

刘 洋, Fomel Sergey, 刘 财等. 高阶 seislet 变换及其在随机噪声消除中的应用. 地球物理学报, 2009, 52(8): 2142~2151, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.08.024

Liu Y, Fomel Sergey, Liu C, et al. High-order seislet transform and its application of random noise attenuation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(8): 2142~2151, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.08.024

高阶 seislet 变换及其在随机噪声消除中的应用

刘 洋^{1,2}, FOMEL Sergey², 刘 财¹, 王 典^{1*}, 刘国昌^{3,2}, 冯 暄¹

1 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

2 美国德州大学奥斯汀分校经济地质局, 奥斯汀 78713

3 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

摘 要 Seislet 变换是一种小波类数学变换方法, 主要根据不同小波级数上地震同相轴的局部倾角的不同来分析数据. 一般意义上, 测线方向上的离散小波变换(DWT)是一种特殊的零局部地震倾角的 seislet 变换. 早期的工作基于低阶版本的离散小波变换来构建 seislet 变换, 在本文中, 通过使用 Cohen-Daubechies-Feauveau (CDF) 9/7 双正交小波变换(常用于 JPEG2000 压缩标准)作为框架, 扩展高阶 seislet 变换方法. 通过分析理论模型和实际数据的处理结果, 并对比傅里叶变换、离散小波变换和低阶 seislet 变换, 高阶 seislet 变换可以为地震数据提供更好的压缩比. 因此更加适用于地震数据去噪处理.

关键词 高阶 seislet 变换, 随机噪声, 局部地震倾角, 双正交小波变换, 压缩比

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.08.024

中图分类号 P631

收稿日期 2008-09-19, 2008-12-15 收修定稿

High-order seislet transform and its application of random noise attenuation

LIU Yang^{1,2}, FOMEL Sergey², LIU Cai¹, WANG Dian^{1*}, LIU Guo-Chang^{3,2}, FENG Xuan¹

1 College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

2 Bureau of Economic Geology, The University of Texas at Austin, Austin 78713, USA

3 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract The seislet transform is a wavelet-like transform that analyzes seismic data by following variable slopes of seismic events across different scales. It generalizes the discrete wavelet transform (DWT) in the sense that DWT in the lateral direction is simply the seislet transform with zero slopes. An earlier work used low-order versions of DWT to construct the seislet transform. In this work, we extend this approach to a higher order, using the Cohen-Daubechies-Feauveau 9/7 biorthogonal wavelet transform (the basis for the JPEG2000 compression scheme) as a template. Using synthetic and field-data examples, we demonstrate that the new transform can provide a better compression rate for seismic events than the Fourier transform, DWT, or the low-order seislet transform. Therefore, the high-order seislet transform can be more suitable for data processing tasks such as data regularization and noise attenuation.

Keywords High-order seislet transform, Random noise, Seismic local slopes, Biorthogonal wavelet transform, Compression ratio

基金项目 国家自然科学基金项目(40574042)和国家 973 项目(2009CB219301)资助.

作者简介 刘 洋, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 2006 年获吉林大学固体地球物理学博士学位, 现在吉林大学地球探测科学与技术学院从事教学和科研工作, 主要从事地震信号处理、岩石圈信息综合研究等工作. E-mail: yangliu1979@gmail.com

*** 通讯作者** 王 典, 女, 1978 年生, 博士, 副教授, 2006 年获吉林大学固体地球物理学博士学位, 现在吉林大学地球探测科学与技术学院从事教学和科研工作, 主要从事地震信号处理工作. E-mail: dianwang@jlu.edu.cn

1 引 言

地震记录中的随机噪声有很多来源. 风动、不良的检波器埋置、记录电缆附近的瞬时移动、电子仪器和近地表不规则体(如:砂砾、卵石或多孔的石灰石等)的散射都可以引起随机噪声,沙漠地区的老资料由于覆盖次数低,经常有很多随机噪声^[1],时移地震中的随机噪声也是不可避免的问题^[2],弱反射及不可预见的噪声频带也会引起低信噪比叠后剖面的随机噪声. 许多学者发展了有效的方法,如:经典中值滤波、非线性拟合、 $f-x$ 域预测滤波等. 近年来,一些学者提出新的随机噪声消除方法,如:赵德斌等(1998)^[3]提出应用 $f-x$ 域奇异值分解预测滤波的方法进行随机噪声衰减, Gulunay(2000)^[4]提出用于随机噪声压制的无关联预测滤波方法, Ristau 等(2001)^[5]对适用于地震数据随机噪声消除中的几种自适应滤波方法的比较, Liu 等(2006)^[6]提出有效消除地震随机噪声的多级中值滤波技术,邢贞贞等(2007)^[7]应用高阶统计量方法分析随机噪声中的有效信息,王兆磊等(2007)^[8]利用不同范数准则下的反演方法进行压制噪声的研究,但是以上方法在实际应用中都有一些局限性.

小波变换在科学和工程上有着广泛的应用^[9],由于灵活的特性,其在地球物理学领域也得到了很好的发展^[10~13]. 在地震数据处理领域,刘财等(1995,1996)^[14,15]将小波变换技术应用于地震数据高分辨率处理中,裴正林(2002)^[16]和郭刚明等(2003)^[17]分析并总结了小波变换技术在地震资料处理中的应用. 在非地震数据处理领域,小波变换也有广泛的应用. 徐亚等(2004,2006)^[18,19]提出用小波变换方法进行位场资料的处理,李琪等(2006)^[20]应用小波变换提取地震的震磁效应,马利华等(2007)^[21]将小波变换应用于日长变化的研究. 对比经典的傅里叶变换,小波变换的优势在于它可以描述非平稳信号,因此小波变换可以为非平稳信号分解提供最优化的基础. 基于小波变换能够集中有效信号能量,而随机噪声在小波域仍然体现随机特性的特点,小波变换在地震噪声消除中也有广泛的应用^[22~24],尤其在去除地震随机噪声中,如,张波等(1999)^[25]利用小波分析和反演方法联合去除随机噪声,吴爱弟等(2002)^[26]应用正交小波变换消除地震随机噪声,并取得明显的效果,杨立强等(2005)^[27]进行了基于二维小波变换的随机噪声压制方法的研

究,王典等(2008)^[28]利用第二代小波变换和百分位数软阈值方法开发了有效的随机噪声消除方法.

小波类变换在地震图像处理和数据分析中具有很广泛的应用^[29~31],其主要利用图像中的方向特性^[32~35]. Fomel(2006)^[36]开发了一种针对地震数据的方向性数学变换方法,并命名为“seislet 变换”. seislet 变换主要源于离散小波变换(DWT)技术,但在不同小波级数上引入地震同相轴的局部倾角属性. 一般来说,沿测线方向的离散小波变换是一种特殊的零倾角 seislet 变换. 基于 seislet 变换的高压缩特性,很多地震数据处理任务都可以由该方法来实现,例如,地震数据规则化和随机噪声衰减等.

