的信号能够重构原始信号, 重构后在信噪比和分辨率方面有了一定的提高, 对地震资料的去噪有重要意义。

关键词: 希尔伯特—黄变换; 地震资料; 经验模态分解; 固有模态函数; Hilbert 谱; 波形地震相分析

中图分类号: P681.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2009)03-0211-06

Application of the Hilbert-Huang Transform to Seismic Data Processing

LIU Qing-min¹, YANG Wu-yang¹, LI Shu-ping², HE Xin¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development - Northwest, PetroChina, Lanzhou 730020, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, Yumen Oilfield Limited Company, PetroChina, Gansu Jiuquan 735019, China)

Abstract: Hilbert-Huang transformation is a newly developed time-frequency analysis method for dealing with the non-linear, non-stationary signals. In this paper, the basic principles and several key technologies of the Hilbert-Huang transform, as well as its strengths are briefly introduced. It's application to the decomposition of seismic signal with random noise included and actual seismic data are discussed also. The original signal can be really reconstructed with this method, and reconstructed signal improves signal-to-noise ratio and resolution of the attributes, so it is a meaningful method for denoising the seismic data.

Key words: Hilbert-Huang transform; Seismic data; Empirical mode decomposition; Intrinsic mode function; Hilbert spectrum; Waveform seismic facies analysis

0 前言

目前对地震信号进行时频分析最常用且最成熟的方法就是傅立叶变换和小波变换。傅立叶变换^[1]是纯频域分析方法, 无法提供时域信息, 而且严格要求系统的线性、数据的周期性或平稳性, 因此在对非平稳非线性的信号面前显得无能为力。小波分析^[2-7]虽然在时域和频域局部性都有了很大提高, 但它仍然是窗口可调的傅立叶变换, 小波窗内的信号是短时平稳的, 无法摆脱傅立叶变换的缺陷, 而且小波基选择时的多样性和不可变更性也限制了小波变换的适应能力; 另外小波基的有限长会造成信号的能量泄漏。

希尔伯特—黄变换 (Hilbert-Huang Transform, 简称 HHT)^[8-9] 方法是美国工程院院士 Norden Huang 等人提出的一种全新的信号分析方法。它首先对信号进行非线性的自适应分解—经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, 简称 EMD), 分解得到不同的固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, 简称 IMF), 然后利用 Hilbert 变换研究信号的时频能量分布, 提供更加清晰的局部细节时频特征。它适用于非线性和非平稳信号; 自适应性强, 根据数据的特征时间尺度进行分解时频局部性好; 不同的 IMF 分量是平稳信号或简单的非线性信号,

① 收稿日期: 2008-09-25

作者简介: 刘庆敏 (1962—), 女 (汉族), 内蒙古赤峰人, 硕士, 助理工程师, 主要从事地震正演及地震反演等研究工作。

属于窄带信号;具有较好的客观性。因此该方法引起工业界的极大兴趣,已经被广泛应用于数据分析的诸多领域,在信号处理、生物医学、地震工程学等方面也已获得应用。

实际中地震信号大都是非线性非平稳的信号。基于 HHT 在非平稳信号中处理的优势,本文将它初步应用于含噪音的地震信号与实际地震资料中,地震信号可以被重构,且从地震相平面图中可以发现重构后的地震数据更能体现地质信息,提高了地震资料的信噪比和分辨率,易于进一步推广。

1 HHT 基本原理

HHT 方法是由经验模型分解和希尔伯特变换两步组成。

1.1 经验模型分解(EMD)

HHT 变换的核心是对信号进行 EMD 分解,获得有限数目的固有模态函数(IMF)。为保证 IMF 是单分量函数,它必须满足下列条件^[8]:

(1) 极值点的数目和零交叉点的数目相同或者至多相差一个;

(2) 固有模态函数在任意点,由局部极值定义的包络的均值是零。

但第二个条件很难满足,一般取近似。在此我们用 Huang(2000)提出的近似条件,设 SD 是连续两个分解结果的标准偏差,于是有

$$SD = \sum_{i=0}^T \frac{|h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{h_{k-1}^2(t)} \leq \text{constant} \quad (1)$$

