

地震信号的复地震道分析及应用

石颖^{1,2}, 刘洪¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 大庆石油学院地球科学学院, 大庆 163318)

摘要 复地震道分析又称三瞬分析, 该分析方法可将反映地震信号局部变化情况的地震波的瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率等信息分离开. 本文应用 Hilbert 变换求解虚地震记录, 用复地震道分析方法求取“三瞬”信息, 并用该方法计算了理论合成地震记录的瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率, 获得了较好的效果. 同时, 本文也利用该方法对某区块实际地震资料进行了处理, 结果表明, 复地震道分析方法获得的“三瞬”信息可反映地震信号的局部变化, 有助于进行地震薄互层分析, 并能提高数据的解释精度.

关键词 复地震道分析, 瞬时振幅, 瞬时相位, 瞬时频率, Hilbert 变换

中图分类号 P631 **文献标识码** A **文章编号** 1004-2903(2008)05-1538-06

Complex seismic trace analysis of seismic signal and its application

SHI Ying^{1,2}, LIU Hong¹

(1. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*
2. *School of Geoscience, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China*)

Abstract Complex seismic trace analysis is also called three instantaneous analysis. It can separate instantaneous amplitude from instantaneous phase and instantaneous frequency of seismic wave, and give local variations of seismic signal. Imaginary seismogram is obtained by Hilbert transform and three instantaneous information is obtained by complex seismic trace analysis method in this paper. The instantaneous amplitude, instantaneous phase and instantaneous frequency of theoretical synthetic seismogram are calculated and their effects are good. The actual data processing results show that the instantaneous information from the complex seismic trace analysis method not only reflects local variation of seismic signal, but also devotes to analysis of thin interbeds with seismic data, which can also improve interpretation accuracy.

Keywords complex seismic trace analysis, instantaneous amplitude, instantaneous phase, instantaneous frequency, Hilbert transform

0 引言

Gabor 在 1946 年首先提出了复信号的概念, 并应用于电子工程领域, Taner 在 1979 年将这一概念引入地震信号分析中^[1]. 随后, 其在地震信号和 CDP 反射记录的解释上得到了广泛的应用. 在急需发展的深部地震勘探^[2]中, 地震波经过长程传播和散射^[3]后, 地表所接收到的地震反射信号能量相对较弱, 反射波同相轴难于追踪, 致使勘探难度增大^[4]. 通常我们认为地震波是一种解析信号, 复地震

记录道技术是建立在 Hilbert 变换基础上的, 通过 Hilbert 变换, 可获取虚地震记录, 进而求得瞬时参数. 通过复地震记录道技术所得到的反射强度(瞬时振幅)、瞬时相位以及瞬时频率等地震特征参数, 反映了地震信号的局部变化情况, 可以确定地下岩层的岩性、岩相变化以及岩石孔隙中所含流体的性质, 从而帮助研究地层学的问题^[5], 瞬时相位还可清晰地反映一些弱反射波及深层反射波, 以更多地获取深层构造区域信息. 有关复地震道分析以及瞬时属性的研究, 前人已经发表了大量的研究成果^[6~16].

收稿日期 2008-06-28; **修回日期** 2008-09-05.

基金项目 国家“973”重点基础研究发展计划项目(2007CB209603)和国家自然科学基金项目(40830424)联合资助.

作者简介 石颖, 女, 1976 年生, 黑龙江五常市人, 讲师, 中国科学院地质与地球物理研究所博士研究生, 主要从事地震资料处理方面的研究.
(E-mail: yingshi@mail.iggcas.ac.cn)

本文在常规地震道分析的基础上,对地震记录进行 Hilbert 变换,得到复数道,进而求取瞬时振幅,瞬时相位以及瞬时频率。

同时,利用复地震道分析方法对理论合成地震记录进行了试算,效果较好,该理论合成地震记录由 Ricker 子波和一组反射系数序列形成。同时,本文也给出了三瞬分析在某油田区块中的应用,实际地震剖面显示了良好的应用效果,对油气预测和油藏综合分析有较大的指导意义。

1 复地震道分析

复地震道分析方法通过 Hilbert 变换将实地震道变成复地震道,进而从复信号中分离出瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率等参数。

