

文章编号 1004-924X(2017)01-0198-10

## 遥感图像条带噪声的多尺度变分模型去除

霍丽君<sup>1,2\*</sup>, 何 斌<sup>1</sup>, 周达标<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:** 多片 CCD 拼接遥感成像系统由于存在非均匀性问题, 导致遥感图像中常存在条带噪声, 本文在分析条带噪声的主要来源和模型的基础上, 提出了多尺度变分模型的条带噪声去除方法。首先, 分析了条带噪声的特点并建立了图像退化模型。其次, 结合条带噪声的单向性特点与多尺度分层分解方法构造能量泛函。然后, 利用不动点 Gauss-Seidel 迭代法多尺度分级极小化能量泛函, 将条带噪声和图像有用信息分离。最后, 对各尺度结构分量和细节分量进行累加, 得到去噪图像。实验结果表明: 对于周期条带噪声, 图像畸变量为 2%, 图像辐射质量提升到 11.715 dB; 对于随机条带噪声, 图像畸变量为 3.3%, 图像辐射质量提升到 11.092 5 dB。与典型条带噪声去除方法相比, 不管是周期条带噪声还是随机条带噪声, 本文方法均能够在保证畸变量很小的情况下, 将其完全去除, 满足遥感图像低畸变量的预处理要求。

**关键词:** 光学遥感; 条带噪声; 多尺度分层分解; 非均匀性校正

**中图分类号:** TP751.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172501.0198

## A destriping method with multi-scale variational model for remote sensing images

HUO Li-jun<sup>1,2\*</sup>, HE Bin<sup>1</sup>, ZHOU Da-biao<sup>1,2</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: huolj2014@163.com*

**Abstract:** Non-uniformity often occurs in multi-detectors remote-sensing imaging system, resulting in the existence of strip noise in remote sensing images. A destriping method with multi-scale variational model has been proposed on the basis of the analysis on the main sources and model of stripe noise. First, the characteristics of strip noise have been analyzed and the degradation model of the image has been formulated. Secondly, the unidirectional characteristic of strip noise and multi-scale hierarchical image decomposition have been combined to structure  $J$ -functional. Then, the method uses fixed point Gauss-Seidel iterative method to minimize multi-scale  $J$ -functional and separate stripe noise and useful information. Last, structural and details component under different scales will be accumulated to obtain the destriped images. The experiment result on real remote sensing images indicates that the image distortion is 2% and IF increases to 11.715 0 dB for regular stripe noise; the image distortion is

收稿日期: 2016-06-15; 修订日期: 2016-08-24.

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20126016)

3.3% and the IF increases to 11.092 5 dB for random stripe noise. Compared with typical destriping methods, the method in this paper can ensure that stripe noise will be removed completely and pre-processing requirements of small distortion for remote sensing images will be met, for both regular stripe noise and random stripe noise.

**Key words:** optical remote sensing; stripe noise; multiscale hierarchical image decomposition; non-uniformity correction

## 1 引言

遥感图像的像元网格是通过结合遥感器平台在顺轨方向的运动和交轨方向(与平台运动方向垂直)的扫描来共同实现的。交轨方向通常需要将多片 CCD(Charge Coupled-Device)探测器进行拼接以满足成像焦平面的长度<sup>[1-2]</sup>,从而实现大视场成像的要求。由于多片 CCD 探测器在成像过程中存在辐射响应非均匀性和不同行或列读出电路不一致等问题<sup>[3]</sup>,在扫描方向容易产生条带噪声。

为了抑制条带噪声,需要对遥感相机进行发射前辐射定标和在轨辐射定标,但由于 CCD 探测器,尤其是中波和长波红外探测器的辐射响应会随时间产生漂移,不能完全消除条带噪声<sup>[4-6]</sup>。残留的条带噪声不仅影响成像质量,而且还会进一步影响后续的遥感图像应用,所以急需研究一种能有效去除残留条带噪声的方法。

目前,去除条带噪声的方法主要分为三类:基于滤波的方法、基于灰度信息统计的方法和基于变分的方法。基于滤波的方法主要包括空间-频率域滤波<sup>[7]</sup>和基于小波域的滤波<sup>[8]</sup>,这类方法计算简单、易于实现,但由于无法准确分离频率成分,容易丢失图像有用的细节信息,造成图像模糊;基于灰度信息统计的方法主要包括直方图匹配<sup>[9]</sup>、矩匹配<sup>[10]</sup>及其改进方法<sup>[11]</sup>,这类方法以各传感器具有相同灰度统计特性为前提,去噪效果严重依赖于被统计的数据集,而且存在收敛速度慢和鬼影的问题;基于变分的方法通过极小化能量泛函,得到去噪图像,这类方法的关键在于能量泛函的构造。Bouali 等<sup>[12]</sup>采用  $L^1$  范数构造能量泛函, $L^1$  范数虽然有利于保护边缘信息,但由于其约束性太强,容易产生阶梯效应。

上述方法都是在单一固定尺度下进行图像恢复的,在去除条带噪声时,容易损失细节信息或导

致去除不干净。图像的多尺度分层分解理论(TNV)<sup>[13]</sup>认为图像是由不同尺度空间的结构分量和振荡分量(包括纹理和噪声)构成的,故可以通过将图像在不同尺度下分解,达到分离噪声和图像有用细节信息的目的。

本文针对遥感图像条带噪声的特点,提出了一种基于多尺度变分模型的去噪方法,在构造能量泛函时将条带噪声的特点和多尺度分层分解方法相结合,并引入二阶正则约束项,利用不动点 Gauss-Seidel 迭代法多尺度分级极小化能量泛函,得到去噪图像。通过对不同的实际遥感图像进行处理,验证了该方法性能。

## 2 条带噪声去除算法

### 2.1 算法设计

假设图像  $f \in L^2(\Omega)$ ,条带噪声为加性噪声,则图像的退化模型为:

$$f(x, y) = u(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 为遥感相机获得的实际观测数据, $u(x, y)$ 为探测器响应一致情况下的理想数据,是待求量, $n(x, y)$ 为条带噪声,是未知量。 $x$ 轴和 $y$ 轴分别沿水平方向和竖直方向,坐标原点位于图像左上角。去除条带噪声的问题就是在 $n(x, y)$ 未知的情况下,从已知的含噪图像 $f(x, y)$ 中得到理想数据的最佳估计 $\hat{u}$ 。此类反问题是典型的病态问题,可以利用变分模型进行求解,其关键在于能量泛函的构造,在构造能量泛函时只有充分结合条带噪声的特点,才能有效去除条带噪声,同时保留有用的细节信息。