其中, $h_{k-1}(t)$ 、 $h_k(t)$ 分别表示第 k 次分解前、后的信号; $\text{constant} \in [0.2, 0.3]$ 。

EMD 分解是基于一个筛选的过程,具体描述如下:

(1) 初始化: $r_0(t) = x(t)$; 计算上下包络的平均值作为包络平均 m ;

(2) 提取第 j 个 IMF:

(a) 初始化: $h_i(t) = r_j(t)$, $i=1$;

(b) 找出 $h_{i-1}(t)$ 信号的局部极大值点和局部极小值点;

(c) 根据某种插值方法求出 $h_{i-1}(t)$ 的上包络和下包络;

(d) 计算上下包络的平均值作为包络平均 m ;

(e) $h_i(t) = h_{i-1}(t) - m_{i-1}(t)$;

(f) 如果满足终止准则,那么就认为求出一个 IMF,即 $c_j(t) = h_i(t)$; 否则 $i=i+1$, 返回到(b);

(3) $r_j(t) = r_{j-1}(t) - c_j(t)$;

(4) 如果 $r_j(t)$ 仍然至少有两个极值点,那么 $j=j+1$, 转到(2), 否则分解终止。

经过 EMD 后,原始信号可以表示为

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

其中, n 为 IMF 的个数; r_n 为最后一个不可分解的序列,为 $x(t)$ 的均值或者趋势项。

值得注意的是,在具体实现时对均值的求取并不是用三次样条插值上、下包络线求平均得到的,而是直接从极值点用 B 样条函数的线性组合^[10-11]的方法得到均值,避免了求取上下包络线带来的误差,提高了计算效率和精度。

另外在分解中,由于信号的端点一般不会同时是局部极值点,因此必须对信号或极值序列进行外延,以确保包络线能够抵达端点。包络线外延不准确时会引起误差,而任何由这种边界效应带来的误差会随着 IMF 分解层数的增加而向内传播,继而“污染”整个数据序列,使得最后的分解结果失去意义。因此边界值的处理是 EMD 分解中最为关键的问题,也是最难解决的问题。目前常用的 EMD 边界处理方法有镜像延拓法,神经网络预测,正交多项式外延方法,线性外延法等,本文在此采用适应性强和效果比较好的镜像延拓法^[12]。

1.2 Hilbert 变换

对于任意一个时间序列 $X(t)$, 都能得到它的 Hilbert 变换结果 $Y(t)$, 即

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (3)$$

$$Z(t) = X(t) + iY(t) = a(t)e^{i\theta} \quad (4)$$

于是可得

$$\text{瞬时振幅: } a(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (5)$$

$$\text{瞬时相位: } \theta(t) = \tan^{-1} \frac{Y(t)}{X(t)} \quad (6)$$

$$\text{瞬时频率: } \omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (7)$$

于是,对 $X(t)$ 的 n 阶分量进行 Hilbert 变换后

$$X(t) = \text{Re} \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i\int \omega_j(t) dt} \quad (8)$$

与傅立叶变换不同的是,式中的 a_j 和 ω_j 不是常数,而是时间的函数;因此 Hilbert 谱能够刻画一个数据序列在时间上的变化规律。

2 模型试算

2.1 正弦子波

图 1(a) 是单一的正弦子波;图 1(b) 是对正弦子

波做 Hilbert 变换后得到的能量谱,可看出 Hilbert 谱具有很好的时频局部性;而图 1(c))是小波变换得到的谱,除在高频分量处具有局部性外,能量在频率空间内分布广泛的延伸开来。而经过 EMD 分解

