文章编号:1672-8785(2014)11-0028-09

基于矩匹配和变分法的MODIS条带去除模型

胡宝鹏 周则明 孟 勇 蒋 林

(解放军理工大学气象海洋学院，江苏南京 211101)

摘 要： 针对中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 影像条带噪声的特点，提出了一种结合矩匹配和变分法的条带去除模型。首先采用矩匹配方法去除多行和宽行条带噪声；然后，基于改进的条带检测方法定位矩匹配后的残余条带；最后，基于变分条带去除模型，使用 Split Bregman 迭代求解以去除条带。实验结果表明，该方法能够有效地去除 MODIS 影像中的条带噪声，并能有效地保持图像中的细节信息。与直方图匹配、矩匹配、低通滤波及单向变分去条带算法相比，本文模型的去噪效果更理想。

关键词： MODIS 影像；条带噪声；矩匹配方法；变分条带去除；图像处理

中图分类号: TP311.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.11.007

Destriping Model of MODIS Images Based on Moment Matching and Variational Approach

HU Bao-peng, ZHOU Ze-ming, MENG Yong, JIANG Lin

(College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: According to the features of the stripe noises in the images from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), a destriping model which combines moment matching with the variational method is proposed. Firstly, the multi-line and wide-line stripe noises are removed by using the moment matching method. Secondly, the residual stripes after moment matching are located by using the improved stripe detection method. Finally, the stripe noises are removed by Split Bregman iteration on the basis of the variational destriping model. The experimental result shows that the method can remove the stripe noises in MODIS images effectively while preserving the details of the image. Compared with the destriping algorithms such as histogram matching, moment matching, low-pass filter and unidirectional variational destriping algorithms, the proposed model has more ideal denoising effectiveness.

Key words: MODIS; stripe noise; moment matching method; variational stripe removal; image processing

收稿日期： 2014–09–10

基金项目： 国家自然科学基金资助项目 (41174164)；公益性行业 (气象) 专项项目 (GYHY201306068)

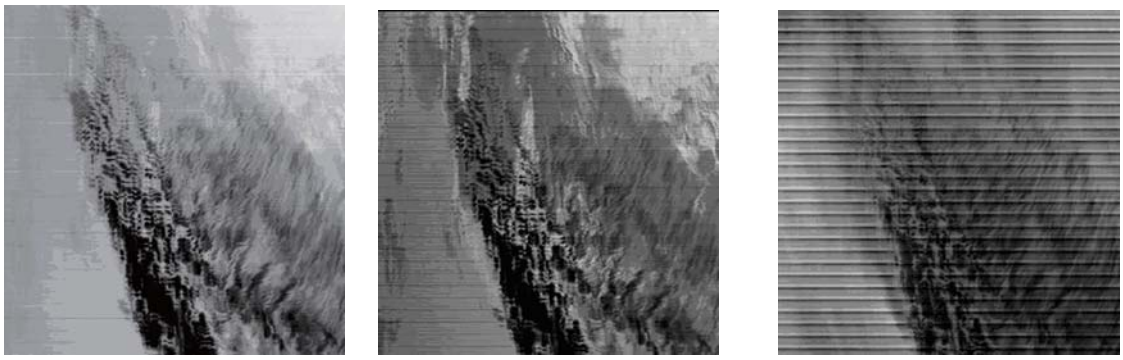
作者简介： 胡宝鹏 (1984-)，男，硕士研究生，主要研究模式识别与图像处理。

E-mail: hubaopenggentleman@163.com

0 引言

MODIS 能连续地对大气、陆地和海洋进行综合观测。它通过掸扫方式采集图像。由于多个扫描探测器的响应水平很难达到完全一致，当一个或多个传感器不能正常工作时，MODIS 数据会产生条带噪声。常见的 MODIS 条带噪声可分为单行、多行及宽行等三种类型，如图 1 所示。

条带去除方法主要有基于空域的方法 [1,2] 和基于变换域的方法 [3−4] 两种类型。基于空域的方法实现简单，要求图像中地物分布单一；基于变换域的方法计算复杂，要求图像条带噪声的周期性强。近年来出现了一些新的方法，例如：Tsai 和 Chen[5] 基于边缘检测和直线跟踪算法检测和定位条带噪声的方法，使用三次样条插值函数去除条带。石光明等 [6] 提出了一种将二维方向滤波器与均值补偿相结合来去除遥感图像中的非周期性条带的方法。王玉璘 [7] 和罗婷等 [8] 分别提出了利用机器学习来去除条带噪声的方法。项海兵等 [9] 基于均衡化曲线补偿算法提出了一种条带快速检测和去除算法，能有效去除图像中的单行和多行条带噪声。另外，Rakwatin 等 [10] 提出的一种分步去除条带噪声算法，可使用直方图匹配结合迭代最小二乘面滤波去除条带噪声。



