

周怀来,李枚,郑文锋,彭小明. 基于 Curvelet 变换的地震资料信噪分离技术. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 620~625, DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.033.

Zhou H L, Li M, Zheng W F, Peng X M. An approach to signal noise separation of seismic data based on Curvelet transform. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(2): 620~625, DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.033.

## 基于 Curvelet 变换的地震资料信噪分离技术

周怀来<sup>1</sup>, 李枚<sup>2</sup>, 郑文锋<sup>1</sup>, 彭小明<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学信息工程学院, 成都 610059; 2. 攀枝花学院, 攀枝花 617000;

3. 中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院, 潜江 433124)

**摘要** 在地震资料中, 噪声干扰严重影响了有效信号的提取, 为此必须进行信噪分离处理. 本文提出一种基于 Curvelet 变换和 KL 变换相结合的软硬阈值折衷处理方法. 首先对地震数据进行 Curvelet 变换, 然后对各尺度系数选取适当阈值压制噪声干扰, 再利用 KL 变换提取数据中的相干有效信号, 最后重构得到去噪后的记录. 经合成记录和实际地震资料处理实验证明, 该方法与小波变换法相比较, 更能有效进行信噪分离, 提高地震剖面信噪比和分辨率.

**关键词** Curvelet 变换, Ridgelet 变换, 小波变换, KL 变换, 信噪比, 分辨率

DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.033

中图分类号 P631

文献标识码 A

## An approach to signal noise separation of seismic data based on Curvelet transform

ZHOU Huai-Lai<sup>1</sup>, LI Mei<sup>2</sup>, ZHENG Wen-Feng<sup>1</sup>, PENG Xiao-Ming<sup>3</sup>

(1. College of information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. PanZhiHua University, PanZhiHua 617000, China; 3. Exploration & Development Research Institute of Jiangnan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Qianjiang, Qianjiang 433124, China)

**Abstract** In seismic data, noises seriously affect the extraction of significant signals, so the denoising processing is necessary. A method of signal noise separation is proposed based on a combination of Curvelet transform and KL transform. This paper first uses the Curvelet method to decompose seismic data. The soft and hard thresholds on scales of the Curvelet domain are selected for attenuation of noises, and then we makes use of KL transform to extract correlative significant signals. Lastly we reconstruct the seismic data processed. The synthetic and real seismic data processing experiments show that the method in this paper can efficiently separate signal and noise, and improve seismic section signal-to-noise ratio and seismic resolution compared with the wavelet method.

**Keywords** Curvelet transform, Ridgelet transform, wavelet transform, KL transform, SNR, resolution

### 0 引 言

由于野外采集数据中包含噪声干扰, 地震数据信噪比和分辨率都很低, 很难落实地质构造, 给地震资料解释研究带来困难. 因此要尽可能压制各种噪声, 提高地震资料的信噪比和分辨率.<sup>[19~24]</sup> 在地震

数据信噪分离处理技术中, 通常根据噪声的类型合理选择去噪方法. 常用的去除方法有  $f-x$  域预测滤波方法、相干加强去噪方法、KL 变换方法、奇异值分解法以及小波变换等. 小波变换理论被广泛用于地震信号去噪处理中, 并取得较好效果. 然而小波变换分析方法并非尽善尽美, 大量实践证明小波对于

收稿日期 2008-04-16; 修回日期 2008-07-07.

基金项目 国家自然科学基金项目(40761018)资助、四川省科技厅应用基础研究项目(ZX0017)小波变换在油气资源勘探中的应用研究项目资助.

作者简介 周怀来, 男, 汉族, 1978 年生, 博士, 现为成都理工大学信息工程学院教师, 研究方向: 石油物探信息处理及反演, 多波信息处理.  
(E-mail: zhouhuailai06@cdut.cn)

表征各向同性对象具有较好效果,对于各项异性的奇异性则显得力不从心.其主要原因是小波变换只能反映信号的零维奇异性,而难以反映高维奇异性<sup>[18]</sup>.在小波变换基础上,Candes E. J.<sup>[1~3]</sup>和 Donoho D. L. 建立了一种适于表示各向异性的多尺度方法——脊波(Ridgelet)变换,其本质是通过小波基函数添加一个表征方向的参数得到的,具有小波的优点,同时还具有较强的方向选择和辨识能力.为进一步表示多维信号中更为普遍的曲线型奇异性,Curvelet<sup>[4~7]</sup>变换应运而生,用多个尺度的局部直线来近似表示曲线,能为信号处理提供更多信息.