后得到的是一系列的单频或者频带很窄的分量,可以很好的满足 Hilbert 变换的条件。因此 HHT 具有很好的时频局部性特征。

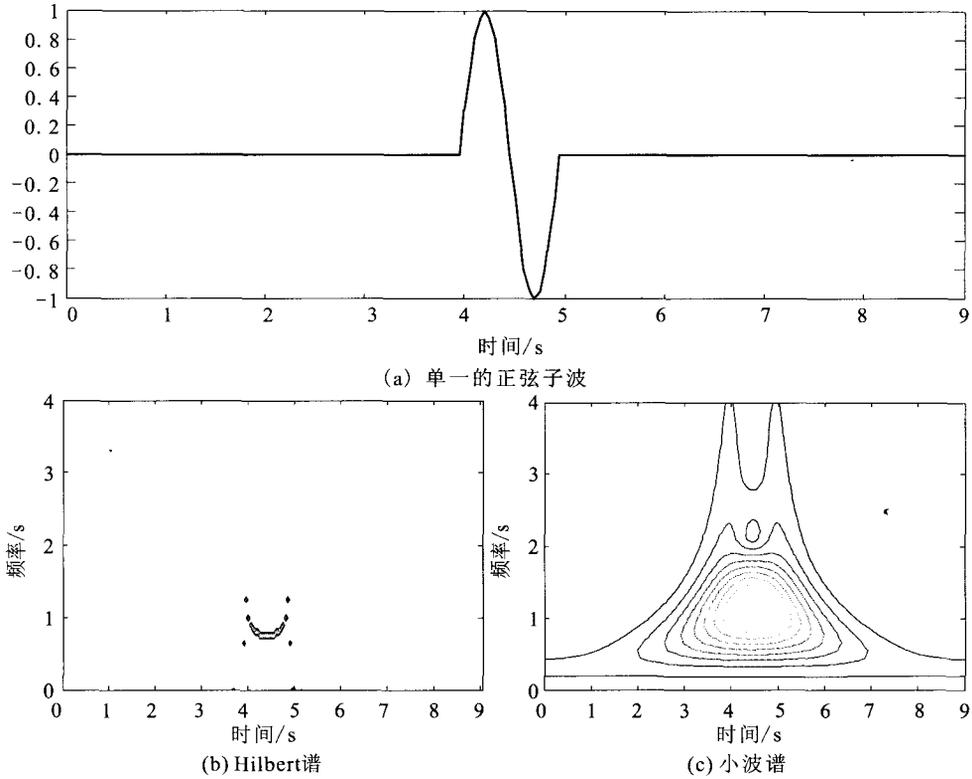


图 1 时间局部的信号的谱分析

Fig. 1 The Hilbert spectrum analysis to a calibration of time localization.

2.2 地震信号

将 HHT 方法在非平稳随机信号处理的优势应用到地震信号的处理中。

首先将地震信号^[13]进行 EMD 分解,得到各阶 IMF 分量。由于各阶分量的频率不同,如果对各阶分量形成的地震剖面进行分析,实际上形成了一种滤波方法,因此我们可以根据实际需要选择不同的分量进行时频分析和信号重构,以提高地震信号的信噪比和分辨率,从而进一步提高地震资料解释的精度。本文对无噪音的合成记录和具有随机噪音的地震信号进行分解,并进行信号重构。图 2 是做合成记录的速度模型。图 3 是未加噪音的地震信号在 HHT 分解前后的结果:图 3(a)是未加噪音的合成记录;图 3(b)是图 3(a)经过 HHT 分解后重构的结果;图 3(c)为 HHT 分解前后的误差,误差很小,可以恢复原始信号。图 4 为加噪音的地震信号在 HHT 分解前后的结果:图 4(a)是加噪音的合成记录;图 4(b)是图 4(a)经过 HHT 分解后重构的结

