

基于 Contourlet 系数相关特性的自适应 图像去噪算法

杨 帆 赵瑞珍 胡绍海

(北京交通大学信息科学研究所, 北京 100044)

摘要 研究发现, 图像经过 Contourlet 变换之后, 其变换系数在尺度内和尺度间都表现出很强的相关特性。基于此, 首先根据 Contourlet 系数在同一尺度内的邻域相关特性, 构造得到一个自适应阈值, 然后在采用阈值法进行自适应阈值去噪的同时, 利用 Contourlet 系数在相邻尺度间的相关性对系数进行进一步的取舍, 从而提出一种新的基于 Contourlet 变换系数特性的自适应阈值图像去噪算法。该算法不仅可以有效去除噪声, 而且可以很好地保留图像边缘信息。实验结果表明, 在相同条件下该算法的主客观去噪效果均优于现有同类方法。

关键词 图像处理; 相关性去噪; Contourlet 变换; 自适应阈值

中图分类号 TN911.7 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092902.0357

Adaptive Algorithm for Image Denoising Based on Correlation Properties of Contourlet Coefficients

Yang Fan Zhao Ruizhen Hu Shaohai

(Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract The contourlet coefficients corresponding to an image have strong correlations both at the same scale and between neighboring scales. Therefore, an adaptive threshold is firstly constructed by the intra-scale correlation property of contourlet coefficients. After the adaptive thresholding denoising, the inter-scale correlation of the contourlet coefficients is utilized to decide what processed coefficients to use. Based on the two above correlation properties of contourlet coefficients, a new adaptive contourlet-domain image denoising algorithm is thus presented. The new algorithm cannot only remove noise thoroughly, but maintain the edges of the image effectively. Experimental results show that the proposed algorithm can get better denoising results and is superior to the available methods both visually and objectively.

Key words image processing; correlation denoising; contourlet transform; adaptive threshold

1 引 言

图像去噪是信号处理领域中的一个前沿课题。基于 Contourlet 变换的图像去噪方法是近年来该领域中的一个研究热点。作为多尺度几何分析^[1]方法之一, Contourlet^[2, 3]变换不仅继承了小波变换的多分辨特性和时频局部化特性^[4], 还具有多方向性和各向异性, 能够更有效地捕捉到自然图像中的重要信息, 并对其进行稀疏表示, 这使它在图像去

噪方面有着广阔的应用前景。

基于变换域的图像去噪的关键是如何对变换后的系数进行修正, 目前主要有阈值法、相关法和模板大值三大类方法, 其中阈值法应用最为广泛。在阈值去噪过程中, 如果变换缺乏平移不变性, 就会在信号的不连续点邻域产生伪吉布斯现象, 导致信号失真。考虑到 Contourlet 变换不具有平移不变性, Eslami 和 Radha 将 Cycle Spinning 与 Contourlet

收稿日期: 2008-05-19; 收到修改稿日期: 2008-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(10778724)和北京交通大学科技基金(2005SM011)资助项目。

作者简介: 杨 帆(1983—), 女, 硕士研究生, 主要从事图像处理方面的研究。E-mail: 06120410@bjtu.edu.cn

导师简介: 赵瑞珍(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事图像处理与小波变换等方面的研究。E-mail: rzhzhao@bjtu.edu.cn

变换相结合对图像进行去噪^[5],改善了去噪的效果。但通常的阈值去噪法^[6,7]并未考虑图像经 Contourlet 变换后系数之间(包括尺度内和尺度间)的相关性,这样在根据选定的阈值和阈值函数对 Contourlet 系数进行取舍的时候,就会丢失很多包含有用图像信息的系数。