1.1 Hilbert 变换

在时域的计算方法^[17]为:

$$f^*(t) = f(t) * \frac{1}{\pi t} = f(t) * h(t), \quad (1)$$

式中, $f(t)$ 为实信号; $h(t)$ 为滤波因子; $f^*(t)$ 为 $f(t)$ 的 Hilbert 变换。

在频域的计算方法为:

$$F^*(f) = H(f)F(f) = e^{i\pi/2} F(f), \quad (2)$$

式中, $F(f)$ 为实信号 $f(t)$ 的频谱; $H(f)$ 为 $h(t)$ 的频谱; $F^*(f)$ 为 $f^*(t)$ 的频谱。

1.2 复地震道

复地震道分析将实地震道 $f(t)$ 看成是解析信号或复地震道信号 $F(t)$ 的实部,即:

$$F(t) = f(t) + jf^*(t), \quad (3)$$

利用复地震道 $F(t)$,就可定义瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率。

实地震道可以认为是一个幅值缓慢变化的余弦振动,即

$$f(t) = A(t)\cos\theta(t), \quad (4)$$

虚地震道也称地震道的正交道,相应的可以表示为:

$$f^*(t) = A(t)\sin\theta(t), \quad (5)$$

由 Hilbert 变换的定义可知, $f^*(t)$ 可由 $f(t)$ 的 Hilbert 变换求得。

综合(3)(4)(5)式,复地震道可表示为

$$F(t) = A(t)e^{i\theta(t)}, \quad (6)$$

式中, $A(t)$ 为瞬时振幅; $\theta(t)$ 为瞬时相位。 $A(t)$ 和 $\theta(t)$ 是两个基本的瞬时属性^[18]。

1.3 三瞬信息

三瞬信息包括瞬时振幅,瞬时相位以及瞬时频率。

瞬时振幅也称振幅包络或反射强度,它相当于地震道包络函数。其反映了地震波能量的瞬时变化情况,与地震相位无关,可用来判断与岩性有关的地质体。瞬时振幅可表示为

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

瞬时相位与瞬时振幅无关,不仅其本身是一种瞬时属性,而且是求得瞬时频率的基础。瞬时相位可追踪连续性差的弱反射波及极性变化的反射波。瞬时相位可表示为

$$\theta(t) = \tan^{-1}[f^*(t)/f(t)], \quad (8)$$

将瞬时频率定义为瞬时相位随时间的变化率^[19,20],瞬时频率反映了地震道信号的频率分量随时间的变化。利用瞬时频率推断薄层的存在会取得油气预测的定性或定量效果。瞬时相位可表示为

$$\omega(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt}, \quad (9)$$

计算瞬时频率的一种较方便的方法是计算反正切函数的导数,即

$$\omega(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \{ \tan^{-1}[f^*(t)/f(t)] \}, \quad (10)$$

进一步表示为

$$\omega(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{f(t) \frac{df^*(t)}{dt} - f^*(t) \frac{df(t)}{dt}}{f^2(t) + f^{*2}(t)}, \quad (11)$$

本文就是应用上述公式进行计算的。

2 单道理论计算

为了更清楚地说明 Hilbert 变换和复地震道的概念,本文应用褶积方法模拟了理论单道地震信号。采用的 Ricker 子波为主频 30 Hz 的零相位 Ricker 子波,如图 1 所示。Ricker 子波的时域表达式为

$$s(t) = [1 - 2(\pi f_p t)^2] e^{-(\pi f_p t)^2}, \quad (12)$$

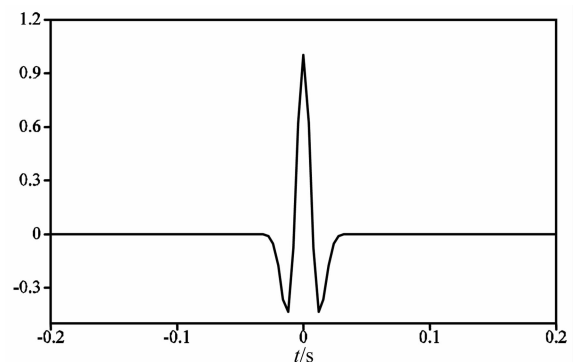


图 1 主频为 30 Hz 的零相位 Ricker 子波
Fig. 1 Zero phase Ricker wavelet
with 30 Hz peak frequency

表 1 给出了具有四个反射界面的水平层状介质模型参数,由表 1 的参数可得到各界面的反射系数,如图 2 所示.