与各向同性的随机噪声不同,条带噪声是一种结构性噪声(各向异性),具有方向性和单向性<sup>[11]</sup>,条带噪声的单向性主要体现在条带噪声只影响图像梯度场的一个分量。不失一般性,本文以水平方向条带噪声为例,如图1所示,图1(a)是光谱成像仪 MODIS(Moderate Resolution

Imaging Spectro-radiometer) 获得的 Level-1B 数据, 可以明显看出图像中条带噪声沿水平方向分布, 计算其水平方向和竖直方向的梯度, 分别如图

1(b)、(c)所示, 可以看到含噪图像水平方向的梯度不受条带噪声的影响, 而竖直方向的梯度受条带噪声的影响。

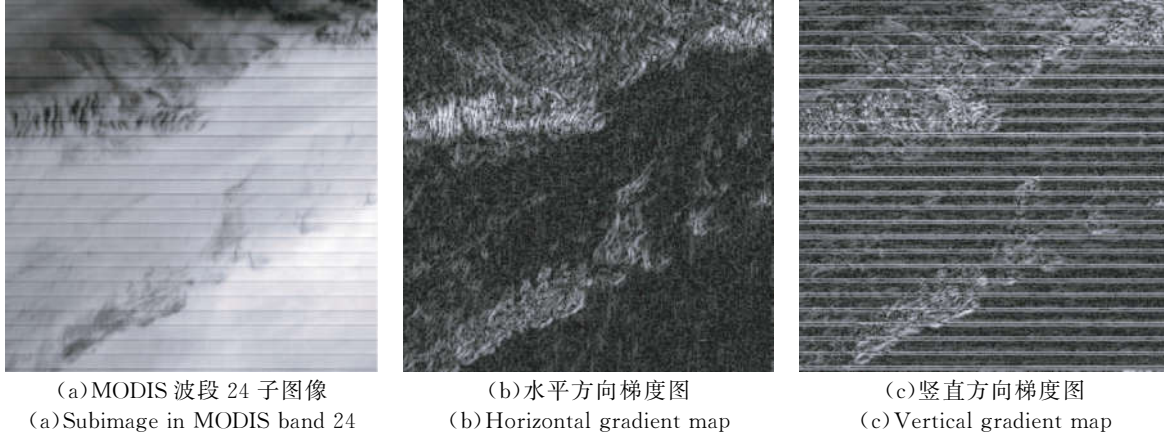


图 1 MODIS 获得的数据及其梯度图

Fig. 1 MODIS image and its partial gradient maps

结合水平条带噪声只影响图像梯度场竖直分量的特点, 构造能量泛函:

$$J(u, v) = \arg \inf_{u+v=f} \int_{\Omega} \left\| \frac{\partial(u-f)}{\partial x} \right\|^2 + \lambda_0 \left\| \frac{\partial u}{\partial y} \right\|^2 dx dy, \quad (2)$$

式中: 右侧第一项为保真项, 第二项为正则约束项,  $\lambda_0$  为正实数, 其为图像分解的尺度参数, 则解记作  $[u_0, v_0]$ , 这样, 原含噪图像就分解为两部分  $f = u_0 + v_0$ , 此时  $\tilde{u} = u_0$ , 残余量为  $v_0$ 。  $u_0$  只包含了图像在  $\lambda_0$  尺度下的结构分量和细节信息, 其对应的残余量  $v_0$  除了包含有条带噪声信息外, 还包含有用图像的有用细节信息, 这些细节信息属于更小的尺度空间, 可以通过细化分解尺度进行提取。将  $v_0$  在  $\lambda_0 \cdot 2^{-1}$  尺度下分解:

$$v_0 = u_1 + v_1, \\ [u_1, v_1] = \arg \inf_{u+v=v_0} \int_{\Omega} \left\| \frac{\partial(u-v_0)}{\partial x} \right\|^2 + \lambda_0 \cdot 2^{-1} \left\| \frac{\partial u}{\partial y} \right\|^2 dx dy. \quad (3)$$

如式(3)所示, 得到  $f = u_0 + u_1 + v_1$ ,  $u_1$  包含了图像在  $\lambda_0 \cdot 2^{-1}$  尺度下的结构分量和细节信息, 其对应的残余量为  $v_1$ 。类似地, 第  $k$  次分解为:

$$v_{k-1} = u_k + v_k, \\ [u_k, v_k] = \arg \inf_{u+v=v_{k-1}} \int_{\Omega} \left\| \frac{\partial(u-v_{k-1})}{\partial x} \right\|^2 + \lambda_0 \cdot 2^{-k} \left\| \frac{\partial u}{\partial y} \right\|^2 dx dy. \quad (4)$$

此时, 图像  $f$  可以表示为:

$$f = u_0 + v_0 = u_0 + u_1 + v_1 = \dots = u_0 + u_1 + \dots + u_k + v_k = \sum_{j=0}^k u_j + v_k. \quad (5)$$

随着分解尺度的不断细化,  $\{u_j\}_{j>0}$  不断地从  $v_k$  中提取出有用细节信息, 同时将有用信息与条带噪声分离。分解次数与图像畸变量 ID 的关系如图 2 所示, 图像畸变量<sup>[11]</sup>定义为:

$$ID = 1 - \frac{1}{\text{card}\{BW\}} \sum_{\omega \in BW} \frac{|P_0(\omega) - P_1(\omega)|}{P_0(\omega)}, \quad (6)$$

式中:  $P_0, P_1$  分别为含噪图像和去噪图像沿行方向的幅度均值,  $BW$  表示频率范围,  $\text{card}$  表示集合元素的个数。由于图像去噪后沿行方向的变化应该与原含噪图像保持一致, 所以 ID 越趋近于 1, 表明图像畸变量越小, 原有图像信息丢失越小。

