

一种基于 Curvelet 变换的地震数据去噪方法和应用

郑晓雯^{1,2}

(1.上海市建筑科学研究院有限公司,上海市 200032; 2.上海市工程结构安全重点实验室,上海市 200032)

摘要: 如何去除噪声且不损失有效信号是地震数据处理中的一个重难点。实验将一种 Curvelet 自适应阈值去噪法应用到地震数据处理中, Curvelet 变换系数由自适应阈值约束,经阈值函数映射得到估计系数,最后对所得的估计系数进行逆变换,实现地震数据去噪,有效提高地震数据信噪比。模型和实际数据处理结果表明, Curvelet 自适应阈值去噪法较好地压制了噪声的同时保护有效信号,克服了 $F-X$ 域滤波产生新噪声的缺陷,取得了较好去噪效果。

关键词: Curvelet 变换; $F-X$ 域滤波; 阈值; 去噪; 信噪比

中图分类号: U418

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)03-0251-04

0 引言

随着经济的发展,国家新基建蓬勃发展,能源需求量不断增加,对勘探行业从业人员提出了更高的要求。地震勘探^[1]作为当前最有效的勘探方法,受到越来越大的重视。通过地震勘探方法采集到的野外数据,需要经过各种处理才能从中提取精确可靠的信息,其中数据处理中的去噪是一个重点。

Curvelet^[2]变换起源于1999年E. J. Candes^[3]等科学家提出的概念,提出至今仅二十余年,其理论研究取得了良好进展,在应用算法中取得了一系列应用成果。目前, Curvelet 变换广泛应用于医学、人脸识别系统、指纹识别系统^[4]等领域,在国内,将 Curvelet 变换用于地震数据处理仍处于早期阶段。Curvelet 变换经历了传统的数字变换算法、第二代变换算法和基于第二代变换理论快速离散实现方法等,随着算法的改进, Curvelet 变换更简单、快速,且大大减少了数据的冗余^[5]。Curvelet 变换去噪法作为一门新兴的方法其还有很长的发展道路以及无限的潜力。

本文基于 Curvelet 自适应阈值^[6]实现地震资料去噪,与 $F-X$ 滤波^[7]对比,通过两种方法的对比,观察分析两种方法的去噪效果,对比各自的优缺点。

1 基于 Curvelet 自适应阈值实现地震资料去噪

1.1 基本思路

信号在 Curvelet 域的系数大多数都是为零的,所以即使不满足香农采样定理(奈奎斯特采样定理)也能恢复完整的信号。一般大的 Curvelet 系数包含的有用信息多将对它进行保留,较小的 Curvelet 系数包含的有用信息少可将它进行去除。考虑用信号去噪的阈值萎缩法来实现地震资料去噪,其基本做法为:设置一种尺度自适应性阈值,取高于阈值的 Curvelet 变换系数,经阈值函数映射得到估计系数,最后对所得的估计系数进行逆变换,实现地震数据去噪,使地震数据信噪比提升。其中确定阈值函数与选取适当的阈值是两个重要的问题。

1.2 离散 Curvelet 变换

离散 Curvelet 变换^[8]以笛卡尔坐标(Cartesian coordinates)下 $f[t_1, t_2]$ ($0 \leq t_1, t_2 < n$) 为输入,其离散形式为:

$$c^D(j, l, k) = \sum_{0 \leq t_1, t_2 < n} f[t_1, t_2] \overline{\varphi_{f,l,k}^D[t_1, t_2]} \quad (1)$$

采用一带通函数:

$$\psi(\omega_1) = \sqrt{\phi(\omega_1/2)^2 - \phi(\omega_1)^2} \quad (2)$$

其中 $\psi_j(\omega_1) = \psi(2^{-j}\omega_1)$;

剪切矩阵:

$$S_{\theta_l} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\tan \theta_l & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

并非等间距的但斜率是等间距的。离散 Curvelet 变换的尺度角度分割^[9]示意图 1。

收稿日期: 2023-04-27

基金项目: 2020 年上海市科委优秀技术带头人计划项目(20XD1432400); 上海建科集团科研创新项目(KY10000038.20210052)