果;图 4(c)为 HHT 分解前后的误差,误差很小。图 3、4 的结果可以看出,不管有没有噪音,从重构的信号基本上能够恢复原始信号,取得了初步的应用效果。

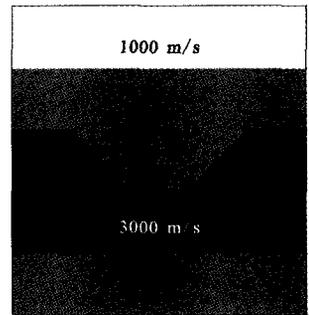
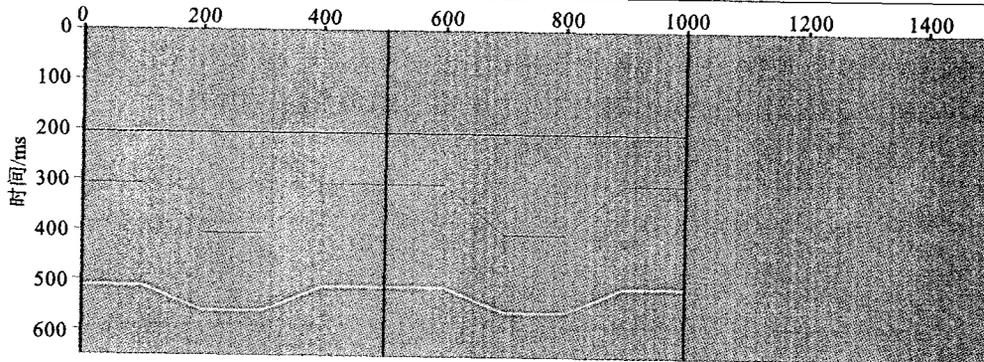


图 2 速度模型

Fig. 2 Speed model.

3 实际资料

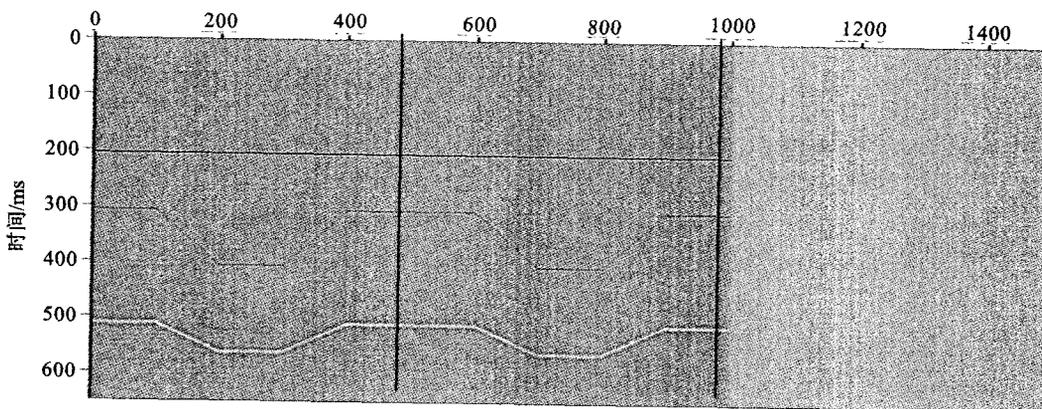
对西部某地区的地震资料做 EMD 分解,得到 8 个不同的 IMF 函数;由前几个 IMF 分量进行地震



(a) 人工合成记录 (b) 分解后重构的记录 (c) 分解前后的误差

图 3 未加噪音的地震信号 HHT 分解前后的结果

Fig. 3 Comparison between the original and reconstructed signals (there is no noise) decomposed by HHT.



(a) 加了噪音的合成记录 (b) 分解后重构的记录 (c) 分解前后的误差

图 4 随机噪音的地震信号 HHT 分解前后的结果

Comparison between the original and reconstructed signals (with random noise included) decomposed by HHT.