由于初期的 seislet 变换是基于低阶小波变换框架(Haar 和 Cohen-Daubechies-Feauveau 5/3)^[37],其很难对沿同相轴方向的非平稳信号进行有效地压缩,因此压缩特性具有一定的局限性. CDF 9/7 滤波器具有更好地处理非平稳信号的能力,被用于 JPEG2000 的压缩标准^[38]. 在本文中,通过引入 Cohen-Daubechies-Feauveau(CDF)9/7 双正交小波框架,升级 seislet 变换为高阶变换,该技术主要根据地震数据特有的局部倾角属性对高阶 CDF 9/7 小波变换系数中预测算子和更新算子进行修改,利用第二代小波变换的提升方案实现高阶 seislet 变换. 在该变换中,预测算子沿主地震倾角方向对地震同相轴进行预测,而更新算子将地震同相轴信息带入下一级变换. 理论模型和实际数据的处理结果证明该方法有很好的处理效果,在有效消除随机噪声的同时能够很好地保护地震信号的细节,其对地震数据的去噪效果要明显优于傅里叶变换、低阶离散小波变换、高阶离散小波变换和低阶 seislet 变换.

2 理论基础

2.1 提升方案(Lifting Scheme)

提升方案^[39,40]提供了一种方便的计算离散小波变换的快速算法,该方法构造的第二代小波,不依赖 Fourier 变换,但可以实现所有的第一代小波变换. 具有:(1)继承了第一代小波的多分辨率的特性;(2)不依赖傅里叶变换;(3)占用系统内存少;(4)反变换很容易从正变换得到,只是改变了数据流的方向和正负号等特点. 其一般形式可以定义为以下几个关键步骤:

(1)将输入数据分成奇序列 o 和偶序列 e .

(2)计算奇序列与偶序列预测值之间的残差 r .

$$\mathbf{r} = \mathbf{o} - \mathbf{P}[\mathbf{e}], \quad (1)$$

其中, \mathbf{P} 是预测算子.

(3) 通过修正偶序列, 计算数据的近似值 \mathbf{c} .

$$\mathbf{c} = \mathbf{e} + \mathbf{U}[\mathbf{r}], \quad (2)$$

其中, \mathbf{U} 是更新算子.

(4) 近似值 \mathbf{c} 成为新的数据, 重复以上步骤得到下一级数的变换系数.

提升方案下的逆变换形式也可以很简单地定义, 提升方案的反算子提供了反变换的运算法则:

(1) 将近似值 \mathbf{c} 和近似级数下的残差 \mathbf{r} 作为输入数据.

(2) 通过方程(2)中的反向运算, 重建偶序列成分 \mathbf{e} .

$$\mathbf{e} = \mathbf{c} - \mathbf{U}[\mathbf{r}]. \quad (3)$$

(3) 通过方程(1)的反向运算, 重建奇序列成分 \mathbf{o} .

$$\mathbf{o} = \mathbf{r} + \mathbf{P}[\mathbf{e}]. \quad (4)$$

(4) 重组奇序列和偶序列成分, 生成上一级数尺度的数据, 重复上面步骤重建原始数据.

离散小波变换结果由近似级数尺度下的近似数据和所有级数尺度下的残差组成, 设计一种有效变换的关键在于确保预测算子 \mathbf{P} 留下最小的残差而更新算子 \mathbf{U} 保留原始数据中必要的特征并进入下一级数的运算.

2.2 基于平面波预测技术 (Plane-wave prediction) 的 seislet 变换

“Seislet 变换”^[36] 是一种针对地震数据开发的特殊的小波类变换方法, 可以提供比经典小波变换更有效的地震数据压缩能力. 在离散小波变换中, 变换的基本单元是数据样点, 而在 seislet 变换中, 对应的处理单元是地震道, 根据对应地震道中局部地震倾角属性对同相轴进行预测和时移, 其结果更符合离散小波变换的分片平滑假设. 基于平面波分解方法^[41]的预测运算是该方法的核心, 其通过最小化预测误差以提供估计局部地震倾角和邻道预测的准则. 平面波在不同地震道中传播的一个重要特点是波的总能量保持不变, 平面波分解滤波器利用时间域的全通滤波器来实现平面波的传播, 在计算中, 通过泰勒展开拟合全通滤波器的低频响应, 获取预测误差滤波器与时空变化局部地震倾角的关系, 最后局部地震倾角可通过迭代正则化方法求解, 其结果使预测误差滤波器作用后的地震记录能量达到最小. 由于平面波分解方法得到的局部地震倾角具有时空变化的特点, 因此在实际应用中可以很好地预测出复杂的地震同相轴.

由局部平面波的物理模型, 可以得到局部平面波微分方程:

$$\frac{\partial P(t, x)}{\partial x} + \sigma(t, x) \frac{\partial P(t, x)}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

其中, $P(t, x)$ 是地震波场, $\sigma(t, x)$ 为依赖于时间变量 t 和空间变量 x 的局部地震倾角. 当地震倾角为常数时, 方程(5)有简单的解:

$$P(t, x) = f(t - \sigma x), \quad (6)$$

其中, $f(t)$ 为任意波形. 当局部地震倾角 $\sigma(t, x)$ 沿空间变化时, 可以利用局部算子来预测相邻地震道.

假设地震剖面为 \mathbf{s} , 为地震道的集合 $\mathbf{s} = [\mathbf{s}_1 \mathbf{s}_2 \cdots \mathbf{s}_N]^T$, 其中 N 为地震总道数, \mathbf{s}_i 为第 i 道地震数据, 其时间样点数设为 M . 在线性算子表示下, 平面波分解算子可以定义为

$$\mathbf{d} = \mathbf{D} \mathbf{s}, \quad (7)$$

其中, \mathbf{d} 为残差, \mathbf{D} 为分解算子且有如下定义:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -\mathbf{S}_{1,2} & \mathbf{I} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -\mathbf{S}_{2,3} & \mathbf{I} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & -\mathbf{S}_{N-1,N} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中, \mathbf{I} 代表单位算子, $\mathbf{S}_{i,j}$ 为从第 i 道到第 j 道的预测因子, \mathbf{I} 和 $\mathbf{S}_{i,j}$ 为 $M \times 1$ 维的矩阵. 地震道的预测过程是原始地震道沿主地震倾角方向的时移运算. 该预测因子是局部平面波(方程(5))在 x 方向传播的数值解. 主地震倾角可以由对预测误差(\mathbf{d})求极小值来估计. 计算过程利用规则化的最小平方最佳化方法来实现, 规则化条件为所估计的倾角在数据空间中平滑.

