

一种基于小波邻域的半软阈值去噪算法*

赵新中¹ 陶永耀¹ 贺佩² 石敏²

(1. 炬芯(珠海)科技有限公司 珠海 519085; 2. 暨南大学信息科学技术学院 广州 510632)

摘要:针对小波硬阈值去噪函数的不连续和软阈值去噪函数的恒定偏差导致图像边缘模糊的缺点,本文提出了一种新的半软阈值函数。该方法通过区分图像的强弱边缘分别进行处理,并在弱边缘小波系数的估计中采取基于贝叶斯估计的方法且考虑了邻域小波系数的大小。仿真结果表明,与原有的小波阈值去噪算法和普通的阈值去噪算法相比,该算法在峰值信噪比(PSNR)、边缘保持指数(EPI)和视觉效果上都有明显的提高。该方法能够很好地保护图像边缘信息,达到很好的去噪效果。

关键词:弱边缘; 邻域小波系数; 半软阈值函数; 边缘保持指数

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Denoising algorithm of semi-soft threshold based on wavelet neighborhood

Zhao Xinzong¹ Tao Yongyao¹ He Pei² Shi Min²

(1. Actions (Zhuhai) Technology Co., Limited, Zhuhai 519085, China; 2. School of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: The soft threshold function will produce a constant deviation cause and the hard threshold function is not continuous cause image edges blur. In this paper a new semi-soft threshold function method is proposed. This method processes the image by distinguish strong and weak edge. What's more, the neighboring wavelet coefficients and Bayesian estimation method were incorporated into the estimation of the weak edge. Simulation results showed that the proposed algorithm had better visual effect and PSNR and EPI performance than many exiting thresholding methods. This method can protect the edge of the image to achieve a good denoising effect.

Keywords: weak edge; neighbor wavelet coefficients; semi-soft thresholding function; EPI

1 引言

数字图像在获取或传输过程中会受到传感器震荡、电子元器件噪声、抖动等诸多因素的干扰而导致数字图像质量下降,从而会影响图像的视觉效果。因此很有必要在应用中对图像信号进行去噪预处理。人们根据图像和噪声的统计特征及不同频谱分布规律,提出了基于空域和变换域的多种去噪方法。自从小波和多尺度分析工具出现以后,小波变换由于其特有的多分辨率特性使得其成为去噪领域的热点问题^[1]。小波去噪方法中最经典的算法有硬阈值和软阈值两种,但是硬阈值函数的不连续性会导致吉布斯效应^[2],软阈值存在的恒定偏差则会使得消噪图像模糊。因此为了克服软硬阈值函数的固有缺点,不少学者在其基础上提出了改进算法^[3-4],最为著名的有半软阈值去

噪法^[5]和软硬折中阈值去噪法^[6]。这两种方法只是单纯地对软硬阈值的缺点进行改进而没有从图像和噪声的本身特性出发,因此没能取得很理想的效果。本文考虑到图像的先验信息将图像边缘分为弱边缘和强边缘两种,分别进行处理,并且在噪声很弱、边缘很难区分的情况下,为了减少噪声的影响和保护图像弱边缘,提出了一种基于邻域的阈值函数来进行处理。该方法与贝叶斯估计相结合且利用了图像的先验知识,不仅能去除噪声还能很好地保护图像的边缘细节信息。

2 理论基础

2.1 噪声模型分析

假设原始图像受到高斯白噪声的污染,则信号模型为

$$g(i, j) = f(i, j) + n(i, j) \quad (1)$$

收稿日期:2015-12

* 基金项目:广东省科技计划项目(2013B090800022)、广东省科技计划项目(2015B090901047)资助

式中： $g(i, j)$ 表示含噪图像， $f(i, j)$ 表示原始图像， $n(i, j)$ 表示方差为 σ^2 的噪声。含噪图像 $g(i, j)$ 经小波变换后有 $W_g = W_f + W_n$ ，其中 W_g 为含噪图像的小波系数， W_f 为原图像的小波系数， W_n 为噪声小波系数。

经小波分析后的图像，其本身的能量对应着幅值较大的小波系数，主要集中在低频。噪声能量则对应着幅值较小的小波系数^[7]，并分散在小波变换后的所有系数中。

2.2 小波阈值去噪原理

根据信号和噪声在小波域的特性，设置一个阈值，认为大于该阈值的小波系数的主要成份为有用信号，给予收缩后保留，小于该阈值的小波系数，其主要成份为噪声，予以剔除，这样就可以达到去噪的目的。目前最常用的去噪方法是硬阈值去噪和软阈值去噪。其经典的阈值函数可描述为：

