

# TDI-CCD 图像固有条带噪声的消除方法及实现

赵变红<sup>1,2</sup>, 何斌<sup>1</sup>, 杨利红<sup>1,2</sup>, 王文华<sup>1</sup>, 禄金波<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, E-mail: yunhan0502@gmail.com;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 存在于 TDI-CCD 图像中的条带噪声会影响图像的质量, 降低系统的测量精度。针对 TDI-CCD 图像固有条带噪声的灰度值在原始信息中变化比较缓慢的特点, 利用傅里叶变换域内的频谱图映射确定条带噪声频率的方法, 分别采用低通、带阻滤波器对条带噪声进行消除。另外, 提出了一种改进阈值的小波变换法来消除条带噪声, 该方法能在小波分解后各个尺度的垂直方向上自适应地确定阈值。实验结果表明在消除条带噪声方面, 改进阈值的小波变换法优于传统的傅里叶变换法。在整个频率域内, 改进阈值的小波变换法能够较彻底地消除条带噪声, 同时较好地保持了原图像的特征。

**关键词:** TDI-CCD; 条带噪声; 傅里叶变换; 小波变换; 自适应阈值

中图分类号: TP751

文献标识码: A

## Methods and Realization for Removing Inherent Stripe Noises in TDI-CCD Images

ZHAO Bian-hong<sup>1,2</sup>, HE Bin<sup>1</sup>, YANG Li-hong<sup>1,2</sup>, WANG Wen-hua<sup>1</sup>, LU Jin-bo<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China, E-mail: yunhan0502@gmail.com;

2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The existence of stripe noises influences the qualities of TDI-CCD images, and reduces the measurement accuracy of the system simultaneously. For the characteristic of slow change of the stripe noises' grey level compared with the primary information, the stripe noises are eliminated via low-pass filter and band-elimination filter separately using the method of determining the stripe noise frequency through the frequency spectrum mapping in the Fourier transform domain. Moreover, an improved threshold of Wavelet Transform method of eliminating stripe noise is presented in this paper. The each vertical direction's threshold in various scales is determined by itself after the wavelet decomposition. It is proved that in removing the TDI-CCD stripe noises, the improved threshold of Wavelet Transform is better than the traditional Fourier Transform. The stripe noises can be removed drastically via the improved threshold of Wavelet Transform method, the goal which reserves the spectral characteristic of original image is also achieved.

**Key words:** TDI-CCD; stripe noises; Fourier transform; wavelet transform; adaptive threshold

## 1 引言

CCD(Charge Coupled Device)遥感相机是将 CCD 作为图像传感器在影像传感领域的一个重要应用。而 CCD 的 TDI(Time Delayed Integration)工作模式能够在不牺牲空间分辨率和工作速度的情况下获得高灵敏度的特点,因而在高速、微光领域具有广泛的应用前景。但是 TDI-CCD 在高分辨率遥感相机的应用中也存在不足:首先,由于 TDI-CCD 相机设计结构上器件自身的原因,得到的图像存在着周期性的规则垂直条纹;另外,受目前的材料和制造工艺所限,TDI-CCD 敏感面的封装窗口玻璃存在着结构和材料的不均匀性,从而导致了非周期垂直条纹的产生,并且相机受聚焦面环境和电路系统驱动时序延时的影响也会产生非周期的垂直条纹。这些由于相机本身原因存在于 TDI-CCD 图像中的固有条带噪声会降低 TDI-CCD 测量系统的探测灵敏度,减小工作动态范围,降低图像的信号质量,影响系统的测量精度,从而限制系统的应用。因此,必须采取有效的处理方法将固有条带噪声予以消除。

条带噪声广泛地存在于多种遥感图像中,已有不少学者对其成因和消除方法进行了研究。典型的空域条带噪声消除方法有 Horn 和 Kautsky 提出的直方图匹配方法<sup>[1-2]</sup>以及 Gadallah 针对直方图匹配方法的缺陷提出的矩匹配方法<sup>[3]</sup>。一般情况下,矩匹配可以获得比直方图匹配更好的效果,然而其缺点是它会改变原始的反射率分布特性,且往往要求图像足够大,地物分布均匀。刘正军等对矩匹配方法进行了改进,提出了一种在地物非均匀分布状况下成像的小图像噪声的去除方法<sup>[4]</sup>。虽然这种方法能较好地消除条带噪声,恢复和保持地物真实反射率的空间分布情况,但对于一般条件下的 MODIS 成像影像效果仍然不是十分理想。由于在频率域可以更好地分离和研究信号与噪声,从而可以更好地进行噪声消除同时保留更多的信号,因此,变换域的噪声消除技术是目前消噪研究的主要部分。Srinivasan 等采用功率滤波器方法对 Landsat 卫星图像条带噪声进行了滤除<sup>[5]</sup>。Simpson 等则提出了改进的有限冲击响应滤波器方法,进行了 GOES 系列卫星图像中条带噪声消除的研究<sup>[6-7]</sup>。杨忠东、张文建等应用小波收缩法剔除了 MODIS 热红外波段数据的条