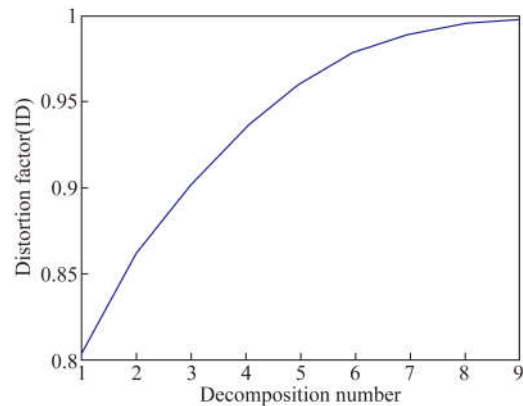


图 2 去噪图像畸变量与本文方法分解次数的关系  
Fig. 2 Distortion factor of destriped image with respect to the number of decomposition used in proposed method

### 2.2 优化方法

求解式(2)的泛函极小化问题,可以转化为求解其对应 Euler-Lagrange 方程的解<sup>[14-15]</sup>,即:

$$\begin{aligned} \partial_x^2(u-f) + \lambda_0 \partial_y^2 u &= 0 \text{ in } \Omega \\ \frac{\partial u}{\partial n_{|\partial\Omega}} &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

采用有限差分法将图像的定义域  $\Omega$  离散化,设  $x=ih, y=jh$ ,取  $h=1$ ,则式(7)的离散形式为:

$$D_{-x}(D_{+x}(u-f)) + \lambda_0 D_{-y}(D_{+y}u) = 0, \quad (8)$$

其中:  $(D_{\pm x}u)_{i,j} = \pm(u_{i\pm 1,j} - u_{i,j})$ ,  $(D_{\pm y}u)_{i,j} = \pm(u_{i,j\pm 1} - u_{i,j})$ 。

采用不动点 Gauss-Seidel 迭代法求解式(8),得到式(2)的解的离散形式递推公式为:

$$u_{i,j}^{n+1} = (u_{i+1,j}^n + u_{i-1,j}^n + 2f_{i,j} - f_{i+1,j} - f_{i-1,j} + \lambda_0 u_{i,j+1}^n + \lambda_0 u_{i,j-1}^n) / (2 + 2\lambda_0). \quad (9)$$

对于图像边界上的像素点采用 Neumann 边界条件,则:

$$\begin{cases} u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^{n+1}, 1 \leq i \leq N-2, 1 \leq j \leq M-2 \\ u_{i,0}^{n+1} = u_{i,1}^{n+1}, u_{i,M-1}^{n+1} = u_{i,M-2}^{n+1}, i = 0, \dots, N-1, \\ u_{0,j}^{n+1} = u_{1,j}^{n+1}, u_{N-1,j}^{n+1} = u_{N-2,j}^{n+1}, j = 0, \dots, M-1 \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $i, j$  分别为列索引和行索引,图像  $u$  的尺寸为  $M \times N$ 。

算法流程如下:

输入:待去噪图像  $f$

(1)初始化  $\lambda = \lambda_0, \epsilon = \epsilon_0$ ;

(2)应用式(7)~(10)求解  $u_0, v_0$ ;

(3)while( $ID > 0.99$  and  $\|v_k\|_2 - \|v_{k-1}\|_2 > \epsilon_0$ )

更新  $\lambda_k = \lambda_0 \cdot 2^{-k}, v_{k-1} = f - \sum_{j=0}^{k-1} u_j$

应用式(7)~(10)求解  $u_k, v_k$

输出:去噪图像  $\tilde{u} = \sum_{j=0}^k u_j$

### 3 实验与分析

MODIS 一共有 36 个波段,光谱范围为 0.4~14.4  $\mu\text{m}$ ,虽然经过了发射前辐射定标和在轨辐射定标,但某些波段仍受条带噪声影响严重,如热辐射波段 24,27,30,33 等,其中波段 24 受周期条带噪声的影响较严重(图 1(a)),波段 33 受随机条带噪声的影响较严重(图 10(a))。

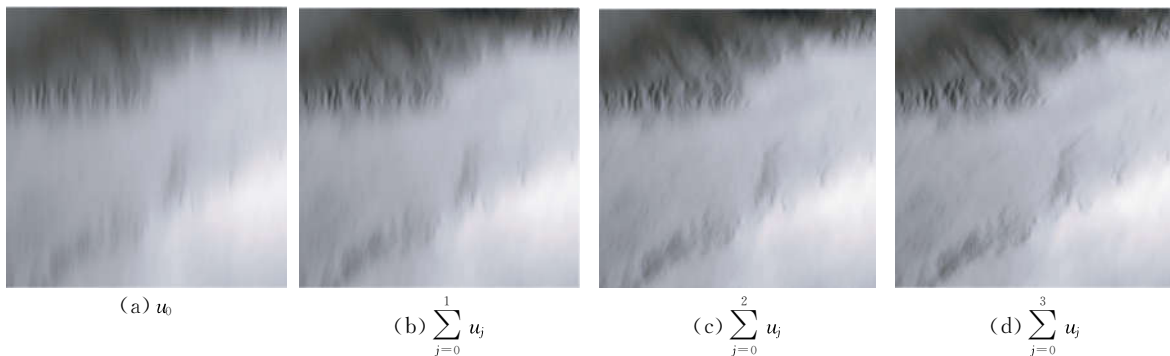
利用本文方法对其进行条带噪声去除,并与小波滤波法<sup>[7]</sup>,改进的矩匹配法(M-M)<sup>[10]</sup>和单向变分法(UV)<sup>[16]</sup>等典型条带噪声去除方法进行对比。本文采用主观和客观相结合的方法综合评价去噪结果。主观上,除了直接观察图像的视觉质量外,还采用行均值曲线和列方向的幅频曲线定性评价去噪图像质量。客观上,使用辐射质量提升因子 IF(单位为 dB)、图像畸变量 ID 等评价参数进行评价。辐射质量提升因子<sup>[6]</sup>的定义为:

$$IF = 10 \lg \left[ \frac{\sum_n (m_{I_R}[n] - m_I[n])^2}{\sum_n (m_{I_E}[n] - m_I[n])^2} \right], \quad (11)$$

式中:  $m_{I_R}[n], m_{I_E}[n], m_I[n]$  分别为噪声图像,去噪图像和经低通滤波器处理的去噪图像第  $n$  行的均值。IF 值越大,表明图像的辐射质量提升越大。

