

基于空间自适应变分的条带噪声去除方法

刘亚梅

(长春工业大学, 吉林 长春 130012)

摘 要:遥感图像经常被条带噪声污染,导致图像质量下降。为了去除条带噪声,本文提出了一种基于空间自适应变分的噪声抑制方法。首先,对条带噪声建模,并利用信噪比较高的区域估计出模型的增益和偏置;然后,在变分法的框架下,构建能量函数,并引入空间自适应正则因子,根据图像空间信息自适应调整正则参数;最后,采用分裂式 Bregman 算法优化能量函数,得到去噪图像的最优解。实验表明,本文算法可以将实际遥感图像等效视数由 37.26 提高到 76.48,辐射质量提升因子提高到 8.52 dB。本文算法能够有效去除条带噪声,保留图像细节,改善图像质量。

关键词:遥感;条带噪声;空间自适应;全变分

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.05.021

Destriping method based on spatial adaptive total variation

LIU Ya-mei

(Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: Remote sensing images often suffer from stripes, which degrades the image quality. To remove stripes, a new destriping method based on spatial adaptive total variation is proposed. Firstly, the stripe model is built and the gain and bias of the model are estimated with high SNR regions. Then, an energy function is designed under the framework of total variation and an adaptive regulation parameter is introduced, which adapts to the spatial varying information. At last, the split Bregman approach is exploited to optimize the minimization problem. Experiment results demonstrate that the proposed method can improve the equivalent number of looks (ENL) from 37.26 to 76.48, and the improvement factor (IF) of radiometric quality is improved to 8.52 dB. The proposed method can effectively remove stripes and preserve detail information.

Key words: remote sensing; stripe noise; spatially adaptive; total variation

1 引 言

推扫式成像系统经常受到条带噪声的影响^[1-2]。条带噪声主要源于不同像元之间的辐射响应非均匀性^[3]。条带噪声的存在,影响图像的视觉效果,降低图像的信噪比和后续数据分析的精度^[4-5]。因此,研

究有效去除条带噪声算法至关重要。

去除条带噪声算法主要可以分为以下四类。第一类方法是滤波法,包括空间域滤波法和变换域滤波法^[6]。这类方法相对简单,易于实现,但容易损失图像细节。第二类方法是匹配法,包括直方图匹

作者简介:刘亚梅(1970-),女,硕士,主要从事光机电系统的研究。E-mail:liuyamei1970@126.com

收稿日期:2015-09-06;**修订日期:**2015-10-12

配法和矩匹配法。这类方法基于统计一致性的假设,当获得的图像数量较少时,不具有统计意义,去噪效果不佳。第三类方法是变分法^[7],这类方法通过优化能量函数得到最优解。但能量函数中的正则参数对去噪效果影响很大,全局的正则参数不能同时有效地去除噪声和保留图像细节。第四类方法是基于学习的方法,包括稀疏表达算法^[8]和低秩算法^[9]等。这类算法去噪效果较好,但算法时间复杂度很高,不利于工程实现。

针对以上算法中存在的问题,本文提出了一种基于空间自适应变分的去除条带噪声算法。首先,建立噪声模型并估计增益和偏置矩阵;接着,在变分法的基础上,引入包含自适应正则参数的能量函数;最后,利用最优化的方法进行优化求解。该算法不依赖统计一致性的假设,易于工程实现,能够在去除噪声的同时保留图像细节。

2 去条带噪声算法

2.1 噪声模型和参数估计

受条带噪声影响的图像降质模型可以写成如下形式:

$$f = k \cdot u + b + n \quad (1)$$

其中, $f \in R^{M \times N}$ 是观测到的含有条带噪声和高斯噪声的图像, u 是不含噪声的图像, n 代表高斯白噪声, k 和 b 分别代表像元辐射响应非均匀性的增益和偏置矩阵。‘ $\cdot$ ’是矩阵对应元素相乘运算符。为了得到不含条带噪声的图像,首先需要估计出矩阵 k 和 b , 其次再估计出 u 的最优解。

对于包含线阵探测器的推扫式成像系统,不妨假设推扫方向沿竖直方向(y 坐标),则矩阵 k 和 b 分的每列元素分别相等。由于遥感图像视场大、地面景物丰富,因此很容易在图像的每列中选取两个信噪比较高的像素点,根据这两个像素点来估计增益和偏置矩阵。具体地,参考[7]中的算法:首先,求含噪图像关于行的偏导数,在每列偏导数为零的点中,选取灰度值最小的像素点 $f(i_1, j)$ 和最大的像素点 $f(i_2, j)$ 作为参考点;然后,分别计算这两个参考点的四邻域均值 $u(i_1, j)$ 和 $u(i_2, j)$, 作为其真实值;最后,按照下式计算增益和偏置的值:

$$k(j) = [f(i_1, j) - f(i_2, j)] / [u(i_1, j) - u(i_2, j)] \quad (2)$$

$$b(j) = [u(i_1, j)f(i_2, j) - u(i_2, j)f(i_1, j)] / [u(i_1, j) - u(i_2, j)] \quad (3)$$