作者简介: 郑晓雯(1989—), 女, 本科, 工程师, 从事工程物探工作。

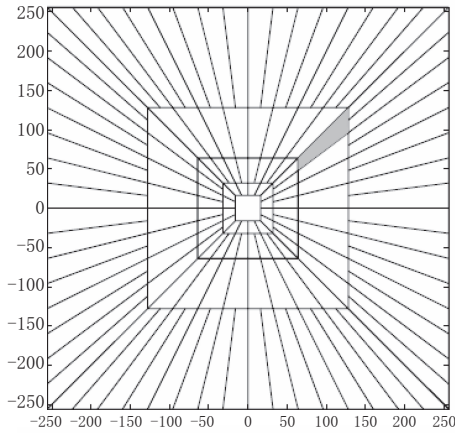


图1 离散 Curvelet 变换的尺度角度分割示意图

定义:

$$\hat{U}_j(\omega) = \psi_j(\omega_1) V_j(\omega_1) \quad (4)$$

针对每一个 $\theta_l \in [-\pi/4, \pi/4]$ 有:

$$\hat{U}_{j,l}(\omega) = \psi_j(\omega_1) V_j(S_{\theta_l} \omega) = \hat{U}_j(S_{\theta_l} \omega) \quad (5)$$

1.3 基于 USFFT 的快速离散 Curvelet 变换

基本步骤如下:

(1)对给定笛卡尔坐标下的一个函数进行二维傅里叶变换,得到二维频率域^[10]表示,

$$\hat{f}[n_1, n_2], -n/2 \leq n_1, n_2 \leq n/2 \quad (6)$$

(2)在频域中,对每一对 $(j, 1)$,重采样,得采样值:

$$\hat{f}[n_1, n_2 - n_1 \tan \theta_l], (n_1, n_2) \in P_j \quad (7)$$

其中 $L_{1,j}, L_{2,j}$ 分别表示窗函数的支撑区间的长宽分量,

将内插后 $\bar{f}$ 的 $\hat{U}_j$ 与窗函数相乘得:

$$\hat{f}[n_1, n_2] = \hat{f}[n_1, n_2 - n_1 \tan \theta_l] \hat{U}_j[n_1, n_2] \quad (8)$$

(3)对 $\hat{f}_{j,l}$ 进行二维傅里叶逆变换,得曲波系数集 $c^D(j, l, k)$ 。

1.4 基于 Wrapping 的快速离散 Curvelet 变换法

基本步骤如下:

(1)对给定笛卡尔坐标下的一个函数进行二维傅里叶变换,得到二维频率域表示,

$$\hat{f}[n_1, n_2], -n/2 \leq n_1, n_2 \leq n/2 \quad (9)$$

(2)在频域中,对每一对 $(j, 1)$,重采样,得采样值:

$$\hat{f}[n_1, n_2 - n_1 \tan \theta_l], (n_1, n_2) \in P_j \quad (10)$$

(3)将内插后的 $\bar{f}$ 与 $\hat{U}_j$ 窗函数相乘得:

$$\hat{f}[n_1, n_2] = \hat{f}[n_1, n_2 - n_1 \tan \theta_l] \hat{U}_j[n_1, n_2] \quad (11)$$

(4)围绕原点 wrapping 局部化 $\hat{f}[n_1, n_2]$;

(5)对 $\hat{f}_{j,l}$ 进行二维傅里叶逆变换,得曲波系数集 $c^D(j, l, k)$ 。

1.5 基于 Curvelet 自适应阈值地震资料去噪原理

本文使用软阈值函数使 Curvelet 系数向零方向萎缩。

令阈值 $T > 0$,采用软阈值函数:

$$\eta_T(x) = (x - \text{sgn}(x) \cdot T) I(|x| > T) \quad (12)$$

则信号的曲波系数估值为:

$$\hat{C}_f = \begin{cases} C_g - \text{sgn}(C_g) \cdot T, & |C_g| > T \\ 0, & |C_g| \leq T \end{cases} \quad (13)$$

其中 $I(\cdot)$ 为示性函数; C_g 为 g 的曲波系数; $\hat{C}_f$ 为 f 的曲波系数 C_f 的估值。

目前,阈值的确定方法有多种,本文在已有的先验条件下,通过数值计算可得近似最优阈值为:

$$T(\sigma_x) = \frac{\sigma^2}{\sigma_x} \quad (14)$$

阈值与噪声方差 σ^2 和原信号的曲波系数广义高斯分布的标准方差 σ_x 有关。当 $\sigma/\sigma_x \leq 1$ 时,信噪比很大,故选择较小的阈值,以保持原信号的细节并且消除噪声;反之当 $\sigma/\sigma_x \geq 1$ 时,信噪比很低,故选择较大的阈值,以去除掩盖信号的噪声为主。本文使用的实测剖面图信噪比较高,故选择较小的阈值。由于 σ_x 是与尺度有关的,并在曲波变换域各子带中被估计,所以阈值具有尺度(子带)自适应性。一般而言,仅对曲波变换域的高频子带进行阈值萎缩处理,保持低频子带。