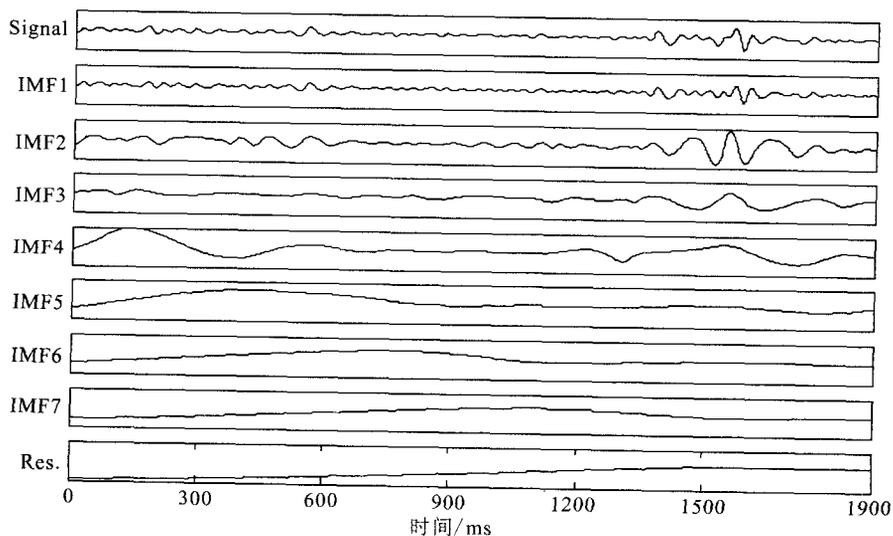


图 5 实际地震信号的经验模态分解

Fig. 5 EMD of a real seismic signal.

资料的重构;然后利用自组织神经网络的方法,在目的层的一定时窗内根据地震波形的相似性原理,假定按照 8 个分类数,将地震数据划分出不同的类别,

得到波形地震相平面图^[14-15]来比较分析。

图 5 给出了一道地震数据和它的经验模态分解结果。第 1 行是实际信号,第 2 行至第 7 行是分解

得到的 7 个固有模态函数(IMF1~IMF2),最后一行是剩余项,在时间域中表现为小尺度到大尺度的层层分解。图 6 是实际地震信号的 Hilbert 时频

谱,从图中可以看出频率的分布范围以及频率随时间的变化。

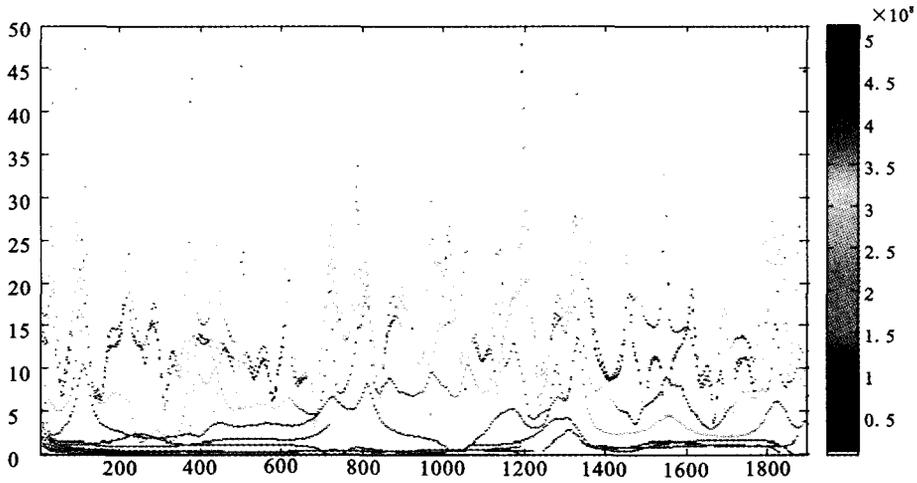


图 6 实际地震信号的 Hilbert 时频谱

Fig. 6 Hilbert time-frequency spectrum of real seismic data.