令 $\lambda = \sigma \sqrt{2 \lg(N)}$ (Donoho 阈值, N 为信号的长度)，则硬阈值函数定义为

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}, & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

软阈值函数定义为

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(w_{j,k}) \times (|w_{j,k}| - \lambda), & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

由上可知，硬阈值函数不连续、软阈值函数存在恒定的偏差，都会影响小波系数的估计值，为了克服这些缺点，Bruce 和 Gao 提出了半软阈值函数，其描述如下：

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}, & |w_{j,k}| \geq T_2 \\ \text{sign}(w_{j,k}) \times \frac{T_2(|w_{j,k}| - T_1)}{T_2 - T_1}, & T_1 \leq |w_{j,k}| \leq T_2 \\ 0, & |w_{j,k}| < T_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中：小波阈值 λ 的选取直接关系到消噪的结果，如果阈值过大，图像边缘信息损失，造成失真；如果阈值过小，噪声去除不完全，达不到去噪的效果。一般地小波阈值有如下几种选择：

1) VisuShrink 阈值

根据高斯噪声特性，Donoho 和 Johnstone 在 1994 年提出了这种通用阈值

$$T = \sigma_N \sqrt{2 \ln N} \quad (5)$$

式中： σ 是噪声的标准方差， N 是信号的采样长度。上式阈值强烈依赖于信号长度 N 。因为实际图像往往具有 10^5 以上的数据样本，因此通用阈值会产生较大的阈值，有时候会抹杀一些细节信息。

噪声的标准差是未知的，需要用一定的方法对其进行估计。由于噪声主要集中在第一层的对角子带 HH_1 子带中，则可通过该子带的系数来估计 σ_N ，Donoho 和 Johnstone 提出的一种中值估计法^[8]，表示如下：

$$\hat{\sigma}_N = \frac{\text{Median}(|x(i, j)|)}{0.6745}, x(i, j) \in HH_1 \quad (6)$$

2) SureShrink 阈值

一种基于 stein 的无偏似然估计准则的自适应阈值，也称之为 stein 无偏风险阈值。这是在软阈值函数的基础上，对均方差准则所做的无偏估计。由于其估计的针对性，这种阈值非常适合软阈值去噪的方法。

3) BayesShrink 阈值

这是一种通过图像的先验分布等信息来求最佳阈值，会减少很多误差。其假设不同尺度和不同子带的小波系数都服从广义高斯分布，另加入小波系数记为 w_j^{sb} ，则其系数矩阵可以通过广义高斯分布来建模。则广义高斯分布标准差的估计公式为：

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum (W_j^{sb}(m, n))^2$$

$$\sigma_\beta = \sqrt{\max(\sigma_x^2 - \sigma_n^2, 0)} \quad (7)$$

则贝叶斯阈值^[9]估计公式为：

$$T = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_\beta} \quad (8)$$

3 本文算法

近年来的研究表明，在去噪过程中融入其他的信息如邻域小波系数^[10]等有助于保持细节信息。当一个较大的小波系数周围邻域的小波系数都较小，那么这个较大的小波系数受噪声污染严重的可能性极大。

本文算法对强弱边缘分别进行处理，由于噪声和图像的弱边缘极易混淆，使得图像噪声去除不完全或者图像边缘损耗，因此本文所构造的阈值函数在对弱边缘小波系数进行估计时充分利用小波系数的邻域信息。

3.1 基于邻域的半软阈值函数的构造

为了克服各门限法的缺点，有效地提高图像的去噪效果，本算法结合贝叶斯估计构造了一种基于邻域的半软阈值函数，其阈值函数为

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}, & |w_{j,k}| \geq T_1 \\ w_{j,k} \times \frac{\sigma_w^2}{\sigma_w^2 + \sigma_n^2}, & T_2 \leq |w_{j,k}| < T_1 \\ 0, & |w_{j,k}| < T_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中： σ_n 代表的是当前子带的噪声的标准差，若该邻域内小波系数大小在 T_1 和 T_2 之间的个数分别为 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ ，则

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2}{N} - \bar{x}^2 \quad (10)$$

$$\sigma_w^2 = \max(0, \sigma_x^2)$$

由上式可知，当 $T = T_2$ 时，为弱边缘均方差比较小， σ_w^2 趋向于 0，则

$$\hat{w}_{j,k} = \lim_{\sigma_w^2 \rightarrow 0} w_{j,k} \times \frac{\sigma_w^2}{\sigma_w^2 + \sigma_n^2} = 0$$

同理当 $T = T_1$ 时，为强边缘均方差比较大，则 $\sigma_x^2 \gg \sigma_n^2$ ，此时 $\hat{w}_{j,k} = w_{j,k}$ ，则以上函数在一定意义上是连续的。