#### 3.1 周期条带噪声去除

采用本文介绍的条带噪声去除方法对 MODIS 波段 24 level-1B 数据进行去噪处理,如图 3~图 4 所示。从图中可以看出,随着分解尺度的不断细化,不同尺度的结构分量和细节信息不断得到提取和恢复,且周期条带噪声没有被恢复,最后残余项  $v_N$  中几乎只剩下周期条带噪声信息。



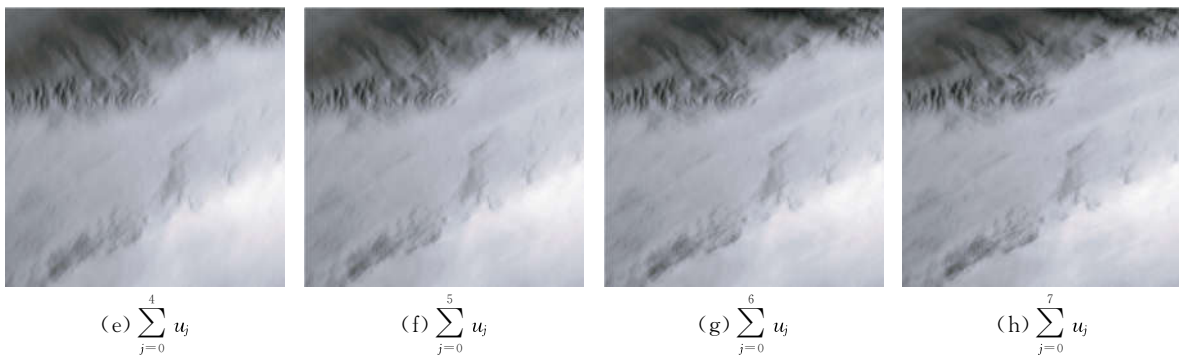


图 3 MODIS 波段 24 子图像分解不同次数所得的去噪图像( $\lambda_0 = 15, \epsilon_0 = 10^{-6}$ )

Fig. 3 Destriped image of MODIS band 24 subimage with different decomposition number( $\lambda_0 = 15, \epsilon_0 = 10^{-6}$ )

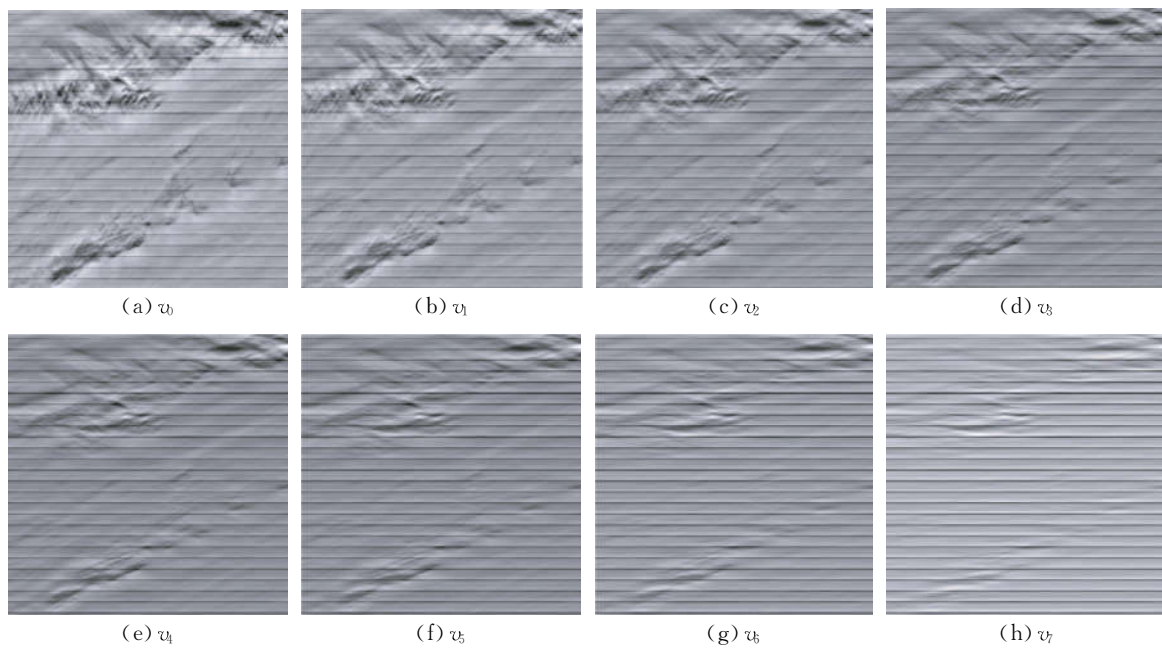


图 4 图 3 对应的残余量  $v_k$ (为了显示效果,进行了对比度拉伸变换)

Fig. 4 Residual  $v_k$  for  $0 \leq k \leq 7$  corresponding to Fig. 3(contrast stretching for display)

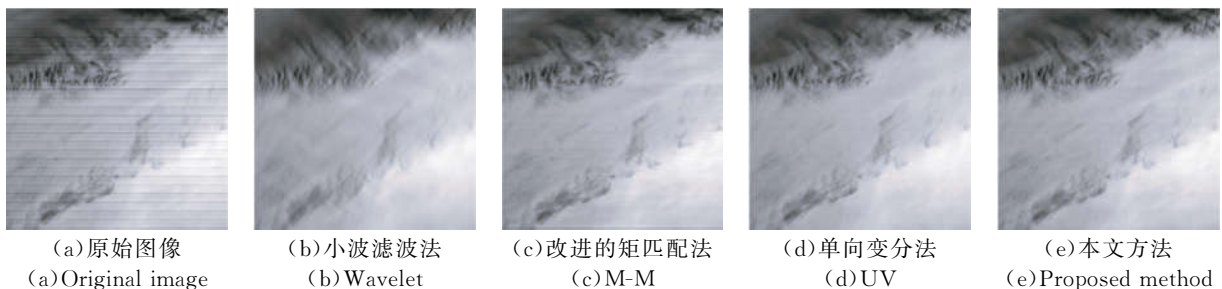


图 5 MODIS 波段 24 去噪结果

Fig. 5 Destriped results of MODIS band24 subimage

图 5(b)~(e)为使用小波滤波法、改进的矩匹配法,单向变分法和本文方法对图 1(a)周期条

带噪声进行去除的结果。从图中可以看出,几种方法处理后,周期条带噪声都得到了不同程度的

抑制。小波滤波法在去除条带噪声时由于无法准确将条带噪声的频率成分和有用信息的频率成分区分开,导致与条带噪声具有相同频率的细节信息损失严重。改进的矩匹配法严重依赖于参考图像的选择,不能完全去除条带噪声。单向变分法虽然能完全去除条带噪声,但是由于正则化项  $L^1$  范数约束性太强,导致图像沿垂直于条带噪声的方向过于平滑,图像对比度下降。而本文方法在去除条带噪声的同时能最大限度地保留有用细节信息,去噪效果最好。

