

DOI: 10.7652/xjtuxb201903020

采用变分法的遥感影像条带噪声去除

王昶^{1,2}, 王旭³, 纪松²

(1. 辽宁科技大学土木工程学院, 114051, 辽宁鞍山; 2. 信息工程大学地理空间信息学院, 450001, 郑州;
3. 辽宁林业职业技术学院林学院, 110101, 沈阳)

摘要: 为了避免去除遥感影像条带噪声时丢失影像细节, 构建了综合两种单向变分模型的组合去噪方法。首先, 构建一种条带去除单向变分模型, 通过此模型可以有效去除遥感影像条带噪声, 从而初步获得近似遥感影像及条带噪声影像, 同时避免近似遥感影像出现阶梯效应; 其次, 为了避免条带噪声影像中包含的少量细节信息丢失, 构建一种条带保留单向变分模型, 通过此模型可以去除条带噪声影像中的细节信息而只保留条带噪声, 从而有效分离出细节信息; 最后, 把分离出的细节信息与近似遥感影像进行累加得到去噪影像。通过实验分析发现, 本文方法不仅能完全去除条带噪声, 而且基本没有破坏影像细节, 去噪后的影像质量得到明显提高。

关键词: 条带噪声影像; 条带去除单向变分模型; 条带保留单向变分模型; 遥感影像

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)03-0143-07

Stripe Noise Removal of Remote Images Based on Variation

WANG Chang^{1,2}, WANG Xu³, JI Song²

(1. School of Civil Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051, China;
2. Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;
3. Forestry Institute, Liaoning Forestry Vocation-Technical College, Shenyang 110101, China)

Abstract: To avoid the loss of image details when removing the stripe noise of remote images, a combined destriping method of two unidirectional variation models was constructed. First, a stripe removal unidirectional variation model which can effectively remove the stripe noise and obtain the approximate restoration images and stripe noise images was constructed, and the stair effect is avoided in approximate remote images. Second, in order to avoid losing details in the stripe noise image, a stripe preserve unidirectional variation model was constructed, which could remove the image details from the stripe noise image and only preserve the stripe noise, so that the stripe noise and the image details could be separated effectively. Finally, the approximate remote image and the image details were superimposed to obtain the destriped image. Experimental results show that the proposed method can effectively restrain the stripe noise of remote images, and preserve the details of the remote images very well, hence the quality of destriped images is improved obviously.

Keywords: stripe noise image; stripe removal unidirectional variation model; stripe preserve unidirectional variation model; remote image

受遥感载荷探测器成像机理及外界环境影响,遥感影像时常受到条带噪声污染^[1-2],因此在对遥感影像进行分析与应用之前,必须去除条带噪声。在过去的几十年里,国内外学者提出了许多去除条带噪声的方法,如基于滤波方法、基于统计匹配方法等。傅里叶变换滤波法^[3]及小波变换滤波法^[4]是典型的滤波方法。傅里叶变换滤波法通过分析条带噪声的频率,采用合适的滤波器检测并去除条带噪声,但由于很难找到一个能将信号与噪声有效分离的频率,从而导致条带噪声去除不彻底。小波变换滤波法通过确定的阈值及阈值函数来去除条带噪声,但由于阈值选取的不确定性,会导致条带噪声去除不彻底或影像的细节信息丢失。文献[5]提出了一种把小波滤波法与傅里叶滤波法相结合的组合滤波方法,虽然该方法可以有效去除条带噪声^[5],但在去除条带噪声时会丢失影像细节。基于统计匹配的方法根据条带噪声行与非条带噪声行灰度统计特性的差异来去除条带噪声。直方图匹配和矩匹配是典型的统计匹配方法,它们分别根据像元灰度的差异及像元灰度矩的差异来去除条带噪声。然而,这类方法过度依赖灰度统计数据集,从而使条带噪声去除不彻底^[6-9]。

近年来,学者们提出基于变分法来去除条带噪声,如文献[10]根据条带噪声特点建立了一种单向变分模型^[10];文献[11]提出了一种单向变分 TV (total variation) 与框架正则化相结合的模型^[11];文献[12]构建了一种单向变分与 TV-Stokes 相结合的去噪模型^[12];文献[13]根据影像具有低秩性及条带噪声具有稀疏性特征构建了条带噪声分离模型^[13]。上述变分模型虽然可以在去除条带噪声的同时更多地保留影像细节,但由于模型的正则化强度很难把控,还是会丢失影像细节。