表 1 多层水平介质模型参数

Table 1 Model parameters of horizontal layers media

| 层号 | 深度(m) | 速度(km/s) | 密度(g/cm ³) |
|----|-------|----------|------------------------|
| 1 | 200 | 1.5 | 1.0 |
| 2 | 500 | 2.0 | 2.4 |
| 3 | 630 | 3.0 | 2.4 |
| 4 | 700 | 2.1 | 2.3 |
| 5 | 1300 | 4.3 | 2.1 |

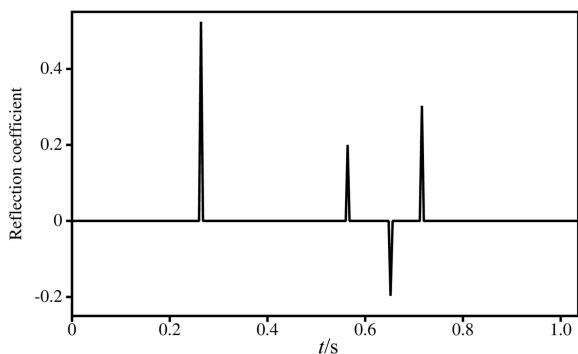


图 2 由表 1 模型参数获得的反射系数序列
Fig. 2 Reflection coefficient series from model parameters in Table 1

将图 1 的 Ricker 子波和图 2 的反射系数序列做褶积,所得合成地震记录如图 3 所示.

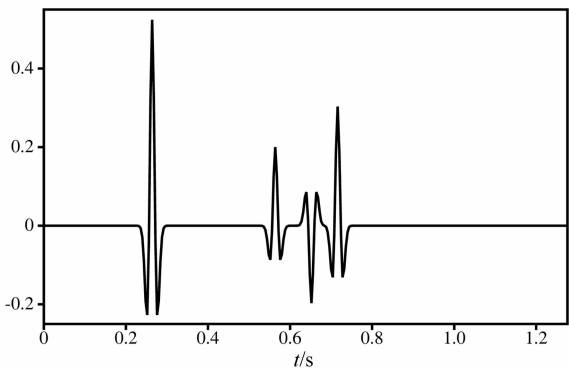


图 3 合成地震记录
Fig. 3 Synthetic seismogram

对图 3 的实地震道记录进行 Hilbert 变换,得到如图 4 所示的虚地震道记录,即实地震道的正交

道.可以看出虚地震记录相对实地震记录发生了 90°相移.

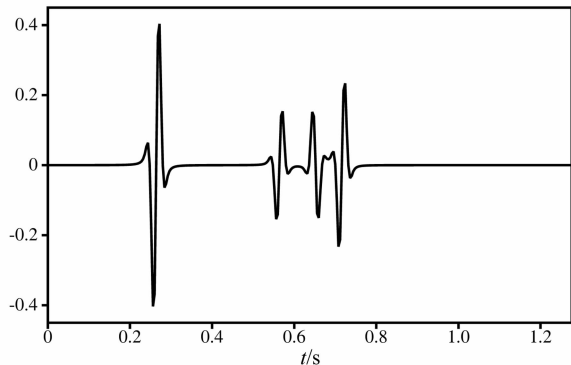


图 4 正交道
Fig. 4 Quadrature trace

对图 3 所示的单道地震记录进行复地震道分析,得到的瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率分别如图 5、6、7 所示.由图可知,三瞬信息能很好地把该地质模型所示的四个反射层区分开,真实地反映了该道地震记录的瞬时特性.

