

小波变换用于超声成像测井图像增强处理的研究

邹长春¹⁾ 韦宏鹤^{2,3)}

(1) 北京大学地球与空间科学学院, 北京, 100871 (2) 中国科学院力学研究所, 北京, 100080;
3) 北京华科软信息技术有限公司, 北京, 100761)

摘要 本文针对成像测井图像增强的问题, 提出一种基于小波变换的超声成像测井图像增强方法。对超声成像测井图像进行小波变换分解, 在小波变换域内采用一个新的非线性函数作用于各个尺度下的高频系数, 然后重构图像。适当地调节非线性函数的参数值, 既能增强图像, 又能在一定程度上抑制噪声。与常规的图像增强方法相比, 该方法在提高超声成像测井图像的细节表现能力上效果较佳。

关键词 超声成像测井 图像增强 小波变换

A Study of Enhancing Images Derived from Ultrasonic Imaging Logging with Wavelet Transform

ZOU Changchun¹⁾ WEI Honghu^{2,3)}

(1) School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871 (2) Institute of Mechanics, CAS, Beijing, 100080;
3) Beijing Huakeruan Company of Hydropower Information Technology Development, Ltd., Beijing, 100761)

Abstract For the problem of image enhancement of imaging logging, a wavelet transform based method is proposed to enhance images derived from ultrasonic imaging logging. The source image is first decomposed by means of wavelet transform. Then a new nonlinear function is used to adjust the multiscale wavelet transform coefficients in the transformed domain. Finally, image reconstruction with inverse wavelet transform yields the enhanced image. The suitable parameters for the nonlinear function can be chosen to suppress noises while enhancing the image. Compared with conventional image enhancement techniques, the new method is better in enhancing the fine structures in the image.

Key words ultrasonic imaging logging image enhancement wavelet transform

在成像测井资料处理中, 通常需要采用图像增强方法来改善成像测井图像的质量(张守谦等, 1997), 突出成像测井图像中的细节成分, 使成像测井图像更加容易地被解释。传统的图像增强方法, 如直方图均衡化和同态滤波等方法(田捷等, 1995), 在增强图像的同时, 往往难以避免地将噪声放大。近年来, 小波变换在信号处理和图像处理方面得到了广泛应用(杨福生, 1999; 姚天任等, 1999), 也为图像增强处理开辟了一条新的途径。国内外学者根据小波变换所具有的良好空间域和频率域局部化特征, 以及多分辨率分析特征, 探索性地进行了图像增强处理研究。Lu等(1994)采用小波多尺度梯度变换和多尺度边缘方法增强图像的对比度。Laine等

(1994)利用小波多尺度分析方法实现了图像增强。黄晓凌等(1998)应用小波分析的多分辨率特性, 对医学X射线图像进行了增强处理研究, 取得了比较满意的效果。

笔者在对中国大陆科学钻探PP2孔超声波扫描成像测井资料处理和解释中, 将小波变换应用于超声成像测井图像增强处理, 提出了一种新的增强算法。本文简要介绍有关方法原理, 给出应用实例, 并分析其效果。

1 超声成像测井及图像特征

超声成像测井是一项先进的测井技术。它以脉冲-反射方式向井壁发射声波脉冲信号并接收井壁

反射回来的声波信号,反射波幅度变化反映介质的特性阻抗差异,反射波传播时间变化反映井眼的形态变化。进行超声成像测井时,利用超声换能器发射的声波脉冲信号对井眼四周扫描,由超声换能器接收反射波信号。超声换能器随测井仪器提升旋转,声波脉冲扫描的轨迹呈螺旋纹。显示测井图像时,在磁北极处把采集到的扫描图截断,展开成井眼声波图像,包括幅度图像和传播时间图像。

超声成像测井能够在裸眼井和套管井中进行测量,井壁覆盖范围大,测井图像可用于识别岩性,分析地层的结构、构造、裂缝和断层等地质特征,检查射孔孔眼、套管腐蚀断裂情况。

图1是一幅超声成像测井声幅图像,纵坐标表示深度,横坐标表示方位。图中裂缝特征较明显,但是也有一些细节特征较模糊。倘若对其作图像增强处理,则可使图像质量在一定程度上得到改善。