针对条带噪声去除过程中容易丢失影像细节这一问题,本文构建了两种单向变分模型来去除条带噪声。通过构建的条带去除单向变分模型可以初步获得去噪后的近似遥感影像及条带噪声影像,并且

避免去噪后的影像出现阶梯效应。为了避免影像细节丢失,通过构建的条带保留单向变分模型可以从条带噪声影像中分离出影像细节。最后,把近似恢复影像与影像细节累加得到去噪影像。

1 条带噪声去除方法

1.1 条带噪声的特点分析

条带噪声是一种结构性噪声,具有单向性及方向性^[14]。本文以 MODIS(moderate-resolution imaging spectroradiometer)第 33 波段 Level-1B 遥感数据为例,并计算其水平方向梯度和垂直方向梯度。从图 1 可以看到,条带噪声只影响垂直方向梯度(见图 1c),而水平方向梯度(见图 1b)不受影响。为了显示效果,对图 1b、图 1c 的灰度值进行了线性拉伸。

1.2 条带去除单向变分模型

1.2.1 条带去除单向变分模型构建 经典的单向变分模型是在 TV 模型的基础上结合条带噪声的特征转变而来的,但由于 TV 模型在影像平稳区域容易产生阶梯效应,因此首先对 TV 模型进行改进,建立一种具备同性扩散及异性扩散能力的 TV 正则化模型,然后在改进的 TV 模型基础上结合条带噪声特征来构建条带去除单向变分模型。改进的 TV 模型表达式如下

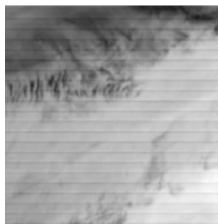
$$J(U, V) = \inf_{F=U+V} \int_{\Omega} \frac{|\nabla U|^2}{\sqrt{(1+|\nabla U|+|\nabla U|^2)}} dU + \lambda_0 \int_{\Omega} |U - F|^2 dU \quad (1)$$

式中: U 表示去噪后的遥感影像; F 表示含条带噪声的遥感影像; V 表示条带噪声; λ_0 表示正则项参数。

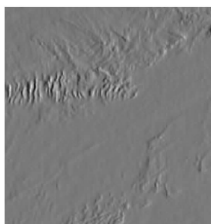
式(1)的欧拉-拉格朗日表达式为

$$2\lambda_0(U - F) - \nabla \cdot \left[\left(\frac{2}{\sqrt{1+|\nabla U|+|\nabla U|^2}} - \frac{|\nabla U|(1+2|\nabla U|)}{2(\sqrt{1+|\nabla U|+|\nabla U|^2})^3} \right) \nabla U \right] = 0 \quad (2)$$

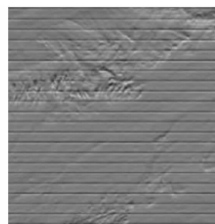
对式(2)进行扩散能力分析。首先对影像局部结构进行分解,建立直角坐标系 (τ, n) ,从而将式(2)写成



(a) MODIS 33 影像



(b) 图 1a 水平梯度



(c) 图 1a 垂直梯度

图 1 MODIS 33 影像及梯度图

$$2\lambda_0(U-F) - [T_1(|\nabla U|)U_u + T_2(|\nabla U|)U_m] = 0 \quad (3)$$

式中: U_u 和 U_m 分别表示沿切线和法线方向的二阶导数; $T_1(|\nabla U|)$ 和 $T_2(|\nabla U|)$ 分别表示沿切线和法线方向的扩散函数, 其控制着沿切线和法线方向的扩散强度

$$T_1(|\nabla U|) = \frac{2}{\sqrt{1+|\nabla U|+|\nabla U|^2}} - \frac{|\nabla U|(1+2|\nabla U|)}{2(\sqrt{1+|\nabla U|+|\nabla U|^2})^3} \quad (4)$$

$$T_2(|\nabla U|) = \frac{2}{\sqrt{1+|\nabla U|+|\nabla U|^2}} - \frac{2|\nabla U|+5|\nabla U|^2}{(\sqrt{1+|\nabla U|+|\nabla U|^2})^3} + \frac{3|\nabla U|^3(1+2|\nabla U|)}{4(\sqrt{1+|\nabla U|+|\nabla U|^2})^5} \quad (5)$$