2.2 空间自适应变分模型

估计出增益和偏置矩阵后,去噪问题转化为:已知 f 、 k 和 b , 根据式(1)求 u 的最优解。这个典型的病态问题可以利用变分模型求解。构造的能量函数为:

$$E(u) = \frac{1}{2} \|k \cdot u + b - f\|_2^2 + \lambda (\|\nabla_x u\|_1 + \|\nabla_y u\|_1) \quad (4)$$

其中,等式右端第一项是保真项,约束去噪后的图像和含噪声图像相似,第二项是正则项,约束去噪后图像在水平和竖直方向光滑。 λ 是正则参数,该参数的意义在于:若 λ 过大,可以有效去除条带噪声,但细节丢失严重;若 λ 过小,可以有效保留细节,但条带噪声去除不彻底。而图像中不同区域空间特性不同,噪声大小也不同。因此,设计有效的空间自适应权值矩阵 w 至关重要。为此,本文引入空间信息指示因子^[10],其定义为:

$$d = \|u_{\eta\eta} - u_{\varepsilon\varepsilon}\| \quad (5)$$

其中, $|\cdot|$ 是取绝对值运算符; $u_{\eta\eta}$ 和 $u_{\varepsilon\varepsilon}$ 分别是梯度方向和垂直于梯度方向的二阶偏导数,即:

$$u_{\varepsilon\varepsilon} = (u_y^2 u_{xx} - 2u_x u_y u_{xy} + u_x^2 u_{yy}) / (u_x^2 + u_y^2) \quad (6)$$

$$u_{\eta\eta} = (u_x^2 u_{xx} - 2u_x u_y u_{xy} + u_y^2 u_{yy}) / (u_x^2 + u_y^2) \quad (7)$$

其中, u_x 、 u_y 和 u_{xx} 、 u_{yy} 、 u_{xy} 分别是关于 x 方向和 y 方向的一阶和二阶偏导数。

空间自适应权值矩阵 w 定义如下:

$$w(i, j) = \frac{\max(d) - d(i, j)}{\max(d) - \min(d)} \quad (8)$$

其中, $\max(d)$ 和 $\min(d)$ 分别代表矩阵 d 中的最大值和最小值。在相对平坦区域,条带噪声明显, $d(i, j)$ 值趋近 $\min(d)$, $w(i, j)$ 值趋近 1, 噪声能够有效去除;在细节丰富的区域,噪声不明显, $d(i, j)$ 值趋近 $\max(d)$, $w(i, j)$ 值趋近 0, 细节能够有效保留。至此,去噪问题转化为如下问题:

$$\min_u \frac{1}{2} \|k. * u + b - f\|_2^2 + \lambda (\|w. * \nabla_x u\|_1 + \|w. * \nabla_y u\|_1) \quad (9)$$

2.3 优化方法

本文利用分裂式 Bregman 算法^[11]解决式(9)中的最优化问题。首先,引入辅助变量 d_x 和 d_y , Bregman 变量 b_x 和 b_y , 即:

$$\min_{u, d_x, d_y, b_x, b_y} \frac{1}{2} \|k. * u + b - f\|_2^2 + \lambda (\|w. * d_x\|_1 + \|w. * d_y\|_1) + \frac{\alpha}{2} \|d_x - \nabla_x u - b_x\|_2^2 + \frac{\beta}{2} \|d_y - \nabla_y u - b_y\|_2^2 \quad (10)$$

接着,将优化问题分解为关于 u 、 d_x 和 d_y 的子问题。

关于 u 的子问题为:

$$\min_u \frac{1}{2} \|k. * u + b - f\|_2^2 + \frac{\alpha}{2} \|d_x^k - \nabla_x u - b_x^k\|_2^2 + \frac{\beta}{2} \|d_y^k - \nabla_y u - b_y^k\|_2^2 \quad (11)$$

这是典型的最小平方问题。求其一阶导并将其置零,整理后有:

$$k. * k. * u^{k+1} + (\alpha \nabla_x^T \nabla_x + \beta \nabla_y^T \nabla_y) u^{k+1} = k. * (f - b) + \alpha \nabla_x^T (d_x^k - b_x^k) + \beta \nabla_y^T (d_y^k - b_y^k) \quad (12)$$

可以用 Gauss-Seidel 方法迭代求解。

关于 d_x 的子问题为:

$$\min_{d_x} \lambda \|w. * d_x\|_1 + \frac{\alpha}{2} \|d_x - \nabla_x u^{k+1} - b_x^k\|_2^2 \quad (13)$$

