

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012 **11**  
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年11月 第17卷 第11期(总第199期)

## 目次

### 综述

数字图像合成技术综述 ..... 吴昊, 徐丹(1333)

### 图像处理和编码

基于群稀疏的结构化字典学习 ..... 郭景峰, 李贤(1347)

SSIM 度量虚拟视点绘制失真的深度图帧内编码 ..... 喻莉, 张军涛, 邓慧萍, 向森, 周鹏, 左雯, 王宁(1353)

统计量移位的鲁棒无损图像信息隐藏 ..... 李晓博, 周詮(1359)

伪造图像典型篡改操作的检测 ..... 左菊仙, 刘本永(1367)

### 图像分析和识别

融合灰度和 SURF 特征的红外目标跟踪 ..... 范新南, 丁朋华, 刘俊定, 张学武(1376)

海面温度栅格图的锋面提取与矢量化 ..... 崔雪森, 周为峰, 王栋, 张胜茂(1384)

交通场景中车辆的运动检测与阴影消除 ..... 王彬, 冯远静, 郭海峰, 张贵军(1391)

基于随机点积图的图像标注改善算法 ..... 孙登第, 罗斌, 郭玉堂(1400)

### 图像理解和计算机视觉

有监督子空间建模和稀疏表示的场景分类 ..... 段菲, 章毓晋(1409)

对立色 LBP 模型的目标跟踪 ..... 张炯, 宁纪锋, 颜永丰, 于伟(1418)

## 计算机图形学

联合骨架与边界特征的平面形状分解…………… 蒋建国, 周丹凤, 郝世杰, 郭艳蓉, 詹曙(1425)

屏幕空间自适应的地形 Tessellation 绘制…………… 张兵强, 张立民, 艾祖亮, 张建廷(1431)

## 遥感图像处理

SAR 图像稀疏优化滤波…………… 杨萌, 张弓(1439)

分段线性动态矩匹配条带去除…………… 秦雁, 邓孺孺, 何颖清, 陈蕾, 陈启东(1444)

基于 Harris 角点和 SIFT 描述符的高分辨率遥感影像匹配算法…………… 陈梦婷, 闫冬梅, 王刚(1453)

---

第八届图像图形技术与应用学术会议征文通知…………… (1460)

## 中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 11 期

2012 年 11 月 16 日出版

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

北京 9718 信箱 邮编 100101  
电子信箱:jig@irsa.ac.cn  
电话:010-64807995 010-82614429  
网 址:www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司  
(中国国际书店)  
(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,  
CAS China Society of Image and Graphics  
Institute of Applied Physics and Computational  
Mathematics

Chief editor LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board  
of Journal of Image and Graphics  
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)  
E-mail:jig@irsa.ac.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation  
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

中图法分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)11-1444-09

论文引用格式: 秦雁, 邓孺孺, 何颖清, 陈蕾, 陈启东. 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.

## 分段线性动态矩匹配条带去除

秦雁<sup>1</sup>, 邓孺孺<sup>1</sup>, 何颖清<sup>1</sup>, 陈蕾<sup>1,2</sup>, 陈启东<sup>1</sup>

1. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275; 2. 国家海洋局南海海洋工程勘察与环境研究院, 广州 510300

**摘要:** 由于探测器之间对接收的地物辐射信号的响应特征不同, 导致遥感数据含有条带噪声, 严重影响了图像质量及后续的定量计算。针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, 在着重分析矩匹配方法的基础上, 提出分段线性动态矩匹配条带去除方法。方法设定阈值分割高中低值域统计区间, 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领域内均值和标准差作为参考值进行条带纠正。应用 TM 数据第 4 波段及环境一号卫星高光谱数据进行去条带实验, 并定性和定量地比较了该方法与动态矩匹配、傅里叶变换、自动均衡化曲线方法的去条带效果。结果表明该方法能够在保留图像基本信息的前提下, 获得最佳的去条带效果, 尤其能够提高非均匀地物分布区域内水体的条带去除效果。

**关键词:** 条带去除; 矩匹配; 分段线性; TM 数据

## Piece-wise linear dynamic moment matching destriping

Qin Yan<sup>1</sup>, Deng Ruru<sup>1</sup>, He Yingqing<sup>1</sup>, Chen Lei<sup>1,2</sup>, Chen Qidong<sup>1</sup>

1. School of Geographic Science and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;  
2. South China Sea Marine Engineering and Environment Institute, SOA, Guangzhou 510300, China

**Abstract:** Due to sensor-to-sensor variation within instruments, stripe noise, which affects image quality and subsequent quantitative calculation, is often detected in remote sensing data. Most previous destriping methods are based on the assumption that photomultipliers are linear. In fact, the nonlinearity is stronger in the low and high signal regions. Moment matching is emphasized in detail and a piece-wise linear dynamic moment matching algorithm is suggested which thresholds the image into low-median-high regions, and destripes each subscene separately by dynamically using its neighborhood average value and standard deviation as reference values. This is equivalent to modeling the relationship between sensors as piece-wise linear rather than simple linear. Tests on band 4 of a TM image and on HJ-1A HSI data show that piece-wise linear dynamic moment matching algorithm reduces stripes to a greater degree while retaining the basic information of image than dynamic moment matching method, Fourier transformation method and automatic equalization curves method. The visual and quantitative assessments make sure that this method is reliable and improves destriping effect of huge water body in heterogeneous area.

