

基于曲波变换的地震数据去噪方法

彭 才¹, 常 智¹, 朱仕军²

(1. 中国石油川庆钻探公司地球物理勘探公司, 四川成都 610213; 2. 西南石油大学资源与环境学院, 四川成都 610500)

摘要:地震记录中的随机噪声频带较宽, 采用常规的去噪方法效果不理想; 小波变换去噪方法虽然可以压制随机噪声, 但会损伤有效信号, 且去除二维信号中的随机噪声时存在一定的局限性。针对此局限性, Candès 提出了脊波变换, 但对于整幅图而言, 脊波变换的效果并不理想。由此, 发展了曲波变换, 即基于小波变换和脊波变换的多尺度几何分析方法。该方法能够表示具有方向性的线性奇异边缘, 克服了小波变换在表达图像边缘的方向特性等方面的内在缺陷。曲波变换结合了脊波变换的各向异性特点和小波变换的多尺度特点, 可以在压制随机噪声的同时保护有效信号, 达到更好的去噪效果。仿真数据和实际资料去噪结果验证了曲波变换压制随机噪声的可行性及其效果。

关键词:曲波变换; 小波变换; 脊波变换; 随机噪声; 去噪

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

压制噪声的方法有很多, 有根据有效波横向上相关、随机干扰横向上不相关性质去噪的, 如 F-X 滤波法、F-X 域奇异值分解法^[1]、K-L 变换去噪法和多项式拟合法^[2]等, 这些方法对横向上具有一定相关性的随机噪声去噪效果不理想; 有利用地震信号和随机噪声统计上相互独立的特点压制随机噪声的, 如独立成分分析法^[3], 但该方法保真度低, 计算速度慢。

近年来, 小波理论在地震数据处理和图像处理中的应用得到了很大的发展。小波变换具有较强的分频和局部分析能力, 对于一维信号, 能够消除部分随机干扰, 保留有效信号的中、高频成分, 经过小波重构, 可以恢复有效信号^[4~8]。对于二维信号, 常用的二维小波是一维小波的张量积, 用它进行图像分析, 是以“点”为单位来捕捉图像特征的, 因此难以表达图像边缘的方向特性, 这使得传统小波变换在去除二维信号中的随机噪声时表现出一定的局限性。为克服这一局限性, Candès^[9]提出了脊波(Ridgelet)变换, 用脊波变换进行二维图像分析, 可以认为是以直线为单位来解剖图像的。实际上图像中的线条以曲线居多, 对整幅图像进行脊波变换效果并不理想, 因此需要对图像进行分块, 使每个分块中的线条都近似于直线, 然后再对每个分块进行脊波分析。

基于上述思想, 发展了改进型的分块方法——曲波变换, 即首先对图像进行子带分解, 然后将不同尺度的子带图像分成大小不同的子块, 分别对每个子块进行脊波变换。

1 方法原理

1.1 脊波变换的基本原理

脊波变换^[9]通过对图像进行 Radon 变换, 把图像中的一维奇异性信号(例如图像中的直线)转换成 Radon 域的一个点, 然后用一维小波进行点的奇异性检测, 从而有效地解决了小波变换在处理二维图像时存在的缺陷。但实际上图像中的边缘线条以曲线居多, 对整幅图像进行单尺度脊波分析, 效果不佳, 因此需要对图像进行分块, 使每个子块中的线条都近似直线, 再对每个子块进行脊波变换。

脊波变换是曲波变换的核心。定义双变量函数 $f(x, y)$ 的脊波变换为^[9, 10]

$$\varphi_{a,b,\theta}(x,y) = a^{-1/2} \varphi[(x \cos \theta + y \sin \theta - b)/a] \quad (1)$$

式中: φ 是小波函数; a 是脊波变换的尺度因子; b 是脊波变换位置参数, 即偏移截距; θ 是脊波变换的角度。从(1)式可见脊波函数沿脊线

$$x \cos \theta + y \sin \theta = C$$

是不变的(C 为常数), 而在脊线的垂直方向上, 则是小波函数的变化曲线。对于一个可积的单变量函数 $f(x)$, 脊波变换的形式为

收稿日期: 2008-01-30; 改回日期: 2008-03-26。

作者简介: 彭才(1981—), 男, 助理工程师, 硕士, 现主要从事地震数据处理方法研究工作。

$$R_f(a, b, \theta) = \int \varphi_{a, b, \theta}(x) f(x) dx \quad (2)$$

重构公式为

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

通过 Radon 变换,可以把脊波变换与小波变换联系起来。对于一个双变量函数 $f(x, y)$,其 Radon 变换为

$$R_f(\theta, t) = \int f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) dx dy \quad (4)$$

