

基于方差补偿矩匹配的红外图像非均匀性校正方法

祝善友¹ 张桂欣¹ 巩彩兰² 祝令亚³ 赫华颖³ 胡 勇^{2*}

¹ 南京信息工程大学遥感学院, 江苏 南京 210044
² 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083
³ 中国资源卫星应用中心, 北京 100094

摘要 红外焦平面阵列的非均匀性校正其定量应用之前必须解决的关键难题之一。将矩匹配方法引入到红外图像非均匀性校正中, 针对其改变图像中地物光谱分布, 并可能产生新条带噪声的缺陷, 通过比较标准矩匹配前后每个探测元的输出与其均值差异, 提出了一种方差补偿的矩匹配改进方法。实验图像校正结果的定性与定量分析表明, 方差补偿的矩匹配方法效果理想, 在校正图像非均匀性的同时, 更大程度上保留了不同地物本身光谱特征的差异。

关键词 遥感; 红外焦平面阵列; 非均匀性校正; 方差补偿; 矩匹配

中图分类号 TP751.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1211002

Non-Uniformity Correction Method Based on Standard Deviation Value Compensation after Moment Matching

Zhu Shanyou¹ Zhang Guixin¹ Gong Cailan² Zhu Lingya³ He Huaying³ Hu Yong²

¹ School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

² Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

³ China Centre for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China

Abstract Non-uniformity of infrared focal plane arrays is one of the key problems that must be solved before its quantitative applications. The moment matching method is adopted in correction of infrared non-uniformity. Due to the disadvantages of the method, such as changing of the image spectral variance and possibly producing new stripe noise, by comparing the output and the mean value difference for each detector between before and after the standard moment matching correction, an improved moment matching method based on the standard deviation value compensation is proposed. The quantitative and the qualitative analysis results show that the proposed method improves the non-uniformity correction precision, while the spectral variance of different objects in original image is better retained.

Key words remote sensing; infrared focal plane arrays; non-uniformity correction; standard deviation value compensation; moment matching

OCIS codes 100.2000; 100.2550; 100.3008; 110.2960

1 引言

红外焦平面阵列是当今红外成像技术发展的主要方向, 具有灵敏度高、探测能力强等优点^[1-2], 已

被广泛应用于军事和民用领域。但由于制造工艺的限制, 使得焦平面阵列上各探测单元对外界均匀光强的响应度不完全一致, 在图像上表现为空间噪声

收稿日期: 2013-04-13; 收到修改稿日期: 2013-06-25

基金项目: 民用航天“十二五”预先研究项目(D040103)、国家自然科学基金(41001289)、江苏高校优势学科建设工程

作者简介: 祝善友(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事热红外遥感基础理论与应用、资源环境遥感等方面的研究。

E-mail: zsygzx@163.com

* 通信联系人。E-mail: huyong@mail.sitp.ac.cn

或固定图案噪声^[3],即非均匀性。在定量化应用之前,必须进行非均匀性校正。国内外有关非均匀性校正的方法总体上可分为两大类^[1-2,4]:基于定标的校正算法和基于场景的校正算法。前者具有较高的校正准确度,一般在系统出厂前均需要进行标定,但需要如黑体源、光学设备等辅助器件,后者大多需要根据变化的场景信息估计帧间微位移,才能有效去除红外图像的非均匀性噪声^[5]。

红外焦平面阵列图像不同探测元之间的响应差异可视为产生了条带噪声,尤其是与正常探测元相比,虽然部分探测盲元经过了校正补偿处理,但其所在行(列)的条带噪声仍然相对较为明显。标准矩匹配方法及其改进方法被广泛应用于遥感图像的条带噪声去除^[6-11]。标准矩匹配方法通过改变原始图像的光谱分布,起到图像条带去除作用,只适合于几何校正前的图像,而且要求地物分布均匀,校正效果与精度依赖于设定的参考均值与方差。如果图像中地物分布复杂,每个探测器所扫描的地物特征变化很大,其均值和方差的差异也较大。标准矩匹配法把原本非一致的各行(列)均值与方差看作近似相等,把所有行(列)的均值和方差都调整到某一个参考均值和方差上,改变了图像在成像行或列方向的均值分布,从而导致图像反映的地表光谱信息发生畸变,甚至出现带状效应^[6-7]。许多研究针对该问题,提出了改进的矩匹配方法,将其用于遥感影像条带噪声的去除。

