

文章编号 :1001 - 2486(2005)01 - 0051 - 04

基于二进小波变换的噪声图像自适应增强新算法^{*}

王红霞 ,成礼智 ,吴 翊
(国防科技大学 理学院 ,湖南 长沙 410073)

摘 要 :针对图像增强算法通常会放大原图像中噪声分量的问题 ,提出了一种基于二进小波变换的图像增强新算法。该算法充分利用了二进小波变换的平移不变性和各尺度上小波系数间的相关性 ,有效改善了增强过程中噪声放大和边缘失真问题。此外 ,算法具有高度的自适应能力 ,适用性更强。实验结果表明 ,与目前已有的各类多尺度图像增强算法相比 ,该算法在抑制噪声和凸显图像特征两方面均有明显改进。

关键词 :自适应图像增强 ;二进小波变换 ;增强函数 ;尺度相关性

中图分类号 :TN911. 7 **文献标识码** :A

An Adaptive Strategy for Image Enhancement Based on the Dyadic Wavelet Transform

WANG Hong-xia , CHENG Li-zhi , WU Yi
(College of Science , National Univ. of Defense Technology , Changsha 410073 , China)

Abstract :A new algorithm for image enhancement based on the dyadic wavelet transform is proposed aiming at minimizing the image noise while amplifying the image feature. By making full use of the shift invariability of the dyadic wavelet transform and correlation of the wavelets coefficients from different scales ,the proposed algorithm can efficiently alleviate the amplification of the noise and distortion of edges ,which are the most difficult and common problems in image enhancement. Furthermore ,the enhancing strategy is highly adaptive and thus applicable to images from many sources. The results of experiments are also given ,which show that the new algorithm performs better in both de-noising and image feature enhancing compared with the existing multi-scale algorithms.

Key words :adaptive image enhancement ;the dyadic wavelet transform ;enhancing function ;scale correlation

图像增强的目的是提高图像对比度、凸显其中感兴趣部分的特征 ,进而更加便于人眼理解或机器识别。目前已有很多图像增强算法 ,如灰度直方图均衡和空域数字滤波^[1]、基于数学形态学或偏微分扩散方程的非线性滤波以及基于多尺度分析的高频增强^[2,3]等。在实际问题中 ,原始图像通常总是含有一定程度的噪声 ,在某些领域中噪声还特别严重(如图像增强技术应用最广泛的医学图像) ,这些经典算法处理带噪图像时均面临不同程度的困难。这是因为图像的细节特征与噪声都对应高频部分 ,增强算法既要凸显边缘特征同时又要有效抑制噪声 ,这两个目标在某种程度上是一对矛盾 ,因此带噪图像的增强是图像处理中倍受关注的重要问题之一。

D. L. Donoho 提出可以基于 Curvelet 变换增强图像^[4] ,并取得了较好的实验结果 ,但是这种方法计算复杂度非常高 ,且主要适合处理包含大量线状特征的图像。本文提出了一种基于二进小波变换自适应增强带噪图像的新算法 ,通过利用不同尺度上的小波系数间的相关性来有效区分噪声和图像信息 ,并据此自适应选定增强变换 ,实现在抑制噪声的同时增强高频细节。实验结果表明 ,与目前已有多尺度增强算法相比 ,运用本文的算法处理带噪图像得到的图像的主、客观质量都有明显改善。

1 二进小波变换

由于二进小波变换具有平移不变性 ,可以有效避免非线性变换引起的视觉形变 ,因此在图像去噪和

^{*} 收稿日期 2004 - 10 - 09
基金项目 :国家自然科学基金资助项目(10171109)
作者简介 :王红霞(1977—) ,女 ,博士生。

增强中应用广泛^[5]。二进小波实际上是对连续小波的尺度二进离散化后得到的一种基函数表示形式, 由于它在分解信号过程中没有下采样(合成部分相应地也没有上采样), 从而各级分解得到的子带分量存在冗余, 因此也称为冗余小波变换。