迄今为止,Curvelet 变换在图象去噪、图像融合、数据压缩等领域得到了广泛的应用.在地震数据处理领域尚处于起步阶段,Herrmann<sup>[8~9]</sup>等人和国内的张素芳<sup>[16]</sup>等人将其用于地震资料多次波衰减处理中,包乾宗、高静怀<sup>[17]</sup>等人则研究了其在 VSP 资料处理中的应用.本文将近年迅速发展起来的 Curvelet 变换用于地震资料信噪分离中,利用其多尺度多方向特性以及该变换的最优稀疏约束条件对地震信号进行信噪分离.同时由于 KL 变换是一种最佳变换,可用于提取地震信号中的相关有效信号,去除随机噪声,对于地震剖面上的线性相干噪声也有一定的压制作用.因此作者提出了将 Curvelet 变换与 KL 变换相结合的软硬阈值折衷方法用于地震资料信噪分离处理技术中,可达到压制噪声干扰的目的,提高地震资料质量.

## 1 Curvelet 变换

与小波变换<sup>[10~15]</sup>一样,Curvelet 变换也是一种新的多尺度变换,它能够对信号提供稀疏表示,不像在小波变换结果中传播到各个尺度分量中,能起到很好的能量集中效果. Curvelet 变换的基础是 Ridgelet 变换. Ridgelet 变换是由 Candes 和 Donoho 提出的,其解决了高维奇异性,特别是直线和超平面的奇异性而产生的一种新的工具,基本思想就是利用 Radon 变换,先将线的奇异性问题转换为点的奇异性问题,然后在 Radon 域中进行小波变换,充分利用小波变换能有效处理点奇异性问题的优势.

小波函数  $\psi: R \rightarrow R$  满足

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|^2} d\omega < \infty, \quad (1)$$

其中  $\Psi$  为  $\psi$  的傅立叶变换.对任意的  $a > 0, b \in R$  和  $\theta \in [0, 2\pi)$ , Ridgelet 基函数  $\psi_{a,b,\theta}: R^2 \rightarrow R^2$  定义为:

$$\psi_{a,b,\theta}(x) = a^{-\frac{1}{2}} \psi[(x_1 \cos\theta + x_2 \sin\theta - b)/a]. \quad (2)$$

对于二维函数  $f(x)$ ,其 Ridgelet 系数定义为:

$$R_f(a,b,\theta) = \int \psi_{a,b,\theta}(x) f(x) dx, \quad (3)$$

其重构公式为:

$$f(x) = \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} R_f(a,b,\theta) \psi_{a,b,\theta}(x) \frac{da}{a^3} db \frac{d\theta}{4\pi}. \quad (4)$$

由此可见,Ridgelet 变换是 Radon 域上的一维小波变换,小波能有效表示具有孤立点奇异性目标,而 Ridgelet 能有效表示具有线状奇异性目标.因此 Curvelet 变换本质上是对信号进行子带分解后的进行 Ridgelet 分析的多尺度变换.首先对信号做小波变换,将其分解为一系列不同尺度的子带信号,然后对每个子带信号做局部 Ridgelet 变换,Ridgelet 中的子块大小可因尺度变换而互不相同.对函数  $f(x,y)$  做 Curvelet 变换包括如下步骤:

(1)子带分解.通过小波变换将其分解为多个子带分量.对  $f(x,y)$  做  $J$  层分解得

$$f = p_0 f + \sum_{j=1}^J \Delta_j f.$$

其中  $p_0 f$  为低频分量,  $\sum_{j=1}^J \Delta_j f$  为高频分量.

(2)平滑分割.将各个高频子带分割为若干个子块,不同子带分量分割的子块大小可以不同.

(3)Ridgelet 分解.对每个子带平滑分割的子块进行 Ridgelet 变换.

## 2 信噪分离方法原理

地震资料中包含大量的规则线性干扰和随机噪声,对于资料中的规则干扰和随机噪声,本文利用 Curvelet 变换与 KL 变换相结合的方法进行去除.首先对原始地震资料做 Curvelet 变换,然后对 Curvelet 变换系数做阈值处理,去除记录中的随机噪声,接着对阈值处理后的 Curvelet 系数进行 KL 变换,运用 KL 变换提取相关信号,最后做逆 Curvelet 变换得到去噪后的地震记录.具体实现步骤可由以下四步来完成:

(1)Curvelet 分解

对原始地震记录  $f(x,y)$  进行 Curvelet 分解,得到 Curvelet 系数,如  $w_{j,k}$ .