相距较远的地震道之间预测过程可以由简单的递归来实现, 例如, 从第 1 道到第 k 道的预测为

$$\mathbf{S}_{1,k} = \mathbf{S}_{k-1,k} \cdots \mathbf{S}_{2,3} \mathbf{S}_{1,2}. \quad (9)$$

通过使用平面波预测因子 \mathbf{S} , 可以对提升方案中离散小波变换的预测算子和更新算子进行修改. 低阶 seislet 变换^[36] 主要基于低阶小波变换 (Haar 和 CDF 5/3). 例如, 对于简单的 CDF 5/3 小波系数, 可以得到 seislet 变换中对应的预测算子 \mathbf{P} 和更新算子 \mathbf{U} :

$$\mathbf{P}[\mathbf{e}]_k = (\mathbf{S}_k^{(+)}[\mathbf{e}_{k-1}] + \mathbf{S}_k^{(-)}[\mathbf{e}_k])/2, \quad (10)$$

$$\mathbf{U}[\mathbf{r}]_k = (\mathbf{S}_k^{(+)}[\mathbf{r}_{k-1}] + \mathbf{S}_k^{(-)}[\mathbf{r}_k])/4, \quad (11)$$

其中, $\mathbf{S}_k^{(+)}$ 和 $\mathbf{S}_k^{(-)}$ 为一个地震道的预测因子, 分别对应沿局部地震倾角从左侧和右侧进行时移. 该预测过程需要在不同小波级数上进行, 因此需要在两个不同道间距的地震道之间进行运算.

2.3 高阶 seislet 变换

基于 Cohen-Daubechies-Feauveau(CDF)9/7 双正交小波框架,我们定义高阶 seislet 变换. CDF 9/7 双正交小波变换广泛用于图像处理中的 JPEG2000 压缩,其具有优秀的压缩特性. 在提升方案实现过程中, CDF9/7 双正交小波变换由两次带有不同系数的 CDF 5/3 双正交小波变换级联来构建^[42]. 高阶 seislet 变换的预测算子和更新算子分别定义如下:

$$\mathbf{P}'_1[\mathbf{e}]_k = (\mathbf{S}_k^{(+)}[\mathbf{e}_{k-1}] + \mathbf{S}_k^{(-)}[\mathbf{e}_k])\alpha, \quad (12)$$

$$\mathbf{U}'_1[\mathbf{r}]_k = (\mathbf{S}_k^{(+)}[\mathbf{r}_{k-1}] + \mathbf{S}_k^{(-)}[\mathbf{r}_k])\beta, \quad (13)$$

$$\mathbf{P}'_2[\mathbf{e}]_k = (\mathbf{S}_k^{(+)}[\mathbf{e}_{k-1}] + \mathbf{S}_k^{(-)}[\mathbf{e}_k])\gamma, \quad (14)$$

$$\mathbf{U}'_2[\mathbf{r}]_k = (\mathbf{S}_k^{(+)}[\mathbf{r}_{k-1}] + \mathbf{S}_k^{(-)}[\mathbf{r}_k])\delta, \quad (15)$$

其中, $\alpha = 1.586134342$, $\beta = -0.052980118$, $\gamma = -0.882911076$, $\delta = 0.443506852$. 最后,不同的比例系数被分别应用于奇、偶序列,其系数关系如下:

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}K, \quad (16)$$

$$\mathbf{o} = \mathbf{o}(1/K), \quad (17)$$

其中, $K = 1.230174105$, 此处选取的系数 K 为 JPEG 2000 压缩标准中的系数,此系数的选取不会影响信号经过正反变换后完全重构的性质,但对非平稳信号的压缩比却可以得到提高.

3 Seislet 变换域的去噪阈值选取

Seislet 变换方法在预测算子和更新算子中引入地震局部倾角模式,在预测过程中地震同相轴沿倾角方向进行最大程度地压缩,而随机噪声在地震数据中随机分布,属于不可预测部分. 因此地震信号在 seislet 变换域内其能量主要集中在有限的几个系数中,而噪声的能量却分布于整个变换域内. 经 seislet 分解后,地震信号的变换系数要大于噪声的变换系数. 如果找到一个合适的阈值,当 seislet 系数小于该阈值时,认为这时的 seislet 系数主要是由噪声引起的;当 seislet 系数大于该阈值时,则认为其主要是由地震信号引起的. 当对 seislet 系数进行阈值处理后,反变换就可以达到去除噪声而保留有用信号的目的.

第一种选择 seislet 系数的方法是软阈值^[43]. 本文应用一种百分位数(Percentiles)方法,该方法主要是基于数据的排序模型,将数据体按照从小到大的顺序排序,然后取出需要位置的值作为输出,例如,长度为 n 的输入数据,其第 90 个百分位数的输出是位置为 $k = (90n)/100$ 的数据,中位数则是第 50 个百分位数的输出.

第二种方法是在级数方向的阈值. 通常,地震记录中的同相轴信息所对应的 seislet 系数主要集中在较小的几个级数尺度上,如果仅用该主要 seislet 系数进行信号恢复,则可以得到对应的去噪结果. 该方法主要依赖于变换方法对有用信息的压缩能力,在下面的数据分析中,可以看到高阶 seislet 更加满足其应用的要求.

另外一种可选的方法是形状正则化^[44]. 该方法引入一种造型算子,使用该算子可以定义由估计模型空间到可接受模型空间的影射关系. 该造型算子由迭代最佳化方法来实现(例如,共轭梯度法),该方法可以对估计的结果进行简单的控制. 一种特殊的形状正则化算子是锐化算子,该操作将模型影射到锐化的模型空间中,其处理效果近似于软阈值方法.

4 理论模型分析

为了测试高阶 seislet 变换的去噪效果,首先建立一个简单的多层地震反射模型(图 1a). 地震子波主频为 10 Hz,道间距为 20 m,共 128 道. 在该模型中加入均匀分布的随机噪声,噪声的最大幅值等于有用信号的最大振幅值. 由于实际中不存在白噪声,因此应用低通滤波器对该模型进行处理,高通频率为 60 Hz,此时该数据成为带限信号,更加符合实际地震记录(图 1b). 应用平面波分解技术,可以得到对应噪声模型的局部地震倾角剖面,如图 1c. 由于地震倾角是沿地震同相轴方向的平滑结果,而随机噪声不符合同相轴的特征,因此噪声对地震倾角的求取影响很小.

