

文章编号: 1007-4619 (2002) 04-0279-06

成像光谱仪图像条带噪声去除的改进矩匹配方法

刘正军 王长耀 王成

(中国科学院 遥感应用研究所 遥感信息科学重点实验室, 北京 100101)

摘要: 条带噪声是影响线阵 CCD 成像质量的一个重要因子。特别是对于 CCD 质量要求较高的高光谱成像仪, 往往由于硬件质量造成了许多通道中条带噪声的出现。分析了条带噪声形成的主要原因, 比较了几种常用条带噪声去除方法及其局限性。在此基础上指出, 标准的矩匹配方法改变了图像在成像行或列方向的均值分布, 造成了一定的灰度畸变。这种情况对于在地物非均匀分布状况下成像的小幅图像尤其明显。着重提出和讨论了利用均值补偿法、傅里叶变换法、相关系数法结合矩匹配方法来近似恢复由入射辐射强度产生的均值分布, 从而达到保持图像质量并有效去除条带噪声的目的。并对条带噪声去除前后图像质量做了定性定量的比较、评价。

关键词: 高光谱成像仪; 条带噪声; 矩匹配

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

1 引言

条带噪声是一种周期性的重复出现于图像中的噪声现象, 它往往是由于传感器 CCD 光学性质的差异、扫描机械运动、传感器平台等多方面的原因引起的。许多学者已就其成因及去噪方法进行了研究^[1-8]。归纳起来, 用于去除条带噪声的方法可以分为两类。一类是通过傅里叶变换在频率域通过滤波算子去除周期性噪声的频率成分, 然后反变换回空域获得去噪后图像^[9]。缺点是不容易选择正确的频率成分。另一类是针对图像灰度值特征进行的归一化(标准化)和匹配方法, 典型的有直方图匹配^[1, 6-8, 10], 矩匹配(Moment Matching)方法^[4]。前人的研究表明: 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, 其缺点是改变了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。

对于小幅图像, 标准的矩匹配方法改变了图像在成像行或列方向的均值分布, 使图像灰度在空间分布上产生一定的畸变。本文在分析条带噪声主要成因的基础上, 试图在标准矩匹配方法的基础上, 提出一种在地物非均匀分布状况下成像的小图像能较好地去除条带噪声, 又能恢复和保持地物真实反

射率空间分布情况的方法。并以中尺度在率成像光谱仪高光谱航空飞行获取的高光谱图像进行了验证, 试验结果表明该结果是可行的。

2 中尺度在率成像光谱仪条带噪声模型与矩匹配方法

中尺度在率成像光谱仪是一种由中国科学院上海技术物理研究所设计的高光谱传感器。该传感器以掸扫式方式扫描成像。它的总波段为 34 个, 覆盖了从可见光到热红外光谱范围, 其中 0.403—1.043 μm 波段其可见光、近红外波长区, 波段数为 30, 光谱分辨率为 0.020 μm ; 其他 4 个波段分别分布在中红外和远红外区, 光谱分辨率为 0.010 μm 。在每个波段内有 22 个 CCD 进行扫描成像。由于各 CCD 在光谱响应区内的响应函数不一致, 造成了条带噪声的出现(图 1)。可见, 如果能将这种归一化到一个理想的标准响应函数的条件下, 则图像噪声必然得到很大程度的消除。

理想状况下, 设各 CCD 在地面光谱响应范围内为一线性响应函数, 且具有移不变性。设 C_i 为第 i 个 CCD 像元, 则 C_i 的光谱响应函数可用下式表示:

$$Y_i = k_i X + b_i + \varepsilon_i(X) \quad (1)$$

收稿日期: 2001-01-09; 修订日期: 2001-04-16

基金项目: 国家 973 项目, 课题编号: C2000077902。

作者简介: 刘正军(1974—), 男, 湖南湘潭人。2000 年毕业于南京大学, 获理学硕士学位, 现为中国科学院遥感应用研究所该博士研究生。研究方向为遥感图像处理、资源环境遥感应用。已发表多篇学术论文。