下面分析当 $|\nabla U| \rightarrow 0$ 与 $|\nabla U| \rightarrow \infty$ 时, 改进 TV 模型的扩散方式。

(1) 在影像相对平滑区域, $|\nabla U| \rightarrow 0$, $\varphi'(0) = 0$, $\lim_{|\nabla U| \rightarrow 0} T_1(|\nabla U|) = 2$, $\lim_{|\nabla U| \rightarrow 0} T_2(|\nabla U|) = 2$, 法线和切线方向具有相同的扩散系数, 此时方程为同性扩散。

(2) 在影像不平滑区域, $|\nabla U| \rightarrow \infty$, $\lim_{|\nabla U| \rightarrow \infty} T_2(|\nabla U|) = 0$, $\lim_{|\nabla U| \rightarrow \infty} T_2(|\nabla U|)/T_1(|\nabla U|) = 0$, 沿切线方向的扩散速度远远大于沿法线方向的扩散速度, 有利于保护影像的边缘, 此时方程为异性扩散。

根据式(1)建立条带去除单向变分模型如下

$$J(U, V) = \lambda_1 \|U - F\|^2 + \left\| \frac{\partial(U - F)}{\partial x} \right\|^2 + \lambda_0 \left\| \frac{\partial(|\nabla U|^2(1+|\nabla U|+|\nabla U|^2)^{-1/2})}{\partial y} \right\|^2 \quad (6)$$

式中: 等号右边第1项为保真项, 第2项是保持 U 和 F 在条带方向梯度一致, 第3项表示对条带噪声垂直方向梯度进行惩罚。

1.2.2 方法优化 式(6)对应的欧拉-拉格朗日方程^[15-16]为

$$\lambda_1(U-F) + \partial_x^2(U-F) + \lambda_0 \left(\frac{2|\nabla U|}{\sqrt{1+|\nabla U|+|\nabla U|^2}} - \frac{|\nabla U|^2(1+2|\nabla U|)}{2(\sqrt{1+|\nabla U|+|\nabla U|^2})^3} \right) \partial_y^2 U = 0 \quad \text{in } \Omega$$

$$\frac{\partial U}{\partial n} \Big|_{\partial \Omega} = 0 \quad (7)$$

将影像定义域 Ω 离散化, 设定 $x = ik, y = jk$, 取

$k=1$, 则式(7)的离散形式为

$$\lambda_1(U-f) + D_{-x}(D_{+x}(U-F)) + \lambda_0 \left(\frac{2|\nabla U|}{\sqrt{1+|\nabla U|+|\nabla U|^2}} - \frac{|\nabla U|^2(1+2|\nabla U|)}{2(\sqrt{1+|\nabla U|+|\nabla U|^2})^3} \right) D_{-y}(D_{+y}U) = 0 \quad (8)$$

式中

$$\begin{aligned} (D_{\pm x}U)_{i,j} &= \pm (U_{i\pm 1,j} - U_{i,j})/k \\ (D_{\pm y}U)_{i,j} &= \pm (U_{i,j\pm 1} - U_{i,j})/k \\ (D_{x0}U)_{i,j} &= (U_{i+1,j} - U_{i-1,j})/2k \\ (D_{y0}U)_{i,j} &= (U_{i,j+1} - U_{i,j-1})/2k \end{aligned}$$

采用不动点 Gauss-Seidel 迭代法对式(8)进行求解, 得到式(6)的递推公式为

$$U_{i,j}^n = (U_{i+1,j}^n + U_{i-1,j}^n - F_{i+1,j} + 2F_{i,j} - F_{i-1,j} - \lambda_1 F_{i,j} + \lambda_0 b U_{i,j+1}^n + \lambda_0 b U_{i,j-1}^n) / (2\lambda_0 b - \lambda_1 + 2) \quad (9)$$

$$b = \frac{2}{\sqrt{1+a_1+a_1^2}} - \frac{a_1^2(1/a_1+2)}{2(\sqrt{1+a_1+a_1^2})^3}$$

$$a_1 = \sqrt{(D_{+x}U_{i,j})^2 + (D_{0y}U_{i+1,j})^2}$$

对影像边界上的点采用 Neumann 边界条件, 即

$$\left. \begin{aligned} U_{i,j}^{n+1} &= U_{i,j}^{n+1}, 1 \leq i \leq N-2, 1 \leq j \leq M-2 \\ U_{i,0}^{n+1} &= U_{i,1}^{n+1}, U_{i,M-1}^{n+1} = U_{i,M-2}^{n+1}, i = 0, \dots, N-1 \\ U_{0,j}^{n+1} &= U_{1,j}^{n+1}, U_{N-1,j}^{n+1} = U_{N-2,j}^{n+1}, j = 0, \dots, M-1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: i, j 分别为列索引和行索引; $M \times N$ 表示影像 U 的大小。