式中: δ 为 Delta-Dirac 函数,而 $f(x, y)$ 的脊波变换系数可以通过对其 Radon 变换系数进行小波变换来计算,即

$$R_f(a, b, \theta) = \int R_f(\theta, t) a^{-1/2} \varphi((t-b)/a) dt \quad (5)$$

(5)式表明,脊波变换是对 Radon 变换切片的一维小波分析,其中方向角 θ 是固定的,而变量 t 是小波分析的对象。

1.2 曲波变换的基本原理

由于多尺度脊波分析冗余度很大,针对此,Donoho 等提出了曲波(Curvelet)变换^[10,11]。首先对图像进行子带分解,然后对不同尺度的子带图像采用大小不同的块,分别对每个块进行脊波分析。若每个块的频带宽度为 w ,长度为 l ,两者之间近似满足关系 $w=l^2$ 。这种频率划分方式使曲波变换具有强烈的各向异性,而这种各向异性随尺度的缩小呈指数增长。曲波变换结合了脊波变换的各向异性特点和小波变换的多尺度特点,因此特别适用于二维信号分析。

曲波变换可以分为以下几个步骤^[12~15]:

1) 子带分解,即

$$f \rightarrow (P_0 f, \Delta_1 f, \Delta_2 f, \dots, \Delta_s f, \dots) \quad (6)$$

$s \in (1, 2, \dots)$

式中: $P_0 f$ 为低频分量; $\Delta_s f$ 为不同频率的高频分量; S 为多尺度分解的尺度。

2) 平滑分割,即

$$\Delta_s f \rightarrow (w_Q \Delta_s f) \quad Q \in Q_s \quad (7)$$

其中 w_Q 表示在二进制方块

$Q = [k_1/2^s, (k_1+1)/2^s] \times [k_2/2^s, (k_2+1)/2^s]$ 上的平滑窗函数集。 Q_s 表示全体尺度为 S 的二进

制方块集合, k_1, k_2 为任意整数。这一步是将每个子带分解出来的数据在处理前分块进行窗函数平滑。

3) 正规化,即

$$g_Q = 2^{-s} (T_Q)^{-1} (w_Q \Delta_s f) \quad Q \in Q_s \quad (8)$$

其中,

$$(T_Q f)(x_1, x_2) = f(2^s x_1 - k_1, 2^s x_2 - k_2) \quad (9)$$

此过程的输入数据为分布在 Q 附近的平滑分块数据,其输出结果为分布在空间 $[0, 1]^2$ 的数据块。简单地说,此运算是将每个小块还原为单位尺度。

4) 数字脊波分析,将分割成的子块进行脊波变换。

1.3 基于曲波变换的噪声压制

对地震信号 s ,设有效信号为 d ,随机噪声为 n ,则该数据可以表示为

$$s = d + n \quad (10)$$

有效信号可用下述方法估算,即

$$d = C^{-1}(F(C_s)) \quad (11)$$

式中: C 为曲波变换; C^{-1} 为曲波逆变换; F 为阈值函数,做如下定义

$$F(C_s) = \begin{cases} A_c & |A_c| \geq m \sigma_c \sigma \\ 0 & |A_c| < m \sigma_c \sigma \end{cases} \quad (12)$$

式中: A_c 为地震信号的曲波系数; m 为常数,其大小与尺度有关; σ_c 为曲波域中噪声标准差; σ 为噪声标准差。

2 仿真计算

为验证曲波变换去噪方法的可行性,进行了仿真模型去噪试验。首先合成一个理论地震记录,并在记录中加入随机噪声,然后分别用小波变换和曲波变换进行去噪处理。

图 1 为仿真模型去噪实例。图 1a 为合成地震记录;图 1b 是加入较强高频随机噪声后的地震记录;图 1c 为利用小波变换去噪的结果,大部分随机噪声得到了压制,但压制效果不是很理想;图 1d 为利用曲波变换去噪的结果,随机噪声压制的比较彻底,且波形基本与理论模型一致。

为了分析各方法的去噪能力和保真性,对小波变换和曲波变换去噪前后的差值剖面进行了比较(图 2)。从图 2 中可以看出,在小波变换去除的噪声剖面中可见到有效波同相轴的影子,说明小波变换