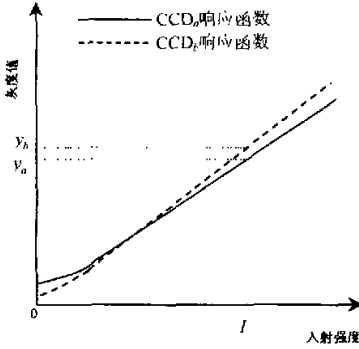


图 1 CCD 响应函数差异比较

Fig.1 Comparison of CCD response functions

式中, Y_i 为 C_i 的响应值, 亦即图像灰度值, X 表示地表漫反射中被该 CCD 所接收的分量, k_i 为像元 i 的增益值, b_i 为其漂移值, ε_i 为高斯分布的随机噪声, 在信噪比较高的条件下, $\varepsilon_i(X)$ 的影响可忽略。于是式(1)可简化为:

$$Y_i = k_i X + b_i \quad (2)$$

可见, 由于 k_i 与 b_i 取值的不同, 导致对于同一入射光强度 X 产生不同的灰度值。如果能将 Y_i 归一化为同一值 Y , 则条带噪声即可得到有效去除。

假定地表地物均一, CCD 按行扫描获取数据, 则各行入射辐射强度的均值和方差近似相等。矩匹配方法选取一 CCD 为参考, 将其他 CCD 校正到该标准 CCD 的反射率。利用公式:

$$Y = \frac{\sigma_r}{\sigma_i} X + \mu_r - \mu_i \frac{\sigma_r}{\sigma_i} \quad (3)$$

式中, X, Y 分别为第 i 行图像各像素校正前、后的灰度值; σ_r, μ_r 为参考 CCD 扫描行的方差、均值; σ_i, μ_i 为第 i 个 CCD 扫描行的方差、均值。

3 改进的矩匹配条带噪声去除方法

在图像较小且地物较复杂导致灰度分布不均匀的情况下, 使用矩匹配方法通常会产生“带状效应 (Banding effect)”, 即沿列方向的 (假设 CCD 沿行方向扫描) 图像从整体上表现出一种时暗时明的不连续, 不符合自然地理要素分布特征的现象。根本的原因在于把列方向原本非一致的各行均值看作近似相等, 从而导致图像上反映的地表光谱信息的分布发生畸变。

可见, 要减轻或去掉带状效应, 需要从含有条带噪声的原始均值分布恢复列方向下图像灰度的真实均值分布。具体可以采取 3 类方法。

3.1 均值补偿法

为减轻原始图像中的条带现象对反求真实均值分布的影响, 可以采用均值补偿的方法。

设 CCD 个数为 N , 则在同样的成像条件下, 对任一 C_i 设其在第 i 个成像行的均值为 μ_i , 则对任一第 $l = k \cdot N + i$ 行 (k 为自然数), 均由 C_i 在该行成像, 设其均值为 μ_l 。对于第 i, l 两行的任意对应像素点 j , 设:

$$Y_{ij} = k_i X_{ij} + b_i \quad (4)$$

$$Y_{lj} = k_l X_{lj} + b_l \quad (5)$$

则式(4)~(5)并整理得:

$$X_{ij} - X_{lj} = \frac{1}{k_i} (Y_{ij} - Y_{lj}) \quad (6)$$

式(6)两边同时对该行所有像素求和得:

$$\sum X_{ij} - \sum X_{lj} = \frac{1}{k_i} (\sum Y_{ij} - \sum Y_{lj}) \quad (7)$$

对式(7)除以列数 (即扫描行包含的像元数) 可求入射辐射强度的均值差值 Δ_l , 即:

$$\Delta_l = \frac{1}{k_i} (\mu_l - \mu_i) \quad (8)$$

移项得: $(\mu_l - \mu_i) = \frac{1}{k_i} \cdot \Delta_l \quad (9)$

式(9)表明, 对于条带图像中经同一 CCD 扫描的各行, 其均值之差为该行地表真实出射辐射强度均值的差值。选定图像前 N 行数据为参考均值, 对其后的每一 CCD 成像行均按上述方法计算得出的差值序列, 即为列方向下地表均值差值变化的曲线。将此序列叠加到矩匹配方法计算结果上即得到经补偿后的图像, 综合式(3), (9), 对任一 $C_i (i \leq N)$ 的第 l 成像行 ($l = k \cdot N + i$ 行, k 为自然数) 中的任一像素单元 j , 均有:

$$Y_{lj} = \frac{\sigma_r}{\sigma_i} X_{lj} + \mu_r + \mu_l - \mu_i (1 + \frac{\sigma_r}{\sigma_i}) \quad (10)$$

