

改进的两步迭代阈值的遥感图像恢复算法

刘卫华, 何明一

(西北工业大学电子信息学院, 西安 710129)

摘要: 结合小波变换和 Contourlet 变换的多尺度、多分辨的共性及这两种变换分别适合处理点奇异和线奇异的特点, 提出了一种新的联合使用小波正则项和 Contourlet 正则项的遥感图像恢复算法。算法中逆问题的求解等价于一个无约束凸规划的求解问题, 目标函数由观测图像的拟合优度和正则项组成, 传统的正则项是一个函数, 本文使用两个正则项函数, 能更好地利用图像的先验知识。然后根据 Besov 空间的半范数等价于小波系数的范数这一原理, 提出了基于小波变换的联合使用小波正则项和 Contourlet 正则项的两步迭代阈值算法。对遥感图像的恢复结果表明, 该算法在改善的信噪比 (ISNR) 和相关系数 (CORR) 等评价指标上都有显著的改善。

关键词: 小波变换; Contourlet 变换; 两步迭代阈值算法; 遥感图像恢复

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8961(2010)09-1406-05

Remote sensing image restoration based on improved two-step iterative thresholding algorithm

LIU Weihua, HE Mingyi

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129)

Abstract: Combined the common properties of wavelet and Contourlet transforms (multi-scale, multi-resolution and the different properties of their adaptivity to point-singularity and line-singularity respectively) a novel remote sensing image restoration algorithm based on two-step iterative thresholding was proposed. Inverse problem can be regarded as a class of the convex unconstrained optimization problem. The objective function is composed of the believe measure to original image and regularization item. The traditional algorithm has only one regularization item, but we proposed two regularization items so as to better use the prior knowledge of the image. The theorem is that the half norm in Besov space is equal to the norm in wavelet domain. Then the two-step iterative thresholding algorithm combined with wavelet regularization item and contourlet regularization item is proposed. The method is received obvious effect in remote sensing image restoration. The experiment results on remote sensing image restoration show that the proposed method achieves significant improvement in improved signal-noise ratio (ISNR) and correlation coefficient (CORR).

Keywords: wavelet transform; contourlet transform; two-step iterative thresholding method; remote sensing image restoration

0 引言

由于遥感图像的获取受成像系统物理条件和成像时天气条件影响, 在成像过程中存在一系列退化

过程, 因此对遥感图像进行恢复是进行其他后续处理的一个预处理工作, 具有重要的实际意义。目前国内外关于遥感图像的恢复可以分为点扩散函数 (PSF) 已知和未知两种情况。在 PSF 已知的情况下, 可以利用 wiener 滤波或者矩阵求逆直接恢复;

基金项目: 国家自然科学基金 (60736007)。

收稿日期: 2009-06-23; **改回日期:** 2009-11-03

第一作者简介: 刘卫华 (1977—), 女。现为西北工业大学电子信息学院在读博士研究生。研究方向为图像处理、图像的去噪和恢复、小波变换等。E-mail: l_w_hua@hotmail.com。

但如果 PSF 未知,不能利用以上方法恢复。通常情况下,给出 PSF 的初始估计,交替求解 PSF 和理想的目标图像,这种方法称为迭代盲解卷积方法^[1],或目标函数(即代价函数)正则化优化(极大极小优化)方法^[2]。对此类问题的求解一般采用迭代算法^[3](IST),但这类迭代阈值算法的收敛率依赖于线性观测算子,当算子是病态的或者条件数很小时,收敛速度极慢。José 对其改进,提出两步迭代阈值算法^[4](TwIST),在线性算子是病态的情况下其收敛速度还是非常快。

文献[4]中, José 对图像进行小波变换,代价函数中的正则项使用图像小波变换系数的某种范数,进行两步迭代阈值处理。虽然小波变换具有时频局域化和多尺度、多分辨的特点,在分析点状瞬态特征的奇异性时是最优的,但对表示图像结构的直线、曲线奇异性时却不是最优的。为解决小波的这一局限性,Contourlet 变换是为分析 2 维或更高维奇异而产生的一种新工具。Contourlet 变换^[5]能捕捉到图像的方向信息和本质的几何结构信息,提取到更多的图像细节,但它不具有平移不变性,且采样导致频谱泄露和混叠。非下采样 Contourlet 变换解决了下采样 Contourlet 变换不具有的平移不变性这一问题,处理效果也有改善,但计算量非常大。本文经过多次实验,综合考虑恢复效果和计算量,选择对模糊图像采用基于小波变换的两步迭代阈值算法,联合使用小波正则项和 Contourlet 正则项,对遥感图像进行恢复。从实验数据来看,改进的信噪比(ISNR)和相关系数(CORR)都高于文献[4]方法,视觉效果也有明显改善。