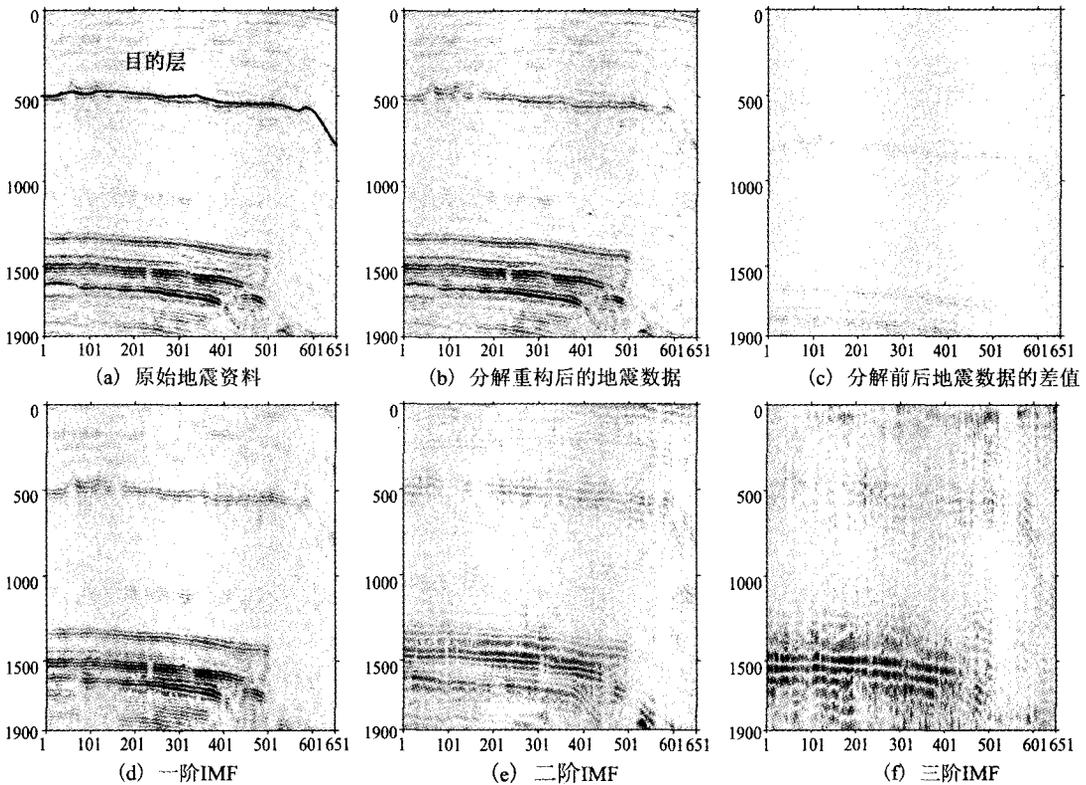


图 7 实际资料分解前后的地震数据以及前三个 IMF 函数

Fig. 7 Comparison between the original and reconstructed seismic data and several IMF function by EMD.

图 7 给出了实际地震数据和重构后的地震数据以及分解的前三个分量的地震剖面。由图 7(d~f)可以看出,经过 EMD 分解后得到不同尺度、不同频率的各阶固有模态函数,其中一阶固有模态函数具

有振幅最大,频率最高,波长最短的波动,依次下去的各固有模态函数振幅逐渐变小、频率逐渐低。各固有模态函数的这种分布状况是由固有模态函数的本性决定的,它总是把最主要的信号先提取出来;也

就是说,由 EMD 方法分解出的前几个固有模态函数集中了原序列中最显著的信息。如果从这个角度来理解 EMD 方法,它就是一种新的主成分分析方法。分解 IMF 分量频率越来越低、波长越来越长,用前几个 IMF 分量重构原始数据(图 7(b)),得到的差值很小(图 7(c)),因此我们可以根据实际需要选择不同的分量进行信号重构等,得到识别目标层的有利属性分量。

图 8 是给出原始地震数据和重构后的地震数据

波形分类属性得到的波形分析地震相图。从图中我们可以看出,该地区主要发育两级断层(一级断层是区域背景下的 NE-SW 向、SE-NW 向大断裂;二级断层是伴生的近南北向断裂)。两图比较我们可以清楚地看到,在图 8(b)重构后的地震数据的地震相图上断层结构特征明显优于原始地震数据,且信噪比得到了很大的提高,进一步验证了用不同 IMF 函数重构原始数据可以提高有用信息,提高信噪比和分辨率。