(2)软硬阈值折衷法去噪处理

对 Curvelet 系数进行软硬阈值折衷法进行处

理. 定义<sup>[21]</sup>

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - a\lambda), & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (5)$$

其中  $\lambda$  为阈值,  $0 \leq a \leq 1$  为调节因子, 当  $a$  取 0 或者 1 时, 上式(5)即为硬阈值或软阈值估计方法, 通过对调节因子的适当调整, 则可以取得较好的去噪

效果.

### (3) KL 变换

对阈值处理后的系数进行 KL 变换, KL (Karhunen-Loeve) 变换是一种与傅立叶变换、沃尔什变换等相似的线性变换, 这是一种特殊的正交变换. 对于给定的信号向量

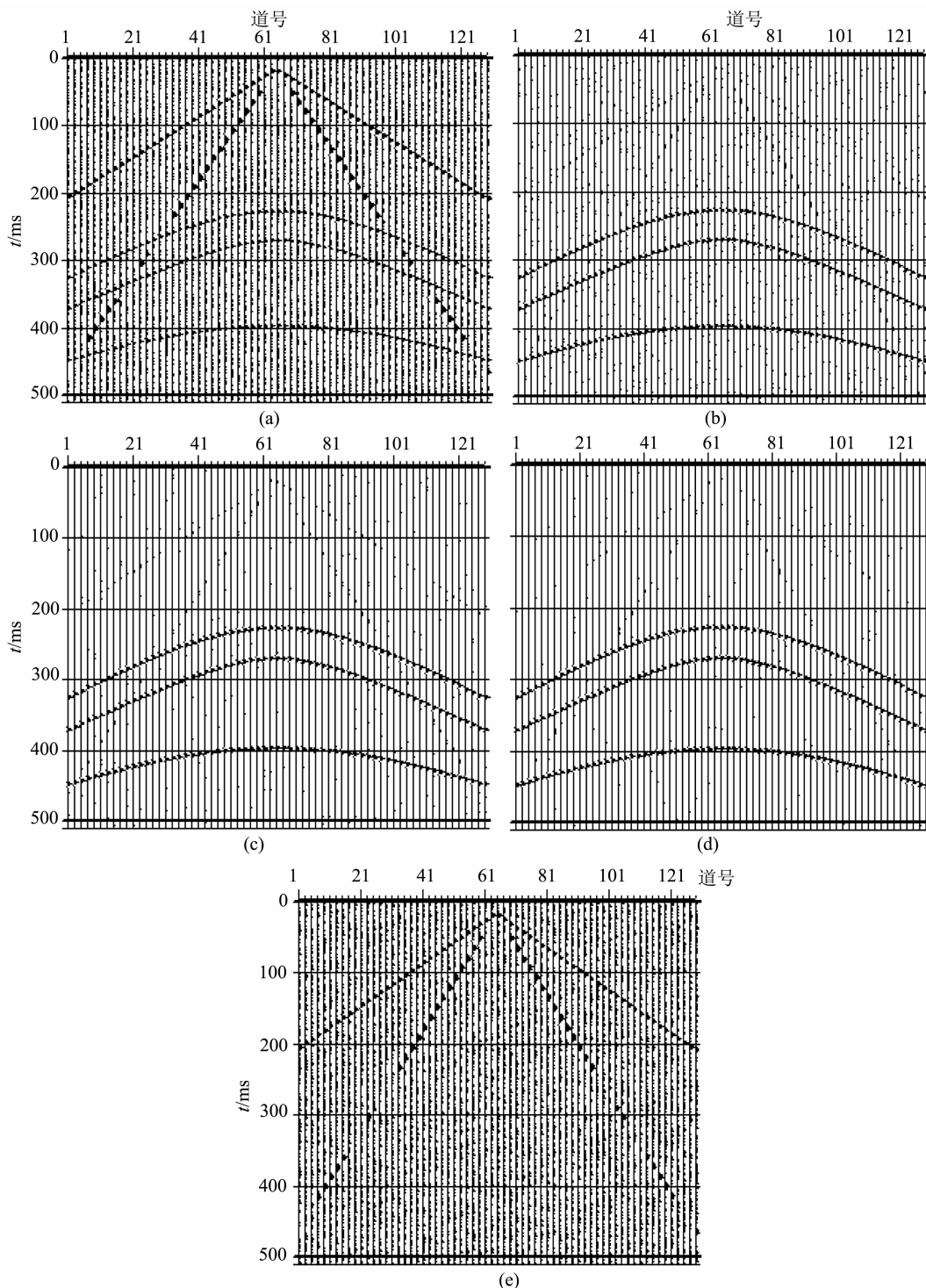


图 1 合成地震记录信噪分离

(a) 含噪合成记录; (b) 小波变换处理结果; (c) Curvelet 变换处理结果;  
(d) 本文方法处理结果; (e) 本文方法去除的噪声

Fig. 1 signal-noise separation of synthetic seismogram

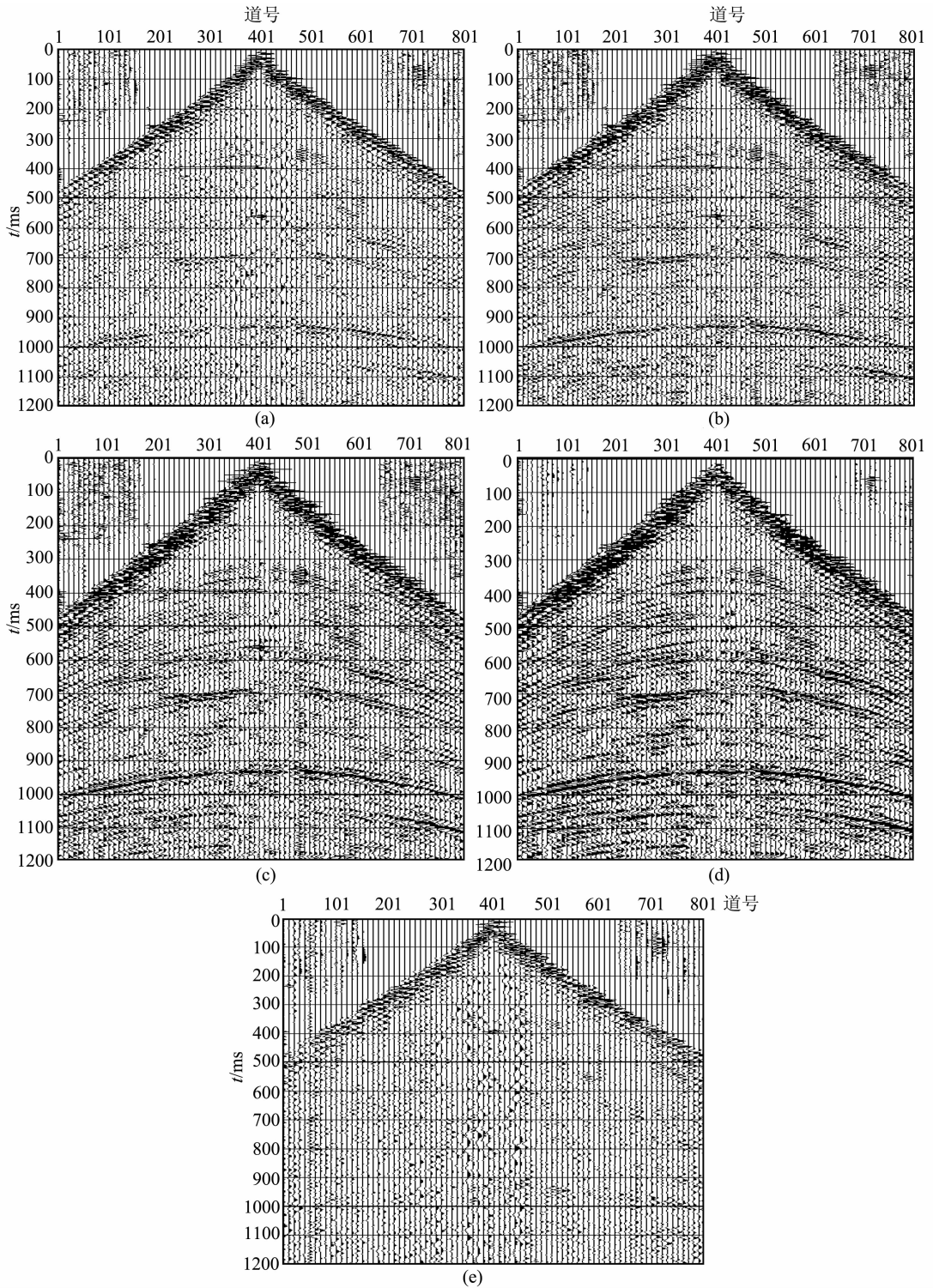


图 2 实际资料处理结果  
 (a)原始地震记录;(b)小波变换处理后结果;(c)Curvelet 变换处理后结果;  
 (d)本文方法处理后结果;(e)本文方法提取的噪声