1 求逆问题的小波域正则化方法

逆问题在信号处理和图像处理的许多领域有重要的应用,例如遥感和雷达图像领域。图像恢复是图像处理中最早和经典的线性逆问题。在逆问题中,我们的目的是想从观测图像 \mathbf{y} 中估计出未知的初始图像 \mathbf{x} ,给定的是作用于初始图像的点扩散函数(PSF) \mathbf{h} ,当 \mathbf{h} 是线性算子时称这种逆问题是线性逆问题。当假定成像系统的 PSF 是空间不变时,成像过程可以用矩阵向量形式表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{n} \sim N(0, \sigma^2)$ 是随机的加性高斯白噪声, \mathbf{H} 表示由 PSF 构成的矩阵。

通常情况下求解 \mathbf{x} 的过程可以看成求解无约束凸规划的过程,即求凸的目标函数 $f(\mathbf{x})$ 的最小值:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2 + \lambda\varphi(\mathbf{x}) \quad (2)$$

式中,第 1 项表示观测数据的拟合优度;第 2 项为正则项(φ 为惩罚函数),在其中可以加入对原始图像一些期望的特性来约束所得到的解,即加入一些先验信息; $\lambda \in [0, +\infty]$ 为正则化参数,起到调节的作用。

正则化方法在求目标函数最小的过程中避免了对算子直接求逆,从而克服了 \mathbf{H} 是病态的情况,这种方法是求解逆问题的比较通用和实用的方法。因为有界变差的函数空间 $BV(\Omega)$ 允许边缘的不连续性,可以很好地保护边缘,文献[2]基于全变差正则化的最大最小化方法(TVmm)用于图像恢复取得了较好的效果。本文也选取全变差算子作正则项,即

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2 + \lambda \sum_i \sqrt{(\Delta_i^h \mathbf{x})^2 + (\Delta_i^v \mathbf{x})^2} \quad (3)$$

如果直接利用梯度下降法对此类问题求解,计算复杂度很高而且容易引起阶梯效应,产生虚假的边缘。针对此不足,根据文献[6]提出的结论:空间 $B_{1,1}^1$ 非常接近空间 BV ,用 Besov 半范数取代全变差范数,提出了一种基于 Besov 空间的图像复原算法,降低了算法的复杂度。则式(3)写为

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2 + \lambda \|\mathbf{x}\|_{B_{1,1}^1(\Omega)} \quad (4)$$

又因 Besov 空间的半范数等价于小波系数的范数^[6],因此,式(4)中对应的范数可以表示为

$$\|\mathbf{x}\|_{B_{1,1}^1(\Omega)} \approx \sum_{k \in J_{j_0}} |\mathbf{x}_k| \quad (5)$$

其中, J_{j_0} 表示图像在小波域的子带系数个数; \mathbf{x}_k 表示第 k 个子带的小波系数。则式(4)最终可以写为

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2 + \lambda \sum_{k \in J_{j_0}} |\mathbf{x}_k| \quad (6)$$

进而可以根据目标函数的导数为零的点就是最小值点求得局部极小值。这样将全变差复原问题中复杂的求解偏微分问题转化为简单的小波软阈值问题,提高了运算效率,减少了图像的阶梯现象。

2 Contourlet 变换

小波变换在分析点奇异性时是最优的,但由于基函数的各向同性导致其方向选择性较差,因此在

表示图像结构的线奇异性时不能达到最优,不能有效地捕捉轮廓信息,因此,变换不能充分利用图像的几何特性。Contourlet 变换^[5]利用 Laplacian 塔形分解(LP)和方向滤波器组(DFB)实现了一种多分辨、多尺度、多方向的图像表示方法,由于具有很好的方向性和各向异性,该方法抓住了图像的几何结构,能准确地将图像中的边缘捕获到不同尺度、不同频率的子带中。但 Contourlet 变换在 Laplacian 塔形分解和方向滤波带分解中都有上下采样,所以该变换不是平移不变的。