1.3 条带保留单向变分模型

1.3.1 条带保留单向变分模型构建 由于无法把控条带去除单向变分模型的正则化强度, 因此通过此模型去除条带噪声时会丢失影像细节, 而丢失的影像细节包含在条带噪声影像中。为了避免影像细节丢失, 构建条带保留单向变分模型如下

$$J(s, u) = \lambda_1 \|s - S\|^2 + \left\| \frac{\partial(s - S)}{\partial x} \right\|^2 + \lambda_0 \left\| \frac{\partial s}{\partial x} \right\|^2 \quad (11)$$

式中: 等号右边第1项为保真项, 第2项是保持条带噪声影像和条带噪声在水平方向梯度一致, 第3项表示对条带噪声水平方向梯度的惩罚; s 表示条带噪声; S 表示近似条带噪声影像; u 表示细节信息。

1.3.2 方法优化 式(11)对应的欧拉-拉格朗日方程为

$$\lambda_1(s-S) + \partial_x^2(s-S) + \lambda_0 \partial_x^2 s = 0 \quad \text{in } \Omega$$

$$\frac{\partial s}{\partial n|_{\partial\Omega}} = 0 \quad (12)$$

将影像定义域 Ω 离散化, 同样设定 $x = ik, y = jk$, 取 $k=1$, 则式(12)的离散形式为

$$\lambda_1(s - S) + D_{-x}(D_{+x}(s - S)) + \lambda_0 D_{-x}(D_{+x}s) = 0 \quad (13)$$

式中 D_{+x}, D_{+y} 分别表示在 x, y 方向前向一阶差分算子, D_{-x}, D_{-y} 分别表示在 x, y 方向后向一阶差分算子

$$(D_{\pm x}s)_{i,j} = \pm(s_{i\pm 1,j} - s_{i,j})/k$$

$$(D_{\pm y}s)_{i,j} = \pm(s_{i,j\pm 1} - s_{i,j})/k$$

利用不动点 Gauss-Seidel 迭代法对式(13)进行求解, 得到式(11)的递推公式为

$$s_{i,j}^{n+1} = (s_{i+1,j}^n + s_{i-1,j}^n - S_{i+1,j} + 2S_{i,j} - S_{i-1,j} + \lambda_0 s_{i+1,j}^n + \lambda_0 s_{i-1,j}^n - \lambda_1 S_{i,j}) / (2\lambda_0 - \lambda_1 + 2) \quad (14)$$

对影像边界上的点采用 Neumann 边界条件, 即

$$\left. \begin{aligned} s_{i,j}^{n+1} &= s_{i,j}^{n+1}, 1 \leq i \leq N-2, 1 \leq j \leq M-2 \\ s_{i,0}^{n+1} &= s_{i,1}^{n+1}, s_{i,M-1}^{n+1} = s_{i,M-2}^{n+1}, i = 0, \dots, N-1 \\ s_{0,j}^{n+1} &= s_{1,j}^{n+1}, s_{N-1,j}^{n+1} = s_{N-2,j}^{n+1}, j = 0, \dots, M-1 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

2 实验与分析

本文实验选择的 4 幅遥感影像为: 带有随机条带噪声的 MODIS 第 30 波段 Level-1B 遥感数据; 带有周期性条带噪声的 MODIS 第 33 波段 Level-1B 遥感数据; 带有周期性条带噪声的 Landsat TM (thematic mapper) 第 3 波段遥感数据; 带有周期性条带噪声的航空影像数据。本文中关于遥感影像条带噪声去除的实现及主客观评价指标的计算均采用 Matlab2016 软件完成, 执行运算的笔记本电脑是

