

改进的第 2 代小波变换在地震资料去噪中的应用

闫 兴, 杜启振, 朱卫星

(中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东东营 257061)

摘要: 在地震勘探中, 小波理论是去除地震资料中的噪声以提高信噪比的有效工具。将最优估计理论与第 2 代小波变换相结合, 获得了反映数据特征的小波变换, 改善了资料处理的效果。

关键词: 第 2 代小波变换; 最优估计; 去噪

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

在地震勘探中, 小波理论是去除地震信号中随机噪声, 进而提高地震资料信噪比的有效工具^[1~3]。Swelden 于 1994 年提出了一种不依赖 Fourier 变换的小波构造方法——提升方法 (lifting scheme)^[4], 该方法既可保持原小波的特性, 又能克服平移不变性带来的局限。为了使这种基于提升理论的第 2 代小波变换更能反映所处理数据资料的特点, 我们将最优估计理论与之结合, 并应用于地震资料的处理中。

1 第 2 代小波变换的基本原理

第 2 代小波变换由分裂 (split)、预测 (predict) 和更新 (update) 3 个步骤组成^[5]。

1.1 分裂

分裂过程是将原始数据 $s^{(j)} = \{s_k^{(j)}, k \in \mathbf{Z}\}$ 分裂成 2 个子集合。

偶数样本: $s^{(j-1)} = \{s_k^{(j-1)}, k \in \mathbf{Z}\}$

奇数样本: $d^{(j-1)} = \{d_k^{(j-1)}, k \in \mathbf{Z}\}$

即

$$s_k^{(j-1)} = s_{2k}^{(j)}$$

$$d_k^{(j-1)} = s_{2k+1}^{(j)} \quad (1)$$

$$S(s^{(j)}) := (s^{(j-1)}, d^{(j-1)}) \quad (2)$$

式中: $j \in \mathbf{Z}_+$; $d^{(j-1)}$ 称为小波子集; S 表示分裂。

1.2 预测

保持偶数样本 $s^{(j-1)}$ 不变, 考虑到原始数据的相关性, 可以利用偶数样本 $s^{(j-1)}$ 来预测奇数样本 $d^{(j-1)}$, 并用奇数样本与预测值之差 (称为细节系数) 替代奇数样本 $d^{(j-1)}$, 即

$$d^{(j-1)} := d^{(j-1)} - P(s^{(j-1)}) \quad (3)$$

式中: P 为预测算子, 一般通过插值细分方法构造,

常用的方法有线性插值与立方插值 2 种。在线性插值中, 一个点的插值位于它左右两点的连线上; 在立方插值中, 采用周围 4 个点拟合成一个多项式。细节系数又称为小波系数, 小波系数越小, 预测越精确。

1.3 更新

更新的出发点就是找到一个更好的子数据集 $s^{(j-1)}$, 使之保持原始数据集 $s^{(j)}$ 的一些特性 Q , 如能量、均值和消失矩等, 即

$$Q(s^{(j-1)}) = Q(s^{(j)}) \quad (4)$$

在更新过程中, 构造一个算子 U , 作用于细节系数 $d^{(j-1)}$ 并叠加到偶数样本 $s^{(j-1)}$ 上, 得到近似信号

$$s^{(j-1)} := s^{(j-1)} + U(d^{(j-1)}) \quad (5)$$

综合上述的讨论, 第 2 代小波变换的分解算法由如下 3 个步骤:

$$1) S(s^{(j)}) := (s^{(j-1)}, d^{(j-1)});$$

$$2) d^{(j-1)} := d^{(j-1)} - P(s^{(j-1)});$$

$$3) s^{(j-1)} := s^{(j-1)} + U(d^{(j-1)}).$$

重构算法由如下 3 个步骤组成:

$$1) s^{(j-1)} := s^{(j-1)} - U(d^{(j-1)});$$

$$2) d^{(j-1)} := d^{(j-1)} + P(s^{(j-1)});$$

$$3) s^{(j)} := M(s^{(j-1)}, d^{(j-1)}).$$

上述步骤 (3) 中, $M(s^{(j-1)}, d^{(j-1)})$ 表示把偶数样本 $s^{(j-1)}$ 和奇数样本 $d^{(j-1)}$ 合并成原始数据 $s^{(j)}$ 。

收稿日期: 2007-03-15; 改回日期: 2007-05-15。

第一作者简介: 闫兴 (1980—), 男, 中国石油大学 (华东) 地球资源与信息学院地球探测与信息技术专业在读研究生, 主要从事地震资料各向异性参数反演方面的研究工作。