韩玲等^[6]提出一种改进的行平滑条带滤波方案,对含有条带噪声波段的行均值曲线进行平滑处理,并调整图像中各像元的灰度值,以减小行间灰度差异,所得图像的峰值信噪比有所提高,在较好地削弱图像中条带噪声的同时,保留了原图像的辐射特征。针对较小且非均匀图像,刘正军等^[8]利用均值补偿法、傅里叶变换法和相关系数法恢复各分图像灰度的真实均值分布,抑制误纠正现象的发生,其结果表明均值补偿法改善带状现象相对较好,但受前 N 行图像数据的均值影响。秦雁等^[9]对探测器响应函数在图像低值区及高值区呈非线性的特点,提出了分段线性动态矩匹配条带去除方法,其中通过阈值分割高、中、低的值域统计区间,对探测器响应函数进行分段线性拟合,并对探测器每一分图像动态采用其相应值域内的均值和标准差作为参考值进行条带纠正。张炳先等^[10]在其研究中采用了类似处理方法,首先将不同反射特性的地物按照灰度差异进行分割处理,然后对每一个分割区域分别采用

标准矩匹配进行处理,从而抑制标准矩匹配处理过程中造成的灰度畸变。陈劲松等^[11]假设同一传感器在不同波段上对相同地物的探测具有线性关系,选择与含条带噪声图像相关性很高的、不含条带噪声的另一波段图像作为参考,获取每个探测器图像的参考均值与方差,实现相应探测器的条带噪声校正。

相对于标准矩匹配方法,上述改进方法在条带噪声去除中效果更为明显,但扩大或弱化了校正后图像中地物本身的光谱特征差异。本文将矩匹配方法引入到红外图像非均匀性校正中,并提出了方差补偿改进的标准矩匹配方法,通过对实验图像校正前后结果进行定性与定量比较分析,结果表明改进后方法的校正效果更为理想。

2 原理与方法

2.1 标准矩匹配方法

理想情况下,各探测器在地面光谱响应范围内为一线性响应函数,即图像灰度值 D 与接收到的辐射亮度 L 的关系可以表达为

$$D = A \times L + B + \epsilon, \quad (1)$$

式中 A 和 B 分别为探测器响应函数的增益和偏置, ϵ 为噪声。由于不同探测器对外界同一入射光强度的响应存在差异,图像上产生了灰度的输出偏差。如果能将不同探测器的输出归一化为同一个值,则可有效去除红外图像非均匀性。

对于一幅足够大的图像,每个探测器生成的灰度值分布概率是相同的,即各个分图像真实辐射的均值和标准差差异很小^[9]。标准矩匹配方法假设每个传感器所探测的地物具有均衡的辐射分布^[12],图像扫描方向的一行或一列图像具有统计一致性^[5],其核心在于通过调整每个传感器的均值、方差到某一参考值来达到校正目的^[12]。

标准矩匹配方法为

$$Y = \frac{\sigma_r}{\sigma_i} X + \mu_r - \mu_i \frac{\sigma_r}{\sigma_i}, \quad (2)$$

式中 X 、 Y 分别为第 i 个探测器图像像素校正前、后的亮度值; μ_i 、 σ_i 分别为第 i 个探测器扫描图像的均值、方差; μ_r 、 σ_r 分别为参考探测器扫描图像(整景图像)的均值、方差。

2.2 方差补偿的矩匹配方法

在某个区域的成像过程中,同一探测元件在不同时间对相同光通量的响应可认为几乎不变,即同一探测元件对相同地物探测的输出相同。如不考虑大气条件等因素的影响,同一探测器输出的一行