(a) 单行条带 (b) 多行条带 (c) 宽行条带

图 1 MODIS 条带噪声

最近几年，变分偏微分方程方法 (Partial Differential Equation, PDE) 在遥感图像条带去除方面的应用取得了一些进展。沈焕锋 [11] 提出用一种基于 Huber–Markov 正则化模型的最大后验概率方法去除条带。Bouali [12] 根据条带噪声的特性提出了单向全变分去条带模型。以上两种变分模型的条带去除效果都较理想。

本文将矩匹配与变分方法相结合，提出了一种分步条带去除模型。实验表明，该模型在去除条带噪声的同时，能更有效地保持图像的细节信息。

1 条带去除模型

条带去除可视为对图像的修复，条带区域丢失的数据可通过其邻域对信息进行修复。对于单行条带，检测其位置后可直接使用变分条带去除模型求解；对于多行和宽行条带，由于图像行数据与 MODIS 传感器的探测单元位置相对应，可将其拆分为若干子图，选择其中一幅无条带噪声子图作为参考，在对其余子图与其做矩匹配处理后，再用条带检测算法定位剩余条带的位置，最后基于变分方法去除条带。图 2 为该变分条带去除模型的流程图。

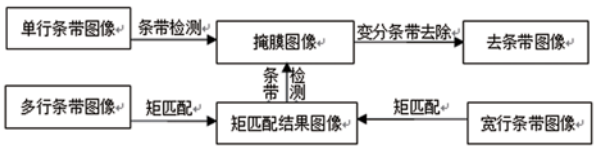


图 2 变分条带的去除流程

1.1 条带检测模型

采用变分图像恢复模型去除条带时，需要确定条带的位置。Fuan Tsai 等 [5] 提出了一种条带检测方法，该方法主要包括三个步骤：(1) 基于 Canny 算子检测图像边缘；(2) 采用直线跟踪

算法追踪所有的穿过整幅图像的水平直线。疑似直线上的边缘像素点满足以下两个条件时即被认为是条带的边缘：其一，疑似直线上连续缺失的最大像素数量小于某一阈值；其二，疑似直线上被检测到的边缘点数不小于某一设定阈值。否则认为其不是条带边缘；(3) 根据图像的条带噪声宽度阈值标示条带的位置。

上述算法对强条带噪声具有良好的检测效果，但将其应用到 MODIS 影像时，检测结果并不理想。原因在于 MODIS 影像在不同波段的条带噪声强弱不同，弱条带噪声易被漏检。另外，MODIS 影像通常纹理结构复杂，边缘检测时产生的大量伪边缘点会影响直线检测算法的精度。本文根据 MODIS 影像的特点对 Fuan Tsai 条带检测算法进行了改进：

(1) 考虑到 MODIS 云图纹理结构复杂，将直线跟踪算法中的阈值改为直线上像素连续出现的个数；

(2) 针对 MODIS 影像条带噪声周期性的特点，对检测到的条带按探测单元进行统计，保留统计结果中出现概率超过阈值的条带。

改进的算法可以最大限度地剔除误检条带，标示漏检条带。实验证明，这种方法能够明显地减少条带的误检率。

1.2 变分条带去除模型

全变差 (Total Variation, TV) 模型 [13] 将 TV 正则化方法引入图像处理领域，去噪效果良好。Bouali[16] 研究了条带噪声的特性，在 TV 模型的基础上提出了单向全变分去条带模型：

$$E(u) = TV_x(u-f) + \lambda TV_y(u) \tag{1}$$

式中，f 为带条带噪声的图像，u 为条带去除后的图像。该模型根据条带噪声呈水平方向分布的特点，增加了原图像在 y 方向上的边缘信息保持，但在非条带区域，图像常会在 x 方向出现过度平滑现象。为了更有效地保持图像在非条带区域的细节信息，本文提出了新的条带去除模型：

$$E(u) = \min_u \frac{\lambda_1}{2}\int_{\Omega_1} ||(u-f)||_2^2 dxdy + \int_{\Omega_1} ||\nabla u||_1 dxdy + \int_{\Omega_2} ||\nabla u|| dxdy \tag{2}$$

式中，$||\nabla u|| = \sqrt{u_x^2+u_y^2}$，$||\nabla u||_1 = |u_x|+|u_y|$，$\Omega_1$ 为非条带区域，Ω_2 为条带区域。在条带区域，泛函模型 (2) 简化为

$$E(u) = \min_u \int_{\Omega_2} ||\nabla u|| dxdy \tag{3}$$

即用基于各向异性扩散的 TV 范式逐步去除条带。在非条带区域，泛函模型为

$$E(u) = \min_u \int_{\Omega_1} ||\nabla u||_1 dxdy + \frac{\lambda_1}{2}\int_{\Omega_1} ||(u(x)-f(x)||_2^2 dxdy \tag{4}$$

式中，第一项为 L^1 范式，能够在去除条带过程中更有效地保持非条带区域中目标的细节；第二项为数据保真项，使图像在去除条带前后在非条带区域保持一致；λ 为非负的权重系数，用以调整 L^1 范式与数据保真项对去条带结果的影响。