3.2 阈值的选取

针对本文算法中阈值的选取, T_1 和 T_2 是用来区分强边缘和弱边缘和噪声的。本算法的 T_2 是类似于对软阈值函数的处理, 由于前面所提到的 SureShrink 阈值是针对于软阈值函数的一种无偏估计, 其所估计的阈值比较小, 则可以很好地区分并处理该阈值附近的噪声和弱边缘, 所以本算法中 T_1 为 SureShrink 阈值。由于通用的 VisuShrink 阈值是一种常用估计, 能够完全去除噪声, 则其在噪声和边缘之间有一定的区分, 则可以作为强弱边缘的隔离点。所以本算法中的 T_2 为通用的 VisuShrink 阈值。

3.3 本文算法的实现

图像去噪中一个很大的研究热点是怎么保护图像的边缘。硬阈值函数去噪若是阈值设定过大则会把一些弱的边缘当作噪声给损失掉了, 而软阈值函数的话就会对整个边缘有一定程度的损耗^[11]。考察新的阈值函数, 由于在处理强边缘时直接保留就克服了硬阈值中损失弱边缘的缺点。而对于弱边缘采取软阈值的方法, 由于引入了邻域小波系数即图像的先验知识图像的边缘肯定与其邻域是相关的, 则可以一定程度的保护图像的边缘。

由于新阈值函数存在一个固有的缺点就是不是严格意义上连续的问题, 因此去噪后的图像在不连续点出会存在震荡, 因此可以在最后进行中值滤波消除该函数中的不连续问题^[12]。

本文算法流程如下:

- 1) 确定分解尺度, 选定小波基对含噪图像进行小波分解。
- 2) 保留最高尺度的低频信息。
- 3) 对各个尺度不同方向的高频信息进行强弱边缘的判断:
 - ①若为强边缘, 直接保留;
 - ②若为弱边缘, 基于邻域的软阈值函数进行收缩保留。
- 4) 将处理后的各尺度高频信号与低频信号进行重构。
- 5) 将重构图形进行中值滤波得到消噪后的图像。

4 仿真实验

为了验证本文算法的有效性, 采用具有代表性的大小为 512×512 标准测试图像 lena (既有丰富的细节又包含大量的平滑信息) 来验证各个方法的有效性。考虑算法的计算量和去噪的效果, 本实验采用的小波基是 sym8, 分解尺度为 3, 对图像加不同强度的高斯白噪声, 采用峰值信噪比 PSNR 和边缘保持指数 EPI 作为衡量降噪性能优劣的标准, 如表 1、2 所示。

如表 1 可以看出本文算法在峰值信噪比上比传统的门限去噪法有了很大的提升, 且本文算法相比于半软阈值算法也有很大的提升。从表 2 中还可以看出本算法的边缘保持指数也高于其他比较算法, 说明本文算法能够很好地保护图像的边缘细节信息。

表 1 不同算法的去噪结果 (PSNR) 比较

噪声	软阈值法	硬阈值法	半软阈值	本文算法
10	28.178 6	30.462 5	31.490 5	32.006 7
20	25.942 9	27.736 3	28.608 5	30.302 3
30	24.770 3	26.208 5	26.208 5	28.959 2
40	24.029	25.228 8	26.011 3	27.872 8
50	23.568 9	24.550 6	25.202 3	26.934 4

表 2 不同算法的去噪结果 (EPI) 比较

噪声	软阈值法	硬阈值法	半软阈值	本文算法
10	0.424	0.626	0.679	0.704
20	0.389	0.586	0.615	0.634
30	0.328	0.490	0.562	0.583
40	0.340	0.478	0.521	0.557
50	0.335	0.445	0.485	0.501

如图 1 所示为对 lena 图像加载方差为 30 的高斯白噪声时, 采用本文的新算法获得的最优函数参数时的降噪结果及同软阈值法、硬阈值法、半软阈值算法的比较图。