(列)数据之间的差异真实表达了地物本身的光谱特征差别。而标准矩匹配方法明显改变了这种差异,因此将其用于图像的非均匀性校正时,应考虑将其改进,使校正后的图像上保留地物之间的光谱差异,为此提出了一种方差补偿的矩匹配方法。

标准矩匹配校正后图像上不同探测器的行(列)均值与参考均值相同,为了保留不同行(列)中的地物光谱差异,非均匀性校正前后图像 X 、 Y' 应具有如下关系

$$Y' - \mu_r = X - \mu_i, \quad (3)$$

将(2)式与(3)式相加,可得

$$Y' + \frac{\sigma_r}{\sigma_i} X - \mu_i \frac{\sigma_r}{\sigma_i} = Y + X - \mu_i, \quad (4)$$

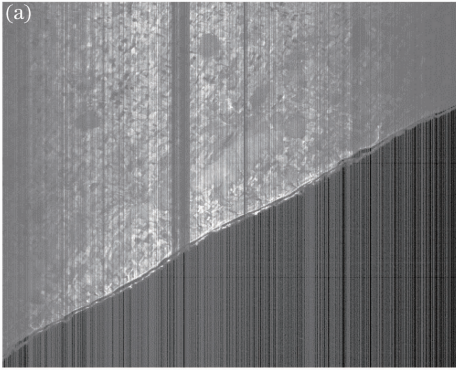
整理后可得

$$Y' = Y + (X - \mu_i) \frac{\sigma_i - \sigma_r}{\sigma_i}, \quad (5)$$

相对于(2)式,(5)式将每个探测器对不同地点的成像差异及其与参考方差之间的差异补偿到了标准矩匹配后的图像中,从而保留了同一探测器内原有地物之间的光谱差异。

3 实验与分析

针对红外图像的非均匀性,以某型号卫星搭载的传感器图像为例,该传感器为焦平面阵列,500个



探测元器件排成一行,通过平台向前移动推扫式成像,可获得75个光谱波段。实验图像波段的中心波长位于短波红外的920 nm附近,大小为500(列)×4096(行),图像上方为陆地,下方为水体。根据前人关于矩匹配方法在不同地物区域应用的相关讨论^[9-10,13],同时为了更清晰、方便地定性比较非均匀性校正效果,本实验给出了水陆交界处500(列)×400(行)图像的定性分析与定量分析结果。数据处理与分析在ENVI/IDL软件环境下完成。

3.1 图像辐射定标

传感器的辐射定标系数中给出了不同探测器 i 在不同探测波段 λ 上的增益 G 、偏置 B 与暗背景噪声 ϵ 。通过图像的辐射定标过程,

$$R_{i,\lambda} = G_{i,\lambda} \times (N_{i,\lambda}^D - \epsilon_{i,\lambda}) + B_{i,\lambda}, \quad (6)$$

式中 $N_{i,\lambda}^D$ 为探测器 i 在 λ 波段上的 DN 值。将原始图像遥感影像像元亮度值(DN)转换为对应的辐射亮度 R [单位: $W/(cm^2 \cdot sr \cdot nm)$],可消除大部分由于不同探测器响应差异带来的非均匀性。

图1给出了辐射定标前后部分区域的图像,结果表明大部分探测元的非均匀性能够得以有效校正,但部分对不同光通量响应不发生变化或是发生很小变化的盲元探测列,如图1(b)中矩形框位置所示,需要在辐射定标基础上,利用矩匹配方法进一步进行校正。

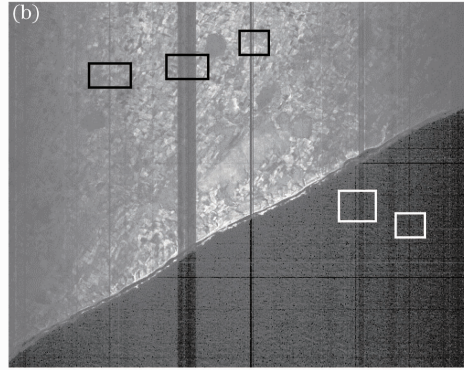


图1 辐射定标(a)前(b)后的图像对比

Fig. 1 Comparison between images (a) before and (b) after radiant calibration

3.2 参考均值与方差的确定

前文述及的标准矩匹配与各种改进矩匹配方法都延续了探测器响应函数呈线性的假设,但在低值和高值区域经常呈二次曲线非线性的特点^[13],这对于图像上诸如水体等低值区的影响尤为明显。秦雁等^[9-10]在改进矩匹配方法时,通过不同的处理手段对同一探测元内部的成像数据进行分段,针对每段数据,分别采用标准矩匹配方法进行纠正。