**Key words:** destriping; moment matching; piece-wise linear; TM data

收稿日期: 2011-09-26; 修回日期: 2012-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071230); 水利部引进国际先进农业科学技术计划(948)基金项目(200820); 国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2006AA06Z416)

第一作者简介: 秦雁(1984—), 女, 中山大学地理科学与规划学院地图学与地理信息系统专业在读博士研究生, 主要研究方向为环境遥感。E-mail: qin.yan@foxmail.com

通讯作者: 邓孺孺, E-mail: eesdr@mail.sysu.edu.cn

## 0 引言

航天航空遥感系统中,常常使用多个探测器同时观测成像,由于研制时探测器存在差异以及运行后其光学特性随时间推移发生改变,造成探测器响应函数不一致,致使遥感图像存在一种周期性、方向性、且呈条带状分布的特殊噪声。此外,扫描机械运动、传感器平台等多方面原因也会引起条带的出现。在地表反射率较一致的大范围区域,如水体、沙漠、雪地等目标上,条带噪声尤为明显<sup>[1]</sup>。以 TM 图像 4 波段为例,海洋水体 DN 值多数在 9~15 之间,而条带噪声达到 1DN 值,因此对于水体这类暗目标,条带引起的误差将达到 10% 左右。此类噪声不但严重影响遥感制图的美观性,而且对大气纠正暗像元选取及水体信息定量反演引入较大的误差<sup>[2]</sup>。去条带校正又称图像相对辐射校正,正是为了校正各个探元响应度差异而对卫星遥感器测量的原始数字计数值(DN 值)进行“再”量化的一种处理过程<sup>[3]</sup>。它是绝对辐射校正前必经的步骤,也是定量遥感的重要环节<sup>[3]</sup>。国内外许多学者针对条带噪声的成因及消除进行了研究,目前去条带方法按原理可分为以下 5 类:空间—频率域滤波方法<sup>[4-9]</sup>、多项式拟合<sup>[10]</sup>、均衡化曲线<sup>[2,11-13]</sup>、直方图匹配法<sup>[14-15]</sup>、矩匹配法<sup>[1,3,16-20]</sup>。

空间—频率域滤波方法将条带看做一种周期性高频噪声,通过设计空间域或频率域的滤波器进行条带消除。最初,空间滤波方法直接采用中值、均值、同态等低通滤波器在图像上进行卷积运算,这必然会使图像趋于平滑,丧失许多边缘信息<sup>[4-5]</sup>。学者们提出了邻域插值法,用上下两像元或周边 6 个非噪声像元的插值结果替代条带噪声,只针对条带区域进行处理,以保留非条带区的边缘信息<sup>[7-8]</sup>。吴军针对 MODIS 数据进一步改进算法,选取与条带波段相关性最好的无条带波段作为插值权重,最大程度地保留条带区细部特征<sup>[9]</sup>。算法适用于带宽为 1 个像元并周期性出现的条带,当条带噪声呈几个像元宽或分布规律不明显时,此算法失效<sup>[8]</sup>。频率滤波方法先将图像从空间域进行某种变换(如傅里叶或小波变换)到频率域,并在频域上利用低通滤波舍弃与条带相联系的频率,再将其反变换到空间域。在实践中,往往很难选择合适的滤波器将信号和噪声分离,这不仅降低处理效率,更破坏图像的真实信

息。在对海量遥感图像的快速处理中,人们很少采用此方法<sup>[18]</sup>。

多项式拟合方法基于图像相邻行或列的地物灰度均值应当是平缓过渡的假设,将行或列均值的变化看做是地物灰度值空间缓变与条带畸变的叠加。采用 N 次多项式拟合行或列均值变化曲线,以其作为参考值分离条带信息。该方法对于图像中等灰度处的条带消除结果最好,但不适于亮度范围变化很大的图像<sup>[10]</sup>。此外,张兵等人基于同样的假设,对列均值和标准差进行均值滤波处理,将平缓变化的列均值和标准差作为参考值进行纵向条带纠正<sup>[21]</sup>。

均衡化曲线法由 Corsini 提出,在 MOS-B 数据去条带应用中取得了良好的效果<sup>[11]</sup>。其原理为在小范围均匀图像内,每个探测器的响应曲线较平缓,图像信号的空间差异相对图像均值较小,可从中分离条带信号。方法选取不同灰度区间的小块均匀目标样本,采用最小二乘法计算各个探测器与参考探测器的响应差异曲线,以达到归一化去条带目的。方法应用于 CCD 推扫成像遥感器的优势在于条带噪声不随时间变化,均衡化曲线只需求取一次。孙凌使用该方法处理我国“海洋一号”卫星 CCD 图像,指出其适用于大面积水域,有助于提高海洋水色定量遥感的精度<sup>[2]</sup>。牛生丽将此方法推广应用于多元并扫成像的 MODIS 数据,建议深化均匀区自动选取算法的研究,以减少人工干预<sup>[12]</sup>。项海兵基于均衡化曲线法,利用 IDL 语言实现了自动检测和去除 MODIS 条带,极大提高了算法效率,但算法在海岸带、海岛区域仍存在一定的误差<sup>[13]</sup>。