对于大小为 $M \times N$ 的数字图像 I , 可以用不含上下采样的滤波器组来实现离散二进小波变换, 其两层分解和重构的结构如图 1 所示^[5]。其中记号 $[A, B]$ 表示对输入信号的各行用滤波器 A 、各列用滤波器 B 滤波, 图 1 中的 H 是低通滤波器, D 为单位全通滤波器, 而 G 和 K 表示高通滤波器, 且 $|H(\omega)|^2 + |G(\omega)|^2 = 1$, $|K(\omega)|^2 + |L(\omega)|^2 = 1$, $L(\omega) = (1 + |H(\omega)|^2)/2$ 。输入图像 I 经过 k 层小波分解后, 得到一个低频子图 S_k 和一系列子带分量 $\{W_j^d\}_{j=1, \dots, k, l=1, 2}$ 。增强过程就是对这些子带分量 $\{W_j^d\}_{j=1, \dots, k, l=1, 2}$ 作变换 $\tilde{W}_j^d = f_j^d(W_j^d)$, 再由 $\tilde{W}_j^d$ 重构得到的就是处理后的图像。

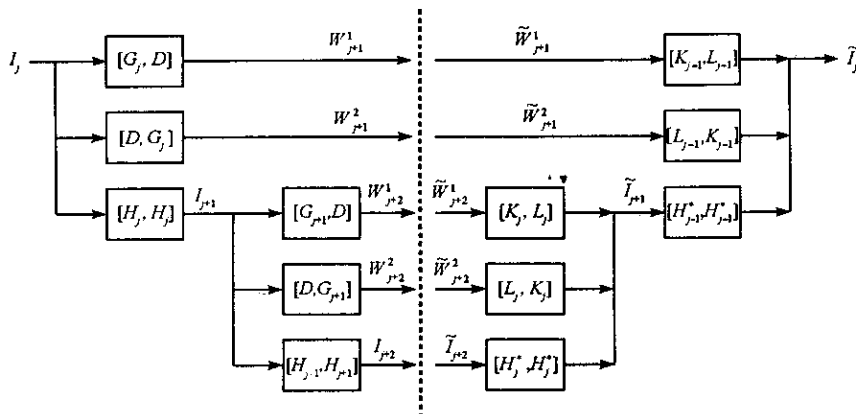


图 1 两层离散二进小波变换的结构示意图

Fig. 1 The structure of two levels of dyadic wavelet transform

若原图像为 $\bar{I} = I + n$, 其中 I 是真实图像, n 是噪声, 那么经过 k 级小波, $\bar{I}$ 就分解为低频分量 $\bar{I}_k$ 和一系列子带 $\{W_j^d\}_{j=1, \dots, k, l=1, 2}$ 。考虑到噪声 n 与真实图像 I 中变化显著的边缘和细节都对应于高频子带 $\{W_j^d\}_{j=1, \dots, k, l=1, 2}$, 当采用增强算法凸显高频部分从而提高边缘对比度时, 将不可避免地放大噪声。改善这种状况的关键在于将 W_j^d 中的噪声和真实信号分离出来。

2 基于尺度相关性的自适应增强

一般说来, 仅仅根据一层频域分解的子带分量所提供的信息要有效区分噪声和信号是很困难的^[6], 而利用多尺度方法得到的多个尺度的分量则可以作更好的区分。这是因为含噪信号在多尺度分解后, 真实信号的各尺度上的系数间具有很强的相关性, 而噪声对应的系数的相关性则很弱或者不相关^[7, 8]。