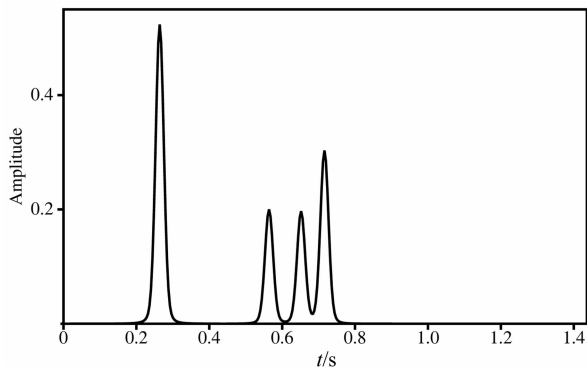


图 5 瞬时振幅
Fig. 5 Instantaneous amplitude

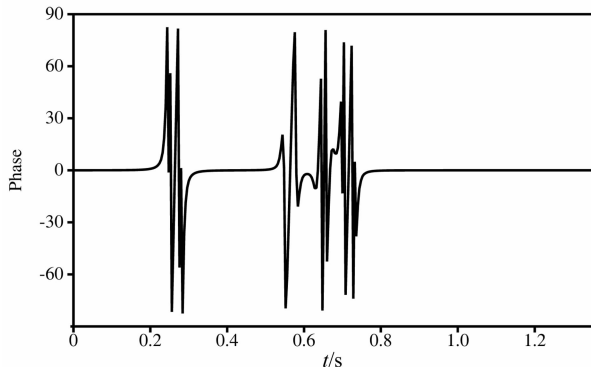


图 6 瞬时相位
Fig. 6 Instantaneous phase

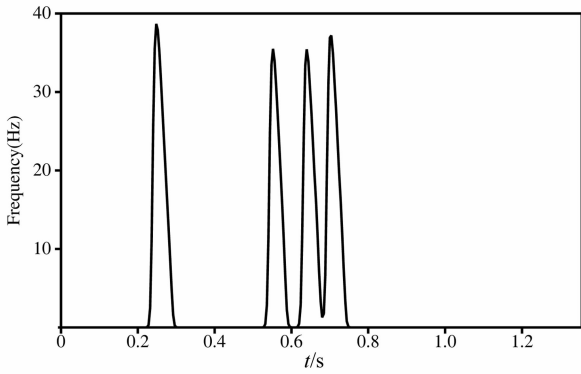


图 7 瞬时频率

Fig. 7 Instantaneous frequency

3 实例分析

在实际地震剖面上,瞬时振幅可用于判断岩性变化,不整合面,局部断层,薄层以及油气富集带等.瞬时相位由于与瞬时振幅无关,可清晰地反映一些弱反射波及深层反射波,利用瞬时相位信息还可判断断层,直接对含油气带进行预测,研究超覆、尖灭等岩性圈闭.由于含气薄储集层和裂缝地层在瞬时频率剖面上将会出现频率偏低现象,据此,利用瞬时频率可推断气层和裂缝的存在.此外,在薄层处,瞬时频率会偏高,故在薄层显示不是很明显的常规地震剖面上,可以用瞬时频率来识别薄层.