带噪声<sup>[8]</sup>。

本文采用变换域的方法来消除 TDI-CCD 图像中的条带噪声。首先通过傅里叶变换域内的频谱图映射确定条带噪声的高频和低频之间的截止频率,采用传统的低通和带阻滤波器对条带噪声进行消除;另外,提出了一种改进阈值的小波变换法来消除条带噪声,该方法能在小波分解后各个尺度的垂直方向上自适应地确定阈值,避免了传统阈值“过扼杀”小波系数的倾向,取得了较好的条带消除效果。

## 2 傅里叶变换消除条带噪声

图 1(a)和图 1(b)分别为截取的  $4\ 096 \times 4\ 096$  大小的 TDI-CCD 静态定标图像(在均匀光照下得到的图像)和实物图像。可以看出 TDI-CCD 图像的条带噪声像素灰度值变化较缓慢,且和图像本身灰度值有关,是在无噪图像的灰度值上提高或降低了灰度  $\Delta g$ 。由于  $\Delta g$  是变化的且变化不大,所以几乎无法有效地表达,造成在空域中去除 TDI-CCD 条带噪声效果不理想。

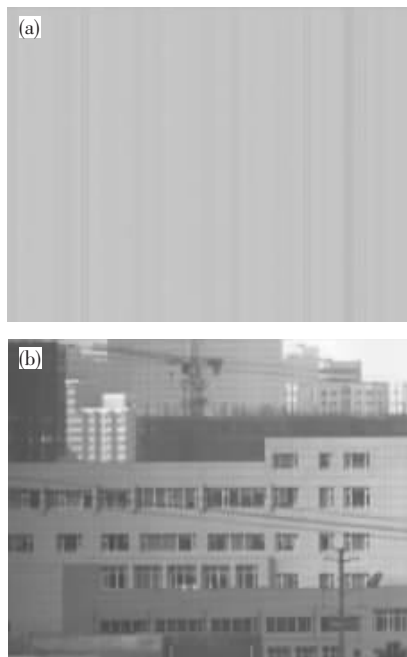


图 1 (a) TDI-CCD 定标图像;(b) TDI-CCD 原图像。  
Fig. 1 (a) TDI-CCD calibration image;(b) TDI-CCD original image.

### 2.1 条带噪声的频谱分析

傅立叶变换的优点是可将空间域中复杂的卷积运算转化为频率域中简单的乘积运算,对图像

进行傅里叶变换后通过滤波算子消除噪声的频率成分,然后反变换到空域获得消除噪声后的图像,故而傅里叶变换在图像的增强和消噪等图像处理中应用十分广泛。

对图像进行傅立叶变换后,频谱图以几何中心为原点表示最低频率成分,由原点向外扩散,频谱图中的点逐步反映图像更高频率分量的信息。条带现象属于周期性噪声,它们在频域中表现为具有对称性的一些亮点。对 TDI-CCD 图像中的垂直条带来说,反映到频谱图中则分布在原点的左右两侧。图 2(a)是傅立叶变换后的图像频谱图(中心部分),为“十”字交叉亮线,水平方向强度相对比较明显(图 2(b)),亮点呈周期分布,这反映的就是 TDI-CCD 图像条带噪声的频率分布。因此只要滤除频谱图中水平分布的亮点,再经傅立叶反变换即消除了 TDI-CCD 图像的条带噪声。低通、带阻和陷波滤波器都比较适合条带噪声的消除,关键是确定条带噪声的亮点在频率域中所占的成分,进而确定滤波器的最佳截止频率,在消除条带噪声的同时最大限度地保留图像的有用信息。因此,消除条带噪声的关键就在于怎样准确地定位条带噪声对应的频率点,然后采取合适的频域手段对条带进行消除。