基于小波系数的邻域相关特性,Cai 等^[8]提出了一种基于邻域小波系数的阈值去噪方法——NeighShrink 方法,从而大大减少了将图像细节误判为噪声的情况。Chen 等^[9,10]将其推广到了二维情况并投入应用。本文将阈值去噪法与相关去噪法^[11]相结合,同时将 NeighShrink 方法中用到的邻域思想引入到 Contourlet 域图像去噪中。Po 等在文献^[12]中对 Contourlet 系数进行了深入研究,并指出当前 Contourlet 系数与其邻居系数、姐妹系数和父系数之间均存在着很强的相关性,如果能在去噪的过程中考虑到 Contourlet 系数之间的相关性,应该可以取得更好的去噪效果。而如何将这三种相关性应用到图像去噪中,目前的研究成果还比较少。本文在深入研究 Contourlet 系数特性的基础上,提出了一种基于 Contourlet 系数间相关特性的自适应阈值图像去噪算法。该算法以 Contourlet 阈值去噪方法为基础,并充分利用 Contourlet 系数在尺度内和尺度间的相关特性对算法进行改进。

2 基于 Contourlet 系数间相关特性的自适应阈值图像去噪算法

2.1 算法思想

在阈值法去噪中,阈值选取得是否合适直接影响到去噪效果的好坏。若阈值选取得过大,则大量的有用信号将被舍弃;若阈值选取得过小,则不能很好地去除噪声。目前已有的 Contourlet 阈值法去噪中,大多对同一子带内的 Contourlet 系数设定相同的阈值,并未考虑到各个 Contourlet 系数之间的差异。针对上述不足,提出了一种利用当前 Contourlet 系数的邻居系数(尺度内相关性)来自适应地调整阈值的方法,使每个 Contourlet 系数都有各自不同的阈值,这样的阈值选取更加准确。

另外,系数的大小并不能准确区分信号与噪声,无论如何选择阈值,都必定会将部分数值较小的信号系数误判为噪声系数,导致在去除噪声的同时丢失了图像的部分细节,如图像的边缘特征等。因此,在采用阈值法对 Contourlet 系数进行取舍的

同时,引入当前系数与其父系数的乘积作为关联系数,将关联系数的大小作为对当前系数进一步取舍的依据。使得本文算法既具有阈值法有效去除噪声的优点,又具有相关法可以很好地保留图像边缘信息的优势。

2.2 算法设计

假设 $c_{j,k}$ 为一高频 Contourlet 系数, $A_{j,k}$ 是以 $c_{j,k}$ 为中心的一个大小 3×3 的邻域窗口,如图 1 所示。可见, $A_{j,k}$ 是一个包含当前 Contourlet 系数和其邻居系数的一个矩形框。

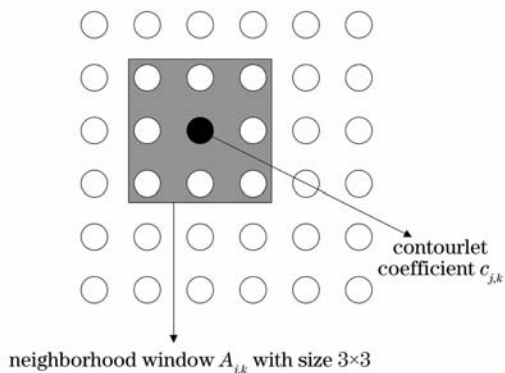


图 1 Contourlet 系数 $c_{j,k}$ 与邻域窗口 $A_{j,k}$ 的位置关系

Fig. 1 Relationship between contourlet coefficient $c_{j,k}$ and neighborhood window $A_{j,k}$

令 $S_{j,k}^2$ 为 $A_{j,k}$ 内所有 Contourlet 系数的平方和,即

$$S_{j,k}^2 = \sum_{(i,l) \in A_{j,k}} c_{i,l}^2. \quad (1)$$

上述操作以子带为处理单元,如果当前 Contourlet 系数 $c_{j,k}$ 在子带的边缘,则其邻居系数会超出子带边界。处理时,对于超出子带边界的邻居系数,用子带内距离该系数最近的系数代替。

选取阈值时,首先确定一个基本阈值 $\lambda = \sigma \sqrt{2 \lg(MN)}$,其中 σ 为噪声标准差, $M \times N$ 为当前 Contourlet 系数所在子带的大小。