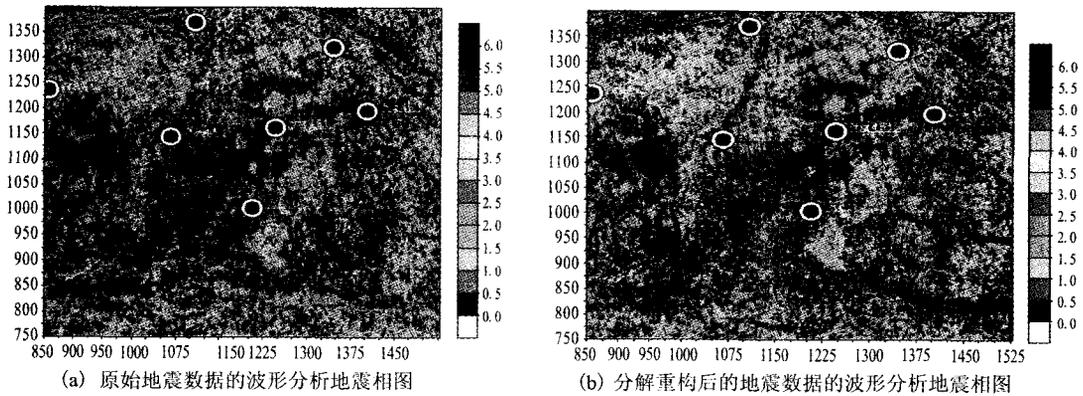


图 8 实际资料分解前后的波形分析地震相图

Fig. 8 Comparison between the seismic facies diagram of the original and reconstructed seismic data.

4 结论和认识

本文利用 HHT 方法在信号分解、时频分析各方面的特点与优势,将其应用于地震信号处理中,模型数据和实际资料的应用表明了该方法的有效性,不但分解后的各阶分量重构后能够恢复原始信号,并且重构后的信号在信噪比和分辨率方面有一定的提高。该方法简单实用,本文仅作了初步的研究,它在地震资料处理方面的潜在应用有待于更进一步的深入研究。

[参考文献]

[1] Potter R K, Kopp G, Green H C. Visible speech[M]. New York: Van Nostrand, 1947.
 [2] Morlet J, et al. Wave propagation and sampling theory-part 2[J]. Sampling theory and complex waves, 1982, 47 (2): 222-236.
 [3] Qin Shuren, et al. Research of Wavelet Transform Instrument System for Signal Analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 13: 114-121.
 [4] 刘希强,周蕙兰,等. 基于小波包变换的地震数据时频分析方法[J]. 西北地震学报, 2000, 22(2): 143-147.
 [5] 刘希强,周蕙兰,等. 基于小波包变换的滤波方法[J]. 西北地震学报, 1999, 21(3): 248-253.
 [6] 杨从杰,冯志生,等. 小波分析方法在提取井水位潮汐因子震前

变化特征的初步应用[J]. 西北地震学报, 2005, 27(2): 163-167.
 [7] 刘希强,沈萍,等. 用小波变换能量线性度方法识别天然地震与爆破或塌方[J]. 西北地震学报, 2003, 25(3): 204-209.
 [8] 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 analyses[J]. Proc. R. Soc. Lond., 1998, 454: 903-995.
 [9] 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: 2317-2345.
 [10] 郑天翔,杨力华. 经验模式分解算法的探讨与改进[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(1): 1-6.
 [11] Chen Q H, Huang E, Riemenschneider S, et al. A B-spline approach for empirical mode decompositions[J]. Advances in Computational Mathematics, 2006 (24): 171-195.
 [12] 黄大吉,赵进平,苏纪兰. 希尔伯特-黄变换的端点延拓[J]. 海洋学报, 2003, 25 (1): 1-11.
 [13] 段生全,贺振华,等. HHT 方法及其在地震信号处理中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32 (4): 396-400.
 [14] 邓传伟,李莉华,等. 波形分类技术在储层沉积微相预测中的应用[J]. 石油物探, 2008, 47 (3): 262-266.
 [15] 董立生,刘书会,等. 地震属性分析技术的研究与应用[J]. 石油物探, 2004, 43 (增): 17-21.