直方图和矩匹配方法基于相同的假设,即探测器观测大范围下垫面时,每个探测器观测不同地物的机会几乎是相同的,则每个探测器所观测的地物具有相同均衡的辐射分布。直方图法由 Horn 和 Woodham 提出,其原理是将每个探测器所形成子图像的直方图调整到某个参考探测器直方图上,以达到去条带目的<sup>[14]</sup>。而矩匹配法假设探测器响应函数呈线性,通过调整每个探测器所形成子图像的均值、标准差到某一参考值,以实现去条带。虽然直方图校正并没有基于线性响应的假设,保留了探测器本身的响应特性,但是由于探测器的输出为整型 DN 值,其分布函数是离散的,对应的修正值是一个值域并不是一个精确值,因此需要设置取高值或低值的规则以逼近修正值,这会引入 1DN 值的误差。矩匹配法直接采用真实值计算,可避免这类将连续

数据离散化所产生的分级误差 (binning error)<sup>[19]</sup>。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<sup>[20]</sup>。然而,当参与统计的数据偏少即图像较小或者地物分布不均匀时,两种方法都强制地改变了图像在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。

上述方法大多建立在响应函数呈线性的基础上以补偿各探测器间的响应差异。由于水体的信号偏低,处于探测器响应非线性范围,因此在水域上条带去除效果欠佳。本文对标准矩匹配方法进行改进,提出分段线性动态矩匹配方法以逼近探测器响应非线性特征,提高非均质地表区域水体的条带去除效果。采用 TM 数据及环境一号卫星 (HJ-1A) 高光谱数据进行实验,并比较该方法与其他几种方法的条带去除效果。

## 1 原理及方法

### 1.1 标准矩匹配

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,则探测器的输出响应值,即图像灰度值  $D$  与接收到的地表漫反射分量  $X$  的关系可以表达为

$$D = A \times X + B \quad (1)$$

正是由于各探测器响应函数的增益  $A$  和偏置  $B$  存在差异,使得对于同一入射辐射强度  $X$  产生灰度值输出偏差,这些偏差即表现为条带。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别很小。方法核心在于将各个探测器输出值的均值和标准差与参考探测器的均值和标准差建立关系,获得归一化的增益和偏置。需要指出的是,以穿轨方式工作的传感器如 NOAA 上的 AVHRR、Aqua/Terra 上的 MODIS、Landsat 上的 TM 等,其以多元并扫方式成像,条带呈横向分布,分图像为各行。而以沿轨方式工作的传感器如 SPOT 上的 HRV、CBERS 及 HY-1A 上的 CCD 相机、IRS-P3 上的 MOS-B,其以 CCD 线阵推扫成像,条带呈纵向分布,分图像为各列<sup>[12]</sup>。

根据这一思想,计算第  $i$  号探测器分图像的均值  $M_i$  和标准差  $S_i$ ,及某一参考探测器分图像的均值  $M_r$  和标准差  $S_r$ ,根据式(1)可得第  $i$  号探测器的归一化增益  $A_i$  和偏置  $B_i$  为

$$A_i = S_i/S_r \quad (2)$$

$$B_i = M_i - A_i \times M_r \quad (3)$$

$D_0$  和  $D_c$  分别表示第  $i$  个探测器、第  $j$  个像元条带校正前后的灰度值,根据式(1)~(3)可得变换公式为

$$D_c = \frac{D_0 - B_i}{A_i} = \frac{S_r \times D_0}{S_i} + M_r - \frac{S_r \times M_i}{S_i} \quad (4)$$

式中,参考均值  $M_r$  和标准差  $S_r$  的选择对于条带校正效果起到关键作用,通常情况下常常直接选择整景图像的均值和标准差作为参考值,或者是最接近整景图像均值和标准差的那个探测器作为参考,校正其他各个探测器。

### 1.2 改进的矩匹配

Wegener 发现当图像存在与扫描线近平行的海岸线,或者海岛、云等孤立小目标无法被所有探测器记录时,各个分图像真实辐射均值和标准差差别很小的假设将被打破,标准矩匹配方法会引入新的噪声<sup>[15]</sup>。对于第 1 种情况,较暗的海水目标纠正后值偏大,而较亮的陆地目标纠正后值偏小,图像会出现时暗时明的不连续畸变,即“带状效应 (banding effect)”。对于第 2 种情况,不含小目标的分图像标准差肯定要比包含小目标的分图像标准差及整个图像的标准差都要小,那么不含小目标的分图像纠正后会引入噪声,且在一定程度上会削弱小目标本身的信息。针对较小且非均匀图像,刘正军总结了均值补偿法、傅里叶变换法和相关系数法以恢复各分图像灰度的真实均值分布,抑制这些纠正正情况<sup>[20]</sup>。