2 数值解格式

条带去除变分模型 (2) 可使用 Split Bregman 迭代快速求解。该算法用于求解含有 TV 范式、L^1 范式和压缩感知等的相关问题，运算效率极高。基于 Split Bregman 算法的思想，本文模型的数值解过程如下：引入辅助变量 $\vec{d} = \nabla u$，其中 $d_x = \nabla_x u$, $d_y = \nabla_y u$, $\vec{d} = (d_x, d_y)$，转化为有约束的优化问题，即

$$E(u) = \min_{u\in BV(\Omega)} \int_{\Omega_1} ||\nabla u||_1 dxdy + \frac{\lambda_1}{2}\int_{\Omega_1} ||(u-f||_2^2 dxdy + \int_{\Omega_2} ||\nabla u|| dxdy \quad s.t. \vec{d} = \nabla u \tag{5}$$

引入二次惩罚函数，将式 (5) 转化为无约束的优化问题：

$$\min_{u,d_x,d_y} \int_{\Omega_2} ||\vec{d}|| + \int_{\Omega_1} (||d_x||+||d_y||) + \frac{\lambda_1}{2}\int_{\Omega_1} ||(u-f)||_2^2 + \frac{\lambda_2}{2}\int_{\Omega_2} ||\vec{d}-\nabla u||_2^2 + \frac{\lambda_2}{2}\int_{\Omega_1} ||d_x-\nabla_x u||_2^2 + \frac{\lambda_2}{2}\int_{\Omega_1} ||d_y-\nabla_y u||_2^2 \tag{6}$$

式中，λ_2 为 Lagrange 乘子。再将式 (6) 转化为如下子问题的求解过程 (为书写方便，省略积分号)，在条带区域有：

$$\begin{cases} u^{k+1} = \arg\min\limits_{u,d} \frac{\lambda_2}{2}||\vec{d} - \nabla u - \vec{b}^k||_2^2 \\ \vec{d}^{k+1} = \arg\min\limits_{u,d} ||\vec{d}|| + \frac{\lambda_2}{2}||\vec{d} - \nabla u - \vec{b}^k||_2^2 \\ \vec{b}^{k+1} = \vec{b}^k + \nabla u^{k+1} - \vec{d}^{k+1} \end{cases} \tag{7}$$

在非条带区域：

$$\begin{cases} u^{k+1} = \arg\min\limits_{u} \frac{\lambda_1}{2}||u - f||_2^2 + \frac{\lambda_2}{2}||d_x - \nabla_x u \\ \qquad -b_x^k||_2^2 + \frac{\lambda_2}{2}||d_y - \nabla_y u - b_y^k||_2^2 \\ d_x^{k+1} = \arg\min\limits_{d_x} ||d_x|| + \frac{\lambda_1}{2}||d_x - \nabla_x u - b_x^k||_2^2 \\ d_y^{k+1} = \arg\min\limits_{d_y} ||d_y|| + \frac{\lambda_2}{2}||d_y - \nabla_y u - b_y^k||_2^2 \\ \vec{b}^{k+1} = \vec{b}^k + \nabla u^{k+1} - \vec{d}^{k+1} \end{cases} \tag{8}$$

式中，松弛因子 $\vec{b} = (b_x, b_y)$ 。由式 (7)、式 (8) 得到变分条带去除模型的数值格式 (9) 和式 (10)：

$$\begin{cases} \triangle u^{k+1} = div(\vec{d}^k - \vec{b}^k) \\ \vec{d}^{k+1} = shrink(\nabla u^{k+1} + \vec{b}^{k+1}, 1/\lambda_2) \\ \vec{b}^{k+1} = \vec{b}^k + \nabla u^{k+1} - \vec{d}^{k+1} \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} (\lambda_1 I - \lambda_2 \triangle) u^{k+1} = \lambda_1 f - \lambda_2 div(\vec{d}^k - \vec{b}^k) \\ d_x^{k+1} = shrink(\nabla_x u^{k+1} + b_x^k, 1/\lambda_2) \\ d_y^{k+1} = shrink(\nabla_y u^{k+1} + b_y^k, 1/\lambda_2) \\ \vec{b}^{k+1} = \vec{b}^k + \nabla u^{k+1} - \vec{d}^{k+1} \end{cases} \tag{10}$$

式中，$shrink(x, \gamma) = x/|x| \times \max(|x| - \gamma, 0)$ 。当残差 $||u^{k+1} - u^k||_2/||f||_2$ 满足一定条件或者迭代达到设定的次数后，迭代终止，得到条带去除后的图像 u。

条带去除泛函数值求解算法如下：

设置初值：$u^0 = f$, $\vec{d}_0 = d_x^0 = d_y^0 = 0$, $\vec{b}^0 = b_x^0 = b_y^0 = 0$, $k = 0$ ，固定 λ_1, λ_2, ε ；

$$u^{k+1} = (\lambda_1 I - \lambda_2 \triangle)^{-1}(\lambda_1 f - \lambda_2 div(\vec{d}^k - \vec{b}^k))$$