Inter(R) Core(TM) i5-5200U CPU@2.20 GHz 处理器, 4 GB 内存。

首先, 采用条带去除单向变分模型进行条带噪声初步分离, 为了显示效果, 对条带噪声影像的灰度值进行线性拉伸, 实验结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看到, 经条带去除单向变分模型去噪后, 分离出的近似 MODIS 30 影像、近似 MODIS 33 影像、近似 TM 影像及近似航空影像都不受条带噪声污染(见图 2b、图 2e、图 2h 及图 2k), 而从条带噪声影像(见图 2c、图 2f、图 2i 及图 2l)中可以看到, 除条带噪声外还包含少量影像细节, 说明条带去除单向变分模型在去除条带噪声时丢失了影像细节。

为了避免影像细节丢失, 采用条带保留单向变分模型去除条带噪声影像中的细节信息。为了显示效果, 对条带噪声影像、条带噪声及细节信息的灰度值进行线性拉伸, 实验结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看到, 条带保留单向变分模型可以有效去除条带噪声影像中的细节信息而只保留条带噪声(见图 3b、图 3e、图 3h 及图 3k), 再通过条带噪声影像与条带噪声相减从而获得细节信息(见图 3c、图 3f、图 3i 及图 3l)。把近似 MODIS 30 影像、近似 MODIS 33 影像、近似 TM 影像及近似航空影像分别与细节信息累加得到去噪影像, 并与文献结果^[3,7,12,14-16]进行比较。为了显示效果, 对不同方法对应的残差图灰度值进行线性拉伸, 实验结果如图 4 所示。

从图 4 可以看到: 经文献[3]方法去噪后, 条带噪声被有效去除, 但去噪后的影像出现模糊; 经文献[7]方法去噪后, 条带噪声去除不彻底; 经文献[12]

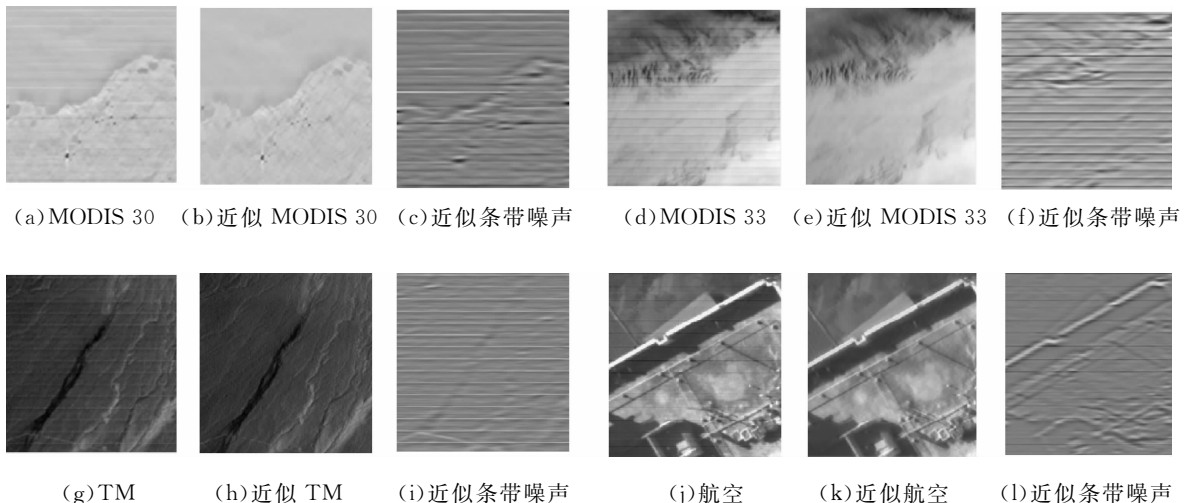


图 2 含条带噪声的遥感影像初步分离结果示意图

[14]方法去噪后,虽然条带噪声被有效去除,但由于对影像某些区域的处理过于平滑,从而导致影像对比度下降;经文献[15][16]及本文方法去噪后,不仅可以有效去除条带噪声,而且去噪后的影像视觉效果