图 6 为图 5 对应的行均值曲线。从图中可以看出,受周期条带噪声的影响,含噪图像的行均值曲线出现了周期性的波动。图 6(a)中行均值曲线过于平滑,说明小波滤波法虽然能滤除条带噪声但容易丢失细节信息,造成图像模糊。图 6(b)中行均值曲线存在少量毛刺,说明条带噪声没有完全去除。图 6(c)中行均值曲线呈现分段平滑的现象,说明单向变分法在去除条带噪声时容易出现阶梯效应。图 6(d)中行均值曲线整体变化趋势与原始图像基本一致,表明图像各尺度结构和细节信息得到了有效保留;同时曲线不存在毛刺,表明条带噪声得到了有效抑制。

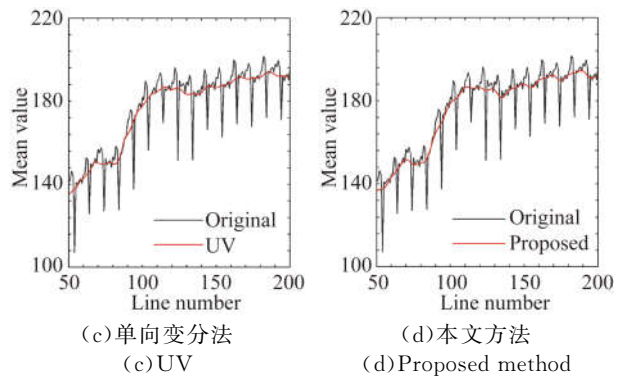


图 6 图 5 中去噪图像的行均值曲线

图 7 为图 5(a)~(e)的列方向幅度-频率均值图。图 7(a)表示由于周期条带噪声的存在,幅频谱在一些频率点处出现尖峰值。图 7(b)中的幅频曲线过于光滑,且与原图像的幅频曲线相差较大,表明小波滤波法不仅滤除了条带噪声信息,而且也滤除了有用细节信息。图 7(c)中幅频曲线存在尖峰值,表明改进的矩匹配法虽然在一定程度上能抑制条带噪声但不能完全将其去除。从幅频曲线的角度来看,单向变分法和本文方法均能有效去除条带噪声。

上述去噪方法的客观评价指标统计结果见表 1。可以看出,本文方法能在图像畸变量很小的情况下,完全去除周期条带噪声,同时能够保留图像的边缘等细节信息。

表 1 MODIS 波段 24 不同去噪方法的客观评价指标统计结果

Tab. 1 Qualitative indexes of different destriping methods for MODIS band24

Band	Index	Wavelet	M-M	UV	Proposed
24	ID	0.974 1	0.995 6	0.989 5	<b>0.998 0</b>
	IF	8.735 0	7.615 8	9.453 2	<b>11.715 0</b>

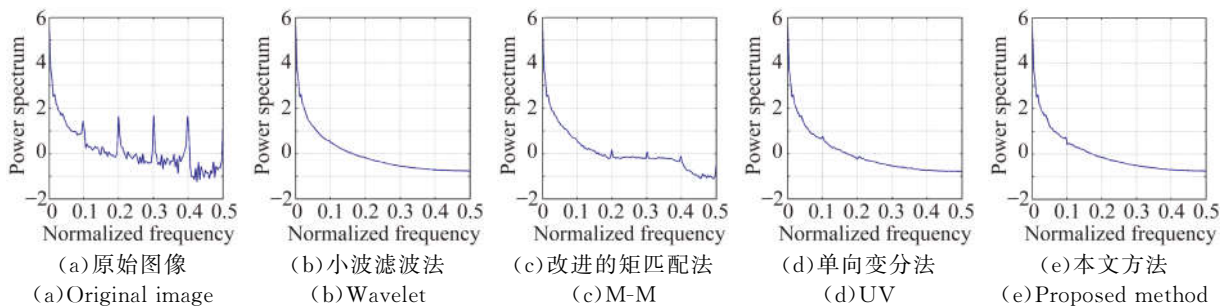
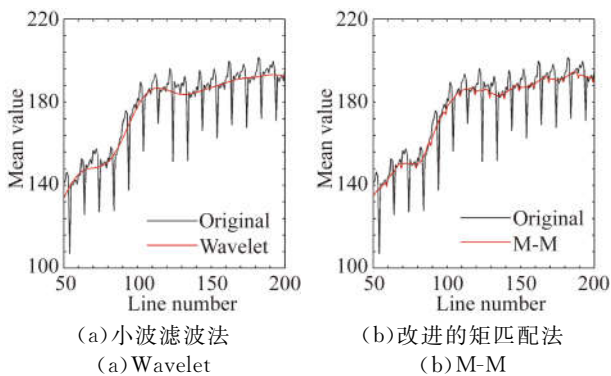


图 7 图 5 中图像的列方向幅度-频率均值图

Fig. 7 Column-averaged power spectrum for images shown in Fig. 5

### 3.2 随机条带噪声去除

利用本文介绍的条带噪声去除方法对 MODIS 波段 33 level-1B 数据进行去噪处理,如图 8~图 9 所示,从图中可以看出,随着分解尺度的不断细化,不同尺度的结构分量和细节信息不断