Do If $u(x, y) \in \Omega_1$

$$\begin{cases} d_x^{k+1} = shrink(\nabla_x u^{k+1} + b_x^k, 1/\lambda_2) \\ d_y^{k+1} = shrink(\nabla_y u^{k+1} + b_y^k, 1/\lambda_2) \end{cases}$$

else $\vec{d}^{k+1} = shrink(\nabla u^{k+1} + \vec{b}^{k+1}, 1/\lambda_2)$

$\vec{b}^{k+1} = \vec{b}^k + \nabla u^{k+1} - \vec{d}^{k+1}$ $k = k + 1$

While $||u^{k+1} - u^k||_2/||f||_2 > \varepsilon$ 输出:u

3 实验与分析

为了测试本文算法的有效性，选取 2012 年 4 月 1 日 Terra MODIS 的第 27、33 红外波段图像作为实验数据。第 27、33 红外波段分别含有明显的宽行和单行条带噪声，测试图像的大小为 512×512。

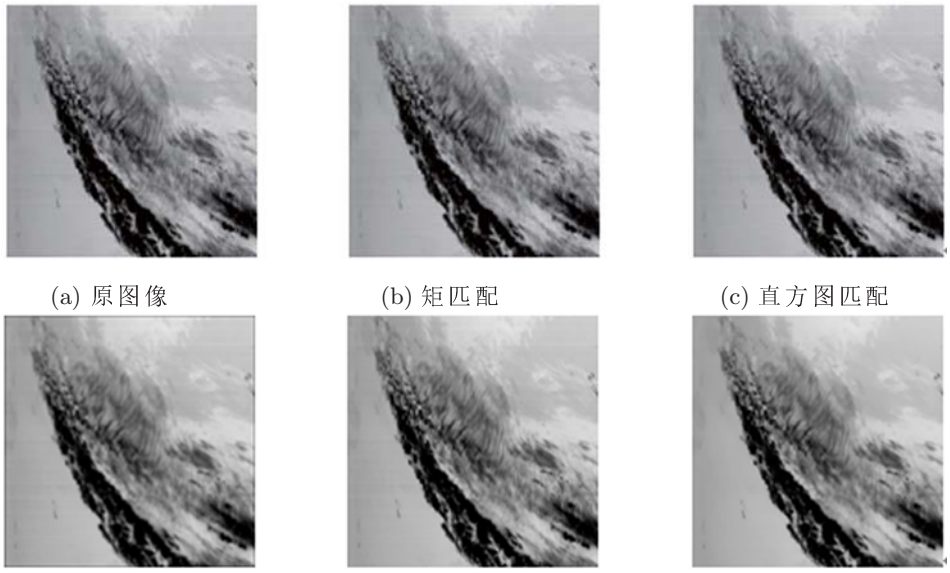
3.1 单行条带去除

对于单行条带图像，采用 1.1 节提出的条带检测方法标记条带位置，其阈值参数需要根据实验设置 [5]。设置最大条带宽度为 3 像素，直线上被检测到的边缘点数占整个直线像素的百分比为 25%。对经过条带位置和非条带位置标记后的图像，直接采用本文提出的变分条带去除模型进行处理。参数设置如下：λ_1=100，λ_2=5，最大迭代次数为 100，迭代终止的条件为 $||u^{k+1} - u^k||_2/||f||_2 < 10^{-3}$。

为了对比条带去除效果，对矩匹配 [1]、直方图匹配 [3]、低通滤波 (5×5) 和单向全变分方法 [12] 进行了比较。各方法的条带去除结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出，各方法均能够在一定程度上去除条带噪声，其中直方图匹配、低通滤波和矩匹配方法去除单行条带的效果较差，仍残留了较多的条带。从目视效果上看，本文提出的方法和单向全变分方法的噪声去除效果最好，在最大限度地去除条带的情况下仍较好地保留了图像的细节信息。图 4 给出了利用各方法去除条带噪声前后行均值的变化情况。

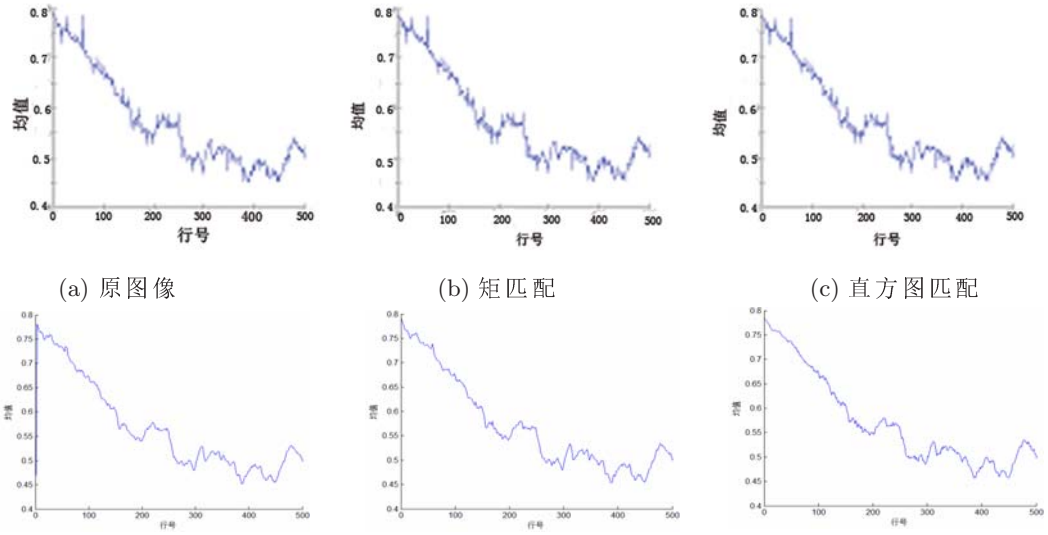
从图 4 可以看出，含条带噪声的原图像的行均值呈现出剧烈的上下波动和随机起伏。经过矩匹配及直方图匹配等处理的图像能部分地平滑行均值曲线。而经过单向全变分和本文提出的算法处理，行均值曲线变得更为平滑，说明这两种方法均能够达到去除条带噪声的目的。