从观测模型中,有:

$$C_g = C_f + C_n \quad (15)$$

即:

$$y = x + v \quad (16)$$

因为 f 与 n 相互独立,所以 C_f 与 C_n 也相互独立。因此有:

$$\sigma_y^2 = \sigma_x^2 + \sigma^2 \quad (17)$$

σ_y^2 的估值 $\hat{\sigma}_y^2$ 可在观测信号 g 曲波变换各相应子带中直接进行估计。 σ^2 的估值可由一个稳健中值估计器估算,公式如下式所示:

$$\hat{\sigma} = \frac{\text{median}(|C_g|)}{0.6745} \quad (18)$$

则 σ_x^2 估值为:

$$\hat{\sigma}_x^2 = \max(\hat{\sigma}_y^2 - \hat{\sigma}^2, 0) \quad (19)$$

当 $\hat{\sigma}^2 \geq \hat{\sigma}_y^2$ 时 $\hat{\sigma}_x^2 = 0$ 即 $T(\sigma_x) = \infty$,但在实际计算

时,取 $T(\sigma_x)=\max(|y|)$, y 为相应子带曲波系数,这时该子带所有系数置零。

2 浅层反射单炮记录模型

首先用 Tesseral 正演软件建立最简单的地质模型见图 2。

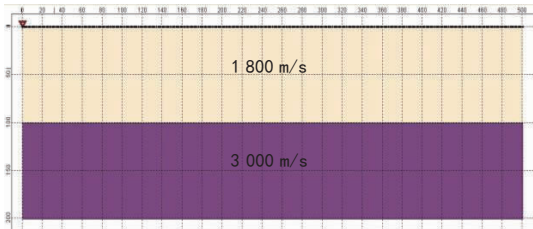


图 2 一个水平界面模型

它的浅层反射单炮记录,单边放炮见图 3(加入 30%Randn 噪声)。

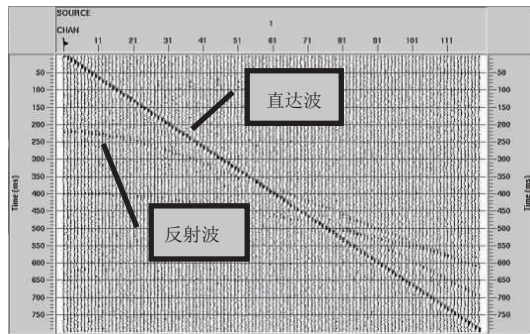


图 3 浅层反射单炮记录

经 $F-X$ 滤波后见图 4。

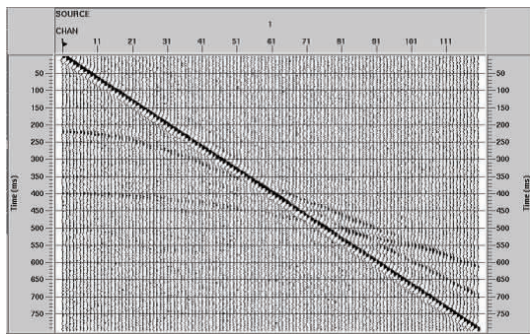


图 4 $F-X$ 滤波后

经 Curvelet 变换去噪后见图 5。

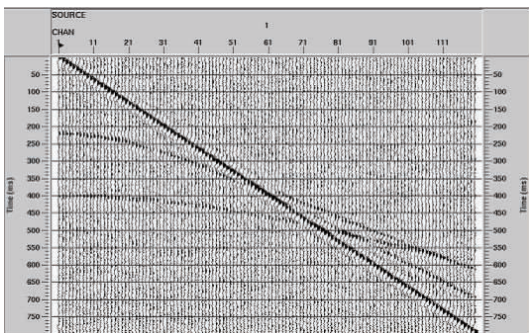


图 5 Curvelet 变换去噪后

截取它们同一区域放大进行对比,对比见图 6。通过对比去噪前后图以及局部对比图,大体可

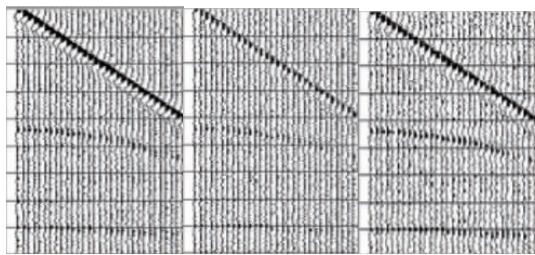


图 6 局部对比图

以看出以下几点:

- (1)经 $F-X$ 滤波与 Curvelet 变换去噪后,对随机噪声的削减作用都比较明显。
- (2)经 Curvelet 变换去噪后的图像质量比 $F-X$ 滤波后的高,分辨率强,信噪比高。
- (3)对有效信号,反射波与折射波, $F-X$ 滤波后不如未处理时强,有减弱,而滤波的重点就是增强有效新号,削弱无效信号。

为了更进一步看出两种去噪法的差别,现计算它们分别所去信号,结果见图 7、图 8。

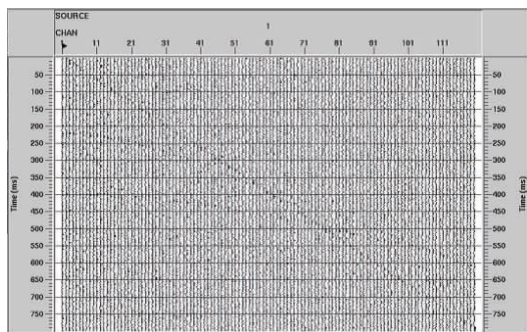


图 7 $F-X$ 滤波所去信号

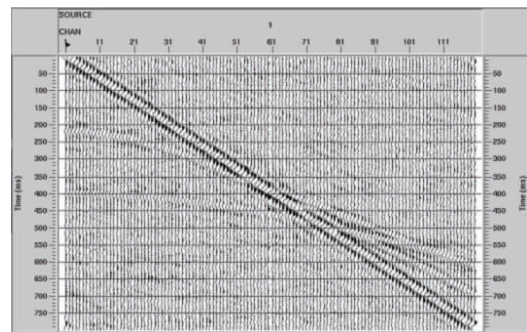


图 8 Curvelet 变换所去信号

3 工程实例

用 $F-X$ 滤波和 Curvelet 变换去噪法分别应用与某地区地层叠后剖面,得到效果图如下。图 9 为原始剖面,图 10 为 $F-X$ 滤波后的剖面,图 11 为 Curvelet 变换去噪后的剖面。

对比去噪前后剖面图大体可以看出:

- (1)Curvelet 变换去噪与 $F-X$ 滤波相比去噪后的图像中的细节信号的损失较小,地震资料中的同相轴更清晰,分辨率高。

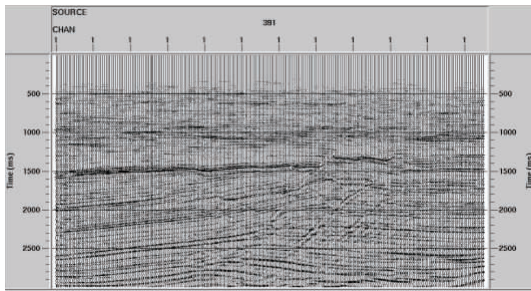


图9 某地区实测剖面

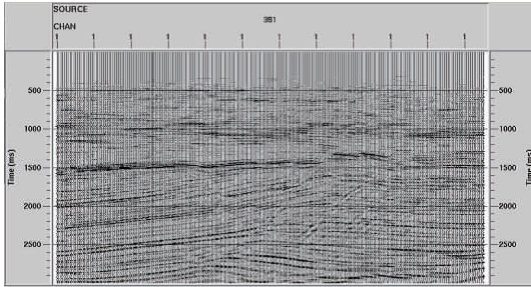


图10 $F-X$ 滤波后剖面

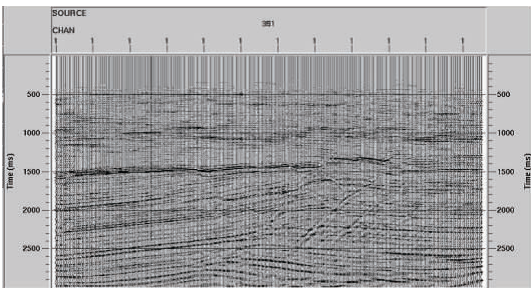


图11 Curvelet 变换去噪后剖面

(2)与 $F-X$ 滤波相比,虽然 $F-X$ 域滤波的去噪较 Curvelet 变换去噪明显,但 $F-X$ 滤波产生了新噪声,且 $F-X$ 滤波后同相轴并不清晰且还改变同相轴。