Fig. 2 Result of seismic data processing

$$x = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T,$$

经 KL 变换后变为  $N$  点向量  $y$ ,  $y$  的各分量之间完全去除了相关性,且均方差最小,以进一步去除噪

声,提取其中相干有用信号,并可根据实际需要选择重构百分比的大小。

(4)逆 Curvelet 变换

对经过上述处理后的 Curvelet 系数进行逆 Curvelet 变换,重构得到去噪后的地震记录。

### 3 实例分析

#### 3.1 合成地震记录处理

首先通过合成地震记录试验来验证方法的可行性。图 1a 是一个三层水平模型的合成记录,其中包含直达波、面波干扰和加入的随机干扰噪声。图 1b 是通过小波变换阈值去噪后的结果。对图 1a 记录进行 Curvelet 软硬阈值折衷法阈值去噪后的结果如图 1c 所示。图 1d 是对含噪记录图 1a 作 Curvelet 分解,接着对分解系数做软硬阈值折衷法去噪,然后采用 KL 变换提取相干有用信号得到的记录。图 1e 是采用本文方法从图 1a 中去除的噪声。从图 1 中几种方法处理的结果图来看,小波变换在信噪分离方面起到很好的效果,但基于 Curvelet 变换法比小波变换处理的效果更为明显,采用本文 Curvelet 变换与 KL 变换相结合的方法不仅可以压制随机干扰,对于线性干扰同样也取得更好效果,提高了记录的信噪比,同时也改善了记录的视觉效果。

#### 3.2 实际资料处理

图 2a 是含强面波干扰和线性干扰的某原始叠前地震资料,由于资料中的大量噪声干扰,影响同相轴识别和追踪。现对图 2a 进行小波变换消噪处理,处理结果见图 2b。图 2c 是基于 Curvelet 变换阈值去噪处理后的结果,从图中可以看出,去噪的效果较好,地震剖面的同相轴较清晰,信噪比和分辨率得到提高,但还存在一定的噪声干扰。图 2d 是经 Curvelet 变换与 KL 变换相结合处理后的剖面,原来能量很强的面波已经消除,随机干扰也得到有效压制,突现反射波同相轴更加连续,信噪比得到更大提高,并且有效信号能量得到有效保持。图 2e 是采用本文方法从图 2a 中分离出的噪声,可以看出该方法基本不损失有效信号能量。从图 2 中处理结果显现出,本文方法更能达到很好的信噪分离效果,能发挥出 Curvelet 变换多尺度、多方向特性,同时运用 KL 变换来提取地震记录中的相干有用信号,符合地震记录相邻道有效信号相关的特点。比较处理结果图 2b、2c、2d 可知,运用 Curvelet 变换与 KL 变换相结合方法可更好的去除剖面中的噪声干扰,提高地震记录的信噪比和分辨率,有效改善地震资料质量。

### 5 结论

文中讨论了基于 Curvelet 变换信噪分离的基

本思想,根据 Curvelet 变换的多分辨率和多方向特性、地震记录中有用信号之间的相关性以及噪声干扰信号的非相关性,提出一种基于 Curvelet 变换与 KL 变换相结合的软硬阈值折衷方法,并满足能量最小准则。经理论模型和实际资料的处理验证了该方法的有效性和可行性,并通过与小波变换阈值法比较,进一步证实该方法在信噪分离上的优越性。但由于地层并非是一种理想的完全弹性介质,地震波在其中传播时会造成能量衰减,地层对高频成分的吸收衰减高于低频成分,因而地震信号中高频端的信噪比往往低于低频端。如果能改善高频部分的信噪比,可使分辨率成倍增加。因此,研究能同时提高信噪比和分辨率的信噪分离方法,尤其是能提高高频端信噪比的方法仍将值得我们进一步探索。