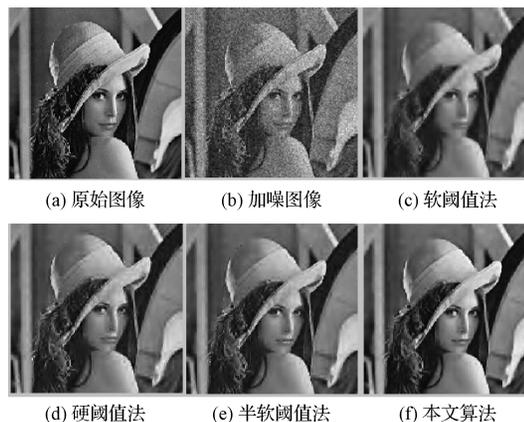


图 1 本文方法与其他算法的去噪效果比较

从图 1 中可以看出, lena 图像中有诸如帽子头发等诸多细节信息, 采用本文的改进方法去噪后的图像实际视觉效果相比其他去噪方法要好很多, 既表现出了更为清晰的边缘轮廓, 也保护了毛发和纹理等细节信息, 在很大程度上克服了软阈值法和硬阈值法的不足, 达到了很好的去噪效果。

以 lena 图像为例, 对文中使用的各种去噪算法对不同噪声水平下的含噪图像完成一次去噪所花费的时间进行研究, 结果如图 2 所示。

图 2 中横坐标是图像所加的噪声标准差, 纵坐标是算法执行所需的时间。可以看出本文改进算法平均所需时间要大于其他几种去噪算法, 这是由于改进的算法计算量比另外几种方法大。而对于硬阈值法、软阈值法和半软阈值去噪这 3 种算法, 虽然它们运行时间短, 实时性较强, 但是去噪效果不如本文改进的算法好。尤其针对边缘信息丰富的图像, 本文算法的去噪效果更明显。

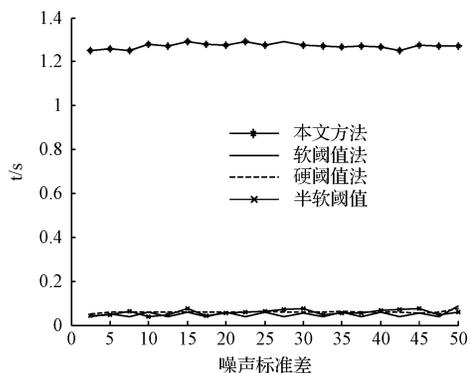


图2 各种去噪算法所需时间比较

5 结论

本方法根据图像信号和噪声在小波域的特性,通过分析提出了一种基于邻域相关性的半软阈值去噪算法。该算法对图像的强弱边缘分别进行处理,通过构造与邻域系数相关的阈值函数来估计弱边缘,很好地保护了图像的边缘信息。实验结果表明,本文所提出的去噪算法有很高的峰值信噪比和边缘保持指数且视觉效果良好,达到了很好的图像去噪效果。

参考文献

- [1] 钱苏敏,张琳絮,张云,等. 基于小波阈值改进的去噪算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(5): 49-51.
- [2] NASRI M, NEZAMABADI-POUR H. Image denoising in the wavelet domain using a new adaptive thresholding function [J]. Neurocomputing, 2009, 72(4-6): 1012-1025.
- [3] 刘慧. 基于小波变换的图像去噪研究[D]. 湖南: 湖南师范大学, 2012.
- [4] BISWAS M, OM H. An adaptive wavelet thresholding image denoising method[C]. 2013 National Con-

ference on Communications (NCC), 2013: 1-5.

- [5] 王知强. 一种基于新阈值函数的小波图像去噪算法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(4): 56-58.
- [6] FATHI A, NAGHSH-NILCHI A R. Efficient image denoising method based on a new adaptive wavelet packet thresholding function[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(9): 3981-3990.
- [7] 蒋薇薇,鲁昌华,张玉钧,等. 基于提升小波改进阈值的频谱信号去噪研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1363-1368.
- [8] 彭玉华. 一种改进的小波变换阈值去噪方法[J]. 通信学报, 2004, 25(8): 119-123.
- [9] BHUTADA G G, ANAND R S, SAXENA S C. Edge preserved image enhancement using adaptive fusion of images denoised by wavelet and curvelet transform[J]. Digital Signal Processing, 2011, 21(1): 118-130.
- [10] 张爱民. 一种基于小波变换的夜视图像去噪和融合方法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1): 38-40.
- [11] 李红延,周云龙,田峰,等. 一种新的小波自适应阈值函数振动信号去噪算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2200-2206.
- [12] BUADES A, COLL B, MOREL J M. Image denoising methods. A new nonlocal principle[J]. Siam Review, 2010, 52(1): 113-147.

作者简介

赵新中, 1975年出生,男,湖南衡东人,硕士,高级工程师,主要研究方向为算法设计。

陶永耀, 1978年出生,男,湖北武汉人,硕士,高级工程师,主要研究方向为系统架构设计。

贺佩, 1990年出生,女,湖南株洲人,硕士,主要研究方向为图像处理。

石敏, 1977年出生,女,湖北人,博士,副教授,主要研究方向为图像处理、SoC设计。