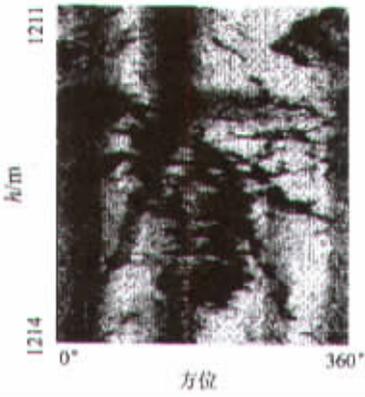


图1 超声成像测井声幅图像

Fig.1 An amplitude image derived from ultrasonic imaging logging

2 测井图像小波变换分解和重构

超声成像测井图像函数 $f(x, y)$ 是一种能量有限的可测函数,即 $f(x, y) \in L^2(R^2)$ 空间。设 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 是 $L^2(R)$ 中的一个闭子空间系列, V_j 的张量积为

$$V_j^2 = V_j \otimes V_j \quad (1)$$

则张量积空间 $\{V_j^2\}_{j \in Z}$ 构成了 $L^2(R^2)$ 的一个多分辨分析(MRA),当且仅当 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 是 $L^2(R)$ 的一个多分辨分析。设 φ 和 Ψ 分别为 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 的尺度函数和小波函数,定义二维尺度函数为

$$\varphi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y) \quad (2)$$

则可构造3个二维小波函数

$$\begin{cases} \Psi_1(x, y) = \Psi(x)\varphi(y) \\ \Psi_2(x, y) = \Psi(y)\varphi(x) \\ \Psi_3(x, y) = \Psi(x)\Psi(y) \end{cases} \quad (3)$$

相应的伸缩平移系表示为

$$\Psi_{j, m, n}^i(x, y) = 2^{-j} \Psi_i(2^{-j}x - m, 2^{-j}y - n) \quad j, m, n \in Z; i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

根据二维 Mallat 分解算法,图像函数 $f(x, y)$ 在尺度 2^j 下的低频逼近成分和高频细节成分可用二维序列 $C_j(m, n)$ 和 $D_j^i(m, n)$ 表示为

$$\begin{cases} C_j(m, n) = [f(x, y), \varphi_j(m, n)] \\ D_j^i(m, n) = [f(x, y), \Psi_{j, m, n}^i(x, y)] \end{cases} \quad m, n \in Z; i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

低频成分主要反映的是井壁较大的地质异常,高频细节成分对应于井壁上细节地质特征。

(5)式中4个二维序列可以由 $f(x, y)$ 分别沿 x, y 方向经由不同的一维滤波器滤波,并抽取偶数下标的滤波结果得到。用矩阵 H 和 G 分别表示一维滤波 φ_j 和 Ψ_j 以及抽取偶数下标元素的运算,并用下标 r 和 c 分别表示对阵列的行和列操作,则小波变换分解算法为

$$\begin{cases} C_{j+1} = H_r H_c C_j \\ D_{j+1}^1 = H_r G_c C_j \\ D_{j+1}^2 = G_r H_c C_j \\ D_{j+1}^3 = G_r G_c C_j \end{cases} \quad j = 0, 1, \dots, J-1 \quad (6)$$

重构图像的算法为

$$C_j = H_r^* H_c^* C_{j+1} + H_r^* G_c^* C_{j+1} + G_r^* H_c^* C_{j+1} + G_r^* G_c^* C_{j+1} \quad (7)$$

其中 $H_r^*, H_c^*, G_r^*, G_c^*$ 分别为 H_r, H_c, G_r, G_c 的对偶算子。

图2为一幅测井图像的小波变换分解与重构过程。图2-a是原始图像,根据 Mallat 分解算法,利用滤波器实现二维正交小波快速分解,二维滤波器可由一维滤波器复合而成。图2-b表示一个尺度分解结构。用 L 表示低通滤波器, H 表示高通滤波器。则除 LL, LH, HL, HH 构造出4个具有不同频率特性和方向特性的滤波器。用 LL 检测图像中的低频分量;用 LH 检测图像中水平方向的高频分量(即水平边缘);用 HL 检测图像中垂直方向的高频分量(即垂直边缘);用 HH 检测图像中斜线方向的高频分量(即对角边缘)。图2-c是图2-a经过一个尺度分解的结果,分解系数生成了低频系数子图像、水平