设图像经多尺度分解后得到的相邻两尺度的小波系数为 W_j^d 和 W_{j+1}^d , 定义相关性系数 $C_j^d = W_j^d \cdot W_{j+1}^d$, 并对 C_j^d 作归一化

$$\bar{C}_j^d = C_j^d \cdot \sqrt{P_j^d / P_{j+1}^d} \quad (1)$$

其中 $P_j^d = \sum_{m, n} [C_j^d(m, n) \cdot C_j^d(m, n)]$, $P_{j+1}^d = \sum_{m, n} [W_j^d(m, n) \cdot W_j^d(m, n)]$, 记 $\bar{C}_j^d = \min_{m, n} \{|\bar{C}_j^d(m, n)|\}$, 并定义

$$\alpha_j^d(m, n) = \begin{cases} 1, & |\bar{C}_j^d(m, n)| \geq |W_j^d(m, n)| \\ 0, & |\bar{C}_j^d(m, n)| = m\bar{C}_j^d \\ \frac{|\bar{C}_j^d(m, n)| - m\bar{C}_j^d}{|W_j^d(m, n)| - m\bar{C}_j^d}, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

那么 $\alpha_j^d(m, n)$ 总在 0 和 1 之间取值。当 $|\bar{C}_j^d(m, n)| \geq |W_j^d(m, n)|$ 时, 认为 (m, n) 处的小波系数一定对应真实信号, 这时 $\alpha_j^d(m, n) = 1$; 当 $|\bar{C}_j^d(m, n)| = \min_{m, n} \bar{C}_j^d$ 时, 认为 (m, n) 处的小波系数对应噪声; 此外 $\alpha_j^d(m, n)$ 越大, $W_j^d(m, n)$ 对应真实信号的可能性也越大。

为了在有效抑制噪声的同时保护脆弱细节,首先依据 $\alpha_j^d(m, n)$ 判定小波系数对应真实信号的置信程度,再通过以下方法实现兼顾抑制噪声的图像增强:

(1) 若 $\alpha_j^d(m, n) = 1$, 也即小波系数对应的确为信号,则选择图 2(a) 所示的增强函数对 $W_j^d(m, n)$ 作变换,其中 $[-T_1, T_1]$ 区间用于增强原图像中的脆弱边缘 $[-T_1, T_1]$ 之外则用于保护原本较强的边缘,避免引入变形和失真;

(2) 若 $\alpha_j^d(m, n) < 1$, 就选择具有图 2(b) 形式的增强函数,这时对 $[-T_0, T_0]$ 间的小波系数作抑制,而 $[T_0, T_1]$ $[-T_0, -T_1]$ 内的系数则被增强,该变换在形式上类似于软阈值去噪^[10]。

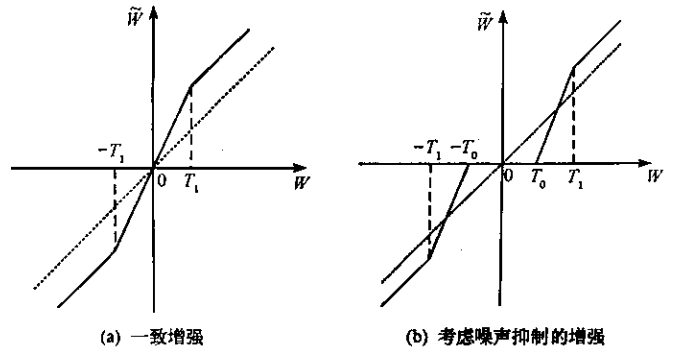


图 2 两种典型增强函数的图像

Fig. 2 Figures of two typical enhancing functions

3 增强参数的选取

考虑到待处理的图像通常特点各异,混有噪声的严重程度也都存在差别,要得到理想的处理效果,对各个尺度、各个位置的小波系数,有必要分别确定其增强函数中的参数,再作增强变换,这一节首先考虑如何估计抑制噪声的参数 T_0 。