其解为:

$$d_x^{k+1} = \text{shrink}(\nabla_x u^{k+1} + b_x^k, \frac{\lambda w}{\alpha}) \quad (14)$$

关于 d_y 的子问题,同理有:

$$d_y^{k+1} = \text{shrink}(\nabla_y u^{k+1} + b_y^k, \frac{\lambda w}{\beta}) \quad (15)$$

其中,shrink 代表阈值收缩算子。

最后,更新 Bregman 变量,即:

$$b_x^{k+1} = b_x^k + \nabla_x u^{k+1} - d_x^{k+1} \quad (16)$$

$$b_y^{k+1} = b_y^k + \nabla_y u^{k+1} - d_y^{k+1} \quad (17)$$

按照以上过程迭代 10 次,可以得到去噪图像 u 的最优解。本文中,参数 α 、 β 和 λ 均取 1。算法流程图如图 1 所示。

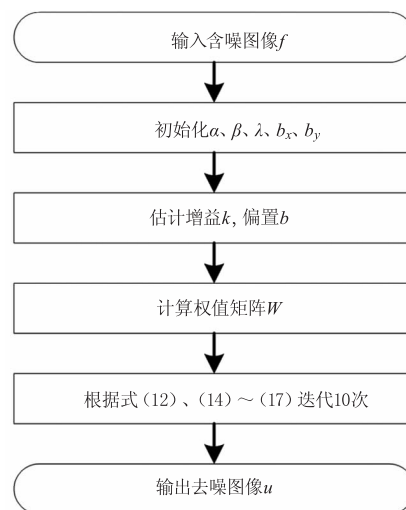
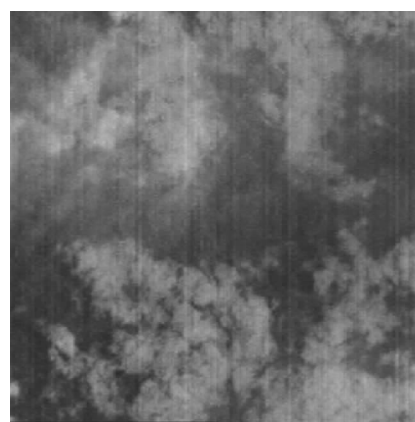


图 1 去噪算法流程图

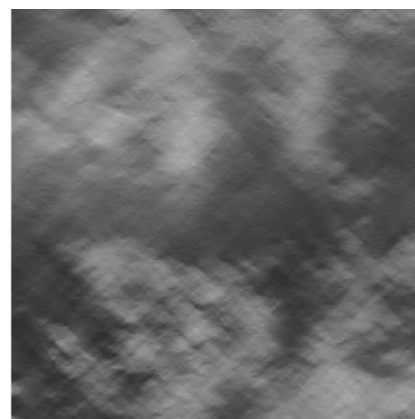
Fig. 1 Flow of the denoising algorithm

3 实验结果和分析

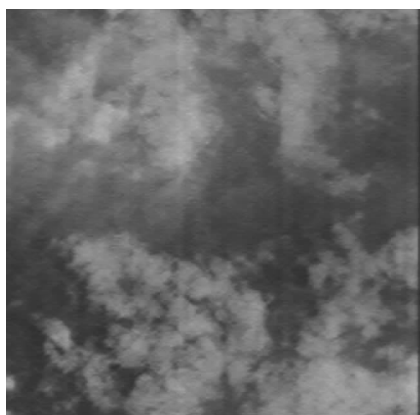
为了验证本文算法的有效性,对 EO-1 遥感图像第 132 波段去噪,并与基于小波变换的滤波法^[6]和全变分法^[7]作对比。为了方便显示,从原始图像中截取 256×256 的子图像,如图 2 所示。



(a) 含噪图像



(b) 小波法



(c) 全变分法



(d) 本文方法

图2 实际遥感图像和去噪结果

Fig. 2 Real remote sensing images and destriping results

从图中可以看出,原始图像含有较严重的条带噪声。基于小波的滤波法较彻底地抑制了条带噪声,但由于该算法损失了竖直方向上的小波细节系数,造成了图像细节丢失,图像质量下降明显。全变分法可以去除大部分条带噪声,但由于正则参数 λ 是全局不变的,在图2(c)中噪声较强区域, λ 值偏小,导致噪声仍有残留,而在纹理较强的区域, λ 值偏大,导致细节丢失,图像变模糊。本文方法由于引入了空间自适应权值矩阵,可以根据噪声和图像细节的不同,自适应调整正则参数,去噪效果最好。