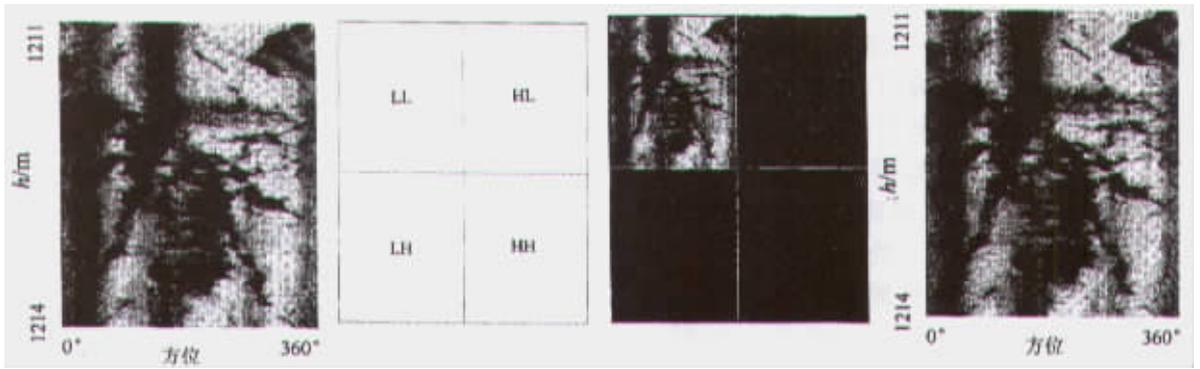


图2 测井图像小波变换分解与重构

Fig.2 Decomposition and reconstruction of a logging image with wavelet transform

高频系数子图像、垂直高频系数子图像和对角线高频系数子图像。图 2-d 是由图 2-c 中 4 个子图像重构的图像。

3 图像增强算法

利用小波变换进行图像增强处理的基本思路是:图像经过小波变换分解后,在小波变换域中重新调整各个尺度下的小波变换系数,反映高频细节特征的小波变换系数可通过函数变换加以放大,反映噪声的小波变换系数则不能被放大,而应缩小或置零,最后重构图像。由此使原始图像中对比度较差、模糊不清的细节得到增强,图像的视觉效果得到改善。

黄晓凌等(1998)介绍了一种基于小波变换的高频增强算法,引入一些加权值 W_j 作用于对高频系数取 $W_j = 2^{-ja}$,其中 a 为任意值。当 a 大于 0 时,随着尺度增大, W_j 单调下降;当 a 小于 0 时,随着尺度增大, W_j 单调递减。该方法采用一个参数来控制增强结果,具有一定的局限性。

在此引入一个新的非线性函数 g_j 作用于高频系数 $D_j^i(m, n)$

$$g_j = Ke^{\frac{(j-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

其中 K 、 μ 和 σ 是 3 个与尺度无关的参数。受函数 g_j 作用后的 $d_j^i(m, n)^*$ 为

$$D_j^i(m, n)^* = (g_j + 1)D_j^i(m, n) \quad (9)$$

将(8)式代入(9)式,有

$$D_j^i(m, n)^* = (Ke^{\frac{(j-\mu)^2}{2\sigma^2}} + 1)D_j^i(m, n) \quad (10)$$

最后用 $D_j^i(m, n)^*$ 代替 $D_j^i(m, n)$ 进行图像重构,获得增强的图像。

非线性函数 g_j 是一个高斯函数,参数 K 、 μ 和 σ 的值决定了它的几何形态。 g_j 的幅度随着 K 的增大而增大; $j = \mu$ 对应着 g_j 的峰值位置; σ 越小, g_j 的形态越尖。图 3 示出了 K 、 μ 和 σ 取不同值情况下 g_j 的几何形态。纵坐标表示 g_j 的幅度值,横坐标表示尺度序号 j 。其中,图 3-a、图 3-b 可以增强小尺度下的细节成分;图 3-c 可以增强中等尺度下的细节成分;图 3-d、图 3-e 可以增强较大尺度下的细节成分;图 3-f 可以增强所有尺度下的细节成分。由于噪声主要分布在小尺度下的高频子图像中,因此,对于受噪声污染较为严重的图像,采用图 3-c、d、e 可以对噪声起到抑制作用。另外,按照函数 g_j 取值时,相邻两个尺度具有“连续性”,使相邻两个尺度的成分在增强后的图像中反差较小。

本文算法的具体实现步骤归纳如下:

- (1) 选择合适的小波基,对原始图像进行二维离散小波变换,获得不同尺度下的小波变换系数;
- (2) 调节参数 K 、 μ 和 σ ;
- (3) 采用 Mallat 算法进行图像重构,获得增强后的图像;
- (4) 若增强后的图像的像素灰度值超出规定范围,则对其重新刻度和量化。