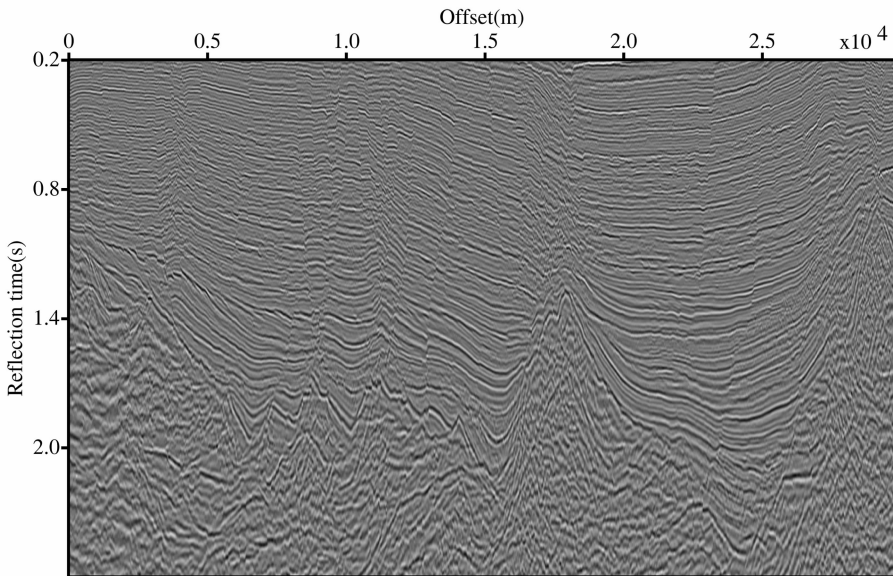


图 8 地震记录

Fig. 8 Seismic section

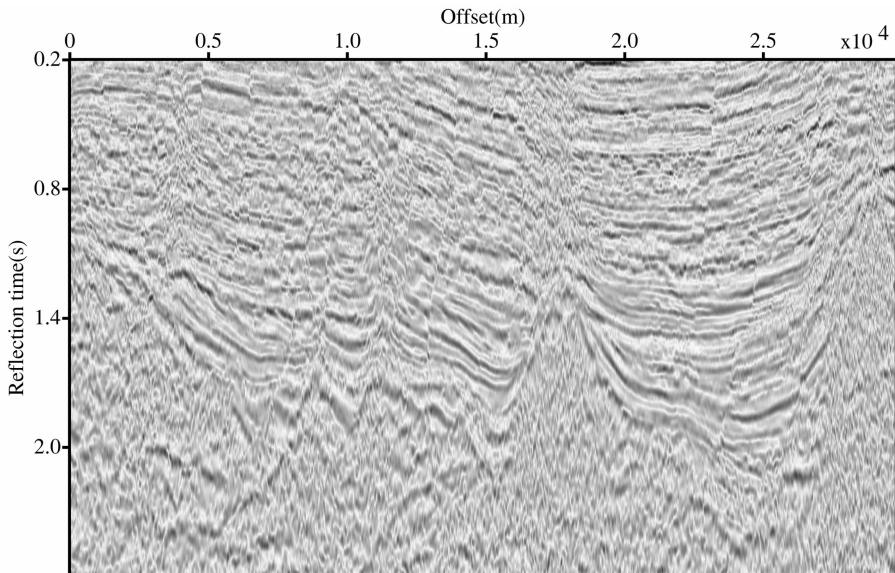


图 9 地震剖面的瞬时振幅

Fig. 9 Instantaneous amplitude of seismic section

图8为某油田区块的地震剖面,该地区为复杂的陆相断陷盆地,地质构造十分复杂.断层较多,断距较小.最右边的凹陷中有巨厚的生油岩,其上部储层发育,是一个典型的下生上储的油藏.用本文复地震道分析方法求取该地震记录的“三瞬”信息,瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率分别如图9、10和11所示.

图9给出的瞬时振幅剖面可以清楚地表示地震波的反射强度,该剖面反映了地震波能量的瞬时变化情况,它与地震相位无关,可用来判断岩性变化,如右面凹陷中的砂泥岩互层的情况.

图10给出的是瞬时相位剖面,该剖面与瞬时振幅无关,能清晰地识别出深层和连续性差的弱反射波,瞬时相位剖面的分辨率很高,能较为清楚的显示薄互层的地下地质情况,为钻探井位的部署提供准确的参考信息.

图11给出的是瞬时频率剖面,该剖面反映了非稳态地震信号的频率随时间的变换,可识别含油气的薄储集层,如右面凹陷中的斜坡区域是一个明显的岩性油气藏,在瞬时频率剖面上也有比较清楚的显示.