基本阈值 $\lambda = \sigma \sqrt{2 \lg(MN)}$ 在各个子带内是统一的,但各个子带中 Contourlet 系数可能具有不同的特性。为了达到阈值自适应调整的目的,可以考虑在基本阈值上乘以一个调整因子 $\mu_{j,k}$,使阈值随着 Contourlet 系数的特点自适应地调整。本文利用当前 Contourlet 系数的邻居系数的不同特点来调整 Contourlet 系数的阈值。对于每一个 Contourlet 系数 $c_{j,k}$,将其自适应阈值设置为

$$\lambda_{j,k} = \mu_{j,k} \lambda, \quad (2)$$

其中 $\mu_{j,k} = \sqrt{c_{j,k}^2/S_{j,k}^2}$ 为调整因子, $\lambda = \sigma \sqrt{2\lg(MN)}$ 为基本阈值。

阈值的选取实际上是一个博弈的过程, 阈值策略最大的目标是: 对于噪声系数, 阈值应尽可能大以有效去除噪声; 而对于信号系数, 阈值应尽可能小以便更好地保留图像的细节。提出的上述自适应阈值很好地解决了两者之间的矛盾。

在对 Contourlet 系数进行取舍时, 采取如下策略:

当前 Contourlet 系数的绝对值大于设定的自适应阈值时, 按下式进行收缩。

$$\hat{c}_{j,k} = c_{j,k} \sqrt{(1 - \lambda^2/S_{j,k}^2)}, \quad |c_{j,k}| \geq \lambda_{j,k} \quad (3)$$

当前 Contourlet 系数的绝对值小于设定的自适应阈值时, 若当前 Contourlet 系数的父系数不存在(说明当前系数所在尺度为最粗糙尺度), 则将当前 Contourlet 系数置零; 若当前 Contourlet 系数的父系数存在, 则将当前系数与其父系数相乘得到关联系数, 归一化后与当前系数进行比较, 根据比较的结果确定当前 Contourlet 系数的取舍。该策略可以更有效地保留图像的细节信息, 使图像的主观效果更好。

2.3 算法步骤

基于 Contourlet 系数间相关特性的自适应阈值图像去噪算法的具体实现步骤为:

步骤 1: 含噪图像进行 Contourlet 变换。

步骤 2: 计算自适应阈值。

首先设定基本阈值 $\lambda = \sigma \sqrt{2\lg(MN)}$, 然后计算当前 Contourlet 系数的调整因子 $\mu_{j,k} = \sqrt{c_{j,k}^2/S_{j,k}^2}$, 其中, $c_{j,k}^2$ 为当前 Contourlet 系数的平方, $S_{j,k}^2$ 为 3×3 邻域窗口内 Contourlet 系数的平方和。计算当前 Contourlet 系数的自适应阈值 $\lambda_{j,k} = \mu_{j,k}\lambda$ 。

步骤 3: 若 $|c_{j,k}| > \lambda_{j,k}$, 则 $\hat{c}_{j,k} = c_{j,k} \times \sqrt{(1 - \lambda^2/S_{j,k}^2)}$, 执行步骤 7; 若 $|c_{j,k}| \leq \lambda_{j,k}$, 执行步骤 4。

步骤 4: 若当前 Contourlet 系数的父系数不存在, 则 $\hat{c}_{j,k} = 0$, 执行步骤 7; 若当前 Contourlet 系数的父系数存在, 执行步骤 5。

步骤 5: 计算关联系数 $R_{j,k} = c_{j,k} \cdot p_{j,k}$, 其中 $p_{j,k}$ 表示当前 Contourlet 系数 $c_{j,k}$ 的父系数。为了使关联系数 $R_{j,k}$ 与当前系数 $c_{j,k}$ 在总体上具有相同能量, 以增加其可比性, 对关联系数进行如下修正:

$$\bar{R}_{j,k} = R_{j,k} \cdot \sqrt{n_c/n_R}, \quad \text{其中 } n_R = \sum_{j,k} R_{j,k}^2, \quad n_c = \sum_{j,k} c_{j,k}^2。$$

步骤 6: 若 $\bar{R}_{j,k} < \rho \cdot |c_{j,k}|$, 则 $\hat{c}_{j,k} = 0$; 若 $\bar{R}_{j,k} \geq \rho \cdot |c_{j,k}|$, 则 $\hat{c}_{j,k} = c_{j,k} \sqrt{(1 - \lambda^2/S_{j,k}^2)}$ 。其中 ρ 可以根据具体情况选取。经过大量实验发现, 当 $\rho = 0.1\sigma \sim 0.3\sigma$ 时, 去噪效果较好。