对有效信号有一定的畸变作用;从曲波变换去除的噪声剖面可以看出,曲波变换去噪方法对有效波同

相轴的影响较小,地震数据的完整性得到了有效保护。

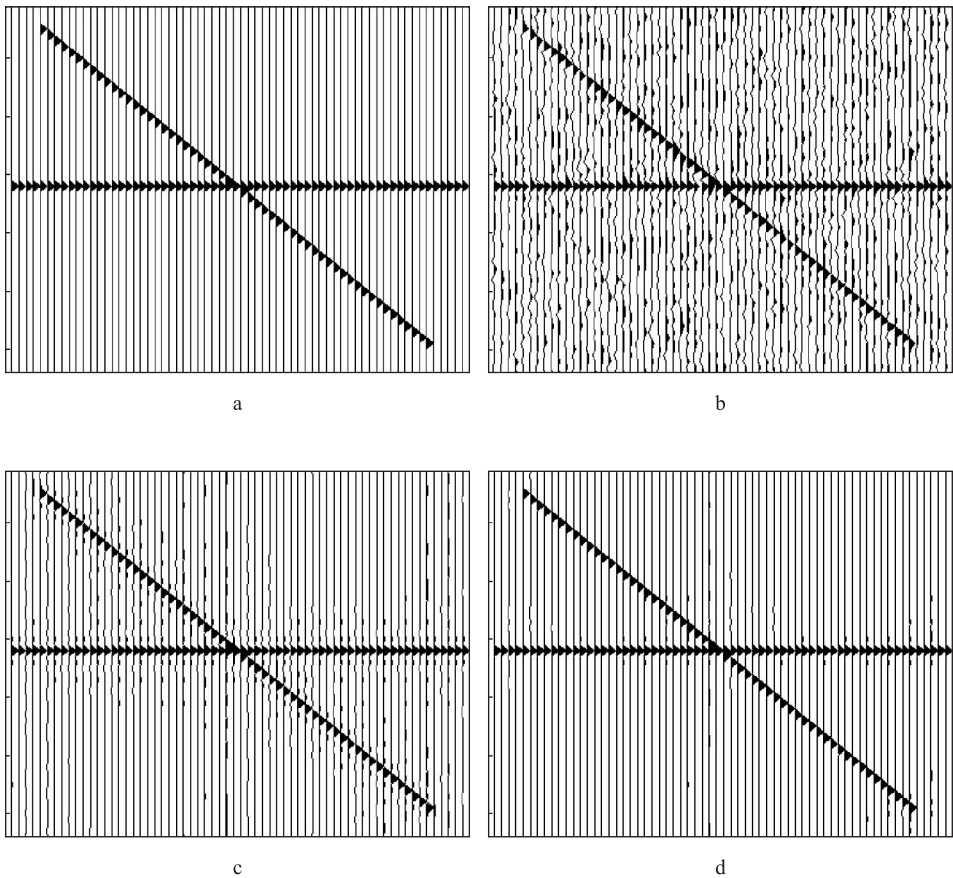


图 1 仿真模型去噪实例
a 合成理论模型; b 加入随机噪声的合成地震记录; c 小波去噪效果; d 曲波去噪效果

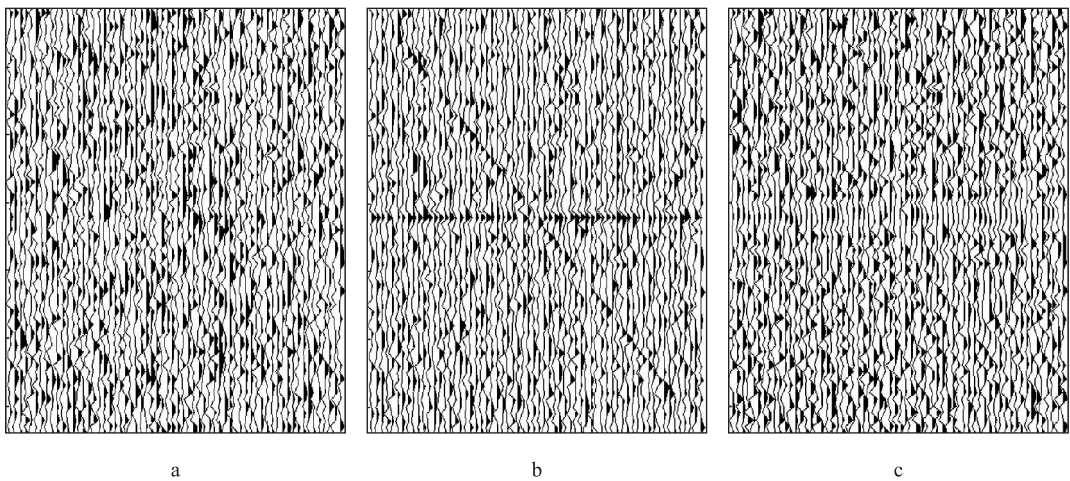


图 2 小波变换和曲波变换去除噪声效果对比
a 原始噪声; b 小波变换差值剖面; c 曲波变换差值剖面

3 实例分析

为验证曲波变换去噪方法在实际资料处理中

的去噪效果,将该方法应用于某二维地震测线。图 3a为原始地震记录,记录中含有较强的随机噪声;图 3b 为小波变换去噪结果;图 3c 为曲波变换去噪结果,原始地震记录中的随机噪声得到了有效