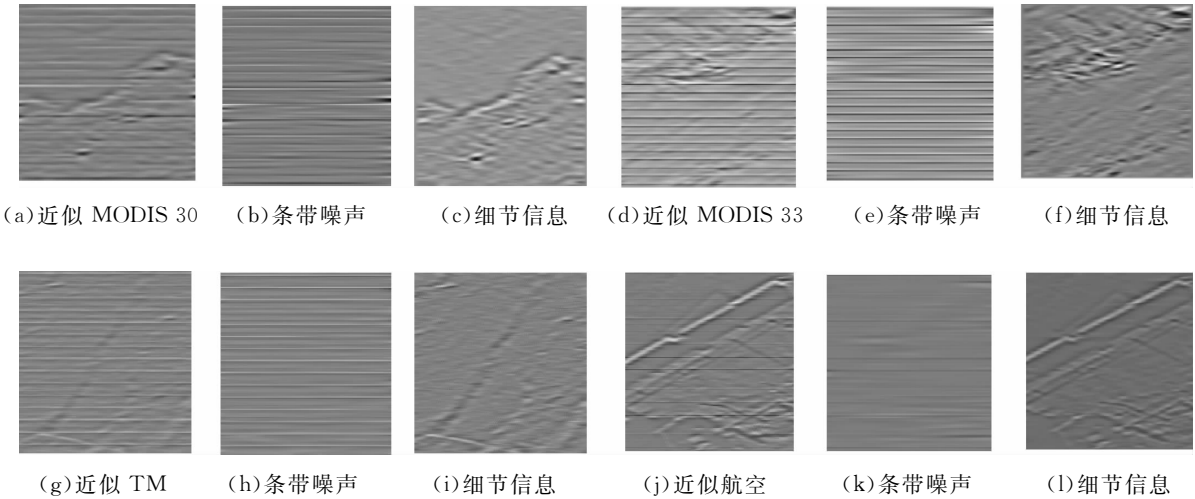
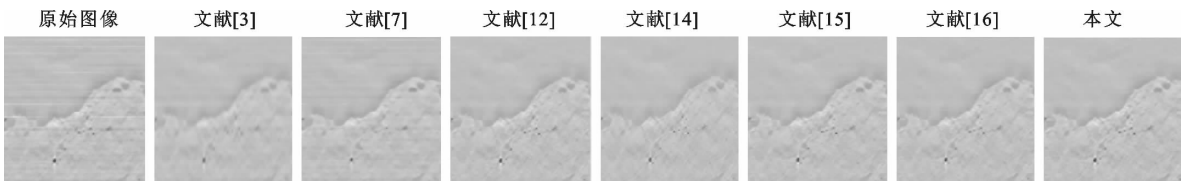