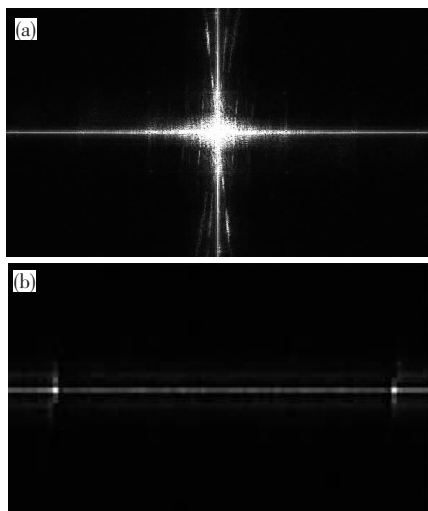


图 2 (a) 频谱图的中心部分; (b) 频谱图的高频部分。

Fig. 2 (a) Central part of the frequency spectrum; (b) High-frequency part of the frequency spectrum.

## 2.2 频谱图映射寻找噪声频率的频率点

对于一幅大小为  $M \times N$  的频域图像  $F(\mu, \nu)$ , 设其行列数分别是  $M$  和  $N$ , 根据频谱图的特点,

条频带在频谱图占的宽度取为  $[M/2-16, M/2+16]$ , 记为  $[X, Y]$ , 可以定义其在列方向上的离散累积分布函数<sup>[9]</sup>为:

$$S_D(\nu) = \sum_{\mu=X}^{\mu=Y} F(\mu, \nu) \quad (1)$$

图 3 是根据公式(1)对 TDI-CCD 图像的频谱图计算得到的列方向上的离散累积分布函数图,图 3(a)中,横轴对应的是列数,纵轴对应的是列方向上的灰度累加值。由于图像的信息相对于条带噪声的频谱亮点比较丰富,容易看出,所以在此不对累积分布函数进行拟合。

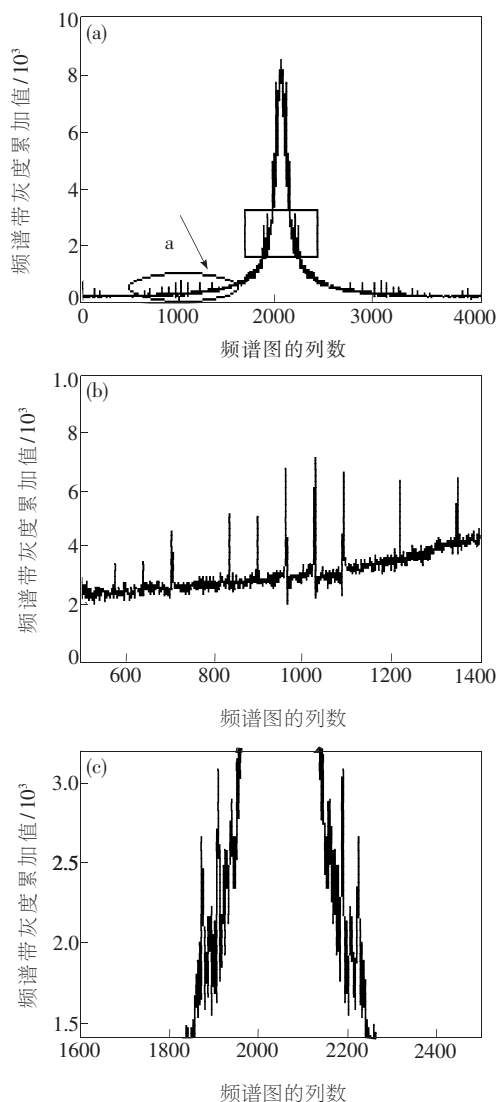


图 3 (a) 离散累积分布图; (b) 放大后的图 3(a) 中的椭圆部分; (c) 放大后的图 3(a) 中的方形部分。

Fig. 3 (a) Diagram of the discrete cumulative distribution; (b) Amplified oval part of the image Fig. 3(a); (c) Amplified square part of the image Fig. 3(a).