均值补偿法适用于  $N$  个 CCD 成像的图像,通过选定图像前  $N$  行数据为参考均值,对其后每个 CCD 成像行  $L(L = kN + i, k \in \mathbf{N}, i = 1, 2, \dots, N)$  作差,并叠加到矩匹配方法中,补偿地面出射辐射真实均值分布。傅里叶变换法通过傅里叶变换将各行均值序列变换到频率域,在频率域利用低通滤波分离条带及均值缓变信息,再通过傅里叶反变换获得空间域的真实均值序列近似模拟。相关系数法依据高光谱图像相邻波段具有较高相关性的特性,选取与条带波段相关性最好的无条带波段,将此波段的各行均值、标准差按一定的规则叠加到矩匹配算法中。傅里叶变换法因低通滤波难以确定,去条带效果相对较差。相关系数法适用于高光谱数据,但相关波段的引入有可能压抑或损坏本波段的细部特征。均值补偿法改善带状现象较好,但受前  $N$  行数据影响。

此外,商业软件中提供了一种动态矩匹配方法

以削弱带状效应<sup>[16,19]</sup>。方法根据空间相邻区域地物灰度分布相近的假设,以当前分图像为中心,相邻  $2N$  个探元图像宽度的均值及标准差为参考进行动态纠正。相对于固定使用整景图像的均值及标准差为参考值的方法,该方法去条带效果更为显著,但对大面积海洋水体仍然失效<sup>[14]</sup>。

### 1.3 分段线性动态矩匹配

以上各种改进矩匹配方法都延续了标准矩匹配方法对于探测器响应函数呈线性的假设,单纯从还原各分图像真实均值分布的角度进行修正。然而由于发射前实验室定标采用的积分球光能等级有限,较难产生低值区特别是近红外波段的光能,探测器响应函数在一定范围内呈线性,但在低端和高端值域常常呈二次曲线非线性的特点<sup>[11]</sup>。先天定标产生的误差以及运行后响应函数的变异,都会打破探测器响应函数为线性的假设。若简单采用同一偏置和增益来模拟探测器响应函数,势必造成图像低值区及高值区条带纠正结果不准确的情况,且对于低值区的影响更为明显。这也是以上各种改进矩匹配方法对于大面积水体条带纠正不适用的原因。

通常情况下,直接求取探测器响应曲线的难度较大,但是可以在响应函数呈线性假设的基础上进行改进,以分段线性的方式逼近探测器实际响应曲线。按阈值设定若干值域区间,在这些独立区间内假设响应函数呈线性,对不同区间分别进行样本统计获得专属的偏置及增益用于条带纠正,即分段线性矩匹配方法。直观上来看,值域区间越细分就能够越精确地模拟探测器响应曲线,然而并非如此。因矩匹配方法是基于样本统计的,若值域区间过度细分则会造成各区间样本数过少,且人为将条带噪声散布在各个割裂的统计区间内,而无法反映出条带引起的差异,造成反效果。因此,统计区间划分应当符合探测器响应曲线高、低值区呈非线性,中值区呈线性的一般特征。高中低值区是相对于探测器响应函数整段值域区间而言,而非某一波段特定的值域范围。通常情况下,在地物类型混杂的图像中,中值区占据大部分样本且呈线性响应,分为一个独立统计区间即可;而低值区及高值区所含样本相对较少,不宜再细分区间,因此整段统计区间至多分为 3 段为宜。当图像地物类型较均匀,如包含大面积水体而缺少高值区样本时,或者包含大面积沙漠、积雪而缺少低值区样本时,可分别将中高值区或低中值区合并,缩减为两段统计区间。

以 3 段区间为例,将式(1)改写为

$$X = \begin{cases} \frac{D - B_l}{A_l} & D \in (0, L] \\ \frac{D - B_m}{A_m} & D \in (L, M] \\ \frac{D - B_h}{A_h} & D \in (M, 255] \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $L, M$  代表分段阈值,  $A, B$  分别表示探测器响应函数的增益和偏置,下标  $l, m, h$  分别代表低中高值域区间。分段设定统计区间可排除高、低值区样本及极端值对中值区线性响应函数拟合的影响,亦可使高、低值区分别建立自身的线性响应函数以逼近实际曲线,从而保证在整个值域范围内接近探测器真实响应曲线。结合式(2)(3)(5),标准矩匹配表达式(4)可改写为

$$D_c = \begin{cases} \frac{S_{lr} \times D_0}{S_{li}} + M_{lr} - \frac{S_{lr} \times M_{li}}{S_{li}} & D_0 \in (0, L] \\ \frac{S_{mr} \times D_0}{S_{mi}} + M_{mr} - \frac{S_{mr} \times M_{mi}}{S_{mi}} & D_0 \in (L, M] \\ \frac{S_{hr} \times D_0}{S_{hi}} + M_{hr} - \frac{S_{hr} \times M_{hi}}{S_{hi}} & D_0 \in (M, 255] \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $D_0, D_c$  分别为第  $i$  个探测器、第  $j$  个像元纠正前后的灰度值,  $S_{lr}, S_{mr}, S_{hr}, M_{lr}, M_{mr}, M_{hr}$  分别为低中高各值域区间参考标准差及均值,  $S_{li}, S_{mi}, S_{hi}, M_{mi}, M_{mi}, M_{hi}$  对应为第  $i$  个探测器分图像低中高各值域区间的标准差及均值。式(6)即为分段线性矩匹配方法纠正公式。由式(6)可见,不同值域区间的像元灰度值应用专属的参考系数进行纠正,最大程度地还原各自偏移量的差异,提高条带去除效果。