为了比较不同方法的去噪效果,选取傅里叶变换、高阶离散小波变换和高阶 seislet 变换实现相同的去噪过程,三种方法对应的变换域信息如图 2 所示,对比三种变换域系数,可以发现高阶 seislet 变换比其他两种方法具有更高的压缩比,有用信息对应的变换系数集中在一个更小的动态级数(scale)范围. 如果利用百分位数软阈值进行变换域处理,例如,仅选取 2% 的变换系数进行信号重建,则反变换结果为去噪后的结果,如图 3. 从图 1a、图 3a、图 3b 和图 3c 的比较可以看到,在使用相同的百分位数软阈值处理时,由于高阶 seislet 变换为地震数据提供更高的压缩比,因此仅选取较小的变换系数即可恢复地震数据又可以有效地消除随机噪声,但是,图中的地震反射同相轴也发生了一些畸变,主要是由于预测的局部地震倾角与真实的地震倾角之间存在一

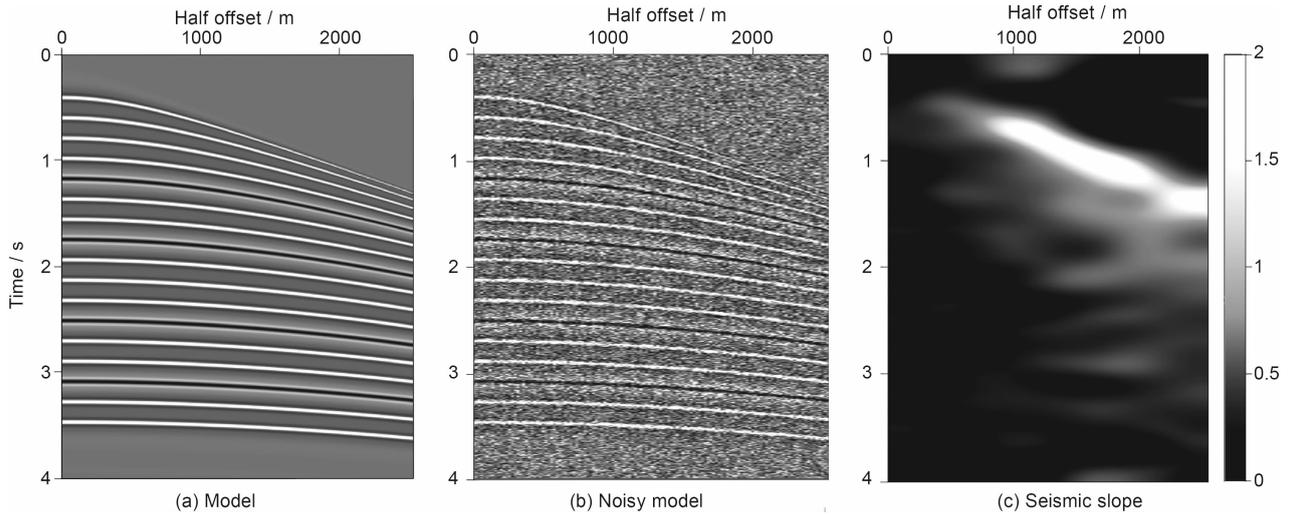


图 1 理论模型

(a) 合成地震记录; (b) 加入色噪声后的模型; (c) 局部地震倾角.

Fig. 1 Synthetic model

(a) Synthetic seismic record; (b) Seismic data after adding colored noise; (c) Seismic local slopes.

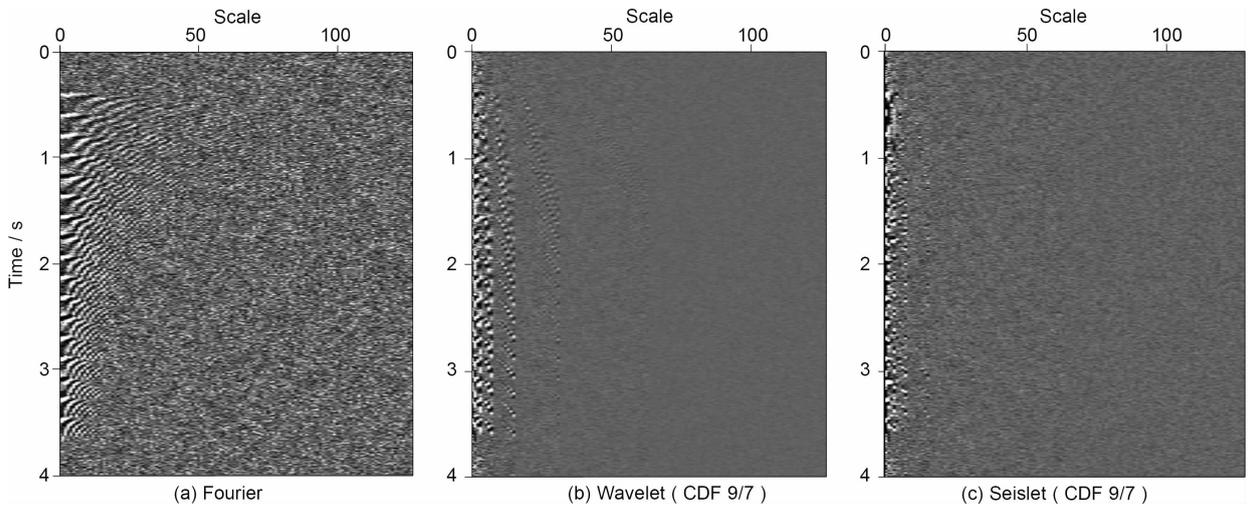


图 2 不同变换域系数比较

(a) 傅里叶变换域; (b) 高阶离散小波变换 (CDF 9/7) 域; (c) 高阶 seislet 变换 (CDF 9/7) 域.

Fig. 2 Comparison of different transform coefficients

(a) Fourier transform domain; (b) High-order wavelet transform (CDF 9/7) domain;

(c) High-order seislet transform (CDF 9/7) domain.

些差异,因此在实际应用中,通常需要增加距离方向上的平滑因子长度,另外,提高地震倾角的预测精度也可以有效地防止有效信号的畸变.而傅里叶变换和高阶小波变换虽然能够消除随机噪声,但不能很好地恢复原始模型中有效信息,尤其在局部地震倾角比较大的区域.图 3d 为图 1b 和图 3c 的差剖面,从图中可以看到大部分的随机噪声得到很好的压制,但一些有效的反射信息也出现在差剖面中.一方面原因是在去噪过程中使用了较少的变换域系数进行重建,部分低能量的有效信息不能参与信号重建;

另一方面,被破坏反射信息的多少取决于局部地震倾角的预测精度,在近炮检距和无反射信息处,地震倾角预测的精度高,有效信息被很好地保护,而在远炮检距处,地震倾角预测的精度相对较差,有效信息被部分衰减.