其中, X_{ij}, Y_{ij} 分别为该像素单元校正前和校正后的图像灰度值。

因其原理是采用对行均值作补偿拟合地面出射辐射真实均值分布, 故作者将此方法命名为基于行均值补偿的矩匹配法。

然而, 上述方法还没有考虑各 CCD 的漂移值 k_i 对计算真实均值差值变化的影响。为解决上述问题, 可在图像上一 CCD 扫描周期范围内选择一地物分布较均匀之矩形区域, 如农田、湖泊等。以其中一 CCD 为参考单元, 设漂移值为 0, 计算其它 CCD 与该标准 CCD 在该范围内的均值差值, 即为各 CCD 漂移值的近似值。如果有多个这种均匀矩形区域, 则可做多次计算, 选择多次计算结果的期望值为漂移值

的近似值。

3.2 傅里叶变换法

总体说来,真实均值分布往往呈现一条平缓变化曲线,而条带噪声则呈短周期的急剧变化。在频率域内真实均值分布表现为低频成分信息,条带噪声则表现为高频成分。通过一维傅里叶变换按列方向将各行均值序列变换到频率域,再在频率域内利用低通滤波将低频信息从高频信息中分离出来,然后通过傅里叶反变换回一维空间域。从而获得真实均值序列分布的近似模拟。离散一维傅里叶变换公式^[8]为:

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \exp\left[-\frac{i2\pi ux}{N}\right] \quad (11)$$

式中, $u = 0, 1, \dots, N - 1, f(x)$ 为均值序列 ($x = 0, 1, \dots, N - 1$), $F(u)$ 为变换域函数。而其反变换公式为:

$$f(x) = \sum_{u=0}^{N-1} F(u) \exp\left[\frac{-i2\pi ux}{N}\right] \quad (12)$$

式中, $u = 0, 1, \dots, N - 1$ 。

在一维频域低通滤波器过程中,需要选择合适的截止频率。在 MATLAB 软件下,经多次尝试与比较确定,选取截止频率为 ± 3 时,获得最佳曲线拟合效果。

3.3 相关系数法

这是利用高光谱传感器中各通道区间窄,相邻波段具有较高的相关性的特性。这种相关性反映在直方图上,就是具有相似的灰度分布,也就反映了与灰度分布紧密联系的行均值分布上。因此,可以直观地认为,两个相同条件下成像的邻近通道具有较强的相关性的时候,它们之间亦有相似的行均值分布。借助这一认识,我们可以利用成像质量较好的图像去修正被条带噪声影响的图像的行均值分布。具体方法是:求多个波段与待去条带波段之间的相关系数,从中选取出相关系数高且图像质量较好的波段。将此波段的各行的均值减去整个图像均值,然后乘以一定常数。该常数依相关系数及模拟效果人为设定,经尝试,一般应小于 0.05 倍原图像均值。再叠加到矩匹配后图像的均值序列上即求得真实均值序列的近似模拟(叠加之前,应将矩匹配后图像各像素减去一定值以平衡因叠加引起的图像灰度均值的增大,保持图像变换前后灰度均值不变)。

相关系数的计算式为:

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)}} \quad (13)$$

其中, X, Y 为分别为两个波段的各行的均值序列。

$\text{Cov}(X, Y)$ 为 X, Y 波段均值序列的协方差; $D(X), D(Y)$ 分别为 X, Y 波段均值序列的方差。

4 实验与结果比较

以中尺度在率成像光谱仪苏州飞行获取的一幅子图像(第 1 通道)为例(图 2)。该图像为 890×770 像元大小。由图 2 中可见该图像条带现象非常严重。图 3 为利用标准的矩匹配方法去条带生成的图像。图 4 是条带去除前后(即图 2、图 3 两图像)的行均值分布的比较。由图 4 可见由于条带现象引起的行均值分布呈波浪状的有规则起伏;去条带后图像的行均值分布则无这种规则起伏的波浪,反而表现