本实验在将矩匹配方法用于非均匀性校正时,也发现这种分段获取参考均值与方差是非常必要的,而且如何进行合理分段对校正结果精度影响较大。根据实验图像上地物类型的分布,并参考秦雁等^[9]的研究,将图像划分为水体和陆地两个区域,分别进行基于矩匹配方法的非均匀性校正处理。由于传感器的本身设计原因,图像上地物亮度由中心列向边缘列逐渐变暗,如图1中陆地区域亮度差异所示。图2分别

统计了水体与陆地区域在不同探测列上的均值分布,明显呈现出了中间亮、两边暗的特点。因此,在确定矩匹配校正所用的参考均值与方差时,选择图像中心列,分别计算得出水体和陆地的均值与方差。

3.3 标准矩匹配

针对每个探测元获取的每列数据,分别统计水体和陆地区域的均值与方差,利用(2)式可得到标准矩匹配后的图像校正结果,如图3(a)所示。

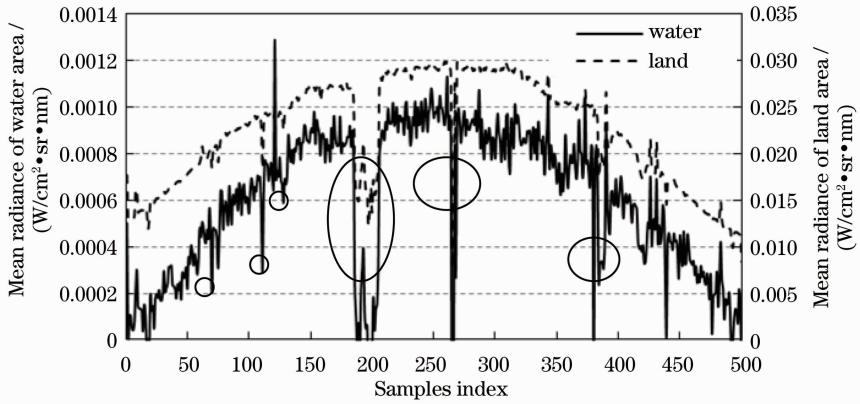


图2 水体和陆地区域内不同探测元输出的均值分布(圆圈标记内的列为探测盲元位置)

Fig. 2 Mean value distribution of different detectors for water area and land area (Columns within circle are corresponding to blind detectors)

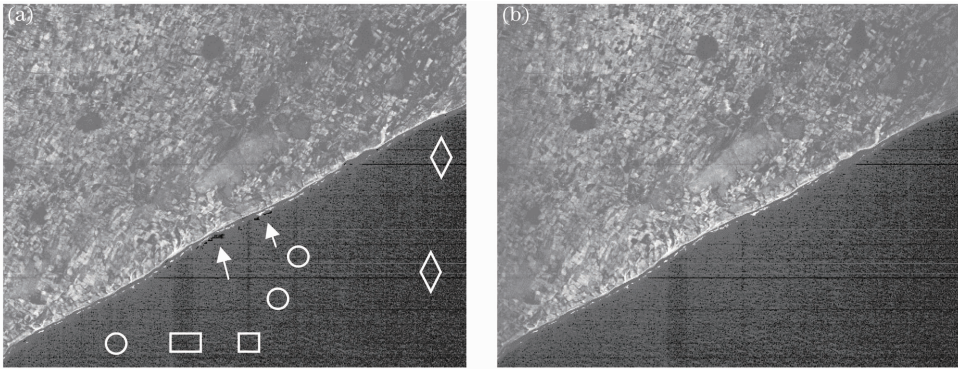


图3 (a)标准矩匹配与(b)方差补偿的矩匹配校正图像对比(Gaussian对比度变换后显示)