5 实际数据处理

在实际资料处理中,选取北海某地区的海上共中心点道集,如图 4a. 该记录共 128 道,道间距 12.5 m.

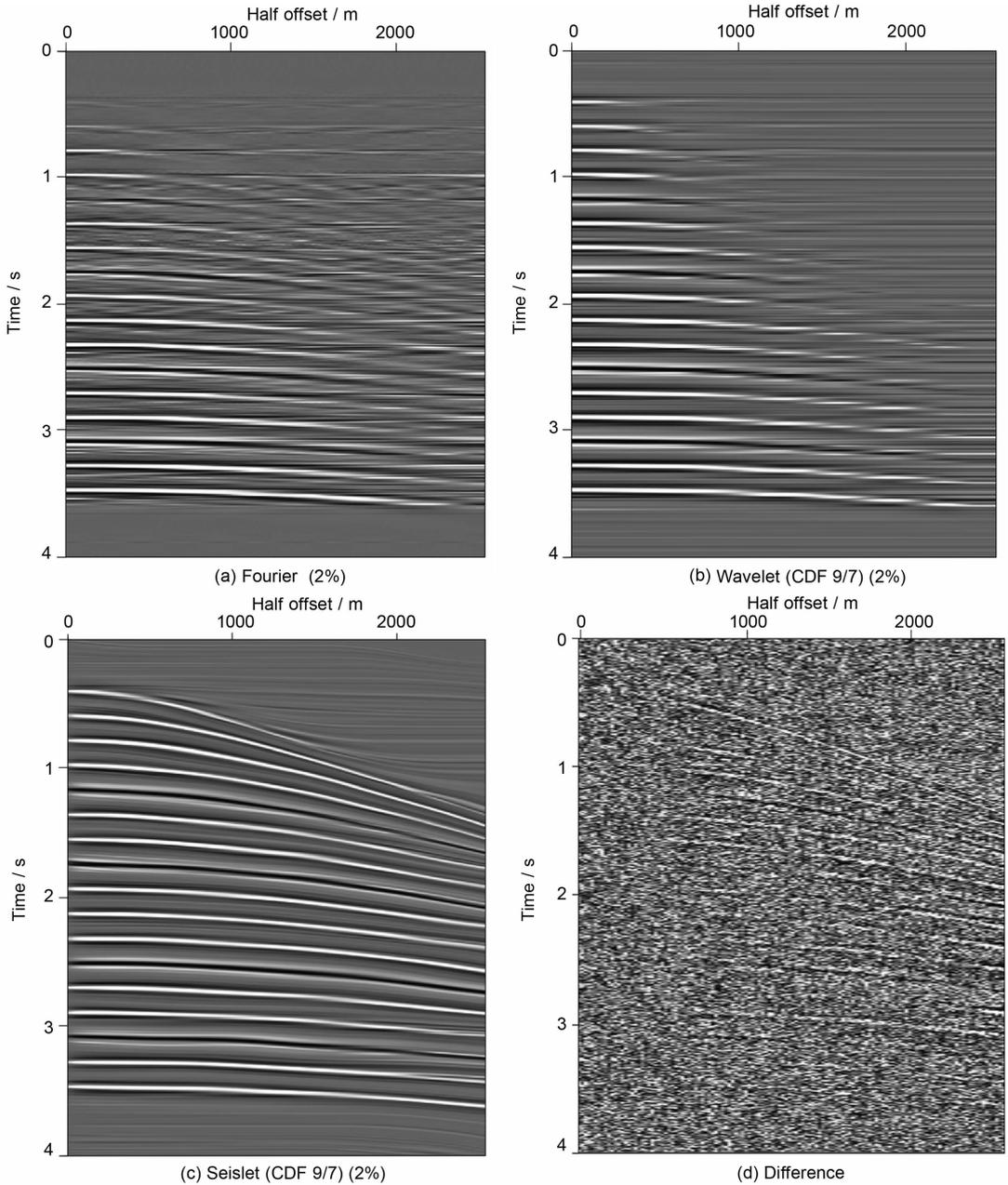


图 3 不同方法去噪效果比较

(a) 傅里叶变换; (b) 高阶离散小波变换(CDF 9/7); (c) 高阶 seislet 变换(CDF 9/7); (d) 差剖面.

Fig. 3 Comparison of denoising result by using different methods

(a) Fourier transform; (b) High-order wavelet transform (CDF 9/7); (c) High-order seislet transform (CDF 9/7); (d) Difference profile.

由平面波分解滤波器,得到对应的局部地震倾角(图 4b),结合局部地震倾角属性,应用高阶 seislet 变换,变换域如图 4c.当选择去噪阈值方法时,由于准确的噪声水平并不可知,因此可选取在级数方向的阈值方法.在该处理中,将级数大于 8 的 seislet 系数置零,如图 5a,对应的反变换即为去噪结果,如图 5b.从图中可以看出,应用阈值去噪后,高阶 seislet 能够提高地层的连续性.图 5c 为图 4a 和图 5b 的差剖面,其中除不相干噪声外,仅包含很少的有用信

息.从该实际数据的处理可以看出,应用级数方向阈值的高阶 seislet 变换可以有效地分离相干信号和随机噪声.

为比较不同方法的压缩特性,本文选取 7 种变换方法(傅里叶变换、Haar 离散小波变换、CDF 5/3 离散小波变换、CDF 9/7 离散小波变换、Haar seislet 变换、CDF 5/3 seislet 变换和 CDF 9/7 seislet 变换)对该实际数据进行分解.通过排序变换域系数,并将其投影到对数坐标,可以对比变换系数

从大到小的下降速率. 图 6 为对应 7 种方法的压缩比比较图, 从图中可以清晰地看到高阶 seislet 变换具有比傅里叶变换、小波变换和低阶 seislet 变换更