分段阈值  $L$  及  $M$  以图像的直方图为参考进行选取,以保证各值域具有一定数量的统计样本。 $L$  值应当覆盖图像低值区即大部分水体的灰度值,该值可从水陆边界读取,以逼近低值区的响应特性。 $M$  值通常包含极高值区,如云、雪、沙漠、裸地等地物,通过实验选取一个较高灰度值。其中  $L$  值的选取较  $M$  值敏感,其决定了低值区纠正效果。

以分段线性的方式改进探测器响应曲线表达式后,另一个需要考虑的关键问题就是参考均值和标准差的确定。在此,可结合利用具有良好纠正效果的动态矩匹配方法。设探测器为  $N$  个,受探测器扫描特性的影响,条带以  $2N$  宽度周期重复出现,采用相邻  $2N$  个探元图像宽度的均值及标准差为参考

对中心行进行纠正。式(6)中的参考值  $S_{lr}$ 、 $S_{mr}$ 、 $S_{hr}$ 、 $M_{lr}$ 、 $M_{mr}$ 、 $M_{hr}$  都是以  $2N$  为周期改变的,采用动态处理的模式最大限度地满足各分图像真实均值及标准差差别不大的假设。

## 2 实验与分析

### 2.1 TM 数据去条带实验

#### 2.1.1 实验区数据

实验数据来源于 2007 年 1 月 13 日成像的 122-45 景第 4 波段 TM 图像,截取原始图像部分区域(1 650 行  $\times$  1 650 列)作为实验区,如图 1 所示。图像覆盖珠江三角洲河口区域,包含海洋、林地、城镇、河流、农田、港口、海岛等多种地物类型。TM 数据第 4 波段条带模型如图 2 所示,图像不仅存在明暗相间的横向宽带噪声,在宽带噪声中还混杂因多个探测器非正常工作产生的单行条带。TM 数据 1 至 5,7 波段为 16 个探元光机扫描成像,条带形式随时间而变化,造成不同周期内的条带形式还具有差异。由于 TM 数据的条带噪声形式较为复杂,故选择其作为实验数据验证算法的有效性。

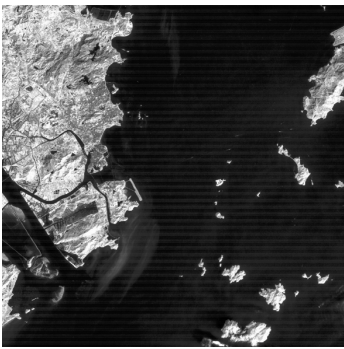


图 1 TM 数据第 4 波段原始图像  
Fig. 1 Raw Image of TM data band4

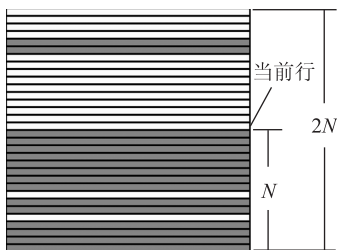


图 2 条带概念模型图  
Fig. 2 Conceptual model of stripe type

#### 2.1.2 条带处理步骤

依据分段线性动态矩匹配方法原理, TM 数据

去条带具体的算法步骤为

1) 查看图像直方图,选取合适的  $L$ 、 $M$  分段阈值。TM4 波段水体与陆地反射率相差极大,其直方图表现为双峰结构, $L$  值必须包含大部分水体灰度值,即覆盖直方图低值区波峰,此实验中取 30。而  $M$  值一般取 200,覆盖直方图高值区波峰,排除超出探测器线性响应范围的极高值。

2) 以行为单位进行纠正,统计当前行低中高各值域范围内的均值  $M_{mi}$ 、 $M_{mr}$ 、 $M_{hr}$  及标准差  $S_{lr}$ 、 $S_{mr}$ 、 $S_{hr}$ 。

3) 以当前行为中心,按低中高各值域分别统计  $2N$  行范围内的均值  $M_{lr}$ 、 $M_{mr}$ 、 $M_{hr}$  及标准差  $S_{lr}$ 、 $S_{mr}$ 、 $S_{hr}$ ,作为纠正参考值。

4) 按式(6),对当前行分低中高值域分别进行条带纠正。

5) 重复步骤 1)–4),直至处理完整景图像。对于前  $2N$  行及最后  $2N$  行,都固定采用该  $2N$  范围计算的均值及标准差作为参考值。

#### 2.1.3 结果比较分析

在 PCI 软件 EASI 模块中编程实现本文提出的分段线性动态矩匹配方法及前人提出的动态矩匹配法<sup>[16]</sup>、傅里叶变换法<sup>[20]</sup>和自动均衡化曲线法<sup>[13]</sup>。傅里叶变换法涉及频域低通滤波确定,在 matlab 软件中,经多次实验选择截止频率为  $\pm 6$  时,获得行均值序列最佳曲线拟合效果。4 种方法 TM 条带处理结果如图 3 所示,根据视觉效果做出如下分析:

1) 分段线性动态矩匹配方法能有效去除条带噪声,使图像细部特征得到还原,视觉效果最佳。

2) 动态矩匹配方法虽然动态采用参考值对中心行进行纠正,逼近了行序列的原始均值,对条带噪声具有消除作用,但图像仍出现行间明暗交替的失真现象。

3) 傅里叶变换法去条带结果与动态矩匹配方法去条带结果相似,对条带有一定的消除效果。但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,图像中也出现了明显的“带状效应”。

4) 自动均衡化曲线方法以  $2N$  行  $\times$  100 列范围作为均匀场景,将其均值作为参考值,计算各行的均衡化补偿校正系数,只对该范围内第一列进行纠正,如此循环处理整幅图像。当  $2N$  行  $\times$  100 列范围内地物均一时,方法纠正效果较好;当  $2N$  行  $\times$  100 列范围包含地物边界或海岛时,因地物灰度值差异较大不满足均匀场景假设,造成区域内产生人工痕迹十分明显的明暗条带。

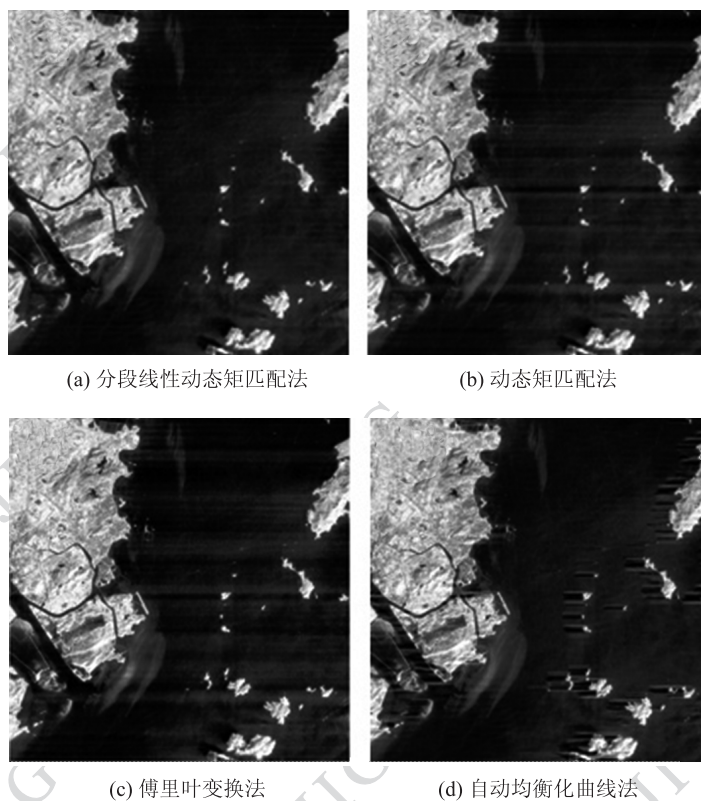


图 3 4 种去条带方法处理结果

Fig. 3 Four result images by different destriping methods

结合视觉直观效果,从 3 个角度对以上 4 种去条带方法做出定量分析:

1) 计算去条带前后图像的均值及标准差,考察方法对于图像基本信息的保留能力。表 1 显示分段线性动态矩匹配方法对于图像均值和标准差保留能力都是最强的。傅里叶变换法对于均值的保留效果较好,但对标准差的改变最大,说明图像细节信息损失较大。动态矩匹配方法与自动均衡化曲线法对图像均值及标准差的保留能力不相仲伯。结果表明,分段线性动态矩匹配方法能够在

保留图像基本信息的前提下,获得最佳的去条带效果。

2) 统计去除条带后的图像与原始图像的差值直方图以分析图像灰度值改变量(见表 1)。分段线性动态矩匹配法对图像的改变量最小,改变量小于 4 个灰度值的像元占 98.61%,且 81.29% 的像元灰度值改变量小于 1,这一比例远高于其他 3 种方法。动态矩匹配法与傅里叶变换法对图像的改变量较为接近,自动均衡化曲线法对图像的改变量最大。

表 1 4 种去条带方法结果图像灰度值统计分析

Table 1 Statistic analyses of image value after destriped by four different methods

图像	均值	标准差	灰度值的改变量			
			<1DN 值/%	<2DN 值/%	<3DN 值/%	<4DN 值/%
原始图像	23.66	14.41	—	—	—	—
分段线性动态矩匹配	23.65	14.39	81.29	93.16	96.86	98.61
动态矩匹配	23.69	14.43	69.66	90.80	85.51	97.61
傅里叶变换	23.65	14.32	67.17	90.95	95.51	97.37
自动均衡化曲线	23.70	14.38	69.85	83.14	89.35	93.06