Fig. 3 Comparison between corrected images after (a) standard moment matching and (b) standard deviation value compensation (Displayed by Gaussian contrast stretches)

对比图1(b)与图3(a)可发现,标准矩匹配明显消除了图像中部分探测元的非均匀性响应,尤其是图1(b)中矩形框位置处的盲元探测列,而且选择中

间列作为参考,校正了传感器本身因素引起的不同列灰度的差异,更为真实地表达了地物的光谱差异。

但是,正如前文分析的那样,水体区域的盲元探

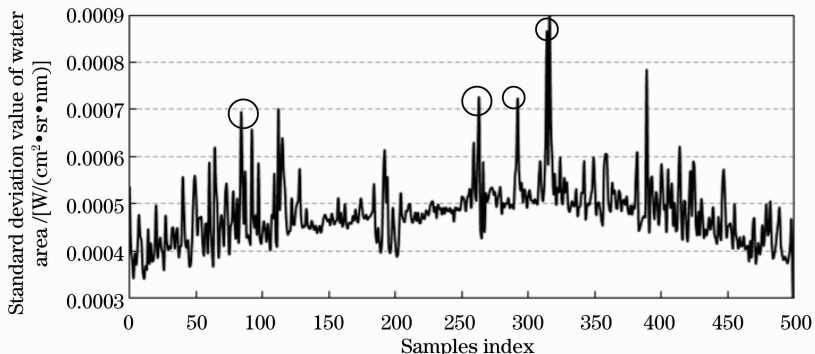


图4 水体区域内不同探测元输出的方差分布

Fig. 4 Standard deviation distribution of different detectors for water area

测列的非均匀性并没有完全得以消除,如图 3(a)中矩形所在列,而且在水体区域出现了新的条带,如图 3(a)圆圈所在列。统计不同探测列水体区域的方差,如图 4 所示,不同探测元的输出方差存在着显著差异,部分相邻探测元之间出现了明显的方差跳跃变化,如图 4 中圆圈所示的列位置。对比图 3(a)与图 4,标准矩匹配后产生的新条带正好位于方差突然变大的列上。在陆地区域由于相邻探测列之间的均值与方差差异相对较小,没有产生明显的新条带。

3.4 方差补偿的矩匹配

标准矩匹配校正后的每个探测列以中心列的均值与方差作为参考,改变了同一探测元对不同地物成像的亮度差异,使得地物本身的光谱特征差异得以扩大或压抑,同时在均值与方差较小的水体区域中产生了新的条纹。为了保留同一探测元内部地物的光谱差异,需要对标准矩匹配后的图像进行方差补偿。考虑到原始图像中存在部分盲元,方差补偿的矩匹配处理步骤如下:

1) 对所有探测列利用(5)式进行标准矩匹配后的方差补偿处理。

2) 判断盲元所在的列。根据图 2,与邻近正常探测列相比,盲元探测列的均值明显偏小,同时考虑到红外焦平面阵列中可能出现连续两个或多个盲元的情况,设计了参数 Δ_i ,

$$\Delta_i = (\mu_i - \mu_{i-1}) \times (\mu_i - \mu_{i+1}), \quad (7)$$

式中 μ_{i-1} 、 μ_i 、 μ_{i+1} 分别为第 $i-1$ 、 i 和 $i+1$ 列的均值。如果 Δ_i 大于某个阈值(研究中阈值设为 5×10^{-8}),或者同时满足 Δ_i 接近于 0 并且 μ_i 小于以第 i 列为中心的多列均值(针对实验图像取 9 列的均值判断连续盲元),则判断第 i 列为盲元探测列。

表 1 不同校正图像的非均匀性 U_R 比较

Table 1 Comparison of the non-uniformity U_R for different corrected images

Region	Radiant calibration	Standard moment matching	Standard deviation value compensation
Land area	0.3044	0.1671	0.1309
Water area	0.9637	0.5114	0.5088