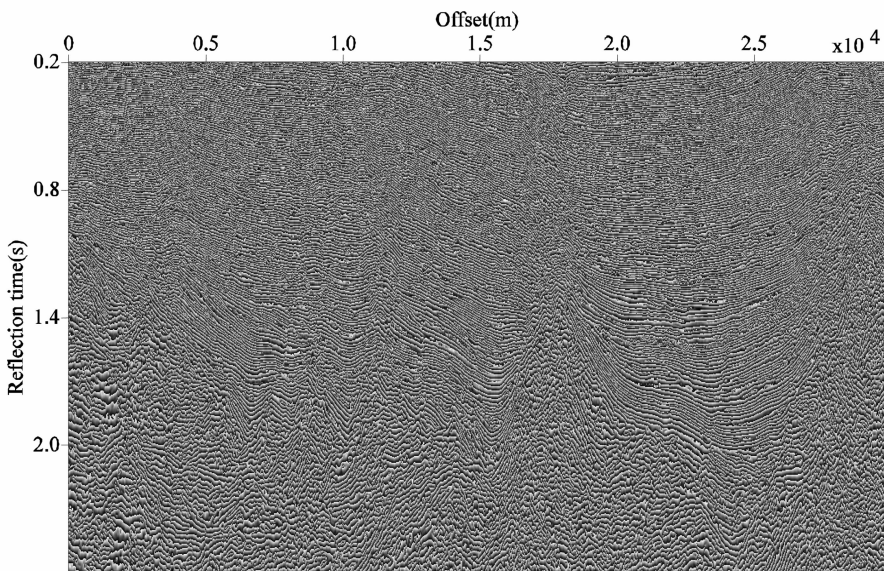


图10 地震剖面的瞬时相位
Fig. 10 Instantaneous phase of seismic section

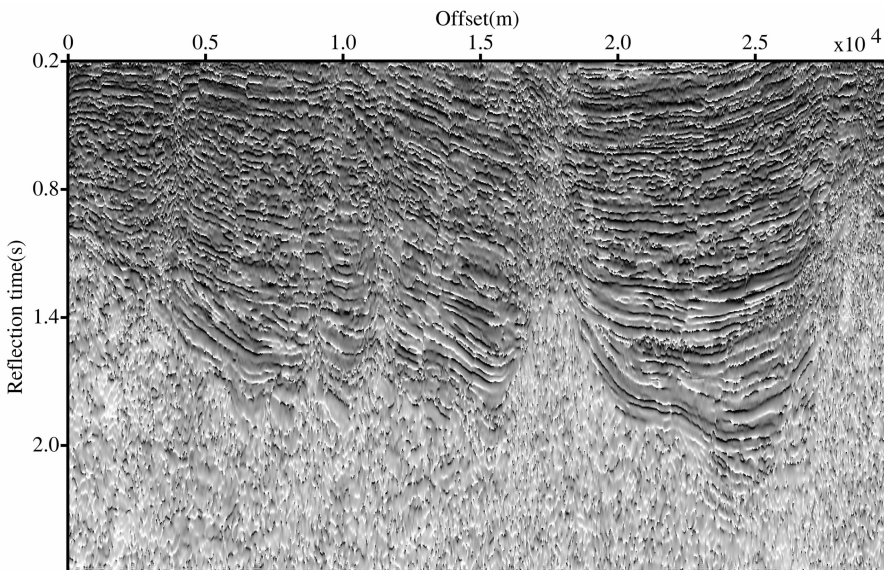


图11 地震剖面的瞬时频率
Fig. 11 Instantaneous frequency of seismic section

5 结 论

实际地震道经过 Hilbert 变换后,可以产生 90° 的相移,复地震道分析就是分别将原始地震道和 90° 度相移后的地震道作为实部和虚部进行的,该技术能提取地震信号的瞬时振幅,瞬时相位以及瞬时频率信息.用该方法能将原始地震道中的振幅、相位以及频率信息分别加以识别.

本文给出了复地震道分析的基本原理,单道理论地震数据的试算结果和实际地震数据的应用效果表明,三瞬信息能反映地震信号的局部变化,应用三瞬信息,能很好地将薄互反射层区分开.同时,综合研究三瞬信息,可以挖掘资料中更多的信息,增强信号的可识别性,提高数据解释精度,其在地震资料解释中有良好的应用前景.

致 谢 在本文成文过程中,与王维红博士进行了有益的探讨和讨论,在此表示衷心的感谢.

参 考 文 献 (References):