原则上,凡是能够精确重构图像的小波基都可用于图像增强处理;小波分解尺度个数尽量多,以便能对范围较宽的高频成分增强,一般进行 4~6 个尺度分解;为了增强细节成分, K 一般选取 0~4 之间的实数; μ 为任意实数; σ 为大于零的实数。

4 实际资料处理及分析

4.1 实际资料处理

对实际的超声成像测井图像进行了增强处理,

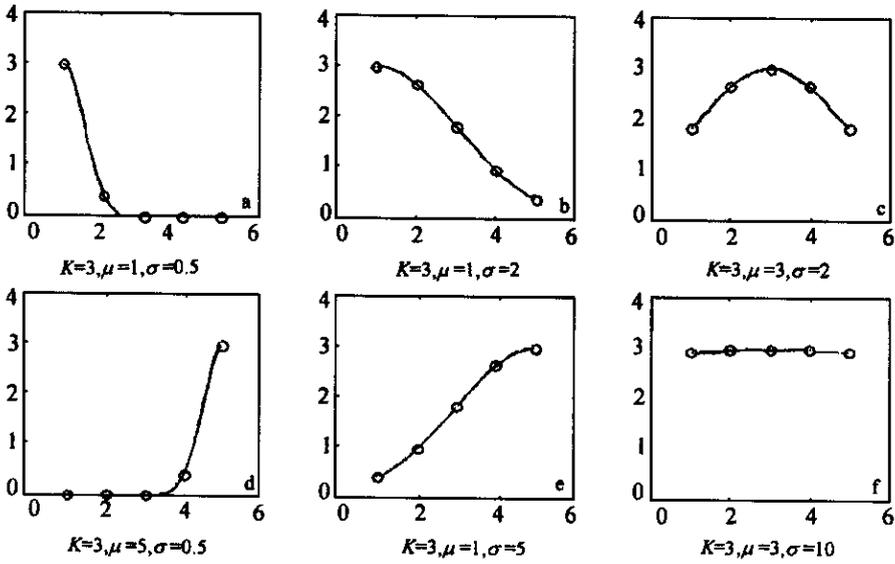


图3 函数的形态示意图

Fig.3 The shapes of function

下面给出具体的例子。

图4-a 是一幅超声成像测井声幅图像,图4-b 是利用 Daubechies 小波 ($N = 4$) 对该图像进行 5 尺度分解的结果。选取 $K = 3, \mu = 1, \sigma = 0.5$ 进行增强处理,此时增强了最小尺度下的高频成分,而尺度 $2^3, 2^4, 2^5$ 下的高频成分未增强,图4-c 表示增强处理后的结果。将原始图像与增强后的图像进行比较,可以看到,原始图像中一些细微的特征在图4-c 中更加突出,层理面的视觉效果有所改善。改变参数对图4-a 重新进行增强处理,取 $K = 3, \mu = 5, \sigma = 3$ 这时 5 个尺度下的高频成分都被增强,且随着尺度增大,高频成分增强程度越高,其结果如图4-d 所示。显然,增强后的图像中层理面迹线变得清晰,图像质量明显比原始图像的好。

图5 是中国大陆科学钻探 PP2 孔的超声波扫

描成像测井图像,图中纵向延伸的黑色条带是测井仪器偏心所造成的结果。同样利用 Daubechies 小波 ($N = 4$) 对其进行 5 尺度分解,选择 $K = 2, \mu = 3, \sigma = 3$,这时各个尺度下高频成分都被增强,但是主要突出尺度为 2^3 下的高频细节成分,且两个相邻尺度的成分在增强后的图像中反差较小。图5-a 是原始声幅图像,相应的增强处理结果如图5-b 所示,增强后的图像中裂缝迹线更加清晰,细小裂缝特性也比较明显,增强效果非常理想。

4.2 与常规方法对比

采用常规的图像增强方法对图4-a 进行了处理。图6 表示直方图均衡化处理后的结果,主要体现出低频成分的反差明显增大,噪声也被放大。而基于小波变换的图像增强方法具有对不同尺度的高频细节信息的增强特点,可以更好地突出测井图像