由图 3 可知,条带噪声的频率点贯穿频域图像的整个水平轴,它同时包含了高频和低频信息。为了在消除条带噪声的同时保留图像原有的信息,必须分离出条带噪声频率的低频区域。

周期性的条带噪声在频域中都表现为具有对称性,考虑到要最大程度地保留图像的原先信息,所以在图 3(a)中,从中心频率处开始,在离中心频率较远的位置找到第一个峰值,即箭头所指的峰值点 a,它的横轴记为  $\nu$ ,此点在频谱图中的几何位置即为  $(M/2, \nu)$ ,这样就把条带噪声所占频率的高频部分和低频部分分离开来。

### 2.3 条带噪声的消除

由频谱图的离散累积分布函数图可以得到条带噪声高频和低频的分离频率。由于陷波滤波器是阻止事先定义的中心频率邻域内的频率,而前面已知条带噪声的频率贯穿频域图像的整个水平轴,所以本文不采用陷波滤波器。因为 Butterworth 滤波器在高低频率间的过渡比较光滑,所以使用 Butterworth 滤波器进行滤波得到的图像振铃效应不明显。在具体利用 Butterworth 低通滤波器和 Butterworth 带阻滤波器滤波时分别对频率做适当调整,以达到滤波效果最好。

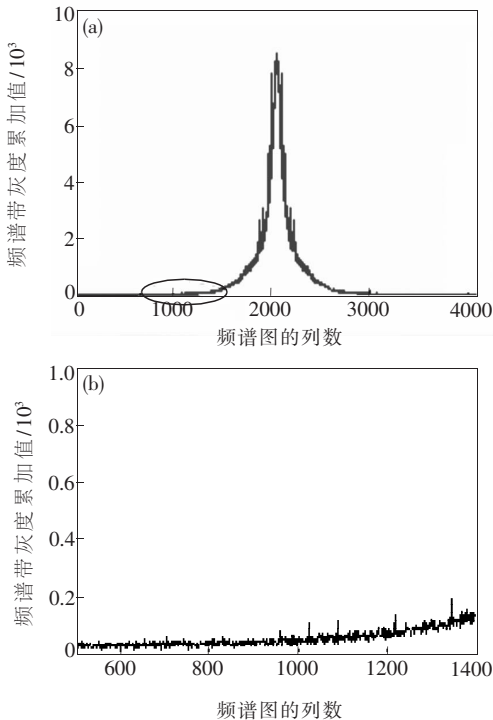


图 4 (a) 低通滤波;(b) 放大后的图 4 (a) 中的椭圆部分。

Fig. 4 (a) Low-pass filtering;(b) Amplified oval part of the image Fig. 4(a).

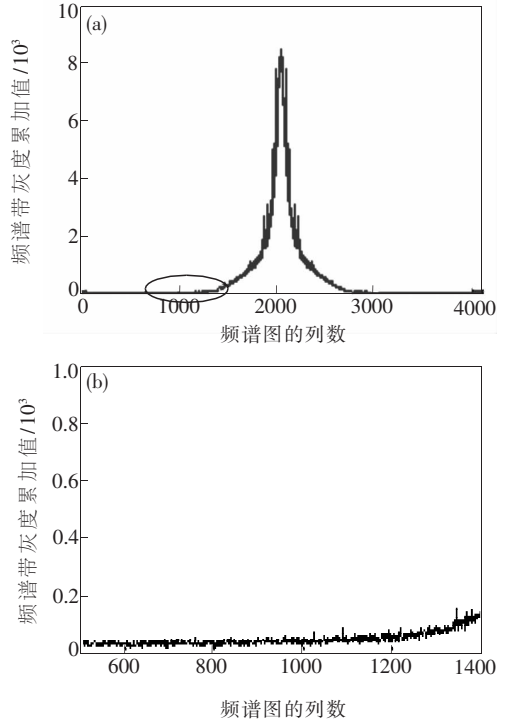


图 5 (a)带阻滤波;(b)放大后的图 5 (a) 中的椭圆部分。  
Fig. 5 (a) Band-stop filtering;(b) Amplified oval part of the image Fig. 5(a).