设原图像为 $\bar{I}_0 = I_0 + n_0$, 其中噪声 n_0 是方差为 σ^2 的 Gaussian 白噪声。这样对 $\bar{I}_0$ 的第 j 层小波分解得到的分量 $\{\bar{I}_j; W_j^d, d=1, 2\}$ 就可以进一步表示成: $\bar{I}_j = I_j + n_j$; $W_j^d = I_j W_j^d + n_j W_j^d$, 其中 $\{I_j; W_j^d, d=1, 2\}$ 和 $\{n_j; n_j W_j^d, d=1, 2\}$ 分别对应真实图像 I_0 和噪声 n_0 在尺度 j 上的分量。 h_j 是在二进小波分解中采用的一维低通滤波器 h 的相邻系数之间插入 $2^j - 1$ 个 0 得到的滤波器。

记 n_j 的方差为 σ_j^2 , 那么 n_j 和 $n_j W_j^d$ 的均方差分别为

$$\sigma_j = \|h_{j-1} * h_{j-2} * \dots * h_0\|_2 \sigma; \quad \delta_j = \begin{cases} \|g_0\|_2 \sigma, & j=1 \\ \sigma \cdot \|g_{j-1} * h_{j-2} * \dots * h_0\|_2 / \|g_{j-1}\|_2, & j>1 \end{cases} \quad (3)$$

其中“*”表示卷积运算。特别地,当采用文献[5]中的二次样条小波时,可以有更为简单的近似估计:

$$\sigma_j \approx 0.5 \sigma_{j-1}; \quad \delta_j \approx 2 \sigma_{j-1} \quad (4)$$

根据文献[11]中的结论, Bayes 最优阈值 $T_0 \approx \delta_j^2 / \sigma_{I_j}$; 其中 δ_j, σ_{I_j} 分别表示第 j 层小波分解后的分量 W_j^d 和 I_j 的标准差, δ_j 根据(3)式估计, σ_{I_j} 则可以按(5)式估算:

$$\sigma_{I_j} = \frac{1}{MN} \sum_{m,n} [I_j(m, n) - \text{mean}(I_j)]^2 \quad (5)$$

在确定了抑制噪声的阈值 T_0 后,下面考虑如何进一步确定增强函数。增强函数通常可以分为线性和非线性两类,对线性增强,只需确定增益 E_j^d , 这样 j 尺度上的增强变换就可以表示为:

$$\tilde{W}_j^d(m, n) = E_j^d(m, n) \cdot W_j^d(m, n); \quad T_0 \leq W_j^d(m, n) < T_1, \quad d=1, 2 \quad (6)$$

这里选择 E_j^d 为

$$E_j^d(m, n) = \alpha_j^d(m, n) \max\{A_j^d\} / A_j^d, \quad A_j^d = \max_{m,n} \{W_j^d(m, n)\} \quad (7)$$

若考虑非线性增强,则要进一步确定增强函数的形式,一种较好的选择是

$$\tilde{W}_j^d = \begin{cases} E_j^d \cdot W_j^d \cdot (1 - |W_j^d|/T_1)^p, & |W_j^d| < T_1 \\ W_j^d, & |W_j^d| \geq T_1 \end{cases} \quad (8)$$

[算法描述]

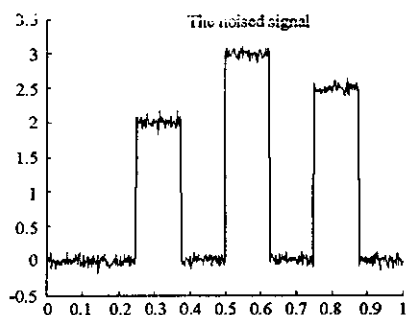
设给定图像 I_0 , 并设定小波分解的层数为 $J, j=0$;

(1) $j=j+1$, 对 I_{j-1} 作二进小波变换得到子带分量 $\{I_j, W_j^d\}$ 及 $\{I_{j+1}, W_{j+1}^d\}$, 并求归一化系数 $\bar{C}_j^d$, 根据(2)式求 α_j^d 作为 W_j^d 确实对应真实图像的置信程度;