(a) 原图像 (b) 矩匹配 (c) 直方图匹配

(c)5×5 低通滤波 (d) 单向全变分 (e) 本文方法

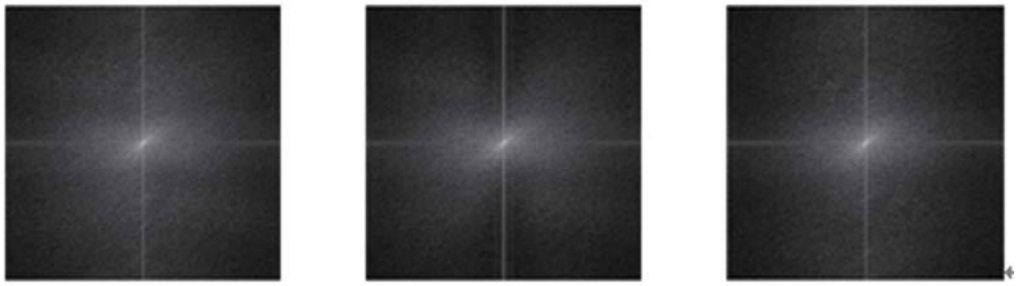
图 3 Terra–MODIS 第 33 波段的条带去除结果



(a) 原图像 (b) 矩匹配 (c) 直方图匹配

(c)5×5 低通滤波 (d) 单向全变分 (e) 本文方法

图 4 Terra-MODIS 第 33 波段的各行均值



(a) 原图 (b) 单向全变分 (c) 本文方法

图 5 Terra-MODIS 第 33 波段的频谱图像

图 5 为利用单向全变分方法和本文算法处理的结果图像的频谱图。原图像的频谱图沿 Y 轴方向分布有亮斑，反映出原图像含有单行条带噪声。图 5(e) 和图 5(f) 在垂直方向上无亮斑，说明本文提出的方法在单行条带去除效果上与单向全变分方法性能相近，均能有效地去除条带噪声，并保持原图像的细节信息。但与图 5(a) 相比，图 5(e) 在 Y 轴附近出现了对称的细微亮线，说明单向全变分模型在去除条带的同时引入了其它噪声。

3.2 宽行条带去除

对于多行和宽行条带噪声图像，为了达到良好的去噪效果，先采用矩匹配再使用变分模型去除条带噪声。Terra MODIS 第 27 红外波段图像中含有宽行条带，本文以此为例，验证算法的有效性。