图 4 和图 5 分别是利用两种滤波器对图像条带噪声进行消除后的频谱累积分布函数图。由于 TDI-CCD 图像条带噪声像素灰度值变换较缓慢的特点,如果直接从图像表面上看很难比较出结果,因此,本文采用频谱图的离散累积分布函数图对结果进行比较和分析。

### 3 小波变换消除条带噪声

TDI-CCD 图像的条带噪声呈垂直分布,通过 Mallat 算法,经过小波分解后,它主要体现在垂直方向的高频小波图像中,而在水平和对角方向的高频小波图像中并无体现。因此,本文将小波变换消除条带噪声的重点放在分解后的低频和垂直方向的高频小波图像上,为了较好地保持原始图像的边缘纹理,对于另外两个方向的高频小波系数予以完全保留。通过实验比较,选择小波函数“db4”把原图像分解为高频和低频部分。

#### 3.1 阈值函数的选取

阈值滤波分两大类型:硬阈值和软阈值。

硬阈值滤波的数学表达式如下:

$$T_{\text{hard}}(y) = \begin{cases} 0, & |y| < T \\ y, & |y| \geq T \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $y$  为含噪信号的小波变换系数,  $T$  为阈值,  $T_{\text{hard}}$  为硬阈值滤波的收缩函数。

硬阈值滤波将幅值小于阈值的小波系数去除, 而将幅值大于阈值的系数原封不动地保留下来。

软阈值滤波的数学表达式如下:

$$T_{\text{soft}}(y) = \begin{cases} 0, & |y| < T \\ \text{sgn}(|y| - T), & |y| \geq T \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\text{sgn}(y)$  表示  $y$  的符号,  $T_{\text{soft}}$  为软阈值滤波的收缩函数。

在软阈值滤波中, 小波系数的估计是有偏的(幅值大于阈值的小波系数的幅值被减去了一部分, 因此估计的数学期望不等于观望值的数学期望), 滤波后的信号过于平滑。硬阈值滤波中, 小波系数的估计是有偏的, 但滤波后容易在信号的突变处产生较大的振荡(称为吉布斯现象)。本文采用软阈值函数进行条带噪声消除。

### 3.2 自适应多阈值的确定

小波变换消除条带噪声中的一个重要问题就是如何选择和确定阈值。可以对高频系数设置一个阈值  $T$ , 大于  $T$  的系数作为重要系数保留下来, 小于  $T$  的小波系数则予以去除。其中最常用的是 Donoho 等提出的统一阈值公式(Universal Threshold)<sup>[10]</sup>:

$$T_{\text{univ}} = \sigma_n \sqrt{2 \lg_2 N} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_n$  为零均值高斯白噪声的标准偏差,  $N$  为小波系数的总个数。

统一阈值公式法可以去除大部分噪声小波系数, 同时可较好地保留图像的高频信号, 但在一定程度上具有“过扼杀”小波系数的倾向。针对 TDI-CCD 图像中条带噪声的特点, 若使用这种单一阈值方法消除, 会不可避免地造成在各个尺度垂直方向的子带上消除条带噪声的不平衡, 不利于图像重构。

根据以上分析, 本文采用了一种基于小波变换的自适应多阈值图像消除条带噪声的方法, 根据图像条带噪声的周期对图像进行  $j$  尺度的合理分解, 保留最底层低频小波图像, 只对各层垂直方向的高频小波系数进行处理, 然后再进行重构。这样可以最大限度地降低对图像信息的改变, 其消除条带噪声的阈值收缩公式为:

$$T_j = \frac{\sigma_j}{2^{j-1}} \sqrt{2 \lg_2 N_j} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_j = \text{median}(|W_{j,k}|)/0.6745$ ,  $W_{j,k} \in HL_j$ , 为第  $j$  层垂直方向高频小波系数的噪声方差估计;  $N_j$  为第  $j$  层垂直方向高频小波系数的个数。它是利用不同子带的垂直方向高频小波系数的不同噪声方差选择不同的阈值, 实验结果表明这种方法具有可行性, 能够在最大程度上消除条带噪声的同时尽可能地保留原始图像信息。

### 3.3 条带噪声的消除

确定了小波基、分解层次和阈值后就可以进行条带噪声消除的工作。图 6 是利用自适应阈值小波变换消噪法对图像条带噪声进行消除后的频谱累积分布函数图。从图中可以看出自适应阈值