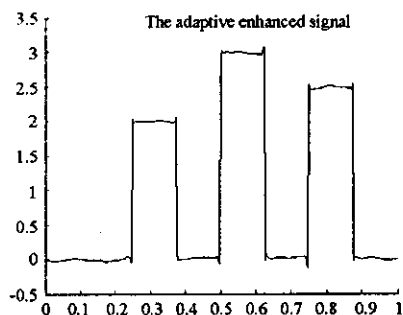
- (2) 若 $\alpha_j^d(m, n) = 1$, 则 W_j^d 对应真实图像, 按照无噪图像的增强方法得 $\tilde{W}_j^d$;
 否则 $\alpha_j^d(m, n) < 1$, 根据前述方法估计 T_0 并作增强变换得到 $\tilde{W}_j^d$;
 (3) 若 $j < J$, 返回(1), 否则转(4);
 (4) $\hat{I}_J = I_J$;
 (5) 由 $\{\tilde{I}_j, \tilde{W}_j^d\}$ 重构得 $\tilde{I}_{j-1}$, $j = j - 1$;
 若 $j > 0$, 转(5), $\tilde{I}_0$ 即为所求的经增强处理后的输出图像。

4 实验结果

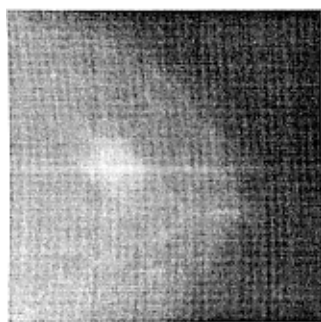
为了说明问题的方便, 分别对一维模拟生成的带噪信号和实测医学图像按本文的算法作自适应增强。从图 3 所示的处理结果可以看出, 本文提出的算法用于增强带有噪声的一维信号或数字图像是非常有效的。当一维信号中存在奇异点(如图 3(1.1)中的阶跃点)并混有噪声时, 这种算法可以在保持奇异性的同时显著地抑制噪声; 对图 3(2.1)所示的乳房 X 光照片的处理结果可以更加直观地看出, 根据本文的自适应增强算法处理后的图像细节特征更加突出, 而且并未出现噪声的相应放大。



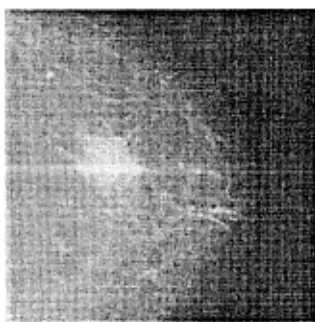
(1.1) 一维带噪信号



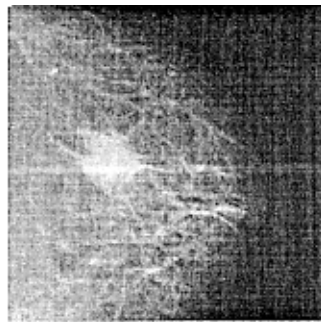
(1.2) 自适应增强的结果



(2.1) 乳房 X 光照片



(2.2) 按 [2] 中算法增强的结果



(2.3) 按本文的算法自适应增强的结果

果

图 3 对带噪信号增强处理的结果

Fig. 3 The enhanced results of noised 1D signal and image

5 结论

本文提出的增强方法可以对带噪信号获得满意的增强效果, 在凸显高频细节的同时很好地避免了原信号中的噪声放大的问题。与目前具有代表性的多尺度增强方法相比, 该算法可以更好地缓解去噪和在图像边缘处引入模糊间的矛盾。与基于 Curvelet 变换的最新研究结果相比, 本文的计算更为简单, 而且对于如医学图像之类噪声严重、重要细节未必具有线状特征的图像, 处理效果更好。由于算法采用了高度自适应的策略, 所以对各类图像具有普遍适用性。

(下转第 59 页)

表 2 谐波频率的有效估计门限(dB)
Tab.2 Efficient estimation threshold of frequencies(dB)

数据长度($M = N$)	30	35	40	50	60	80	160
2d-ESPRIT	25	22	21	19	20	17	—
2d-FOMCESPRIT	20	18	14	8	-5	-5	-6