在矩匹配处理之前，按照本文第 1 节中的条带去除模型所述，将原始影像划分为 10 幅子图。图 6 给出了 MODIS 影像中第 1~10 号探测器对应的子图像。

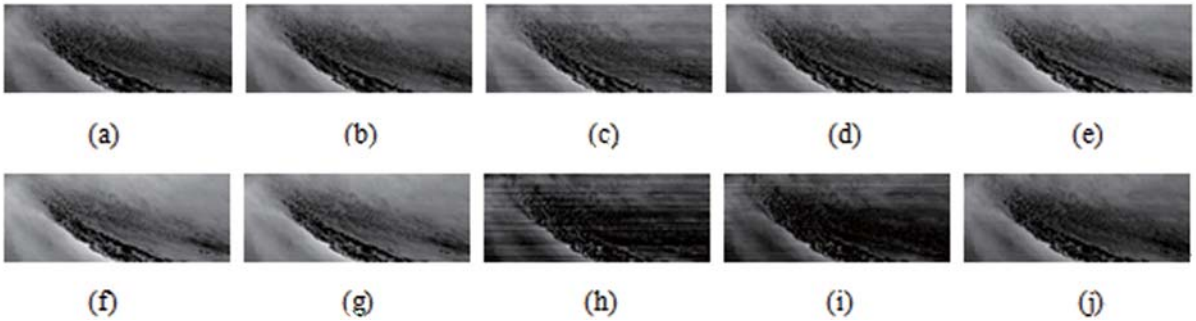
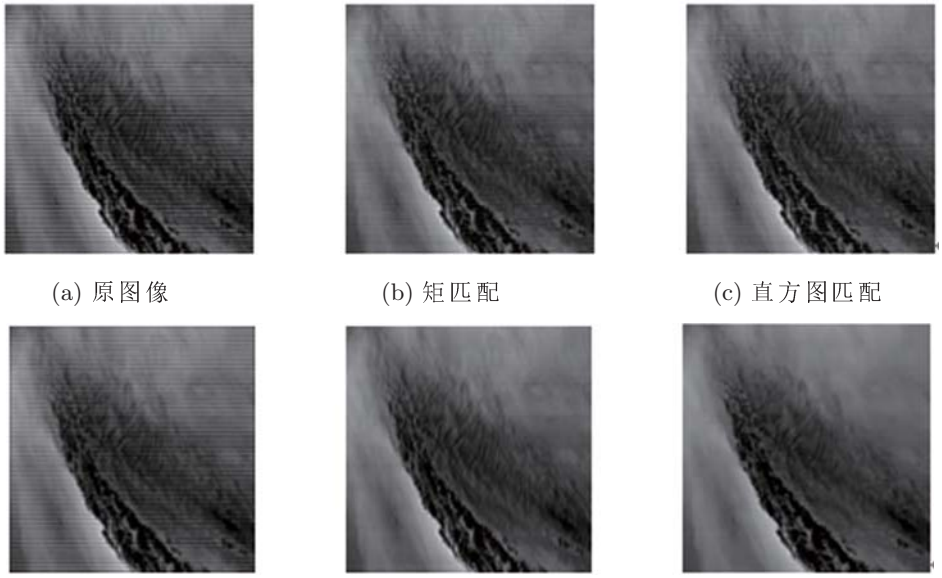


图 6 Terra-MODIS 第 27 波段的 1~10 号探测器子图像

从图 6 可以看出，第 27 波段 1~10 号探测器中的第 4、5、6 和 7 号探测器子图不含条带噪声。选择第 4 幅子图作为矩匹配参考子图，对其余子图与参考子图做矩匹配处理。

将矩匹配结果重新排列为整幅图像, 然后用 1.1 节提出的条带检测法标记条带位置, 最后用变分条带去除模型进行处理, 参数设置与 3.1 节相同。各方法的条带去除效果如图 7 所示。

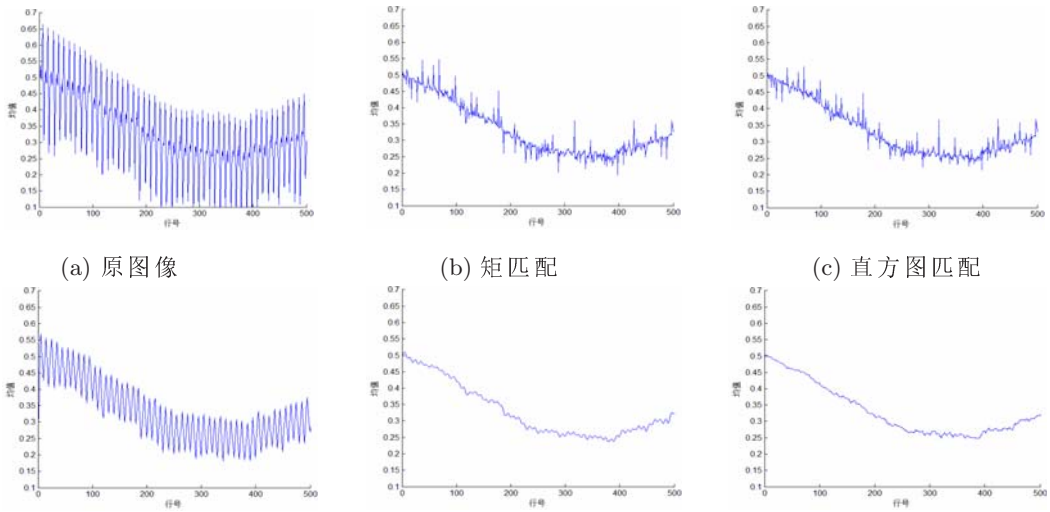


(a) 原图像 (b) 矩匹配 (c) 直方图匹配

(d)5*5 低通滤波 (e) 单向全变分 (f) 本文方法

图 7 Terra-MODIS 第 27 波段的条带去除结果

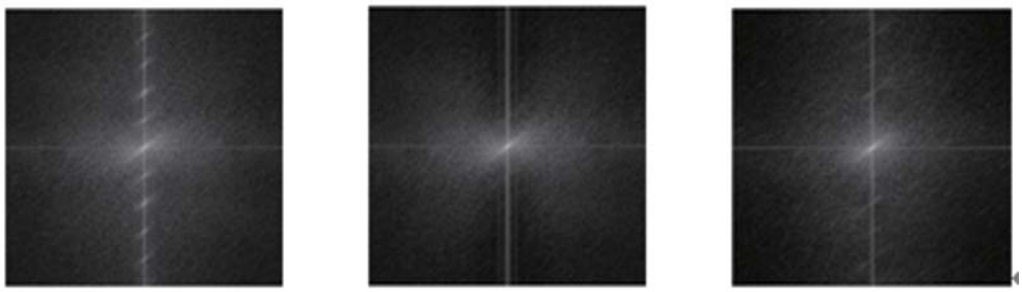
从图 7 可以看出，各方法均能够在一定程度上去除条带噪声，其中直方图匹配、低通滤波和矩匹配法去除宽行条带的效果较差，仍残留了较多的条带；单向全变分方法去除条带后的图像中仍有少量条带存在。从目视效果上看，本文算法在有效去除条带的同时较好地保留了图像的边缘和细节信息。图 8 给出了利用各方法去除条带前后行均值的变化情况。