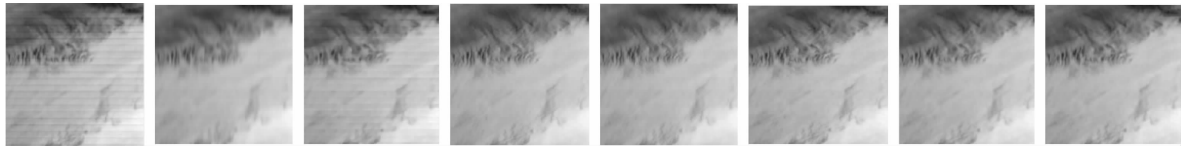
图 3 条带噪声影像的分离结果示意图



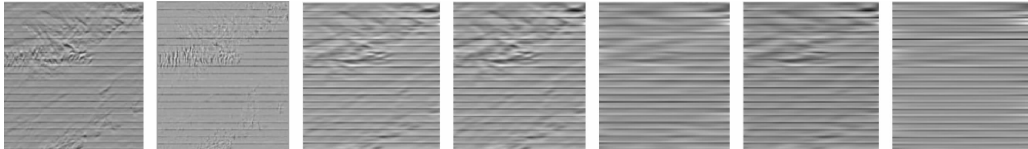
(a)MODIS 30 条带噪声去除



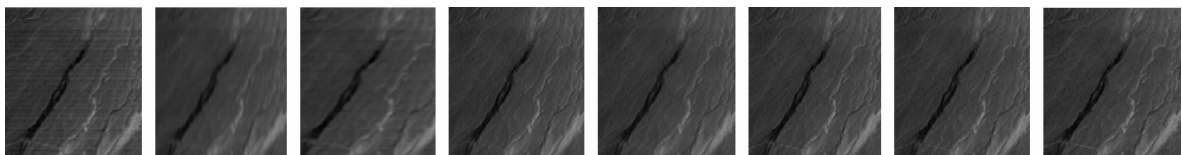
(b)MODIS 30 条带噪声去除残差图



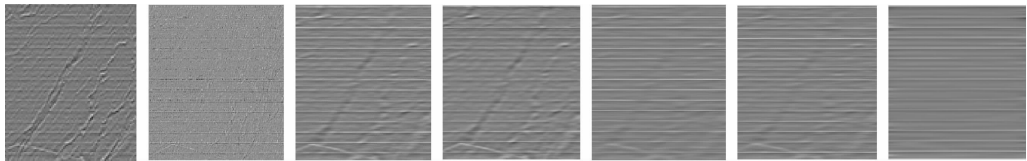
(c)MODIS 33 条带噪声去除



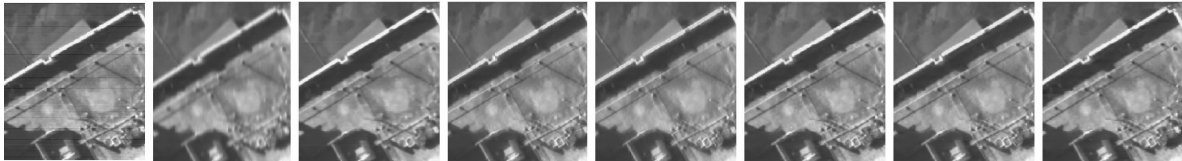
(d)MODIS 33 条带噪声去除残差图



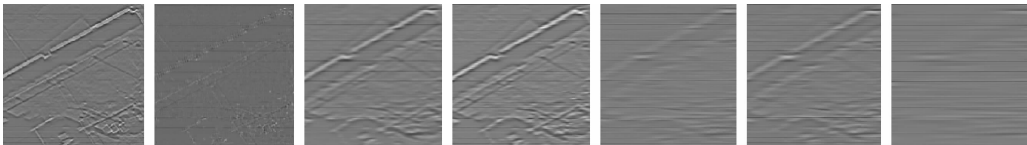
(e)TM 条带噪声去除



(f)TM 条带噪声去除残差图



(g)航空条带噪声去除



(h)航空条带噪声去除残差图

图 4 不同方法的去噪结果及对应的残差图

果较好。从不同方法对应的残差图(见图 4b、图 4d、图 4f、图 4h)可以看到,本文方法所对应的残差图中只包含条带噪声,基本没有影像细节,而其他方法所对应的残差图中都存在少量影像细节。

本文除了主观上采用直观影像视觉效果外,客观上采用影像质量提升因子 $I_f^{[8]}$ 及影像扭曲度 $I_d^{[10]}$ 等指标进行评价,并计算各种去噪方法的效率,结果如表 1 所示。

从表 1 可以看到,本文方法的 I_f 及 I_d 值高于其他对比方法,说明本文方法能在影像扭曲较小的情况下完全去除条带噪声,并且去噪后的影像质量提

升程度最大。从不同方法的计算效率来看,文献[3]方法计算时间最短,文献[7]方法最长。由于本文方法是分两个步骤去除条带噪声的,所以计算效率较其他方法低,但高于文献[7][15]两种方法。

3 结 论

为了避免条带噪声去除过程中丢失影像细节,本文构建了一种综合两种单向变分模型的组合条带噪声去除方法,此方法可以有效去除 MODIS 影像、TM 影像及航空影像上的条带噪声。与其他方法相比,本文方法在保留影像细节及影像质量提升两方

表 1 不同去噪方法的客观评价指标统计结果及效率

影像	评价指标	文献[3]	文献[7]	文献[12]	文献[14]	文献[15]	文献[16]	本文
MODIS 30	I_f /dB	25.889 6	24.667 8	28.796 2	28.557 7	29.166 8	29.014 5	29.234 4
	I_d	0.964 4	0.954 4	0.983 3	0.979 9	0.991 6	0.989 6	0.992 2
	效率/s	1.32	33.45	7.65	7.32	10.41	7.89	8.62
MODIS 33	I_f /dB	25.001 4	24.886 7	33.014 5	26.897 4	33.584 5	33.234 1	33.661 8
	I_d	0.960 1	0.956 4	0.981 2	0.971 6	0.988 1	0.982 6	0.988 9
	效率/s	0.98	30.22	6.01	5.44	8.89	6.24	6.85
TM	I_f /dB	16.113 5	16.041 5	22.212 9	21.883 7	26.354 1	26.124 5	26.538 6
	I_d	0.944 3	0.942 8	0.978 8	0.974 4	0.989 8	0.980 2	0.993 5
	效率/s	1.45	35.45	8.75	8.36	11.98	9.24	9.46
航空	I_f /dB	22.175 6	20.964 4	24.665 6	24.254 8	28.335 4	28.045 6	28.667 9
	I_d	0.956 4	0.951 1	0.977 8	0.975 5	0.989 4	0.985 1	0.990 4
	效率/s	1.62	42.37	14.28	14.00	18.55	16.23	16.77