Cunha 等人于 2005 年提出非下采样的 Contourlet 变换^[7](NSCT)是基于一个非下采样的塔型结构和非下采样的方向滤波带分解,生成一种灵活的多尺度、多方向且平移不变的图像分解方法,NSCT 对应的滤波带具有更好的频域选择性和规则性。

图像的边界和纹理含有丰富的细节信息,特别是对于图像的高层处理有重要作用,因此,要尽量多的保留图像的边界和纹理信息。小波变换适合处理图像的点奇异部分,而 Contourlet 变换适合处理图像的边界和纹理,这个结论也是经过实验证实的^[8]。Contourlet 变换具有两大优点:一是细节分类,具有近似方向和频率的边界和纹理在同一个方向子带中;二是边界保持,边界和纹理的信息由少量大幅值的频率系数表示。

3 结合小波正则项和 Contourlet 正则项的两步迭代阈值算法

3.1 算法流程

在基于小波域正则化的基础上,增加一个 Contourlet 正则项,式(6)改写为

$$\min_x f(x) = \frac{1}{2} \|y - Hx\|^2 + \tau_1 \sum |(x)_{wt}| + \tau_2 \sum |(x)_{ct}| \quad (7)$$

其中, $()_{ct}$ 代表 Contourlet 域各子带的分解系数, $()_{wt}$ 代表小波域各子带的分解系数。这样增加了一个正则项,也就能更好地利用原图像的先验知识,从而加快迭代速度。

为求得目标函数的最小值,先求局部极小值,然后穿插两步迭代算法和一步迭代算法,以保证每次迭代的目标函数值比上次迭代的目标函数值小,整个过程求的是全局的最低点。两步迭代算法的算法流程如下:

1) 数据初始化

$$x_i = \mathbf{0}; x_{i+1} = \mathbf{0}; x_{i+2} = \mathbf{0};$$

2) 软阈值处理

$$\Gamma_{\lambda/\kappa}(x) = \text{soft}((x)_{wt} + (H^T(f - Hx))_{wt}/\kappa, \lambda/\kappa)$$

$$\kappa \in [1, +\infty); \lambda = (\tau_1 + \tau_2)/2$$

3) 一步迭代得到新值

$$x_{i+1} = \Gamma_{\lambda}(x_i)$$

$$f_{i+1} = \frac{1}{2} \|f - Hx_{i+1}\|^2 + \tau_1 \sum |(x_{i+1})_{wt}| + \tau_2 \sum |(x_{i+1})_{ct}|$$

4) 若目标函数 f_{i+1} 满足终止条件 $\frac{|f_{i+1} - f_i|}{f_i} < A$, 则迭代终止,输出结果,否则,进行第 5) 步;

5) 两步迭代得到新值

$$x_{i+2} = (1 - \alpha)(x_i)_{wt} + (\alpha - \beta)(x_{i+1})_{wt} + \beta \Gamma_{\lambda/\kappa}((x_{i+1})_{wt})$$

$$f_{i+2} = \frac{1}{2} (\|f - Hx_{i+2}\|^2) + \tau_1 \sum |(x_{i+2})_{wt}| + \tau_2 \sum |(x_{i+2})_{ct}|$$

这里, $\alpha, \beta \in (0, 1)$, 具体取值参见文献[4];

6) 若目标函数 f_{i+2} 收敛且不满足终止条件,则转向第 5) 步,继续两步迭代;若收敛且满足终止条件则迭代终止,输出结果;若不收敛则转向第 3) 步。

3.2 正则项的选择

小波变换在处理奇异点时效果是最好的, Contourlet 变换具有方向选择性因而处理奇异线时效果最好,非下采样的 Contourlet 变换具有平移不变性,这些变换同时具有多分辨、多尺度的特性,既有共同点也有不同点,本文对这些变换进行不同组合,综合考虑计算量和恢复的性能,选取最优的图像恢复算法。

表 1 中,“wt”表示基于小波变换的两步迭代算法并且正则项只有一个小波正则项;“wt_ct”表示基于小波变换的两步迭代算法并且正则项是小波正则项和 Contourlet 正则项;“wt_nsct”表示基于小波变换的两步迭代算法并且正则项是小波正则项和非下采样的 Contourlet 正则项;“nsct”表示基于非下采样的 Contourlet 的两步迭代算法,并且正则项是非下采样的 Contourlet 正则项;“nsct_wt”表示基于非下采样的 Contourlet 的两步迭代算法并且正则项是非下采样的 Contourlet 正则项和小波正则项。本次实验选取标准测试图像 Barbara, 对其用标准差为 10 的高斯函数模糊后再加上方差为 0.001 的高斯白噪声,选