高的压缩能力. 由于高阶地震小波基于 CDF 9/7 高阶小波变换, 该方法可以对非平稳地震同相轴进行有效地压缩, 因此, 当应用较小的阈值范围来重建数

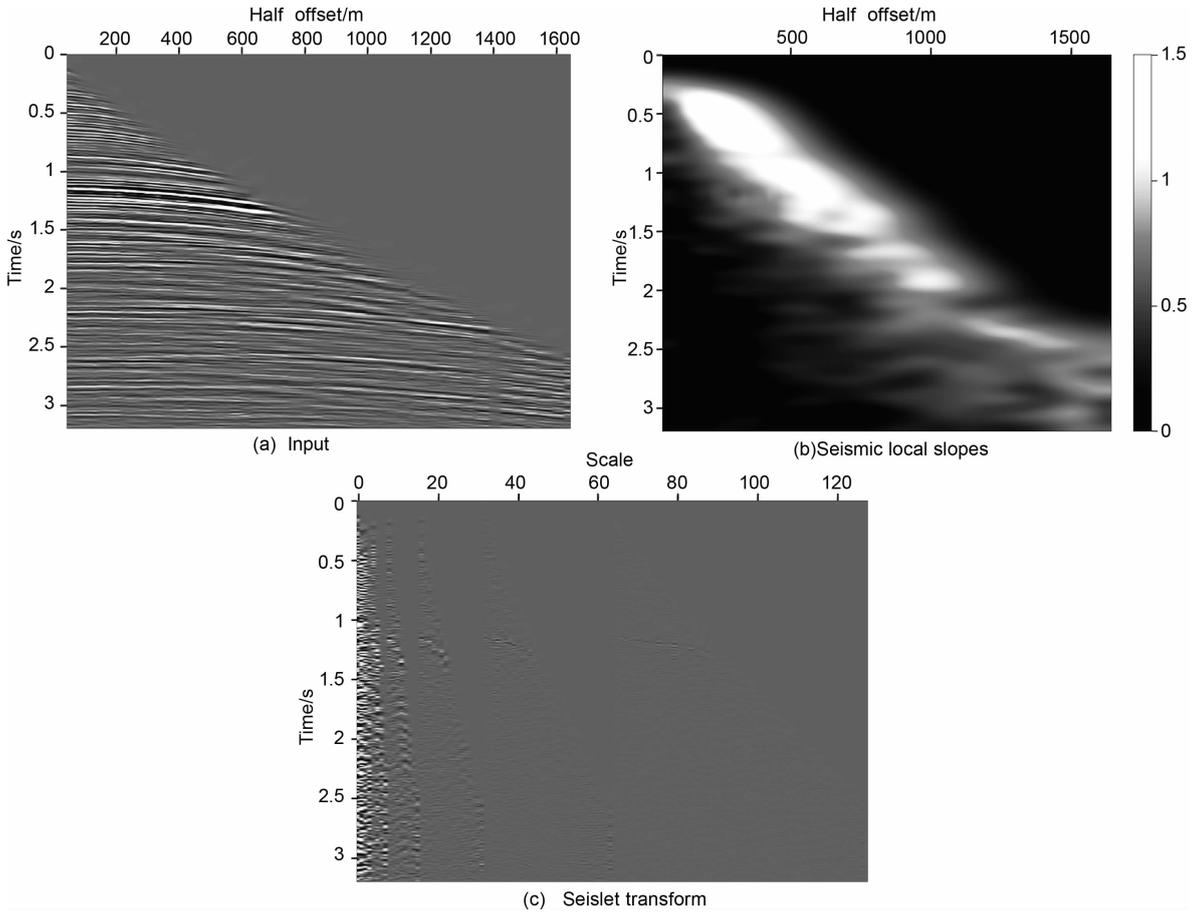


图 4 实际地震数据及变换域系数

(a) 实际地震资料; (b) 局部地震倾角; (c) 高阶 seislet 变换域.

Fig. 4 Field seismic data and transform domain

(a) Field data; (b) Seismic local slopes; (c) High-order seislet transform domain.

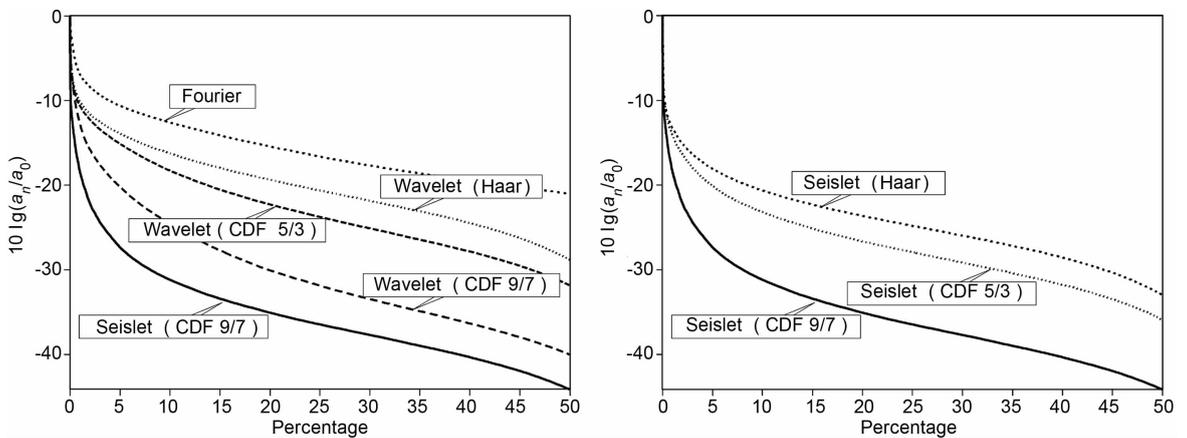


图 6 不同方法压缩比比较

(a) 傅里叶变换、小波变换和高阶 seislet 变换比较; (b) 低阶和高阶 seislet 变换比较.

Fig. 6 Compression ratio comparison of different methods

(a) Comparison of Fourier, wavelet, and seislet transform; (b) Comparison of low- and high-order seislet transform.