面都是最优的。

本文方法虽然在去除条带噪声时能更好地保留影像细节信息,但由于此方法分两个步骤来去除条带噪声,因此会导致计算效率较其他方法低。

参考文献:

- [1] 孙斌, 李景林, 张星祥, 等. 600 mm 长焦面时间延迟积分 CCD 的交错拼接 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 2908-2913.
SUN Bin, LI Jinglin, ZHANG Xingxiang, et al. Interleaving assemble of TDICCDs on 600 mm focal plane [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 2908-2913.
- [2] 李晓杰, 任建伟, 李宪圣, 等. 反射式拼接 CCD 相机非均匀性定标与校正 [J]. 液晶与显示, 2014, 29(6): 1057-1064.
LI Xiaojie, REN Jianwei, LI Xiansheng, et al. Non-uniformity calibration and correction of reflection-based mosaic CCD camera [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2014, 29(6): 1057-1064.
- [3] JINS C, YUN S, HUA D G, et al. Destriping MODIS data by power filtering [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(9): 2119-2124.
- [4] TORRES J, INFANTE S. Wavelet analysis for the elimination of striping noise in satellite images [J]. Optical Engineering, 2001, 40(7): 1309-1314.
- [5] MUNCH B, TRTIK P, MARONE F, et al. Stripe and ring artifact removal with combined wavelet-Fourier filtering [J]. Opt Express, 2009, 17(5): 8567-8591.
- [6] MICHAEL W. Destriping multiple sensor imagery by improved histogram matching [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 11(5): 859-875.
- [7] GADALLAH F, CSILLAG F, SMITH E. Destriping multisensory imagery with moment matching [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(12): 2505-2511.
- [8] 胡宝鹏, 周则明, 孟勇, 等. 基于矩匹配和变分法的条带去除模型 [J]. 红外, 2014, 35(11): 32-35.
HU Baopeng, ZHOU Zeming, MENG Yong, et al. Destriping model of MODIS images based on moment matching and variational approach [J]. Infrared, 2014, 35(11): 35-35.
- [9] 韩玲, 董连凤, 张敏, 等. 基于改进的矩匹配法高光谱影像条带噪声滤波技术 [J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3333-3338.
HAN Ling, DONG Lianfeng, ZHANG Min, et al. Destriping hyperspectral image based on an improved moment matching method [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3333-3338.
- [10] BOUALI M, LADJAL S. Toward optimal destriping of MODIS data using a unidirectional variational model [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011, 49(6): 2924-2935.
- [11] CHANG Y, FANG H, YAN L, et al. Robust destriping method with unidirectional total variation and framelet regularization [J]. Opt Express, 2013, 21(7): 23307-23323.
- [12] ZHANG Y, ZHOU G, YAN L, et al. A destriping algorithm based on TV-stokes and unidirectional total variation model [J]. Optik, 2016, 133: 428-439.
- [13] LU X, WANG Y, YUAN Y. Graph-regularized low-rank representation for destriping of hyperspectral images [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013, 51: 4009-4018.
- [14] ZHOU G, FANG H, YAN L, et al. Removal of stripe noise with spatially adaptive unidirectional total variation [J]. Optik, 2014, 125(12): 3356-3362.
- [15] 霍丽君, 何斌, 周达标, 等. 遥感影像条带噪声的多尺度变分模型去除 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 198-206.
HUO Lijun, HE Bin, ZHOU Dabiao, et al. A destriping method with multi-scale variational model for remote sensing image [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(1): 198-206.
- [16] BOUTEMEDJET A, DEND C, ZHAO B. Edge-aware unidirectional total variation model for stripe non-uniformity correction [J]. Sensors, 2018, 18(4): 1164.

(编辑 荆树蓉)