2 插值细分法

第 2 代小波变换过程中,预测算子 P 和更新算子 U 的选择是非常重要的,在设计预测算子和更新算子的诸多方法中,插值细分法是目前广泛采用的一种方法。它将等间隔采样数据序列

$$X = \{x[i], i = 0, 1, \dots, N-1\}$$

分成偶序列 X_e 和奇序列 X_o 。

$$X_e = \{x_e[n], n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1\}$$

$$X_o = \{x_o[n], n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1\}$$

之和。式中: N 是正偶数,表示数据长度。

使用相邻的 m ($m = 2D$, D 为正整数) 个偶样本 $x_e(n-D+1), \dots, x_e(n), \dots, x_e(n+D)$, 插值估计 n 时刻的 $x_o(n)$ 。对于数值序列左右两端的边界,为简单起见,采用补 0 的方法加以处理,则插值误差为

$$\begin{aligned} d[n] = & x_o[n] - \{p_1 x_e[n-D+1] + \\ & p_2 x_e[n-D+2] + \dots + \\ & p_m x_e[n+D]\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ 为预测系数。

对于标准插值细分小波变换的等间隔采样情况, p_1, p_2, \dots, p_m 服从唯一的 $m-1$ 阶插值多项式^[6]。对一个 δ 序列进行 $m-1$ 阶插值,可确定 P 。

3 最优插值估计

在上述情况下, P 的选择与被分析数据序列无关,为了使 P 的选择反映信号特征,将最优估计引入 P 的设计中,以获得最优的预测系数。

设 n 时刻预测误差为 $e[n] = d[n]$, 则

$$E = \{e[n], n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1\} \quad (7)$$

建立目标函数 $J = E^T E$, 由 $\frac{\partial J}{\partial P} = 0$ 求出 P 的一组解,满足一定的消失矩条件^[7]可确定最优的 P 。 P 确定后,采用文献^[8]的方法可确定更新系数 $U = (u_1, u_2, \dots, u_j)$, 其中 j 为更新过程中采用相邻细节信号的个数。

4 地震信号去噪实例

去噪方法有很多^[9,10],小波去噪也可以有多种

实现方法,本文采用第 2 代 Deslauriers-Dubuc(4, 2)小波和改进后的小波进行去噪对比。小波去噪采用软阈值法,方程为

$$\begin{aligned} d_\tau = & \text{sign}(d[n]) (|d[n] - \tau|) \\ = & \left\{ \begin{array}{ll} 0, & |x| \leq \tau \\ d[n] - \tau, & x > \tau \\ d[n] + \tau, & x < -\tau \end{array} \right\} \\ \tau = & \delta \sqrt{2 \ln N} \\ \delta = & 1/0.6745 \text{ Med}(|d|) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: τ 是计算阈值; δ 是噪声的标准偏差估计; N 表示细节信号的采样数; $\text{Med}()$ 指的是中值函数。

图 1 是胜利油田纯梁地区 1146 测线的地震剖面。图 2 是图 1 经过 Deslauriers-Dubuc(4, 2)小波去噪处理后的结果。图 3 是图 1 经过改进后的第 2 代小波去噪处理后的结果。可以看出,经过第 2 代小波变换去噪处理后,地震剖面的面貌大为改观,不但同相轴清晰可见,而且连续性也大大改善了。

图 4 是胜利油田河口采油区 2586 测线的原始地震剖面,图 5、图 6 分别是经过 Deslauriers-Dubuc(4, 2)小波去噪处理和改进后的第 2 代小波变换去噪处理的结果。由于原始剖面信噪比不是太低,第 2 代小波变换去噪处理取得了明显的效果,但经过改进后的第 2 代小波变换去噪处理后的剖面更加清晰,同相轴的连续性也更好。这也说明了最优插值估计给出的预测系数更合理。

在实际地震资料处理中,去噪效果的好坏与原始地震资料的采样率有很大的关系。因为改进后小波变换的 P 和 U 的选择都是以地震资料的相关性为基础,但是由于原始资料采集时需要综合考虑多种因素,不可能仅考虑去噪的要求^[11],所以在选择预测算子和更新算子的时候要考虑实际资料的原始状况,当数据的采样点确定以后, P 和 U 的值也就固定下来了。另外,小波变换过程中采用不同的插值方法也会有不同的效果,例如上述的图 3 和图 6,虽然都采用改进后的第 2 代小波,但是效果明显不同,这除了实际资料的分辨率影响外,在插值过程中,图 3 采用了隔点插值,而图 6 则使用了全部采样数据,尽可能多地保留了原始信息,因此,图 3 的去噪效果不如图 6 清晰。这一点实际上也与数据的相关性有关,在实际处理中可以通过试验来确定适当的插值方法。