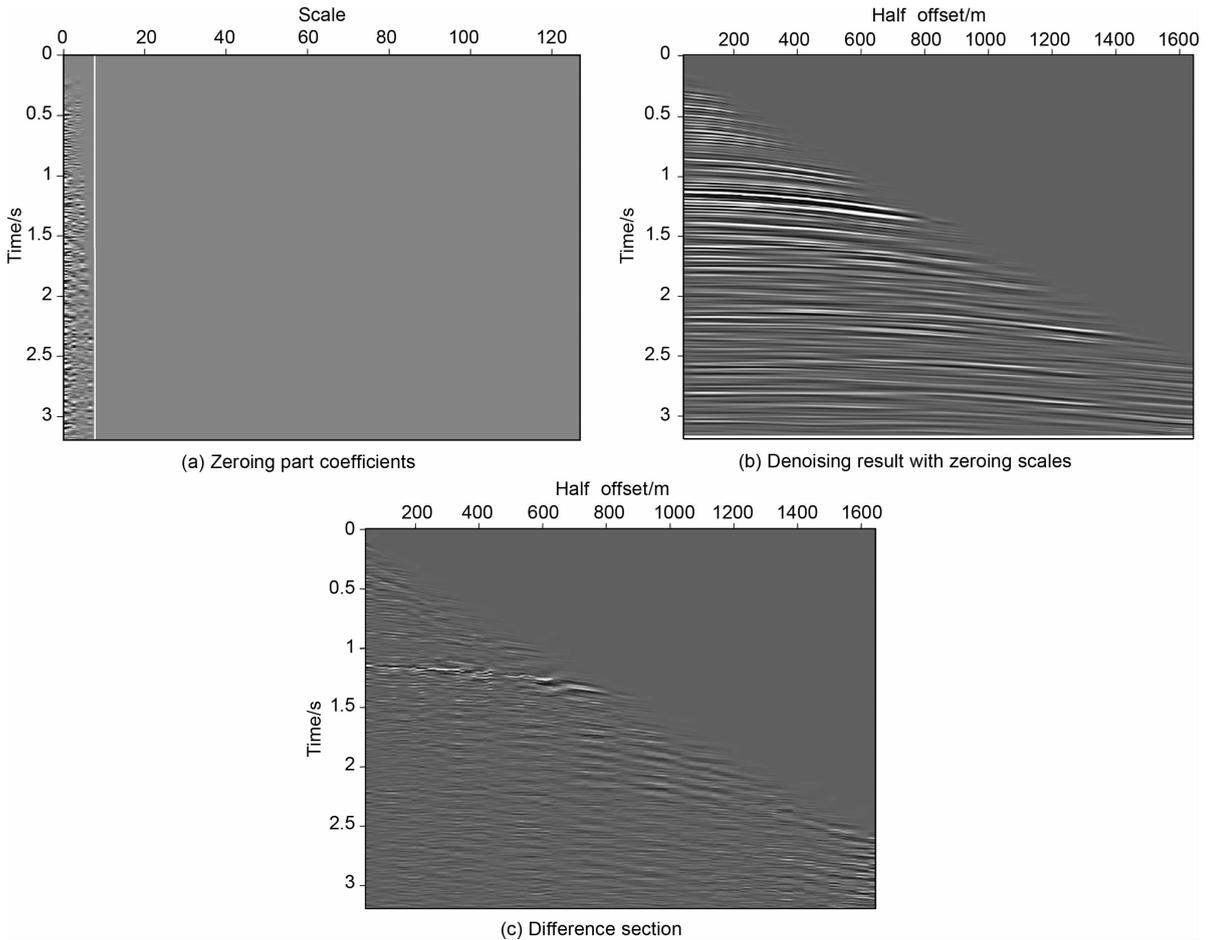


图 5 高阶 seislet 变换处理剖面对比图

(a) 部分置零的变换域系数; (b) 反变换后的去噪结果; (c) 差剖面。

Fig. 5 Comparison of high-order seislet transform processing of prestack field data

(a) Zeroing seislet coefficients at fine scales; (b) Denoised result after inverse seislet transform; (c) Difference section.

据时,高阶 seislet 变换可以提供更好的非平稳信号保护能力。

6 结 论

本文介绍了一种 seislet 变换的高阶扩展形式,该 seislet 变换是一种小波类变换方法,其主要特点是更适合地震数据的分析和处理。通过预测地震同相轴的局部倾角属性,并对地震道进行时移操作,可以使数据具有分片平滑的特性,此时引入提升方案下的高阶离散小波变换框架即可实现该变换方法。通过理论模型的处理以及与傅里叶变换、高阶离散小波变换的比较,本方法在保护有用信号和消除随机噪声方面有更好的效果。最后通过对实际地震记录进行处理并比较不同方法的压缩比,进一步验证了模型分析结果的正确性与本方法的优越性。

致 谢 本研究由中国石油 BGP 国际开发部提供

部分资助。

参考文献 (References)

- [1] 王振国,陈小宏,王学军等. 沙漠地区老地震资料的处理技术及效果分析. 勘探地球物理进展,2007,30(2):123~129
Wang Z G, Cheng X H, Wang X J, et al. Processing of old seismic data from desert and its effect analysis. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 2007, 30(2): 123~129
- [2] 金 龙,陈小宏,刘其成. 基于奇异值分解的时移地震互均衡方法. 勘探地球物理进展,2005,20(2):294~297
Jin L, Cheng X H, Liu Q C. New method for time-lapse seismic matching based on SVD. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 2005, 20(2): 294~297
- [3] 赵德斌,黄真萍,王春梅. $F-X$ 域奇异值分解预测滤波法随机噪声衰减. 石油物探,1998,37(3):29~33
Zhao D B, Huang Z P, Wang C M. Random noise attenuation using predictive filtering in $F-X$ domain by singular value decomposition. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 1998, 37(3): 29~33