- [1] Hardy H H, Richard A B, Gaston J D. Frequency estimates of seismic traces [J]. *Geophysics*, 2003, 68:370~380.
- [2] 刘洪,袁江华,陈景波,等. 大步长波场深度延拓的理论[J]. *地球物理学报*, 2006,49(6):1779~1793.
Liu H, Yuan J H, Chen J B, *et al.* Theory of large-step wavefield depth extrapolation[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2006,49(6):1779~1793.
- [3] 刘洪,袁江华,勾永峰,等. 地震逆散射波场和算子的谱分解[J]. *地球物理学报*, 2007,50(1):240~247.
Liu H, Yuan J H, Gou Y F, *et al.* Spectral factorization of wavefield and operator in seismic inverse scattering[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2007,50(1):240~247.
- [4] 裴江云,刘洪,李幼铭. 在随机噪音背景下地震反射信号的增强[J]. *地球物理学进展*, 2002,17(1):91~95.
Pei J Y, Liu H, Li Y M. Enhancing seismic reflection signal under random noise[J]. *Progress in Geophysics*, 2002,17(1):91~95.
- [5] 牟永光编. 地震勘探资料数字处理方法[M]. 北京:石油工业出版社,1981.271~278.
Mu Y G. Beijing: Digital processing methods of seismic exploration data[M]. Beijing: Press of Petroleum Industry, 1981. 271~278.
- [6] Tanner M T, Koehler F, Sheriff R E. Complex trace analysis [J]. *Geophysics*, 1979, 44:1041~1063.
- [7] Robertson J M, Nogami H H. Complex seismic trace analysis of thin beds[J]. *Geophysics*, 1984, 49:344~352.
- [8] Barnes A E. Theory of 2-D Complex Seismic trace analysis [J]. *Geophysics*, 1996, 61: 264~272.
- [9] Barnes A E. Instantaneous frequency and amplitude at the envelope peak of a constant-phase wavelet [J]. *Geophysics*, 1991, 56:1058~1060.
- [10] 张志勇,胡敬浓,张丽娇,等. 探地雷达复信号分析的几点讨论[J]. *物探化探计算技术*, 2006,28(2):146~148.
Zhang Z Y, Hu J N, Zhang L J, *et al.* Some discussion about reply signal analysis of GPR[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2006,28(2):146~148.
- [11] 陈雨红,杨长春,曹齐放,等. 几种时频分析方法比较[J]. *地球物理学进展*, 2006,21(4):1180~1185.
Chen Y H, Yang C C, Cao Q F, *et al.* The comparison of some time-frequency analysis methods[J]. *Progress in Geophysics*, 2006,21(4):1180~1185.
- [12] 谢雄耀,万明浩. 复信号分析技术在地质雷达信号处理中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2005,22(2):108~112.
Xie X Y, Wan M H. The application of complex signal analysis to process ground penetrating radar data[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2005,22(2):108~112.
- [13] 洪余刚,陈景山,成世琦,等. 瞬时振幅相干法在储层预测中的应用[J]. *西南石油学院学报*, 2005,27(2):25~27.
Yu H G, Chen J S, Chen S Q, *et al.* The application of Instantaneous amplitude coherence analysis method to reservoir prediction[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2005,27(2):25~27.
- [14] 高静怀,陈凤,陈树民. 利用地震瞬时谱属性进行薄互层分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2005,33(3):67~70.
Gao J H, Chen F, Chen S M. Using seismic instantaneous attributes to analyze thin interbeds[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2005,33(3):67~70.
- [15] 倪逸,王倩,张冲. 多维地震瞬时信息的直接计算方法[J]. *石油地球物理勘探*, 1999,34(4):381~389.
Ni Y, Wang Q, Zhang C. Direct Computation of multidimensional seismic instantaneous information[J]. *Oil Geophysical prospecting (in Chinese)*, 1999,34(4):381~389.
- [16] 王西文,刘全新,李幼铭,等. 地震信号瞬时特征在小波域分频提取的方法和应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2000,35(4):452~460.
Wang X W, Liu Q X, Li Y M, *et al.* One method for frequency-division obtainment of instantaneous characteristics of seismic signals in wavelet domain, and its application[J]. *Oil Geophysical prospecting (in Chinese)*, 2000, 35(4):452~460.
- [17] 周绪文编. 反射波地震勘探方法[M]. 北京:石油工业出版社,1989.309~312.
Zhou X W. Reflection seismic exploration methods[M]. Beijing: Press of Petroleum Industry, 1989.309~312.
- [18] White R E. Properties of instantaneous seismic attributes [J]. *The leading edge*, 1991, 10(7):26~32.
- [19] Arthur E, Barner. The calculation of instantaneous frequency and instantaneous bandwidth[J]. *Geophysics*, 1992, 57, 1520~1524.
- [20] 刘喜武,刘洪,李幼铭,等. 局域波分解及其在地震信号时频分析中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2007,22(2):365~375.
Liu X W, Liu H, Li Y M, *et al.* Local waves decomposition and its applications to seismic signal time-frequency analysis [J]. *Progress in Geophysics*, 2007,22(2):365~375.