地得到提取和恢复,而随机条带噪声没有被恢复,最后残余项  $v_N$  中几乎只剩下随机条带噪声信息。

图 10(b)~(e)为使用小波滤波法、改进的矩匹配法,单向变分法和本文方法对图 10(a)随机条带噪声进行去除的结果。

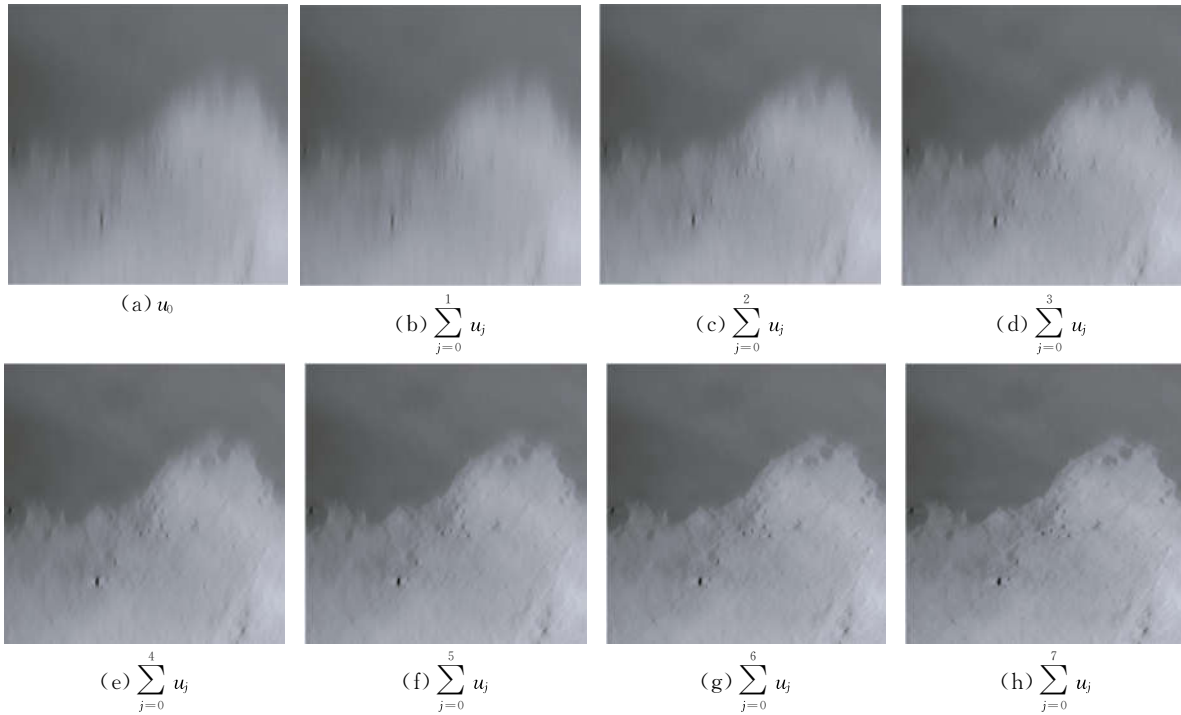


图 8 MODIS 波段 33 子图像分解不同次数所得的去噪图像 ( $\lambda_0 = 15, \epsilon_0 = 10^{-6}$ )

Fig. 8 Destripe images of MODIS band33 subimage with different decomposition number ( $\lambda_0 = 15, \epsilon_0 = 10^{-6}$ )

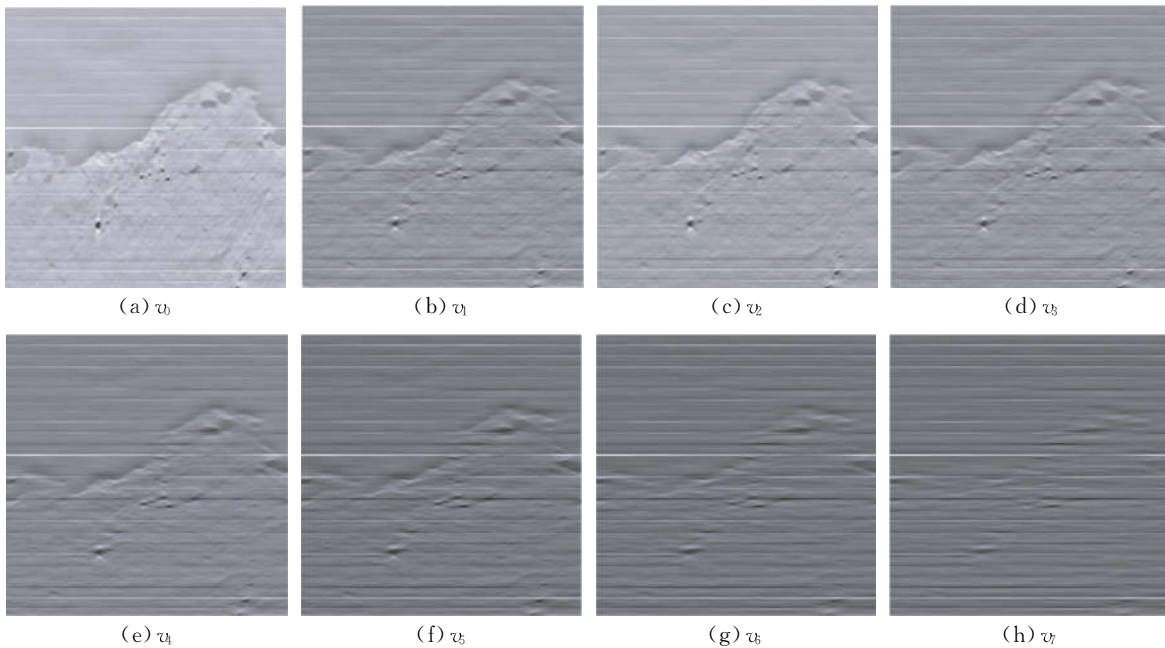


图 9 图 8 对应的残余项  $v_k (0 \leq k \leq 7)$  (为了显示效果,进行了对比度拉伸变换)

Fig. 9 Residual  $v_k$  for  $0 \leq k \leq 7$  corresponding to Fig. 8 (contrast stretching for display)