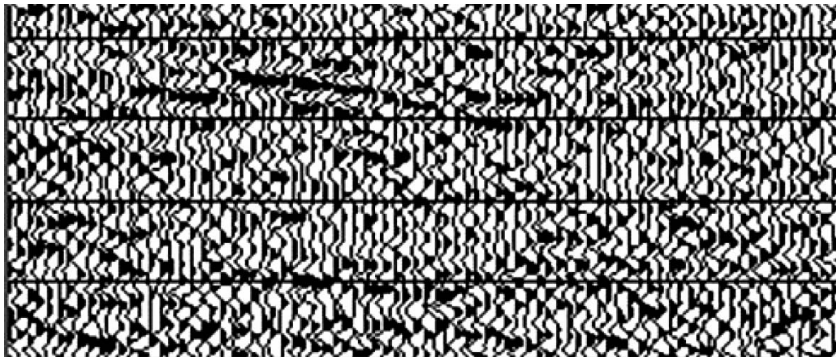


图 1 1146 测线的原始地震剖面

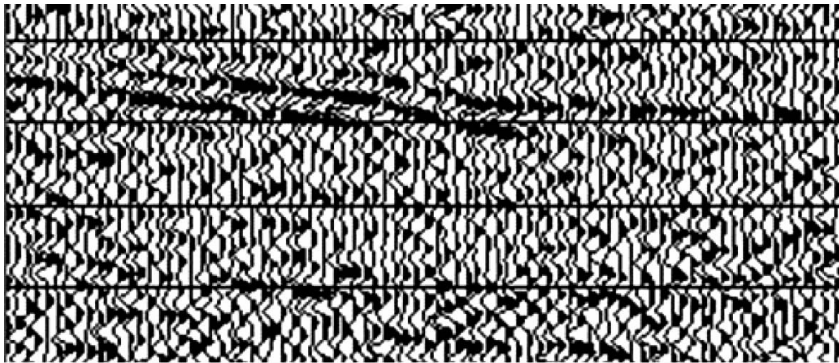


图 2 对图 1 所示剖面经过 Deslauriers-Dubuc(4,2)小波处理后的效果

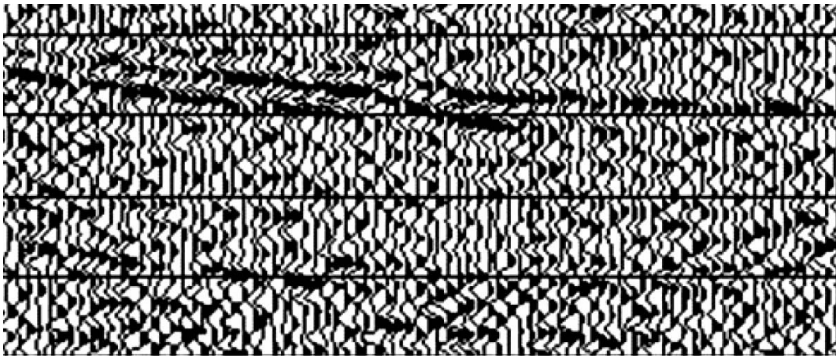


图 3 对图 1 所示剖面经过改进后小波处理后的结果

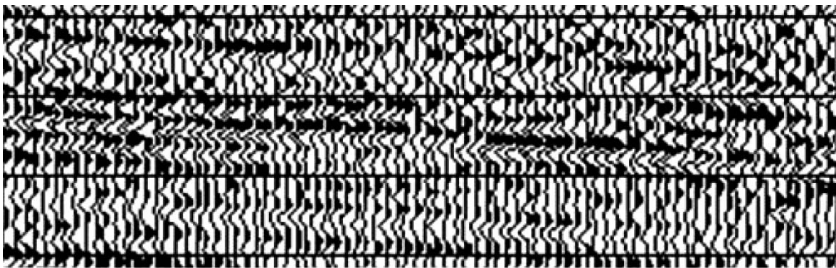


图 4 2586 测线的原始地震剖面

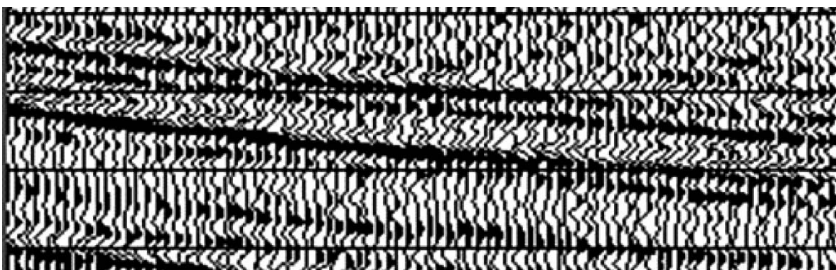


图 5 对图 4 所示剖面经 Deslauriers-Dubuc(4,2)小波处理后的效果

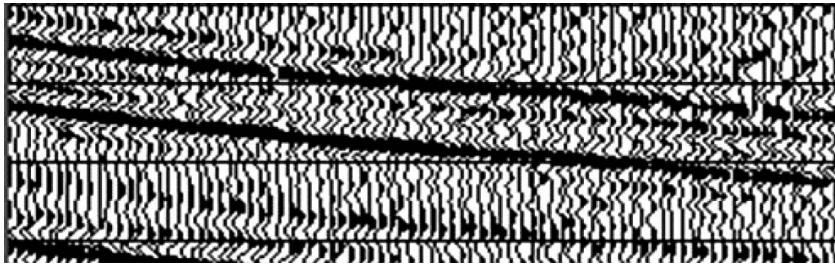


图 6 对图 4 所示剖面经改进后小波处理后的结果

5 结束语

本文讨论了第 2 代小波变换的基本原理及其改进。并通过实际地震资料的试处理,对此分析了第 2 代小波变换和改变后第 2 代小波变换的去噪效果,证明了改进后的第 2 代小波变换可以更好地适应地震资料去噪的要求。

参 考 文 献

- 1 张军华,陆基孟. 小波变换方法在地震资料去噪和提高分辨率中的应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1997, 21(1): 18~21, 24
- 2 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, 41(1): 4~6
- 3 钟凌云,刘天佑. 小波线性软阈值法在航磁资料去噪中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 27(4): 280~284
- 4 Sweldens V. The lifting scheme: A construction of

- second generation wavelet [J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1997(29): 511~546
- 5 陈香朋,曹思远. 第 2 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 Daubechies I, Sweldens W. Factoring wavelet transforms into lifting steps[J]. J Fourier Anal Appl, 1998, 4(3): 245~267
- 7 Fernandez G, Periaswamy S, Sweldens W. Liftpack: A software package for wavelet transforms using lifting [A]. Proc. SPIE 2825, Wavelet Applications in Signal and Image Processing, 1996, 4: 396~408