(3)Curvelet 变换去噪后地震资料的分辨率高于 $F-X$ 滤波,信噪比高。

为了更进一步看出两种去噪法的差别,现利用 Matlab 计算它们分别所去信号,结果见图 12、图 13。

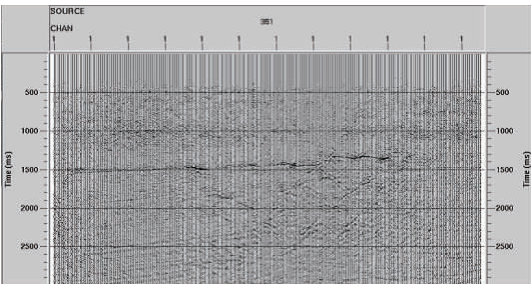


图12 $F-X$ 滤波所去信号

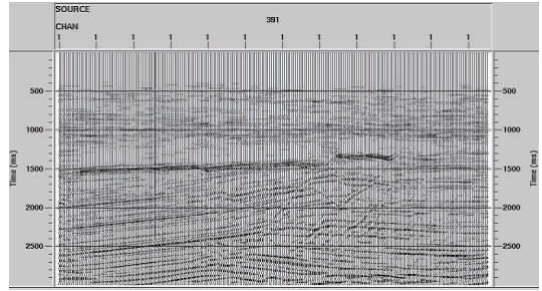


图13 Curvelet 变换所去信号

果。

(2)基于 Curvelet 变换的自适应阈值法处理地震资料很方便且冗余较小,处理速度快。

(3)与 $F-X$ 滤波相比,Curvelet 变换通过两个均值两个方差计算阈值使其更好的保留了高频细节,即图像中的边缘(线奇异),同相轴更加清晰,在视觉效果上也更好。

(4)Curvelet 变换对曲线更敏感些,处理效果也较 $F-X$ 滤波优。

(5)与 $F-X$ 滤波相比,基于 Curvelet 变换去噪在信噪比上有明显的提高,反应了该方法在地震信号去噪的优越性。

虽然经过二十余年的发展,Curvelet 变换理论研究和应用算法取得了良好进展,但是还有许多可以进一步完善的地方,若能充分结合它与其它去噪方法的优点于一体,将可能取得更好的去噪效果。

参考文献:

- [1] 陆基孟.地震勘探原理(上)[M].东营:中国石油大学出版社,2006.
- [2] E. J. Candes, D. L. Donoho. Curvelet A surprisingly effective non-adaptive representation for objects with edges[M]. In: Curves and Surfaces. Nashville, Tn: Vanderbilt Univ. Press, 2000.
- [3] E. J. Candes, F. GUO. New multiscale transforms, minimum total variation synthesis: Applications to edge-preserving image reconstruction [J]. Signal Processing, 2002, 82(11): 1519-1543.
- [4] 隆刚, 肖磊, 陈学佳. 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): 1331-1337.
- [5] E J Candes, L Demanet, D L Donoho. Fast Discrete Curvelet Transform[R]. Applied and Computational Mathematics, California Institute of Technology, 2005.
- [6] 何劲, 李宏伟, 张群. 一种自适应阈值曲波图像去噪算法[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(3): 336-340.
- [7] 李庆忠. 走向精确勘探的道路[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [8] 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.
- [9] 李顺, 木特力铺·马木提, 吾尔尼沙·买买提, 等. 基于离散曲波变换的多文种文档图像文种识别 [J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(5): 1376-1382.
- [10] 万仁远. 基于多尺度变换的多聚焦图像融合方法研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2012.
- [11] 冯鹏, 米德伶, 潘英俊, 等. 改进的 Curvelet 变换图像降噪方法[J]. 光电工程, 2005(9): 67-70, 78.

4 结论

本文考虑到 Curvelet 变换系数之间相关性, 自适应的对 Curvelet 系数进行萎缩处理^[11]。模型和实际数据处理结果表明:

(1)Curvelet 变换对地震资料去噪具有较好的效