(a) 原图像 (b) 矩匹配 (c) 直方图匹配

(c)5×5 低通滤波 (d) 单向全变分 (e) 本文方法

图 8 Terra-MODIS 第 27 波段各行均值图



(a) 原图像 (b) 单向全变分 (c) 本文方法

图 9 Terra-MODIS 第 27 波段频谱图像

从图 8 可以看出，对于宽行条带、矩匹配及直方图匹配能部分地平滑行均值曲线，单向全变分及本文算法均能够获得更为平滑的行均值曲线。这说明全变分及本文方法的条带去除效果更好。

图 9 为用单向全变分方法和本文算法处理结果图像的频谱图。图 9(e) 中 Y 轴方向无亮斑，但在 Y 轴左右出现了明显的对称亮线，说明在去条带的过程中引入了其它噪声。图 9(f) 中 Y 轴两侧无亮线出现，但在 Y 轴上仍然含有轻微的亮斑，说明本文提出的算法在去除条带的同时，并没有引入其它的噪声。但由于受到条带检测算法精度的影响，图像中仍然存在着极少量的条带残余。

为了定量评价本文算法去除条带的效果，选取变化系数倒数 (Inverse Coefficients of Variation, ICV [14]) 和辐射质量提升因子 (Improvement Factors of Radiometric Quality, IF [15]) 作为评价指标。

通过选取图像内两处 10×10 像素大小的均匀区域计算得到 ICV，计算公式如下：

$$ICV = R_a/R_{sd} \tag{11}$$

式中，R_a 为条带去除后图像指定窗口大小内的均值；R_{sd} 为条带去除后图像指定窗口大小的标准差。ICV 值越大，条带的去除效果越好。反映条带去除前后两幅图像在条带分布方向上的变化，计算公式为

$$IF = 10\log_{10}\left(\frac{\sum_i[m_{I_R}(i)-m_{I_R}(i-1)]^2}{\sum_i[m_{I_E}(i)-m_{I_E}(i-1)]^2}\right) \quad (12)$$

式中，$m_{I_R}(i)$、$m_{I_E}(i)$ 分别表示条带去除前后两幅图像的第 i 行均值。IF 值越大，说明条带去除效果越好，反之，说明条带去除能力较差。

从表 1 中可得出, 与其它去条带算法相比，本文算法的 ICV 和 IF 指标值相对较高, 表明本文提出的算法的条带去除效果最好。表中 IF 值出现负值, 说明算法对图像改变过大，图像发生了失真。

表 1 Terra-MODIS 第 33、27 波段条带去除结果的客观评价指标

波段	指标	矩匹配	直方图匹配	低通滤波	单向全变分	本文算法
第 33 波段的图像	ICV(sample 1)	33.0773	36.9123	146.1594	125.3147	167.4878
	ICV(sample 2)	26.2831	26.1658	29.6867	25.7364	28.9149
	IF	0.1126	0.3247	-1.8552	9.9730	9.5904
第 27 波段的图像	ICV(sample 1)	17.7859	23.1659	12.7615	42.1659	67.1132
	ICV(sample 2)	12.1885	14.5207	10.8014	21.4441	23.7181
	IF	11.2870	12.0403	10.8158	31.6712	31.9414

4 结论

提出了一种结合矩匹配和变分方法的 MODIS 影像条带噪声去除算法。首先，采用矩匹配去除多行和宽行条带图像的部分噪声；然后，基于改进的条带检测算法确定条带位置，通过变分方法滤除剩余的条带噪声。从实验结果可以看出，相较于其它方法，本文提出的模型在去除条带噪声的同时，有效地保持了图像的细节信息。但本文提出的变分模型在条带宽度较大时，结果图像中仍然存在少量的残余条带，这需要进一步改进。此外，模型中的参数需要通过实验来选取，如何自适应地设置参数还有待于更深入的研究。

参考文献

[1] Gadallah F L, Csillag F, Smith E J M. Destriping Multisensor Imagery with Moment Matching[J].*Int. J. Remote Sensing*, 2000,**21**(12): 2505–2511.

[2] Horn B K P, Woogha R J. Destriping Landsat MSS Imagery by Histogram Modification[J].*Comput Graph and Image Process*, 1979, **10**: 69–83.

[3] 陈劲松, 邵芸, 朱博勤. 中分辨率遥感图像条带噪声的去除 [J].**遥感学报**,2004,**8**(3:227–233.

[4] 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.