**致谢** 衷心感谢李录明教授对作者的帮助与支持,同时感谢成都理工大学地球探测与信息技术教育部重点实验室对本文工作的帮助。

### 参 考 文 献 (References):

- [1] Candès E J, Donoho D L. New tight frames of curvelets and optimal representations of objects with  $C^2$  singularities [J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 2004, 57: 219~266.
- [2] Candès E J, Guo F. New multiscale transforms, minimum total variation synthesis: Applications to edge-preserving image reconstruction [J]. *Signal Processing*, 2002, 82, 1519~1543.
- [3] Candès E J, Donoho D L. Continuous curvelet transform II: discretization and frames [J]. *Appl. Comput. Harmon. Anal.*, 2005, 19:198~222.
- [4] Candès E J, Donoho D L. Recovering edges in ill-posed problems: optimality of curvelet frames [J]. *Ann. Statist.*, 2000, 30: 784.
- [5] Candès E J, Romberg J, Tao T. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements [J]. *Comm. Pure Appl. Math.*, 2006, 59(8):1207~1223.
- [6] Candès E J, Demanet S L, Donoho D L, Ying L. Fast discrete curvelet transforms, SIAM multiscale Model [J]. *Simul.*, 2006, 5(3): 861~899.
- [7] Starck J L, Candès E J, Donoho D L. The curvelet transform for image denoising [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(6): 670~684.
- [8] Herrmann F, Hennenfent G, Moghaddam P. Seismic imaging and processing with curvelets, the 69th Annual Meeting, Extended Abstracts [J]. EAGE.
- [9] Herrmann FJ, Moghaddam P, Stolk C. Sparsity-and continuity-promoting seismic image recovery with curvelets

- frames [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2007.
- [10] Donoho D. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE. Trans. On IT, 1995, 3:613~627.
- [11] Mallat S G, Hang W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Trans on Information Theory,1992, 38(2):617~643.
- [12] Yu Y, Weaver J B, *et al.* Wavelet transform domain filters: a spatial selective noise filtration technique[J]. IEEE Trans Image Processing, Nov 1994, 3(6): 747~757.
- [13] Mallat S, Hang W L. Singularity detection and processing with wavelets [J]. IEEE Trans. On Information Theory, 1992, 38(2), 617~643,
- [14] Donoho D L, De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE. Trans Inform Theory, 1995,41:613~627.
- [15] Stephane Mt. A Wavelet Tour of Signal Processing [M]. Second Edition, Academic Press, 1999
- [16] 张素芳,徐义贤,雷栋. 基于 Curvelet 变换的多次波去除技术 [J]. 石油地球物理勘探,2006,41(3):262~265.  
Zhang S F, Xu Y X, Lei D. Multiple-eliminated technique based on Curvelet transform [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(3):262~265.
- [17] 包乾宗,高静怀,陈文超. Curvelet 域垂直地震剖面波场分离 [J]. 西安交通大学学报,2007,41(6):650~654.  
Bao Q Z, Gao J H, Chen W C. Wave field separation of vertical seismic profiling in Curvelet Domain[J]. Journal of Xi'An Jiaotong University, 2007,41(6):650~654.
- [18] 吴芳平,狄红卫. 基于 Curvelet 变换的软硬阈值折衷图像去噪 [J]. 光学技术,2007,33(5):688~690.  
Wu F P, Di H W. A image denoising method between soft and hard thresholding based on Curvelet transform [J]. Optical technique, 2007, 33(5):688~690.
- [19] 柳建新,韩世礼,马捷. 小波分析在地震资料去噪中的应用 [J]. 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 [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(2): 541~545.
- [20] 张军华,吕宁,田连玉,陆文志,钟磊. 地震资料去噪方法技术综合评述[J]. 地球物理学进展,2006,21(2): 546~553.  
Zhang J H, Lü N, Tian L Y, Lu W Z, Zhong L. An overview of the methods and techniques for seismic data noise attenuation[J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 2006, 21(2): 546~553.
- [21] 冯象初,甘小冰,宋国乡. 数值泛函与小波理论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2003.  
Feng X C, Gan X B, Song G X. Numerical function and wavelet theory[M]. Xi'An: XiDian university press, 2003.
- [22] 包乾宗,高静怀,陈文超. 面波压制的 Ridgelet 域方法[J]. 地球物理学报,2007,50(4):1210~1215.  
Bao Q Z, Gao J H, Chen W C. Ridgelet domain method of ground-roll suppression [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(4):1210~1215.
- [23] 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[J]. 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[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(4):1155~1163.
- [24] 彭才,朱仕军,孙建库,等. 小波变换域 K-L 变换及其去噪效果分析[J]. 石油物探,2007,46(2):112~114.  
Peng C, Zhu S j, Sun J k, *et al.* K-L transformation in wavelet conversion and the analysis of de-noise effect[J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2007,46(2):112~114.