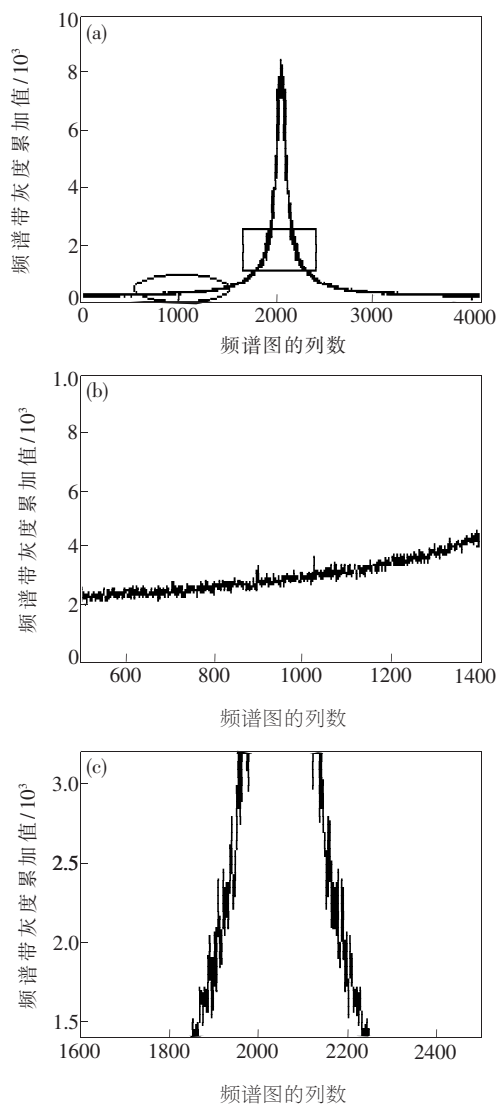


图 6 (a) 改进阈值的小波变换; (b) 放大后的图 6 (a) 中的椭圆部分; (c) 放大后的图 6 (a) 中的方形部分。

Fig. 6 (a) Improved threshold of wavelet transform; (b) Amplified oval part of the image Fig. 6 (a); (c) Amplified square part of the image Fig. 6 (a).

的小波变换法消除了整个水平条频带的条带噪声频谱亮点。

## 4 实验结果分析

从实验结果上来看,利用频谱的离散累积分布函数图分离条带噪声高频和低频频率的频域滤波方法具有良好的去除条带效果,低通和带阻两种滤波器都能有效地消除图像中的条带噪声,较好地恢复原始图像信息。需要注意的是,由于条带贯穿频域图像的整个水平轴,所以在利用两种滤波器进行滤波时带宽要选得足够大。

经过传统的傅里叶变换低通和带阻消除条带噪声后,通过它的频谱离散累积分布函数图和图 3 比较可知,传统的傅里叶变换法可以消除图像中的部分条带噪声。图 4(a)和图 5(a)中左右两边的部分和图像傅立叶频谱的高频部分相对应,把它们分别和图 3(a)对比可以看出,经过低通和带阻滤波后,图像的频谱离散累积分布函数图中的左右两边的曲线表现为下移状态,也就是说图像频谱图中的高频部分亮度下降,原始图像的高频信息丢失,即在消除条带的同时也不可避免地丢失了图像较多的原始高频细节,会使整个图像平滑,降低图像质量。

利用改进阈值的小波变换法消除条带噪声后,从结果可以看出,自适应阈值小波变换消除条带噪声的方法具有可行性(图 6)。同传统的低通和带阻消除条带噪声的方法相比,经过小波变换消除条带噪声后的图像频谱离散累积分布函数图中的曲线基本保持了原来的位置和形状,在消除条带噪声的同时保留了图像丰富的高频细节。通过对图 6(c)和图 3(c)对比可知,利用自适应多阈值的小波变换法在整个傅里叶频域内条带噪声的频谱亮点消除效果较好。所采用的基于傅里叶变

换和小波变换的算法可以由硬件结构实时地实现<sup>[11-12]</sup>。

对 3 种方法进行比较得出的统计结果如表 1 所示。

表 1 评价指标数据

Table 1 Evaluation index data

	平均值	标准方差	相关系数
原始图像	66.835 2	15.376 2	1.000 0
低通滤波	66.835 6	15.368 8	0.999 3
带阻滤波	66.835 5	15.371 9	0.999 4
小波变换	66.837 6	15.294 1	0.999 2

标准方差既反映了图像被条带噪声污染的程度,也反映了图像纹理细节信息的丰富度。从表 1 中可以看出,改进阈值的小波变换法优于传统的傅里叶变换法。由平均值和相关系数的比较可以得出,3 种方法在消除条带噪声方法都能取得不错的效果。