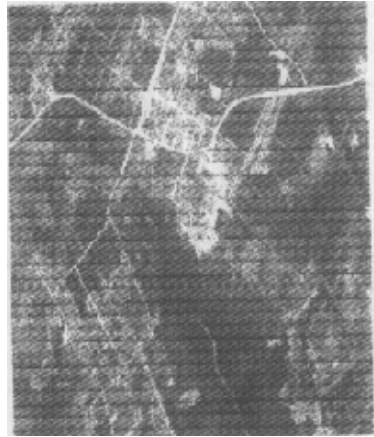


图 2 原始图像

Fig.2 Raw Image



图 3 矩匹配后图像

Fig.3 Image after Moment Matching

为稳定的近似相等的常量,这对于小范围的非均匀

地表来说,显然不符合实际。反映在图 3 中,可见部分行相对于图 2 来说灰度有明显的偏暗,而另一些行则有灰度变亮的趋势。

采用以上所述 3 种方法获得的均值序列曲线如图 5。其中,对于相关系数法,综合考虑波段邻近性及图像质量,选取的通道为 4,6,14,22,29,33,原始图像各通道的相关系数如表 1 所示。在相关性显著的情况下选择图像质量好的第 6 波段的行均值分布函数作进一步处理。可见,3 种方法对于恢复由地表非均匀性引起的行均值不等的现象均有一定的效果,图 6,图 7,图 8 分别是采用上述 3 种方法处理所获得的最终处理结果。

对比图 5、图 6、图 7、图 8 可以看出,3 种方法都使图像行方向的均值分布得到一定恢复,从而使图像质量得到改善。矩匹配方法中出现的明暗分布不均的“带状效应”得到有效消除。这对于在此基础

上进行的定性定量分析、分类研究具有重要的意义。

为定量比较条带去除前后图像质量的改善,采用文献 2 的图像评价函数:

$$IQ = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_j d_R^2[j]}{\sum_j d_E^2[j]} \right] \quad (14)$$

其中: $d_R[j] = m_{IR}[j] - m_I[j]$
 $d_E[j] = m_{IE}[J] - m_I[j]$ (15)

式(14)、(15)中, IQ 为图像质量因子, $m_{IR}[j]$, $m_{IE}[j]$, $m_I[j]$ 分别为原始条带图像、去条带后图像、真实地表图像中各行 j 的均值。在此,我们无法直接获取 $m_I[j]$ 的值,考虑地表具有一定的地域相关性(或均一性),通过选择去除条带效果较好的均值补偿法获得的图像通过 3×3 像元大小的低通滤波获得的图像作为计算 $m_I[j]$ 值的图像。计算结果如表 2。

表 1 各通道相关系数矩阵

Table 1 Correlation co - efficiency of different channels

相关系数	第 4 通道	第 6 通道	第 14 通道	第 22 通道	第 29 通道	第 33 通道	第 1 通道
第 4 通道	1.0000	0.9900	0.9455	-0.7553	-0.8080	0.5063	0.7822
第 6 通道		1.0000	0.9725	-0.7615	-0.7976	0.5534	0.7307
第 14 通道			1.0000	-0.7632	-0.7656	0.6075	0.6588
第 22 通道				1.0000	0.9663	-0.4922	-0.4106
第 29 通道					1.0000	-0.3656	-0.4922
第 33 通道						1.0000	0.2101
第 1 通道							1.0000

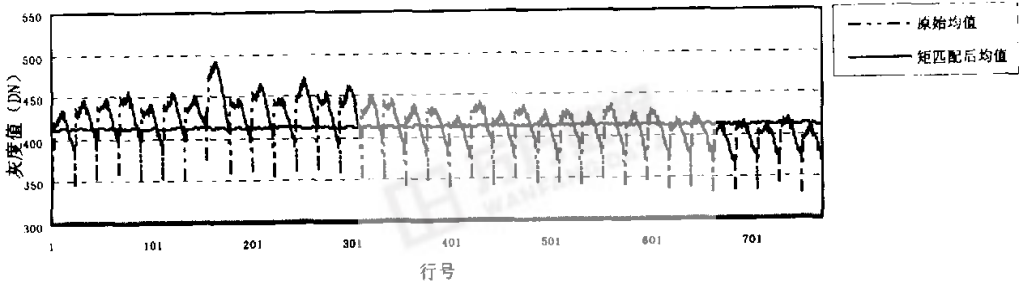


图 4 原始图像与矩匹配去条带后图像均值分布对比

Fig.4 Mean value comparison of raw image and destriped image(line by line)