根据表 1,相对于辐射定标后的图像,标准矩匹配后图像、方差补偿矩匹配图像的非均匀性逐渐变小。相对于陆地,水体区域的非均匀性更高,而且方差补偿前后的非均匀性变化较小,这可以由以下 3 个原因加以解释。首先,同一探测元在陆地区域的探测方差要大于水体区域,这使得方差补偿后的陆地区域非均匀性改善明显;其次,水体区域存在着某些行方向上的条带噪声[如图 3(a)中菱形所示的

3) 盲元列的标准矩匹配校正。由于盲元探测结果不能准确表达地物本身特性和不同地物之间的光谱差异,因此按照(5)式对盲元列进行方差补偿是不合理的。为了更大程度上复原盲元列中地物的光谱特征,研究中假定相邻列的均值与方差相近,分别统计方差补偿矩匹配处理后的盲元相邻列的水体、陆地区域均值与方差,以之作为参考,对盲元列进行标准矩匹配处理。

方差补偿的矩匹配校正结果如图 3(b)所示。对比图 3(a)与 3(b)的水体区域,经方差补偿校正后,标准矩匹配后产生的新条带得以明显消除,进一步改善了盲元探测列的非均匀性,同时标准矩匹配方法在水陆交界处产生的明显过渡[如图 3(a)中箭头所示]也得到校正,而且方差补偿矩匹配校正后的每个探测列保留了地物之间的光谱特征差异。

3.5 不同校正方法的对比分析

从定性的角度分析,仔细观察图 1 和图 3,原始图像顺序经过辐射定标、标准矩匹配和方差补偿的矩匹配校正后,图像的整体效果得到了逐步明显的改善,图像的非均匀性和盲元列都取得了较好的校正效果。

从定量的角度分析,分别针对图 1(b)、图 3(a)和图 3(b)中的陆地和水体区域,采用如(8)式所示的国家标准中非均匀性参数的定义^[14]进行不同校正结果的评价,对比结果如表 1 所示。

$$U_R = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [R(i,j) - \bar{R}]^2}, \quad (8)$$

式中 $R(i,j)$ 为像元 (i,j) 的输出, \bar{R} 为所有像元的均值, M 和 N 为图像大小。

行],从而增加了图像的非均匀性;最后,由于实验所用图像的中心波长位于 920 nm 附近,根据典型水体的反射光谱特征,水体在该波段上反射电磁波的能力非常弱,图像中大气干扰和探测器本身的噪声甚至超过了水体信号本身,使得图像发生了辐射畸变,辐射定标后甚至存在着负值区,这也影响了水体区域的非均匀性校正效果。

论文进一步采用信息熵客观评价非均匀性校正

前后的图像质量^[15],结果表明图 1(b)、图 3(a)和图 3(b)的信息熵分别为 6.7911、6.3406 和 6.2325。从红外图像非均匀性校正的角度分析,校正后图像中不同探测器响应差异减小,对同一地物的探测输出更为接近,在一定程度上使得图像的信息熵逐渐下降,这与非均匀性校正目的相吻合。

综合前文理论分析、图像校正效果对比检验和非均匀性参数 U_R 定量评价等环节,可以发现方差补偿的矩匹配方法在红外图像非均匀性校正中具有显著的效果。此外,实验研究进一步分析了方差补偿矩匹配方法用于该传感器图像其他红外波段的校正效果,得出了与上文一致的结论,但局限于实验条件,未能将论文研究方法用于其他传感器红外图像的非均匀性校正,这需要在后续工作中进一步验证该方法的普适性。

4 结 论

将遥感图像条带噪声去除中经常采用的矩匹配方法,引入到红外图像的非均匀性校正中,并针对其以参考方差与均值为标准处理后,可能产生新的条带和削弱(或扩大)地物本身光谱特征差异的缺陷进行了改进。实验结果表明,提出的方差补偿矩匹配方法较好地实现了改进目标,能够更好地实现红外图像的非均匀性校正。