3) 计算去条带噪声前后图像行均值序列以分析各种方法去除效果。如图 4 所示, 原始图像因存在条带噪声, 行均值抖动非常剧烈; 动态矩匹配法的行均值曲线十分平滑, 在去除图像条带噪声的同时, 破坏了图像原有地物信号差异; 傅里叶变换法提取的拟合曲线也很平滑, 因此也容易破坏地物细部差异特征; 自动均衡化曲线方法的行均值序列以 2N 行为周期形成跳跃, 处理后图像会产生畸变。而本文方法的行均值较原始图像的行均值平滑, 在去除条带同时, 还保留了图像地物信号差异, 纠正效果最优。

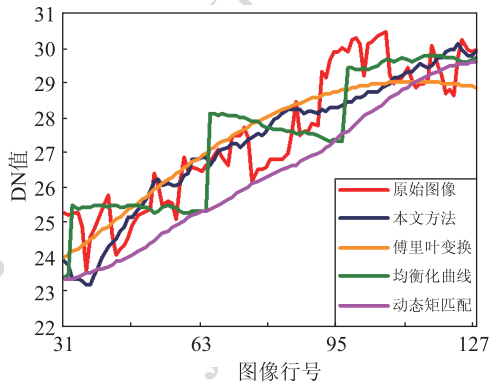


图 4 行均值的对比

Fig. 4 Comparison of row average values

### 2.2 HJ-1A 高光谱数据去条带实验

HJ-1A 高光谱数据采用 CCD 扫描成像方式, 单

景幅宽 50 km, 像元分辨率为 100 m, 图像包含的像元数较少。为验证算法的普适性, 选择成像于 2011 年 2 月 4 日 456-90 景 HJ-1A 高光谱数据进行去条带实验。原始数据各波段均存在不同程度的倾斜条带, 图 5 显示了 41 绿光波段、67 红光波段、103 近红外波段及其标准假彩色合成图像的条带分布情况。与 TM 数据相似, 明暗相间的宽条带中也包含了若干细小条带。应用分段线性动态矩匹配方法进行去条带处理时需注意以下几点:

1) 数据经过几何纠正, 条带呈倾斜分布, 需先旋转图像使条带呈水平, 去条带后再逆旋转图像。通过查看明暗宽条带所占行数, 确定参考值动态选取周期  $N$  为 30。

2) 实验图像仅包含 573 行  $\times$  627 列像元, 且图像水域面积较大, 即使在植被、土壤反射率较高的近红外波段仍然缺少高值区样本, 因此统计区间可缩减为两段。

3) 由于探测器各波段响应函数不一致, 且地物在各波段的原始辐射值也不同, 则适用的阈值  $L$  需分波段设定。HJ-1A 高光谱数据采用 16 位存储形式, 图像灰度值分布范围广, 存储极值可达 65 535。在本次实验中, 分别设置 41 波段、67 波段、103 波段的阈值  $L$  为 5 500、3 550、1 650。该值在  $\pm 100$  范围内浮动对处理结果影响不显著, 说明在存储值域较广的情况下, 阈值设置较为灵活。

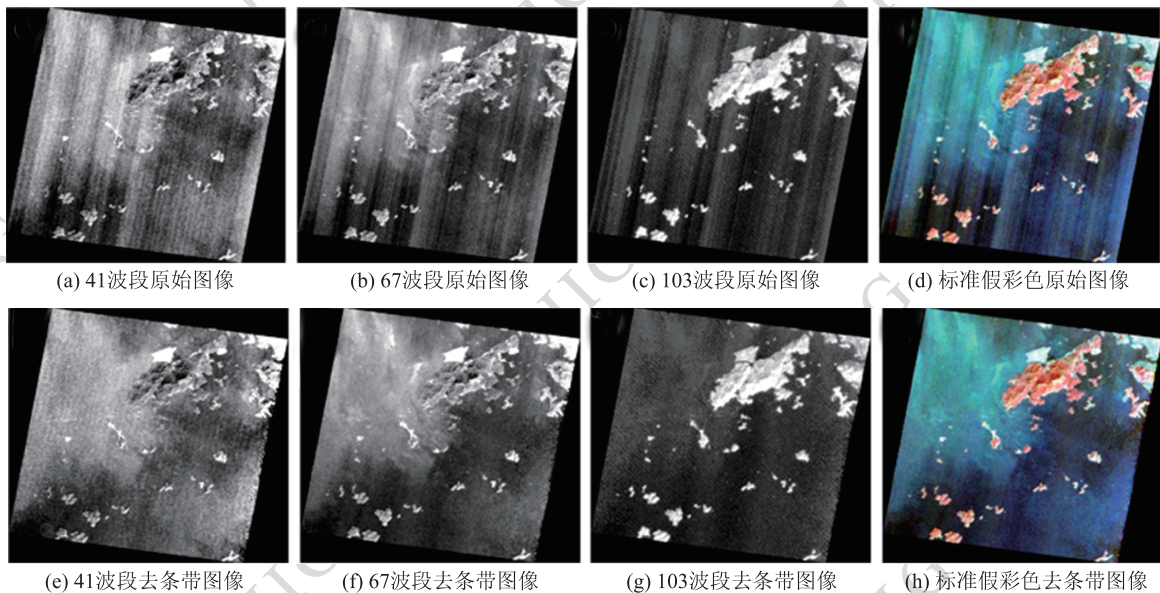


图 5 HJ-1A 卫星 HSI 数据去条带前后对比图

Fig. 5 Comparison of HJ-1A HSI image before and after destriping algorithm applied