步骤 7: 将邻域窗口滑动至下一个高频 Contourlet 系数, 重复执行步骤 2 至 6, 直至所有高频 Contourlet 系数处理完毕。

步骤 8: 采用低频 Contourlet 系数和处理后的高频 Contourlet 系数 $\hat{c}_{j,k}$ 进行 Contourlet 逆变换, 重构出原始图像。

下面针对步骤 2 中邻域窗口大小选择的问题作一简单说明。窗口大小直接决定调整因子 $\mu_{j,k}$ 的大小, 若窗口太小(如 1×1), 则意味着 $\mu_{j,k} = 1$, 此时 Contourlet 系数的“过处理”问题并未得到解决; 但若窗口太大(如 7×7), 则调整因子 $\mu_{j,k}$ 可近似认为接近 $1/7$, 此时不能很好地滤掉噪声系数, 会出现“欠处理”问题, 文献[10]对此进行了较深入的讨论。本文选择 3×3 邻域窗口取得较好的效果。另外, 窗口的形状也可以选择, 除正方形外, 也可选择菱形等, 如文献[13]。

3 实验结果

为了检验本文算法的正确性和有效性, 采用大小为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的 Lena 图像作为测试图像, 并加入不同级别的零均值高斯白噪声。将 Contourlet 软阈值去噪法、Contourlet 硬阈值去噪法、小波 NeighShrink 去噪法与本文算法进行比较。在 Contourlet 软阈值去噪法和硬阈值去噪法中, 均选取 Donoho 等提出的统一阈值。对于 Contourlet 变换, 分解为 4 个不同尺度, 按尺度由粗糙到精细的顺序, 每个尺度上分解的方向子带数依次为 (4, 4, 8, 8), 满足 Contourlet 变换各向异性的条件。LP 和 DFB 分别选取工具包中的“9-7”和“pkva”, k 取 0.15σ 。为便于比较, 对于小波变换, 滤波器仍选“9-7”双正交小波滤波器, 也分解为 4 个不同尺度。

Lena 图像在不同噪声水平下使用不同方法去噪后的峰值信噪比(PSNR)值如表 1 所示。图 2 给出了 Lena 图像在噪声标准差 $\sigma = 30$ 的高斯白噪声条件下, 不同去噪方法去噪效果对比图。为了更直观地对比不同方法的去噪效果, 我们还描绘了

Lena 图像使用不同方法去噪后的 PSNR 曲线, 如图 3 所示。

表 1 Lena 图像使用不同方法去噪后的 PSNR 值比较(dB)

Table 1 Comparison of PSNRs in dB with different denoising methods

σ	Noisy image	Contourlet soft-thresholding	Contourlet hard-thresholding	Wavelet Neigh Shrink	Proposed method
10	28.12	27.49	30.28	33.52	33.63
15	24.63	25.91	28.42	31.55	31.76
20	22.11	24.97	27.12	30.15	30.40
25	20.18	24.30	26.13	29.07	29.39
30	18.58	23.77	25.49	28.23	28.53
35	17.27	23.41	24.84	27.54	27.86
40	16.08	23.10	24.32	26.93	27.25
45	15.06	22.91	23.81	26.38	26.57
50	14.16	22.70	23.65	25.91	26.09



图 2 Lena 图像的去噪效果。(a) 原始图像; (b) 含噪图像; (c) Contourlet 软阈值去噪; (d) Contourlet 硬阈值去噪; (e) 小波 NeighShrink 去噪; (f) 本文算法

Fig. 2 Denoising results for Lena image. (a) Original image; (b) Noisy image; (c) Contourlet soft-thresholding; (d) Contourlet hard-thresholding (e) Wavelet NeighShrink (f) Proposed method