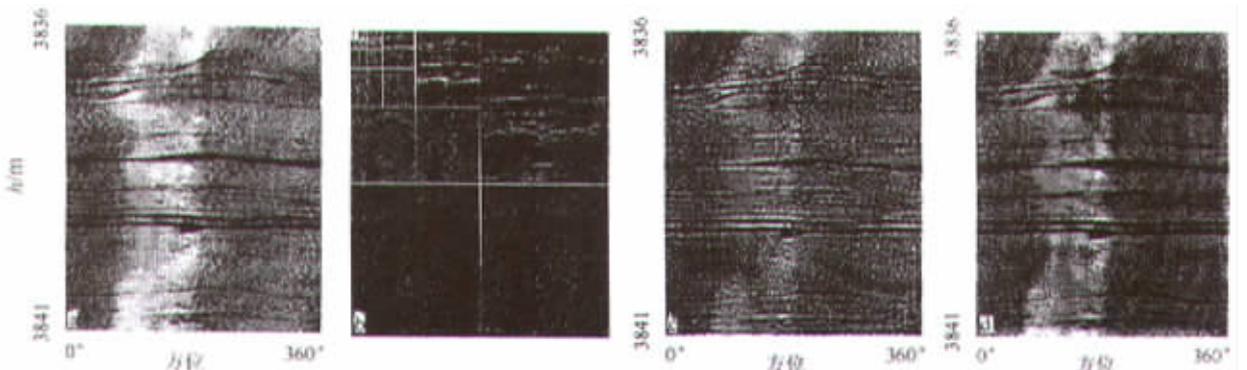


图4 小波变换用于增强声幅图像

万方数据

Fig.4 Amplitude image enhancement with wavelet transform

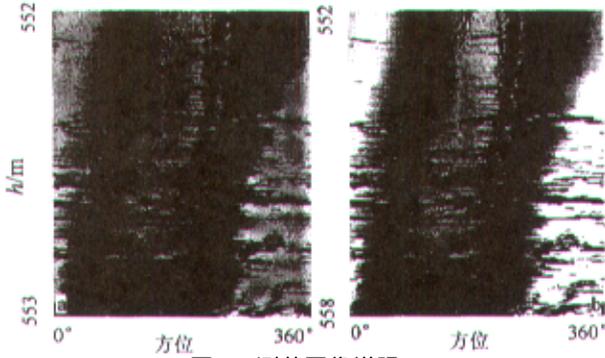


图 5 测井图像增强

Fig. 5 Logging image enhancement with wavelet transform

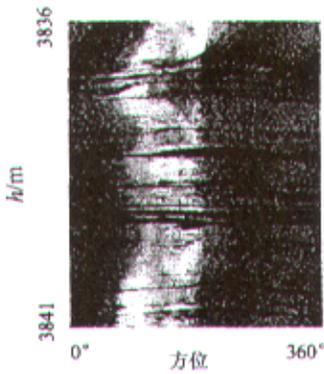


图 6 直方图均衡化增强图像

Fig. 6 Image enhancement with histogram equalization technique

中的地质特征。

实践表明,通过调节参数 K 、 μ 和 σ 能够突出测井图像中各种高频细节信息。但是,需要根据超声成像测井图像中地质特征复杂程度和图像增强目标

等具体情况,选择适当的控制参数,才能够获得较好的效果。

5 结语

基于小波变换的图像增强方法,在增强超声成像测井图像中细节成分的同时,能够避免噪声放大。利用本文提出的算法,可以根据测井图像中地质特征复杂程度和图像增强的具体要求,调节各参数,以便达到最佳效果,该方法既易于计算机上实现又具有灵活性。资料处理结果表明,该方法明显优于传统技术,能够显著地改善测井图像的视觉效果,有助于获得可靠的测井解释结论。

参 考 文 献

黄晓凌, 廖孟扬, 覃家美等. 1998. 基于小波分析的 X 射线照片增强研究. 武汉大学学报(自然科学版), 44(1):121~124.

田捷, 沙飞, 张新生. 1995. 实用图像分析与处理技术. 北京: 电子工业出版社, 71~110, 254~283.

杨福生. 1999. 小波变换的工程分析与应用. 北京: 科学出版社, 112~138.

姚天任, 孙洪. 1999. 现代数字信号处理. 武汉: 华中科技大学出版社, 282~285.

张守谦, 顾纯学, 曹广华. 1997. 成像测井技术及应用. 北京: 石油工业出版社, 96~142.

A F Laine, S Schuler, J Fan, et al. 1994. Mammographic feature enhancement by multiscale analysis. IEEE Transaction on Medical Imaging, 13(14):725~740.

J Lu, D M Healy, J B Weaver. 1994. Contrast enhancement of medical images using multiscale edge representation. Optical Engineering, 33(7):2151~2161.

J Lu, D M Healy. 1994. Contrast enhancement via multiscale gradient transformation. Proc. ICIP '94, II: 482~486, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos CA.