代终止条件 $A = 0.01$, 衡量恢复性能的指标选择改善的信噪比 (ISNR)、相关系数 (CORR) 和运行时间 (time)。

从表 1 中的实验结果上看, 综合考虑计算时间和恢复效果, 基于小波变换的两步迭代算法并且正则项是小波正则项和 Contourlet 正则项的方法性价比最高。

表 1 不同方法的恢复性能比较

Tab. 1 The comparison of several algorithms for image Barbara

	wt	wt_ct	wt_nsct	nsct	nsct_wt
ISNR/dB	2.54	2.92	2.31	3.33	3.22
CORR(0~1)	0.96	0.97	0.96	0.97	0.97
time/s	14	26	596	13 025	13 503

3.3 正则项系数的选择

选取基于小波的两步迭代阈值算法, 正则项是小波正则项和 Contourlet 正则项, 正则项的系数反映了两种不同的正则项在目标函数这个表达式中所占的比重。对标准测试图像 Barbara, 遥感图像 lake, 遥感图像 003, 遥感图像 005, 分别进行测试, 通过图 1 得到经验性的结论: 正则项系数 (τ_1, τ_2) 选取 $(0.000 01, 0.000 01) \sim (0.000 03, 0.000 03)$, 图像恢复效果最好, 这说明两个正则项的比重对等效果较好。

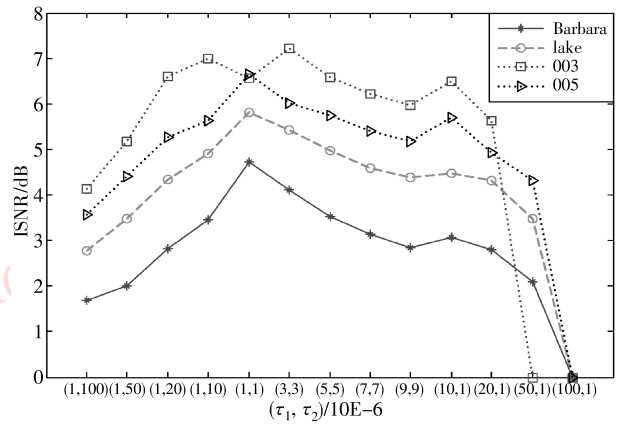


图 1 正则项系数与恢复性能的曲线

Fig. 1 The graphs of the regularization coefficients and the restoration performance

4 实验结果

选取多幅美国宇航局公布的遥感图像进行测试 (图 2), 列出图像 003 (512 × 512) 和 lake (256 × 256) 的实验结果 (图 3)。原始图像的灰度值是经过归一化后的, 即灰度值范围是 0 ~ 1, 然后对图像进行模糊卷积和噪声的加入。考虑到遥感图像的模糊函数多半是高斯函数, 选用标准差为 10 的高斯函