4 结 论

利用四阶混合累积量对高斯噪声的自动抑制作用 ,提出了一种基于四阶混合累积量的二维衰减谐波估计方法。通过保持特征矩阵结构不变 ,该方法较好地解决了现有方法在大样本容量时计算量过大的问题。仿真实验表明 ,该方法不仅具有较强的高斯色噪声抑制能力 ,而且可以通过增加样本容量显著地提高估计精度。

参 考 文 献 :

[1] Hua Y. Estimating Two-dimensional Frequencies by Matrix Enhancement and Matrix Pencil[J]. IEEE Trans. on Signal Processing ,1992 , 40(9) 2267 - 2280.

[2] Sacchini J J ,Steadly W M. Two-dimensional Prony Modeling and Parameter Estimation[J]. IEEE Trans. on Signal Processing ,1993 41 (11) 3127 - 3136.

[3] Rouquette S ,Najim M. Estimation of Frequencies and Damping Factors by Two-dimensional ESPRIT Type Methods[J]. IEEE Trans. on Signal Processing ,2001 49(1) 237 - 245.

[4] Anderson J M M ,Giannakis G B ,Swami A. Harmonic Retrieval Using Higher Order Statistics : A Deterministic Formulation[J]. IEEE Trans. on Signal Processing. 1995 43(8) 1880 - 1889.

[5] Dandawate A V ,Giannakis G B. Asymptotic Theory of Mixed Time Averages and kth-order Cyclic-moment and Cumulant Statistics[J]. IEEE Trans. on Information Theory , 1995 41(1) 216 - 232.

[6] Ruiz D P , Carrion M C , Gallego A et al. Parameter Estimation of Exponentially Damped Sinusoids Using a Higher Order Correlation-based Approach[J]. IEEE Trans. on Signal Processing ,1995 43(11) 2665 - 2677.

(上接第 54 页)

参 考 文 献 :

[1] Gonzales R C ,Woods R E. Digital Image Processing[M]. MA : Addison-Wesley , 1995.

[2] Dippel S , Stahl M , Wiemker R ,et al. Multiscale Contrast Enhancement for Radiographies : Laplacian Pyramid Versus Fast Wavelet Transform[J]. IEEE Trans. Medical Imaging ,2002 ,21(4) :343 - 353.

[3] Laine A F ,Schuler S ,Fan J et al. Mammographic Feature Enhancement by Multiscale Analysis[J]. IEEE Trans. Medical Image ,1994 , 13(4) :725 - 750.

[4] Starck J L ,Murtagh F ,Candes E J et al. Gray and Color Image Contrast Enhancement by the Curvelet Transform[J]. IEEE Trans. Image Processing ,2002.

[5] Mallat S. A Wavelet Tour of Image Processing[M]. Academic Press , 1997.

[6] Coifman R R ,Donoho D L. Translation-invariant Denoising [M]. A. Antoniadis and G. Oppenheim. Berlin , Springer , Wavelets and Statistics. 1995.

[7] Pan Q ,Pan Z ,Dai G ,Zhang H. Two Denoising Methods by Wavelet Transform [J]. IEEE Trans. Image Processing ,1999 ,47(12) : 3401 - 3406.

[8] Sendur L ,Selesnick I W. A Bivariate Shrinkage Function for Wavelet Based Denoising[C]. IEEE ICASSP ,2002.

[9] Greenspan H ,Anderson C H ,Akber S. Image Enhancement by Extropolation Infrequency Space [J]. IEEE Trans. Image Processing , 2000 ,9 :1035 - 1048.

[10] Donoho D L. De-noising by Soft-thresholding[J]. IEEE Trans. Inform. Theory ,1995 ,41 :613 - 627.

[11] Chang S ,Yu B ,Vetterli M. Image Denoising Via Lossy Compression and Wavelet Thresholding[J]. IEEE Trans. Image Processing , 2000 ,9 :1532 - 1546.