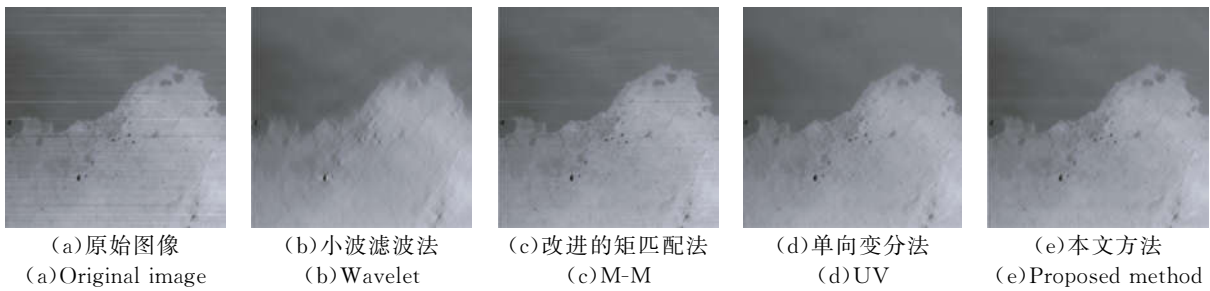


图 10 MODIS 波段 33 去噪结果

Fig. 10 Destriped results of MODIS band33 subimage

如图 10(b)所示,小波滤波法在去除随机条带噪声的同时也滤除了其他细节信息,导致图像变模糊。改进的矩匹配法仍不能完全去除随机条带噪声,如图 10(c)所示。单向变分法虽然能去除随机条带噪声,但是图像的对比度沿垂直于条带噪声的方向下降,如图 10(d)所示。相比较而言,本文方法的去噪效果最好,在去除条带噪声的同时能最大限度地保留图像信息。

图 11 为图 10 对应的行均值曲线。从图中可以看出,含噪图像的行均值曲线受随机条带噪声的影响而呈现随机波动。不同方法对随机条带噪声的去除效果与周期条带噪声的去除效果一致:小波滤波法的行均值曲线过于平滑,改进的矩匹配方法的行均值曲线仍存在少量毛刺,单向变分法的行均值曲线仍呈现出分段平滑的现象,而本文方法的行均值曲线整体走势与原始图像一致且平滑,表明条带噪声得到了完全抑制。

图 12 为图 10(a)~(e)的列方向幅度-频率均值图。12(a)表示由于随机条带噪声的存在,幅度谱高频部分出现剧烈震荡。图 12(b)表示小波滤波法不仅滤除了条带噪声的频率成分,而且有用信息的频率成分也被滤除。图 12(c)表示改进的矩匹配法虽然能在一定程度上抑制条带噪声但不能完全去除。比较图 12(d)和(e)可知,本文方法

能在不破坏有用细节信息的情况下更有效去除条带噪声。

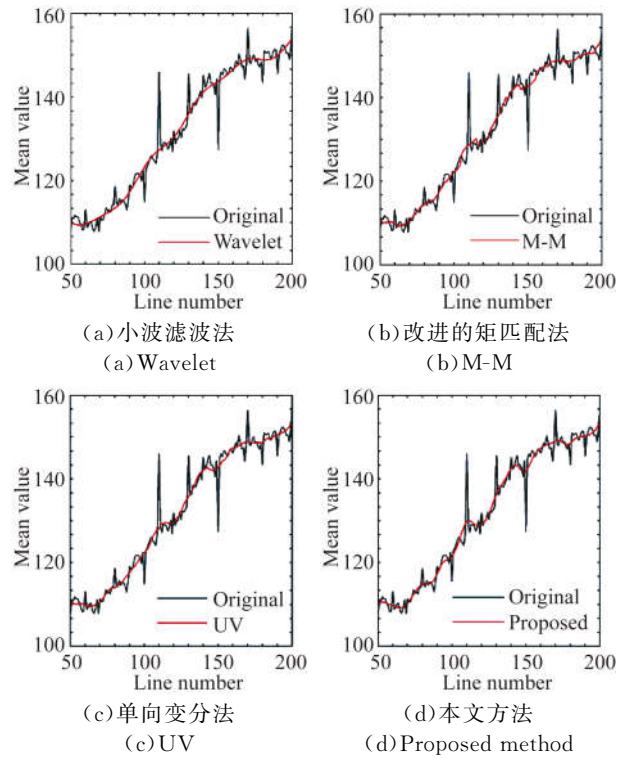


图 11 图 10 中去噪图像的行均值曲线

Fig. 11 Mean line profiles for the images shown in Fig. 10

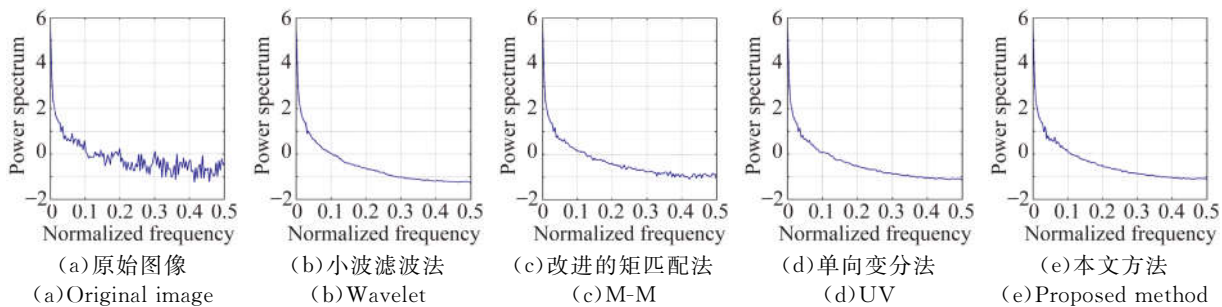


图 12 图 10 中图像的列方向幅度-频率均值

Fig. 12 Column-averaged power spectrum for images shown in Fig. 10

表 2 为上述不同去噪方法的客观评价指标统计结果。相比较而言,本文方法能在图像畸变量很小的情况下,完全去除随机条带噪声。

表 2 MODIS 波段 33 不同去噪方法的客观评价指标统计结果

Tab. 2 Qualitative indexes of different destriping methods for MODIS band33

Band	Index	Wavelet	M-M	UV	Proposed
33	ID	0.964 3	0.998 1	0.975 8	<b>0.996 7</b>
	IF	6.441 9	7.972 2	7.676 9	<b>11.092 5</b>