表 2 图像条带去除质量的比较

Table 2 Image quality comparison after stripe removal

去条带方法	均值补偿法	FFT 法	相关系数法
IQ 值	7.15	5.03	10.09

表 2 中, IQ 值越大表明图像去条带效果越好。

正如前面所述,相关系数法具有最好的去条带效果,均值补偿法亦有很好的效果,傅里叶方法相对较差。但要注意,相关系数法引入了其它波段的分量,在一定程度上降低了图像的使用价值。更详细地定量比较图像在灰度均值分布恢复上的效果还有待进一步的研究。

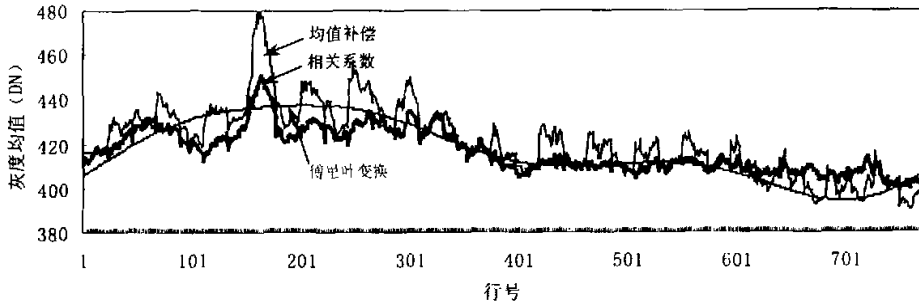


图 5 不同方法拟合均值序列的结果对比
Fig.5 Comparison of mean value fitting results by different methods