[5] Tsai F, Chen W W. Striping Noise Detection and Correction of Remote Sensing Images [J].*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008,**46**(12): 4122–4129.

[6] 石光明, 王晓甜, 张犁, 等. 基于方向滤波器消除遥感图像孤立条带嘈声的方法 [J].**红外与毫米波学报**,2008,**27**(3):214–218.

[7] 王玉璘, 冯旗, 裴浩东, 等. 改进的基于神经网络的卫星遥感图像去条带方法 [J].**飞行器测控学报**,2006,**25**(2):22–25.

[8] 罗婷, 周新志. GA–BP 网络在去除 MODIS 遥感影像条带嘈声中的应用 [J].**测控技术**,2010,**29**(6):21–24.

[9] 项海兵, 刘劲松. MODIS 1B 影像条带检测与去除 [J].**遥感学报**,2011,**15**(1):130–136.

[10] Rakwatin P, Takeuchi W, Yasuoka Y. Stripe Noise Reduction in MODIS Data by Combining Histogram Matching with Filter[J].*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,2007,**45**(6): 1844–1856.

[11] Shen H F, Zhang L P. A MAP–Based Algorithm for Destriping and Inpainting of Remotely Sensed Images [J] .*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009,**47**(5): 1492–1502.

[12] Bouali M, Ladjal S. Toward Optimal Destriping of MODIS Data Using a Unidirectional Variational Model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011,**49**(8): 2924–2934.

[13] Rudin L, Osher S, Fatemi E. Nonlinear Total Variation Based Noise Removal Algorithms[J].*Physical D*, 1992, **60**: 259–268.

[14] Nichol J E, Vohora V. Noise over Water Surfaces in Landsat TM Images[J].*International Journal of Remote Sensing*, 2004,**25**(11): 2087–2093.

[15] 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.

(上接第 23 页)

$K_1 \cdot K_2 > 2$ 时，背景辐射和大气传输环节干扰严重，探测器无法正常探测到目标，因此此时为复杂光电环境。$K_3/K_4 > 3$ 时，干扰措施对目标的正常检测造成严重影响，探测器要么探测到干扰后的假目标，要么探测不到目标。

5 实例参考

例：室外温度 23°C，天气晴朗，飞机 1 在 50 km 高空做蛇形运动，发射 5 枚点源红外干扰弹；飞机 2 与飞机 1 间的距离足够大，与飞机 1 做同样的动作，发射 5 枚面源红外干扰弹。分别分析两种环境对红外成像制导导弹和普通红外制导导弹的威胁程度。

解: 此背景为天空背景,K_1=K_{14}=1.5,K_2 ≈1.0。对于红外成像制导导引头，由于导引头的检测算法为边缘检测或模糊识别，能够有效识别目标和干扰点源的干扰，此时取 K_3/K_4=1，即干扰等级为 1；对于面源干扰，检测算法识别概率大大降低，由于面源诱饵投放过程中的辐射强度要大于 2 倍目标辐射，所以取值要大于 3，即干扰等级为 4。对于一般的红外导引头，两种模式下都无法正常识别目标，取值都大于 3，所以两种环境的干扰等级都是 4 级。以上的分级结果与实际情况相符合，证明本文构建的评估模型具有一定的参考价值。

6 结束语

通过分析光电环境的组成，系统构建了光电信号环境的分级指标体系。在该指标体系的基础上提出了各指标因子的模型。通过指标因子模型构造了判断函数，再结合探测器对环境的不同感受 [9] 修正了判断函数。结合判断函数与分级原则提出了光电信号环境的 4 级划分，最后以实例证明了模型的正确性。

参考文献

[1] 董军章, 田宏. 战场光波段电磁环境分析 [J].**光电技术应用**, 2007, **22**(3): 1–4.

[2] 尹少辉, 雷锋, 高强, 等. 战场电磁环境下光电环境构成分析 [J].**中国新技术新产品**, 2009 (7): 3.

[3] 王志刚. 战场光电信号环境分析 [J].**光电技术应用**, 2005,**20**(3): 14–18.

[4] 冯绍辉. 战略导弹光电威胁环境初步分析研究 [J].**航天电子对抗**, 1992(2): 38–45.

[5] 牛海, 谢田华. 基于人工神经网络的辐射源威胁评估方法研究 [J].**现代防御技术**, 2002,**30**(2): 44–48.

[6] 田晓飞, 马丽华, 洪华, 等. 面源红外诱饵的干扰特性分析以及模拟研究 [J].**激光与红外**, 2012,**42**(2): 165–169.

[7] 王充, 汪卫华. 红外辐射大气透过率研究综述 [J].**装备环境工程**, 2011,**8**(4): 73–76.

[8] 张宏宇, 林涛, 常晓玲. 面源红外干扰弹对红外成像制导系统干扰研究 [J].**光电技术应用**, 2008,**23**(3): 25–29.

[9] 刘义, 赵晶, 刘佳楠, 等. 基于作战效能的战场电磁环境分级描述方法 [J]. **系统工程与电子技术**, 2011,**33**(5): 1059–1062.