- 8 Stepin J, Zielinski T, Rumian R. Image denoising using scale adaptive lifting schemes [A]. Conference on Image Processing, Vancouver, 2000
- 9 王润秋,胡天跃. 用聚束滤波方法消除地震资料中规则噪音[J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(4): 268~272
- 10 赵红怡. 基于小波变换阈值的信号去噪[J]. 现代雷达, 2001, 23(2): 37~39
- 11 云美厚. 地震分辨率[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(1): 12~18

(上接第 454 页)

- gathers by transformation into Snell trace coordinates [R]. Stanford; Stanford Exploration Project Report, SEP-26, 1979
- 3 Henley D C. Coherent noise attenuation in the radial trace domain[J]. Geophysics, 2003, 68(4): 1 408 ~1 416
- 4 Henley D. The radial trace transform: An effective domain for coherent noise attenuation and wavefield separation[J]. Expanded Abstracts of 69th Annual International SEG Meeting, 1999, 1 204~1 207
- 5 余波,黄中玉,谈大龙等. 径向道滤波法去线性干扰[J]. 石油物探, 2005, 44(2): 109~112
- 6 Brown M, Claerbout J. A pseudo-unitary implementa-

- tion of the radial transform[J]. Expanded Abstracts of 70th Annual International SEG Meeting, 2000, 2 115~2 118
- 7 Henley D C. Effective noise attenuation and deconvolution in the radial trace domain[J]. Expanded Abstracts of 74th Annual International SEG Meeting, 2004, 1 969~1 972
- 8 Zhu Weihong, Panos G. Linear noise attenuation using local radial trace median filtering [J]. The Leading Edge, 2004, 23(8): 728~730
- 9 夏洪瑞,郭庭超,周开明等. 均值加权消除相干干扰[J]. 石油物探, 2000, 39(2): 77~82