除了主观视觉效果外,本文采用等效视数(ENL)^[7]和辐射质量提升因子(IF)^[12]定量评价去噪效果。等效视数定义为:

$$\text{ENL} = \left(\frac{\mu}{\sigma}\right)^2 \quad (18)$$

式中, μ 和 σ 分别是近似各向同性区域均值和标准差。辐射质量提升因子定义为:

$$\text{IF} = 10 \lg \left[\frac{\sum_j (m_f[j] - m_c[j])^2}{\sum_j (m_u[j] - m_c[j])^2} \right] \quad (19)$$

式中, $m_f[j]$ 、 $m_u[j]$ 和 $m_c[j]$ 分别是含噪图像、去噪图像及高斯低通滤波去噪图像第 j 列均值。ENL和IF越高,代表图像质量越好。客观评价指标如表1所示。

表1 遥感图像客观评价指标对比表

Tab. 1 Quantitative evaluation of remote sensing images

方法	含噪图像	小波法	全变分法	本文方法
ENL	37.26	44.18	61.73	76.48
IF	—	6.23	7.49	8.52

可以看出,本文算法无论是主观视觉效果,还是客观评价指标,均优于已有算法。此外,本文算法时间复杂度低。对于一幅分辨率为 $M \times N$ 的遥感图像,本文算法时间复杂度为 $O(p \times M \times N)$,其中 p 是迭代次数, p 值一般取10。同时,本文算法在运行过程中,不同像素之间没有相互影响,因此方便使用并行计算技术如GPU等硬件实时实现。

4 结论

遥感图像经常受条带噪声污染。本文分析了条带噪声的来源和特性,建立了噪声模型,提出了一种基于空间自适应变分的噪声抑制方法。首先,利用遥感图像视场大的特点,寻找信噪比较高的区域,估计出增益和偏置矩阵;接着,在变分法的框架下,构建能量函数,并根据图像不同区域空间信息的不同自适应调整正则参数;最后,利用分裂式Bregman算法优化求解。实验结果表明,本文算法在主观视觉质量和客观评价指标上均优于已有算法。本文算法可以有效地去除条带噪声,同时保留图像细节信息。此外,本文算法时间复杂度低,易于并行实时实现。

参考文献:

- [1] WANG Shuai, YU Jinsong, JIANG Yang. Research on noise assessment algorithm of complex texture images [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(5): 567–571. (in Chinese)
王帅,于劲松,姜杨. 复杂纹理图像的噪声评估技术研究 [J]. 激光与红外, 2014, 44(5): 567–571.
- [2] HUANG Wanghua, WANG Qinruo, XU Weichao, et al.

- Robust digital imaging spearman's rho correlation for pepper and salt noise[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(6):1800–1806. (in Chinese)
- 黄旺华,王钦若,徐维超,等. 对椒盐噪声稳健的数字图像斯皮尔曼秩次相关法[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6):1800–1806.
- [3] SUN Hui, XU Shuyan, SUN Shouhong, et al. Research on evaluation method of optical imaging sensors' photon response non-uniformity noise [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4):186–191. (in Chinese)
- 孙慧,徐抒岩,孙守红,等. 光电成像传感器光子响应非均匀性噪声评价方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4):186–191.
- [4] ZHANG Chengbin, WANG Kaifu. Algorithm for impulse noise images based on median-mean filter[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(7):861–864. (in Chinese)
- 张成斌,王开福. 脉冲噪声图像的中-均值滤波算法[J]. 激光与红外, 2015, 45(7):861–864.
- [5] JIAN Xianzhong, LU Ruizhi, GUO Qiang. Modified locally adaptive non-uniformity correction algorithm for single infrared image [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(12):1344–1348. (in Chinese)
- 简献忠,陆睿智,郭强. 改进的单幅红外图像局部自适应非均匀校正[J]. 激光与红外, 2014, 44(12):1344–1348.
- [6] Chen J S, Lin H, Shao Y, et al. Oblique striping removal in remote sensing imagery based on wavelet transform [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(8):1717–1723.
- [7] ZHOU Dabiao, LLI Gang, WANG Dejiang, et al. Method of destriping stripe noise of aerial images based on total variation [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11):330–336. (in Chinese)
- 周达标,李刚,王德江,等. 基于全变分的航空图像条带噪声消除方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11):330–336.
- [8] Chang Y, Yan L X, Fang H Z, et al. Simultaneous destriping and denoising for remote sensing images with unidirectional total variation and sparse representation [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(6):1051–1055.
- [9] Lu X Q, Wang Y L, Yuan Y. Graph-regularized low-rank representation for destriping of hyperspectral images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(7):4009–4018.
- [10] Chen Q, Montesinos P, Sun Q S, et al. Adaptive total variation denoising based on difference curvature [J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(3):298–306.
- [11] Goldstein T, Osher S. The split Bregman method for l1-regularized problems [J]. Siam Journal on Imaging Sciences, 2009, 2(2):323–343.
- [12] Corsini G, Diani M, Walzel T. Striping removal in MOS-B data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(3):1439–1446.