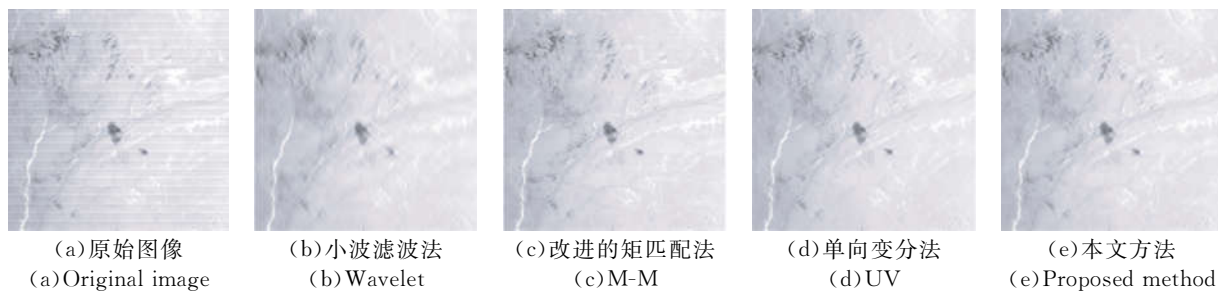


图 13 MODIS 波段 30 去噪结果

Fig. 13 Destriped results of MODIS band30 subimage

## 4 结 论

本文在分析遥感相机图像条带噪声特性的基础上,提出了一种条带噪声去除方法。利用多尺度分层分解方法将图像在不同尺度下分解实现条带噪声和图像有用信息的分离。由于构造能量函数时,结合了条带噪声单向性的特点,所以在去除

为进一步说明本文算法的稳定性,利用本文介绍的条带噪声去除方法对 MODIS 波段 30 level-1B 数据进行去噪处理,并与上述对比方法的去噪结果进行比较,结果如图 13 所示。从图 13(a)中可以看出,波段 30 严重受条带噪声的影响。比较图 13(b)~(e)可以看出,本文方法去除条带噪声的效果仍最优,条带噪声去除彻底,且图像的细节信息和对比度均未受到影响。

条带噪声时仍能很好地保留边缘等细节信息。实验结果表明,对于周期条带噪声,图像畸变量为 2%,图像辐射质量提升至 11.715 0 dB;对于随机条带噪声,图像畸变量为 3.3%,图像辐射质量提升至 11.092 5 dB。通过定性和定量分析,证明本文方法优于传统方法。本文提出的方法能够在完全去除条带噪声的同时很好地保留原图像的细节信息。

## 参考文献:

- [1] 孙斌, 李景林, 张星祥, 等. 600 mm 长焦平面时间延迟积分 CCD 的交错拼接[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(11): 2908-2913.  
SUN B, LI J L, ZHANG X X, *et al.*. Interleaving assembly of TDICCDs on 600 mm focal plane [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2908-2913. (in Chinese)
- [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 X J, REN J W, LI X SH, *et al.*. Non-uniformity calibration and correction of reflector-based mosaic CCD camera [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(6): 1057-1064. (in Chinese)
- [3] 刘则洵, 全先荣, 任建伟, 等. CCD 相机输出非均匀性线性校正系数的定标[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2211-2215.  
LIU ZE X, QUAN X R, REN J W, *et al.*. Calibration of CCD camera's output non-uniformity linear corrected coefficient [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2211-2215. (in Chinese)
- [4] 曹扬, 金伟其, 刘崇亮, 等. 红外焦平面阵列的自适应非均匀性校正及硬件实现[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(12): 2985-2991.  
CAO Y, JIN W Q, LIU CH L, *et al.*. Adaptive nonuniformity correction and hardware implementa-

- tion of IRFPA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):2985-2991. (in Chinese)
- [5] 王文华, 何斌, 韩双丽, 等. 星上 CCD 成像非均匀性的实时校正[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6):1420-1428.  
WANG W H, HE B, HAN SH L, *et al.*. Real-time correction of nonuniformity in CCD imaging for remote sensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1420-1428. (in Chinese)
- [6] 宁永慧, 郭永飞, 曲利新, 等. 多通道时间延迟积分 CCD 辐射标定和像元实时处理[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10):2952-2961.  
NING Y H, GUO Y F, QU L X, *et al.*. Radiometric calibration and pixel data real-time processing of multi-tip TDICCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10):2952-2961. (in Chinese)
- [7] JINSONG C, YUN S, GUO H, *et al.*. Destriping CMODIS data by power filtering [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(9):2119-2124.
- [8] TORRES J, INFANTE SO. Wavelet analysis for the elimination of striping noise in satellite images [J]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2001, 40(7):1309-1314.
- [9] RAKWATIN P, TAKEUCHI W, YASUOKA Y. Stripe noise reduction in MODIS data by combining histogram matching with facet filter [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6):1844-1856.
- [10] GADALLAH F, CSILLAG F, SMITH E. Destriping multisensor imagery with moment matching [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(12):2505-2511.
- [11] 韩玲, 董连凤, 张敏, 等. 基于改进的矩匹配方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 L, DONG L F, ZHANG M, *et al.*. Destriping hyperspectral image based on an improved moment matching method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12):3333-3338. (in Chinese)
- [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):2924-2935.
- [13] TADMOR E, NEZZAR S, VESE L. A multiscale image representation using hierarchical  $(BV, L^2)$  decompositions [J]. *Multiscale Modeling & Simulation*, 2004, 2(4):554-579.
- [14] 王超. 基于变分问题和偏微分方程的图像处理技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007: 13-22.  
WANG CH. *Image processing based on variational problems and partial differential equations* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007: 13-22. (in Chinese)
- [15] 赵文达, 赵建, 韩希珍, 等. 基于变分偏微分方程的红外图像增强算法研究[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(2):281-285.  
ZHAO W D, ZHAO J, HAN X ZH, *et al.*. Infrared image enhancement based on variational partial differential equations [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(2):281-285. (in Chinese)
- [16] ZHOU G, FANG H, YAN L, *et al.*. Removal of stripe noise with spatially adaptive unidirectional total variation [J]. *Optik*, 2014, 125(12):2756-2762.

#### 作者简介:



霍丽君(1989—),女,山西左权人,博士研究生,2008年于吉林大学获得学士学位,主要从事非均匀性校正、遥感图像处理等方面的研究。E-mail: huolj2014@163.com

#### 导师简介:



何斌(1961—),男,吉林长春人,研究员,1983年于南京理工大学获得学士学位,1990年于北京理工大学获得硕士学位,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间遥感图像处理技术方面的研究。E-mail: hbbemail@163.com