参 考 文 献

- Hong Wenqing, Yang Nansheng, Wang Xiaodong, *et al.*. Combined nonuniformity correction algorithm of infrared focal plane arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0611005.
洪闻青, 杨南生, 王晓东, 等. 红外焦平面联合非均匀性校正算法[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0611005.
- Lü Lei, Zhang Xuefeng. Real-time infrared image nonuniformity correction based on FPGA [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(6): 641—643.
吕 雷, 张学峰. 基于 FPGA 的红外图像实时非均匀性校正[J]. *激光与红外*, 2011, 41(6): 641—643.
- Liu Yongjin, Zhang Guohua, Zhao Yigong. Nonuniformity correction algorithm of using mixed kalman filter [J]. *Journal of Xidian University*, 2012, 39(6): 195—200.
刘永进, 张国华, 赵亦工. 混合卡尔曼滤波的非均匀校正算法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(6): 195—200.
- Qin Hanlin, Zhou Huixin, Liu Shangqian. Nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays based on wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(9): 1617—1620.

- 秦翰林, 周慧鑫, 刘上乾. 小波变换的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. *光学学报*, 2007, 27(9): 1617—1620.
- Liu Xiu, Jin Weiqi, Xu Chao. High-resolution reconstruction and non-uniformity correction from images sequences based on poisson-markov model MAP [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(9): 2103—2107.
刘 秀, 金伟其, 徐 超. 基于 MPMP 序列红外图像高分辨率重建和非均匀性校正[J]. *电子学报*, 2011, 39(9): 2103—2107.
- 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.
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.
- M Wegener. Destriping multiple sensor imagery by improved histogram matching [J]. *Int J Remote Sensing*, 1990, 11(5): 859—875.
- Liu Zhengjun, Wang Changyao, Wang Cheng. Destriping imaging spectrometer data by an improved moment matching method [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(4): 279—284.
刘正军, 王长耀, 王 成. 成像光谱仪图像条带噪声去除的改进矩匹配方法[J]. *遥感学报*, 2002, 6(4): 279—284.
- Qin Yan, Deng Ruru, He Yingqing, *et al.*. Piece-wise linear dynamic moment matching destriping [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(11): 1444—1452.
秦 雁, 邓孺孺, 何颖清, 等. 分段线性动态矩匹配条带去除[J]. *中国图象图形学报*, 2012, 17(11): 1444—1452.
- Zhang Bingxian, Wang Mi, Pan Jun. Destriping panchromatic imagery using self-adaptive moment matching [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12): 1464—1467.
张炳先, 王 密, 潘 俊. 采用灰度分割的自适应矩匹配条带噪声去除方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012, 37(12): 1464—1467.
- Chen Jinsong, Shao Yun, Zhu Boqin. Destriping in CMODIS data by an improved moment matching [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, 18(5): 313—316.
陈劲松, 邵 芸, 朱博勤. 一种改进的矩匹配方法在 CMODIS 数据条带去除中的应用[J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(5): 313—316.
- He Lin, Pan Quan, Zhao Yongqiang. A small-target detector based on single likelihood test for hyperspectral imagery [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(12): 2154—2162.
贺 霖, 潘 泉, 赵永强. 一种基于单似然检验的高光谱图像小目标检测器[J]. *光学学报*, 2007, 27(12): 2154—2162.
- C Giovanni, D Marco, W Thomas. Striping removal in MOS-B data [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2000, 38(3): 1439—1446.
- The Technical Norms for measurement and Test of Characteristic Parameters of Infrared Focal Plane Arrays [S]. Chinese Standard GB/T17444-1998.
红外焦平面阵列特性参数测试技术规范[S]. 国标 GB/T17444-1998.
- Meng Tianyou, Wang Yunjia. Ideal equalization of remote sensing images and quantitative assessment of image quality [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(5): 729—739.
孟天佑, 汪云甲. 遥感图像理想均衡化及图像质量定量评价[J]. *中国图象图形学报*, 2012, 17(5): 729—739.

栏目编辑: 张 腾