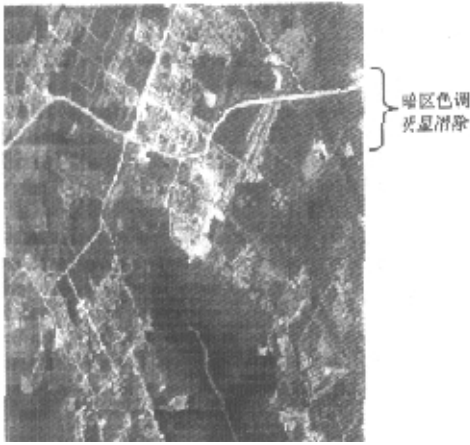


图 6 均值补偿法校正结果
Fig.6 Result image of mean value compensation method

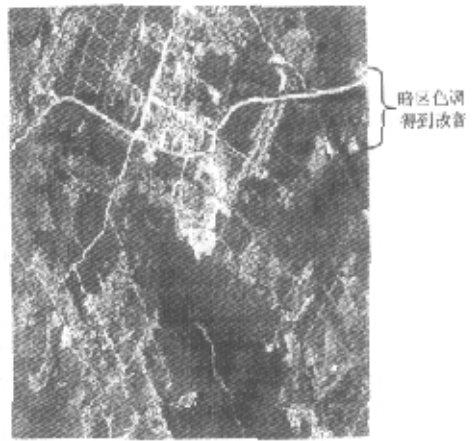


图 7 傅里叶变换法校正结果
Fig.7 Result image of Fourier transformation method

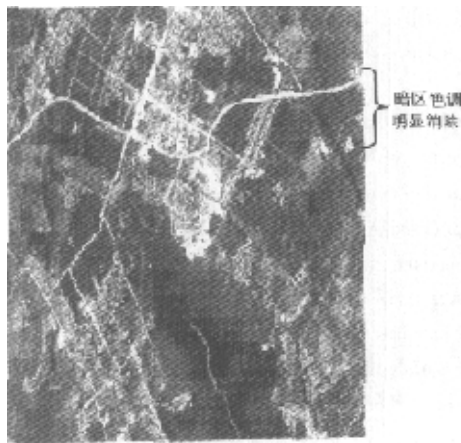


图 8 相关系数法校正结果
Fig.8 Result image of correlation method

5 结论与讨论

本文给出的方法针对矩匹配算法进行了改进,试验结果表明,在较小非均匀图像情况下,仍然能够较好地去除图像条带噪声,同时保持图像灰度的连续性。我们的试验结果显示,3种矩匹配后处理方法中,均值补偿法和相关系数法均具有很好的效果,傅里叶变换法也能一定程度上改善带状现象。然而,应该注意到,相关系数法在采用一个波段数据校准另一个波段时,同时就有可能对该波段本身具有的某些细部特征造成了压抑或损害,并可能引入新的噪声因子。这一定程度上降低了该波段图像の利用价值。由于难以选择合适的频域低通滤波算子,使傅里叶变换方法提取的拟合曲线与真实均值序列较好地拟合,致使去噪效果不如前两者明显。如果能采用小波变换更为精确地模拟均值分布函数,则可望取得更好的效果。

参 考 文 献 (References)

- [1] Michael Wegener. Destriping Multiple Sensor Imagery by Improved Histogram Matching[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1999, 11(5): 859-875
- [2] Giovanni Corsini, Marco Diani, Thomas Walzel. Striping Removal in MOS-B Data[J]. *IEEE Trans. on Geoscience & Remote Sensing*, 2000, 38(3): 1439-1446.
- [3] Robert F. Crippen. Simple Spatial Filtering Routine for the Cosmetic Removal of Scan-Line Noise from Landsat TM P-Tape Imagery[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1989, 55(3): 327-331.
- [4] 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.
- [5] Demetrios J Poros, Chris J. Peterson. Methods for Destriping Landsat Thematic Mapper Images - A Feasibility Study for an Online Destriping Process in the Thematic Mapper Image Processing System (TIPS)[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1985, 51(9): 1371-1478.
- [6] Weinreb M P, Xie R, Lienesch, J H *et al.* Destriping GEOS Images by Matchig Empirical Distribution Functions[J]. *Remote Sens. Environ.*, 1989, 29: 185-195.
- [7] Horn B K P, Woodham R J. Destriping Landsat MSS Images by Histogram Modification[J]. *Comput. Graph. & Image Process.*, 1979, 10: 69-83.
- [8] Kautsky J, Nichols N K, Jupp D L B. Smoothed Histogram Modification for Image Processing[J]. *Comput. Vis. & Image Process.* 1984, 26: 271-291.
- [9] Srinivasan R, Cannon M, White J. Landsat Data Destriping using Power Filtering[J]. *Optical Engineering*, 1998, 27: 939-943.
- [10] Zhang X C, Huang Z C, Zhao Y H. Remote Sensing Digital Image Processing[M]. Zhejiang Province: Zhejiang University Press, 1997. [章孝灿, 黄智才, 赵元洪. 遥感数字图像处理[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1997.]

Destriping Imaging Spectrometer Data by an Improved Moment Matching Method

LIU Zheng-jun, WANG Chang-yao, WANG Cheng

(Laboratory of Remote Sensing Information Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Striping is an important factor that influences image quality acquired by linear array CCD blocks. This may be more crucial for spectrometers because of the imperfect calibration of the detector characteristics and the necessity of higher CCD quality, which results in the most common striping. This paper firstly discussed the main reason causing stripes. Then we compared some striping removal algorithms and their limitations. Based on this consideration, we point out that the standard moment matching method changes the mean value distribution of image in line or column arrangement. This is especially the case for small size images. We present some approaches to simulate and calibrate the image gray value distribution. The purpose of these methods we embraced here is to recover the truth of the mean value distribution of ground radiance. As an emphasis, we mainly discussed the theories and processes of three kinds of mean value fitting approaches: the mean value compensation method, Fourier transformation method and correlation method.

After discussing the methods, we used an 890×770 size test image acquired by an imaging spectrometer to experiment our theories. Through combining moment matching with these post-processing techniques, we successfully reduced stripes and improved the image quality. Finally, we visually and quantitatively assessed the quality of the resulted images.

Key words: spectrometer; striping noise; moment matching