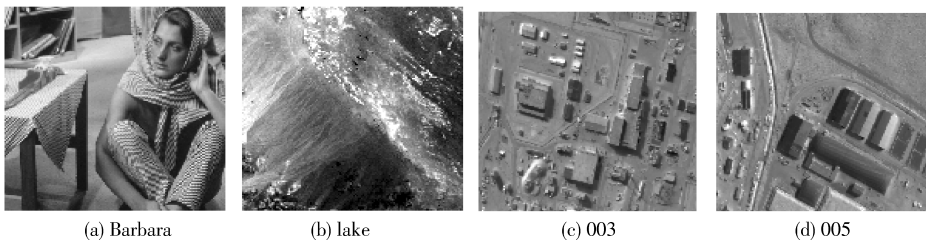


图 2 本文所用测试图像

Fig. 2 The test images in the paper

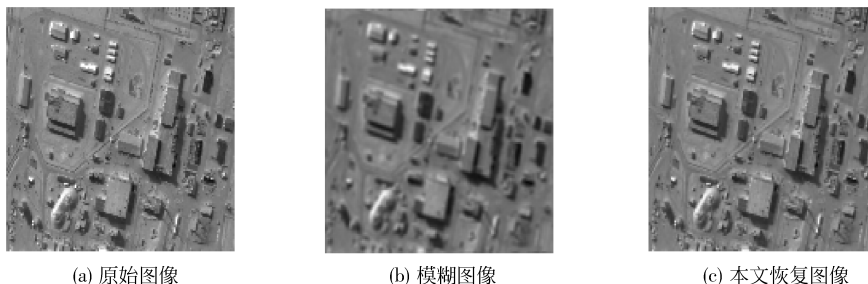


图 3 图像 003 恢复前后的视觉图

Fig. 3 The vision of image 003 before and after restoration

数模糊后再加上方差为 0.001 的高斯白噪声。在基于小波的两步迭代算法中,参照文献[4]提供的程序。

遥感图像 003 包含较多的房屋、道路,存在较多的直线边缘,同时图像还含有较多的奇异点,因此图像是各向异性的。从表 2 的数据来看,本文算法效果较好,其改善的信噪比 (ISNR) 和相关系数 CORR 略高于文献[4]的算法,其中 ISNR 比文献[4]能好 0.5dB, CORR 提高 0.002,而文献[4]是当前效果较好的算法。笔者曾把基于小波的两步迭代算法推广到非下采样的 Contourlet 域,恢复效果较好,但计算量巨大。从计算复杂度上考虑,本文算法和文献[4]算法计算复杂度相当,但是算法“nsct”和“nsct_wt”的计算时间都是本文计算时间的 130 多倍。从计算方法的性价比上考虑,这种方法比较有实际意义。

表 2 遥感图像恢复后的评价指标

Tab. 2 The comparison of several algorithms for remote sensing images

	图像 003			图像 lake		
	ISNR/dB	CORR	time/s	ISNR/dB	CORR	time/s
wt ^[4]	6.72	0.983	17	4.91	0.973	7
wt_ct	7.21	0.985	105	5.43	0.977	35
wt_nsct	6.13	0.981	2 745	4.51	0.971	1 575
nsct	8.26	0.988	13 057	4.40	0.970	2 681
nsct_wt	8.21	0.988	14 642	4.40	0.970	2 731

图像 lake 含有较多的奇异点,较少的奇异线,而且图像特征比较复杂,边界不明显,纹理不清楚,综合运用 Contourlet 正则项和小波正则项,恢复效果较好。从表 2 的实验数据来看,本文算法好于文献[4]的算法,其中 ISNR 改善了 0.5 dB, CORR 改善了 0.004,也好于基于非下采样 Contourlet 变换的两步迭代阈值算法,ISNR 比这种算法要提高 1dB。

5 结 论

本文提出了一种新的联合使用小波正则项和 Contourlet 正则项的遥感图像恢复算法,其计算量小并且图像恢复效果较好。但是文中对于正则项系数的选择只是得到经验性的结论,还有待继续研究。

参考文献 (References)

- [1] Li Chen, Kim-hui Yap. A soft double regularization approach to parametric blind image deconvolution [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(5): 624-633.
- [2] Bioucas-Dias JM, Figueiredo MAT, Oliveira JP. Adaptive total variation image deconvolution: A majorization-minimization approach [C/OL] //Proceedings of the 14th European Signal Processing Conference. [2009-03-28]. http://www.lx.it.pt/~mtf/dias_figueiredo_oliveira_EUSIPCO06.pdf. 2006.
- [3] Dirk A. Lorenz. Wavelet shrinkage in signal and image processing – an investigation of relations and equivalences [D]. Beremer Modell, Germany; University of Bremen, 2004.
- [4] Bioucas-Dias JM, Figueiredo MAT. A new TwIST: two-step iterative shrinkage thresholding algorithms for image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(12): 2992-3004.
- [5] Po D D Y, Do M N. Directional multiscale modeling of images using the contourlet transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(6):1610-1620.
- [6] Chambolle A, Devore RA, Lee NY, et. al. Nonlinear wavelet image processing: variational problems, compression, and noise removal through wavelet shrinkage [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(3): 319-335.
- [7] Cunha AL, Zhou J, Do MN. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [8] Liu Weihua, He Mingyi, Shui Penglang, et al. Residue-based fusion of denoised images by different filter banks [C]// Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Electronics and Applications, New York: IEEE, 2009: 2420-2423.