## 5 结 论

在频率谱离散累积分布函数图的基础上采用低通、带阻滤波器消除条带噪声,取得了一定的效果;另外还采用一种改进阈值的小波变换法对图像条带噪声进行了消除。在一定程度上,用传统的傅里叶变换法在频率域可以消除 TDI-CCD 图像中的部分固有条带噪声,但是在消除条带噪声的同时也去除了某些细节,使整个图像平滑,降低了图像质量,并且它不能彻底地消除条带噪声。改进阈值的小波变换法不仅有效地消除了条带噪声,而且能够保持图像原有的波谱特性,图像几乎没有失真,而且细节更加明显。实验结果验证了自适应阈值的小波变换法消除条带噪声的可行性。

## 参 考 文 献:

- [1] Horn B K P, Woodham R J. Destriping landsat MSS imagery by histogram modification [J]. *Comput Graph & Image Process*, 1979, 10:69-83.
- [2] Kautsky J, Nichols N K, Jupp D L B. Smoothed histogram modification for image processing [J]. *Comput Via & Image Process*, 1984, 26:271-291.
- [3] Gadallah F L, Csillag F. Destriping multisensor imagery with moment matching [J]. *INT J Remote Sensing*, 2000, 21(12):2505-2511.
- [4] 刘正军,王长耀,王成. 成像光谱仪条带噪声去除的改进矩匹配方法 [J]. *遥感学报*, 2002, 6(4):280-284.

- [5] Srinivasan R, Cannon M, White J. Landsat data destriping using power filtering [J]. *Optical Engineering*, 1998, 27:939-943.
- [6] Simpson J J, Gobat J I, Frouin R. Improved destriping of GOES images using finite impulse response filters [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1995, 52:15-35.
- [7] Simpson J J, Stitt J R, Leath D M. Improved finite impulse response filters for enhanced destriping of geostationary satellite data [J]. *Remote Sens Environ*, 1998, 66:235-249.
- [8] 杨忠东, 张文建, 李俊, 等. 应用小波收缩方法剔除 MODIS 热红外波段数据条带噪声[J]. *遥感学报*, 2004, 8(1): 23-30.
- [9] 孙颖, 张志佳. 基于频域滤波的自适应条带噪声去除算法 [J]. *仪表技术与传感器*, 2006, (2): 57-59.
- [10] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage [J]. *Biometrika*, 1994, 81(3):425-455.
- [11] 于超, 陈光武, 石文静. 基于 FPGA 的信号采集及其频谱显示 [J]. *液晶与显示*, 2008, 23(4):499-503.
- [12] 何伟, 俞立, 董辉. 基于 IWT 图像压缩技术的 LED 同步显示系统设计 [J]. *液晶与显示*, 2009, 24(2):262-267.

—————  
(上接 P723)

例:[12]西安电子科技大学. 光折变自适应光外差探测方法:中国,01128777. 2[P/OL]. 2002-03-06[2002-05-28]. <http://211.152.9.47/sipoasp/zljs/hyjs-yx-new.asp?recid=01128777.2&leixin=0>.

**电子文献:**[序号]主要责任者. 题名:其他题名信息[文献类型标志]. 出版地:出版者,出版年(更新或修改日期)[引用日期]. 获取和访问路径.

例:[13]PACS-L: the public-access computer systems forum[EB/OL]. Houston, Tex: University of Houston Libraries, 1989[1995-05-17]. <http://info.lib.edu/pacsl.html>.

例:[14]Online Computer Library Center, Inc. History of OCLC [EB/OL]. [2000-01-08]. <http://www.oclc.org/about/history/default.htm>.

2. 文后参考文献应在正文中引用该文献处进行标注。

3. 关于作者姓名,姓在前,名在后(拉丁文只用缩写);作者 3 人以下应全部列出,4 人以上仅列出前 3 人,其后加“等”(外文加“et al”)。

4. 注意参考文献标注的标点符号、次序,并不得缺项。

5. 参考文献著录不规范的有可能影响文章的录用。

注:文献类型和电子文献载体标志代码:

#### 文献类型和标志代码

文献类型	标志代码	文献类型	标志代码
普通图书	M	报告	R
会议录	C	标准	S
汇编	G	专利	P
报纸	N	数据库	DB
期刊	J	计算机程序	CP
学位论文	D	电子公告	EB

#### 电子文献载体和标志代码

载体类型	标志代码
磁带(magnetic tape)	MT
磁盘(disk)	DK
光盘(CD-ROM)	CD
联机网络(online)	OL