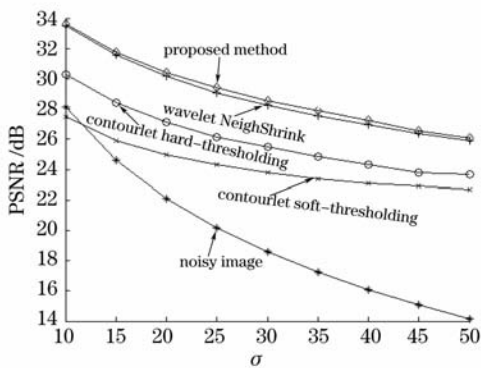


图 3 含噪图像和使用不同方法去噪后图像的 PSNR 值比较

Fig. 3 Comparison of PSNR between noisy image and denoised images using different denoising methods

通过对比表 1 中的数据和观察图 3 中的曲线可以看出, 在上述去噪方法中, 本文提出的去噪算法较之其它三种经典去噪方法去噪后的图像有着最高的 PSNR 值。而且通过观察图 2 也可以发现, 使用 Contourlet 软阈值去噪法去噪后的图像过于平滑, 造成了图像边缘严重模糊等失真现象, 而且当图像含噪水平较低时, 去噪后图像的信噪比反而低于去噪前图像的信噪比; Contourlet 硬阈值去噪法虽可以很好地保留图像的边缘等局部信息, 但是会出现振铃、伪吉布斯效应, 导致很差的视觉效果; 小波 NeighShrink 法由于考虑到了小波系数的邻域特性, 也取得了较好的去噪效果。相比而言, 本文算法的主客观去噪效果最好。

4 结 论

本文算法充分考虑到 Contourlet 变换系数的内在关联特性,并可自适应地调整阈值,兼有软阈值去噪法和硬阈值去噪法的优点,在有效去除噪声的同时,能很好地保留图像的细节和纹理,并获得好的视觉效果,尤其是对那些包含丰富的细节和纹理的图像,其优越性更加明显。但该算法由于要对每一个 Contourlet 系数设定各自不同的阈值和做相关运算,因此计算复杂度相对较高。如何能在取得较好的去噪效果的同时,尽量不增加运算复杂度,是值得进行后续研究的一个内容。

参 考 文 献

- 1 Jiao Licheng, Tan Shan. Development and prospect of image multiscale geometric analysis[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, **31**(12A): 43~50
焦李成,谭山. 图像的多尺度分析:回顾和展望[J]. *电子学报*, 2003, **31**(12A): 43~50
- 2 Do M N. Directional multiresolution image representations[D]. Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, December 2001
- 3 Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2005, **14**(12): 2091~2106
- 4 Tan Yihua, Tian Jinwen, Liu Jian. Adaptively wavelet-based image denoising algorithm with edge preserving[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2): 80~83
- 5 Eslami R, Radha H. Translation-invariant contourlet transform and its application to image denoising[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2006, **15**(11): 3362~3374
- 6 Zhang Jingjing, Fang Yonghua. Novel denoising method for remote sensing image based on contourlet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 462~466
张晶晶,方勇华. 基于 Contourlet 变换的遥感图像去噪新算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 462~466
- 7 Dai Wei, Yu Shenglin, Sun Shuan. Image de-noising algorithm using adaptive threshold based on contourlet transform[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, **35**(10): 1939~1943
戴维,于盛林,孙栓. 基于 Contourlet 变换自适应阈值的图像去噪算法[J]. *电子学报*, 2007, **35**(10): 1939~1943
- 8 Cai T T, Silverman B W. Incorporating information on neighbouring coefficients into wavelet estimation[J]. *The Indian Journal of Statistics*, 2001, **63**(B): 127~148
- 9 Chen G Y, Bui T D, Krzyzak A. Image denoising using neighboring wavelet coefficients[C]. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004, II: 917~920
- 10 Zhao Ruizhen, Hu Zhanyi. Wavelet NeighShrink method for grid texture removal in image of solar radio bursts[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(1): 198~201
赵瑞珍,胡占义. 太阳射电爆发中图像网纹消除的小波 NeighShrink 方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(1): 198~201
- 11 Xu Y, Weaver J, Healy M. Wavelet transform domain filters: a spatially selective noise filtration technique[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1999, **3**(6): 747~758
- 12 Po D D. -Y., Do M N. Directional multiscale modeling of images using the contourlet transform [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2006, **15**(6): 1610~1620
- 13 Zeng Guoping, Zhao Ruizhen. Image denoising using least squares wavelet support vector machines[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11): 632~635