- [4] Gulunay N. Noncausal spatial prediction filtering for random noise reduction on 3-D poststack data. *Geophysics*, 2000, **65**: 1641~1653
- [5] Ristau J P, Moon W M. Adaptive filtering of random noise in 2-D geophysical data. *Geophysics*, 2001, **66**: 342~349
- [6] Liu C, Liu Y, Yang B, et al. A 2D multistage median filter to reduce random seismic noise. *Geophysics*, 2006, **71**: 105~110
- [7] 邢贞贞, 韩立国, 王宇等. 高阶统计量方法在地震信号分析中的应用. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, **37**(增): 139~142
Xing Z Z, Han L G, Wang Y, et al. Application of high-order statistics in seismic signal analysis. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2007, **37** (Suppl.): 139~142
- [8] 王兆磊, 周辉. 在反演过程中利用不同范数准则压制噪声对反演结果的影响. 地球物理学进展, 2007, **22**(3): 919~923
Wang Z L, Zhou H. Using different kinds of norms to suppress the effect of noise in the course of inversion. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(3): 919~923
- [9] Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, 1999
- [10] Foster D J, Mosher C C, Hassanzadeh S. *Wavelet Transform Methods for Geophysical Applications*. SEG Extended Abstract, 1994: 1465~1468
- [11] Dessing F J. A wavelet transform approach to seismic processing [Ph. D. thesis]. Delft: Delft University of Technology, 1997
- [12] 刘财, 王典, 杨宝俊等. 二维小波变换在地震勘探面波消除中的应用. 地球物理学进展, 2003, **18**(4): 711~714
Liu C, Wang D, Yang B J, et al. Apply of 2D wavelet transforms in surface wave eliminations of seismic exploration. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2003, **18** (4): 711~714
- [13] Wapenaar K, Ghose R, Toxopeus G, et al. The wavelet transform as a tool for geophysical data integration. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2005, **12**: 5~23
- [14] 刘财, 张海江, 杨宝俊. 小波变换及其在薄储层识别中的应用. 石油物探, 1995, **34**(3): 23~31
Liu C, Zhang H J, Yang B J. Wavelet transform and its application in the recognition of thin-reservoir. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 1995, **34**(3): 23~31
- [15] 刘财, 张海江, 杨宝俊等. 小波变换在高分辨率地震勘探数据处理中的应用. 长春地质学院学报, 1996, **26**(1): 78~82
Liu C, Zhang H J, Yang B J, et al. Application of wavelet transform to digital processing in high resolution seismic prospecting. *Journal of Changchun University of Earth Sciences* (in Chinese), 1996, **26**(1): 78~82
- [16] 裴正林. 小波理论及其在地震数据处理中的应用. 地球物理学进展, 2002, **17**(3): 486~490
Pei Z L. Wavelet theory and its application in seismic data processing. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2002, **17** (3): 486~490
- [17] 郭刚明, 时立彩, 高生军等. 小波变换在地震资料处理中的应用效果分析. 石油物探, 2003, **42**(2): 237~239
Guo G M, Shi L C, Gao S J, et al. Application of wavelet transform in seismic data processing. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2003, **42**(2): 237~239
- [18] 徐亚, 郝天珧. 提升小波: 可用于重磁资料处理的新方法. 地球物理学进展, 2004, **19**(1): 36~39
Xu Y, Hao T Y. Lifting scheme: a promising method in gravity and magnetic data processing. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2004, **19**(1): 36~39
- [19] 徐亚, 郝天珧, 周立宏等. 位场小波变换研究进展. 地球物理学进展, 2006, **21**(4): 1132~1138
Xu Y, Hao T Y, Zhou L H, et al. Review of wavelet transform in potential field. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2006, **21**(4): 1132~1138
- [20] 李琪, 林云芳, 曾小苹. 应用小波变换提取张北地震的震磁效应. 地球物理学报, 2006, **49**(3): 855~863
Li Q, Lin Y F, Zeng X P. Wavelet analysis as a tool for revealing geomagnetic precursors of the Zhangbei earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(3): 855~863
- [21] 马利华, 韩延本, 廖德春. 小波变换应用于日长变化的研究进展. 地球物理学进展, 2007, **22**(4): 1075~1079
Ma L H, Han Y B, Liao D C. Study progress of wavelet transform applying in length-of-day change. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(4): 1075~1079
- [22] 高静怀, 毛剑, 满蔚仕等. 叠前地震资料噪声衰减的小波域方法研究. 地球物理学报, 2006, **49**(4): 1155~1163
Gao J H, Mao J, Man W S, et al. On the denoising method of prestack seismic data in wavelet domain. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(4): 1155~1163
- [23] 柳建新, 韩世礼, 马捷. 小波分析在地震资料去噪中的应用. 地球物理学进展, 2006, **21**(2): 541~545
Liu J X, Han S L, Ma J. Application of wavelet analysis in seismic data denoising. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2006, **21**(2): 541~545
- [24] 吴招才, 刘天佑. 地震数据去噪中的小波方法. 地球物理学进展, 2008, **23**(2): 493~499
Wu Z C, Liu T Y. Wavelet transform methods in seismic noise attenuation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, **23** (2): 493~499
- [25] 张波, 印兴耀, 吴国忱等. 用小波分析和反演方法联合去除随机噪声的研究. 石油地球物理勘探, 1999, **34**(6): 635~641
Zhang B, Yin X Y, Wu G C, et al. Random noise elimination using wavelet analysis and inversion. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 1999, **34**(6): 635~641
- [26] 吴爱弟, 曹思远. 用正交多小波压制地震信号的随机噪声. 石油地球物理勘探, 2002, **37**(5): 473~476
Wu A D, Cao S Y. Random noise suppression of seismic signal using orthogonal multi-wavelets. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2002, **37**(5): 473~476
- [27] 杨立强, 宋海斌, 郝天珧等. 基于二维小波变换的随机噪声压制方法研究. 石油物探, 2005, **44**(1): 4~6

- Yang L Q, Song H B, Hao T Y, et al. Method of 2-D wavelet transform in attenuating random noise. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2005, **44**(1):4~6
- [28] 王 典, 刘 财, 刘 洋等. 基于提升算法和百分位数软阈值的小波去噪技术. *地球物理学进展*, 2008, **23**(4):1124~1130
- Wang D, Liu C, Liu Y, et al. The application of wavelet transform based on lifting scheme and percentiles soft-threshold in seismic random noise elimination. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, **23**(4):1124~1130
- [29] Douma H, de Hoop M V. Leading-order seismic imaging using curvelets. *Geophysics*, 2007, **72**(6):S231~S248
- [30] Chauris H, Nguyen T. Seismic demigration/migration in the curvelet domain. *Geophysics*, 2008, **73**(2):S35~S46
- [31] Herrmann F J, Wang D, Hennenfent G, et al. Curvelet-based seismic data processing: a multiscale and nonlinear approach. *Geophysics*, 2008, **73**(1):1~5
- [32] Pennec E L, Mallat S. Sparse geometric image representation with bandelets. *IEEE Trans. Image Process*, 2005, **14**(4):423~438
- [33] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation. *IEEE Trans. Image Process*, 2005, **14**(12):2091~2106
- [34] Starck J L, Candès E J, Donoho D L. The Curvelet transform for image denoising. *IEEE Trans. Image Process*, 2002, **11**(6):670~684
- [35] Velisavljevic V. Directionlets: anisotropic multi-directional representation with separable filtering [Ph. D. thesis]. Lausanne, Switzerland: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005
- [36] Fomel S. Towards the seislet transform. SEG Extended Abstract, 2006:2847~2851
- [37] Cohen A, Daubechies I, Feauveau J. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets. *Comm. Pure Appl. Math.*, 2006, **45**(5):485~560
- [38] Acharya T, Tsai P-S. JPEG2000 Standard for Image Compression: Concepts, Algorithms and VLSI Architectures. Wiley-Interscience, 2004
- [39] Sweldens W. The lifting scheme: a new philosophy in biorthogonal wavelet constructions. *Wavelet Applications in Signal and Image Processing III*, Proc. SPIE 2569, 1995:68~79
- [40] Sweldens W, Schroder P. Building Your Own Wavelets at Home, in *Wavelets in Computer Graphics*. ACM SIGGRAPH Course Notes, 1996:15~87
- [41] Fomel S. Applications of plane-wave destruction filters. *Geophysics*, 2002, **67**(6):1946~1960
- [42] Lian C, Chen K, Chen H, et al. Lifting based discrete wavelet transform architecture for JPEG2000. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2001:II445~II448
- [43] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1995, **41**(3):613~627
- [44] Fomel S. Shaping regularization in geophysical estimation problems. *Geophysics*, 2007, **72**(2):R29~R36

(本文编辑 何 燕)