压制。分析对比图 1、图 2 和图 3 可以看出,小波变换去噪对有效同相轴有一定的损伤,同相轴的视

分辨率有一定的降低;曲波变换去噪同相轴得到有效保护,波形特征清楚。

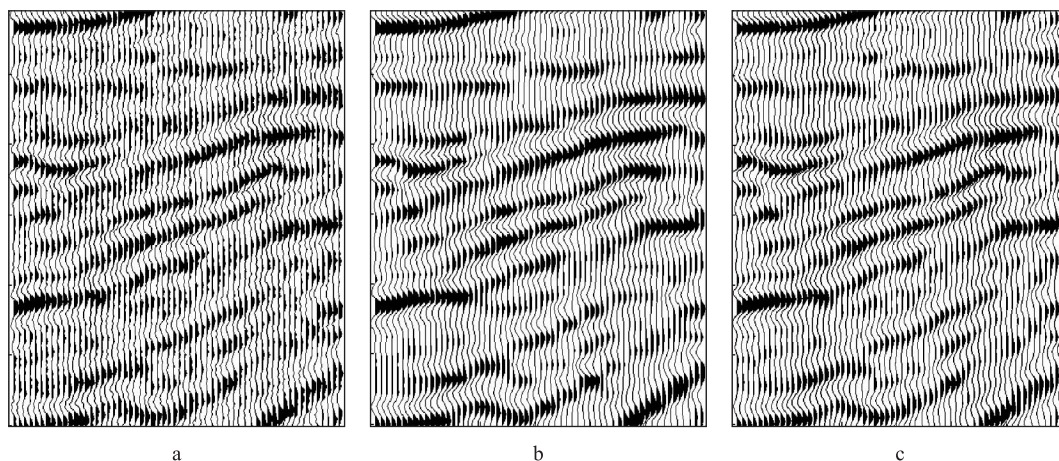


图 3 实际资料的小波变换和曲波变换去噪效果对比

a 含噪记录; b 小波变换去噪; c 曲波变换去噪

4 结束语

曲波变换首先对二维信号进行多尺度子带分解并对子带图像分块,然后对各块做脊波变换,因此结合了脊波变换的各向异性特点和小波变换的多尺度特点,具有很强的各向异性和局部分析能力。通过对曲波变换系数做阈值处理,能够有效地区分图像的边缘和噪声,适合多尺度去噪。

曲波变换是一种有效的信号分析处理技术,下一步的研究方向是利用曲波变换去除相关噪声。

参考文献

- 1 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[J]. 石油物探,1998,37(3):29~33
- 2 夏洪瑞,陈德刚,周开明. 地震资料处理中随机干扰消除方法分析[J]. 石油物探,2003,42(1):93~96
- 3 彭才,朱仕军,孙建库,等. 基于独立成分分析的地震数据去噪[J]. 勘探地球物理进展,2007,30(1):30~32
- 4 王振国,汪恩华. 小波包相关阈值去噪[J]. 石油物探,2002,41(4):400~405
- 5 陈香朋,曹思远. 第二代小波变换及其在地震信号去噪中的应用[J]. 石油物探,2004,43(6):547~550
- 6 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

- 7 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[J]. 石油物探,2005,44(1):4~6
- 8 王立华,曹辉,唐金良,等. 小波包分析法压制井间地震资料噪声[J]. 勘探地球物理进展,2005,28(1):32~35
- 9 Candès E J. Ridgelets: Theory and applications[D]. California, USA: Stanford University, 1998
- 10 Donoho D L. Ridgelet function and orthonormal ridgelets[J]. Journal of Approximation Theory, 2001, 111(2):143~179
- 11 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
- 12 Candès E J, Donoho D L. Fast discrete curvelet transforms[J]. Multiscale Modeling and Simulation, 2006, 5(3):861~899
- 13 焦李成,谭山,刘芳. 脊波理论:从脊波变换到 Curvelet 变换[J]. 工程数学学报,2005,22(5):761~762
- 14 隆刚,肖磊,陈学. Curvelet 变换在图像处理中的应用综述[J]. 计算机研究与发展,2005,42(8):1 331~1 336
- 15 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

(编辑:陈杰)