去条带后的 41 绿光波段、67 红光波段、103 近红外波段及其标准假彩色合成图像如图 5 (e) — (h) 所示。从视觉效果来看,3 个波段的倾斜条带都得到削弱或消除,对比处理前后的彩色合成图像,去条带效果更为明显。以均值和标准差两项重要指标对去条带效果进行定量分析。41、67、103 波段原始图像均值为 3 172. 77、1 871. 08、936. 41,标准差为 1 868. 06、1 183. 31、1 008. 6。去条带后对应图像的均值改变量为 -2. 08、-9. 57、+3. 63,标准差改变量为 -6. 71、-11. 56、-5. 38。从均值及标准差改变量来看,41 及 103 波段去条带后图像信息保留效果比 67 波段要好。然而,相对于 HJ-1A 高光谱数据的宽存储值域,10DN 值左右的均值或标准差改变量仍可接受,方法亦适用于小幅 HJ-1A 高光谱数据去条带处理。

### 3 结 论

现有去条带算法通常建立在探测器响应线性的假设上以补偿各探测器间的响应差异。然而探测器响应函数在低端和高端值域常常呈二次曲线非线性的特点,这对低值区水体的条带纠正带来极大影响。分段线性动态矩匹配方法从响应函数的非线性表达及参考值动态选取两个方面对矩匹配方法进行改进。方法将图像分低、中、高值区间分别进行样本统计,以不同的偏置及增益逼近探测器实际响应曲线;并以当前分图像为中心,取其相邻  $2N$  个探元图像宽度的均值及标准差为参考值,采用动态处理的模式最大限度地满足各分图像真实均值及标准差差别不大的假设。

该方法不仅有效地去除了 TM 数据第 4 波段中的复杂条带,且保留了地物信号差异,几乎不存在图像失真现象,纠正效果最优。动态矩匹配方法及傅里叶变换法对于去条带具有一定效果,但均会引起明暗相间的“带状效应”。傅里叶变换法较难选择合适的低通滤波获得最佳行均值拟合曲线,易对图像标准差造成较大的改变,而压抑图像细部特征。自动均衡化曲线法假设探测器响应非线性,当区域内地物均一时去条带效果较好,若区域内包含地物边界或海岛时,易产生人工痕迹明显的明暗条带。相较其他方法,本文方法对于高值和低值区条带纠正更具保障性,尤其适用于地物分布不均区域内水体的条带消除。

HJ-1A 高光谱数据去条带实验表明,该方法对于以 CCD 成像的小幅数据也具有适用性。方法简单易行,处理效率较高,但分段阈值的选择需要考察具体图像确定。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Niu S L, Tang J W, Jiang X W, et al. The comparison of two quantitative striping removal algorithms for HY-1A COCTS data [ J ]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11 ( 6 ): 860-867. [ 牛生丽,唐军武,蒋兴伟,等. HY-1A 卫星 COCTS 数据条带消除的两种定量方法比较 [ J ]. *遥感学报*, 2007, 11 ( 6 ): 860-867. ]
- [ 2 ] Sun L, Tang J W, Zhang J. A study of quantitative striping removal algorithm for HY-1 CCD data [ J ]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24 ( 6 ): 20-34. [ 孙凌,唐军武,张杰. 我国“海洋 1 号”卫星 (HY-1) CCD 图像数据量化条带消除研究 [ J ]. *海洋学报*, 2002, 24 ( 6 ): 20-34. ]
- [ 3 ] Guo J N, Yu J, Zeng Y, et al. The research on relative calibration of CBERS-01/02 CCD image [ J ]. *Science in China Series E*, 2005, 35 ( Z1 ): 11-25. [ 郭建宁,于晋,曾湧,等. CBERS- 01/02 卫星 CCD 图像相对辐射校正研究 [ J ]. *中国科学: E 辑*, 2005, 35 ( Z1 ): 11-25. ]
- [ 4 ] Cushnie J L, Atkinson P. Effect of spatial filtering on scene noise and boundary detail in Thematic Mapper imagery [ J ]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1985, 51 ( 9 ): 1483 - 1493.
- [ 5 ] Pan J J, Chang C I. Destriping of landsat MSS images by filtering techniques [ J ]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1992, 58 ( 10 ): 1417-1423.
- [ 6 ] Simpson J J, Gobat J I, Frouin R. Optimized destriping of GOES images using frequency domain filters [ J ]. *Remote Sens. Environ.*, 1995, 52 ( 1 ): 15-35.
- [ 7 ] Jiang G M, Niu Z, Ruan W L, et al. A study on removing the stripe noises in MODIS images [ J ]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, 18 ( 6 ): 393-398. [ 蒋耿明,牛铮,阮伟利,等. MODIS 影像条带噪声去除方法研究 [ J ]. *遥感技术与应用*, 2003, 18 ( 6 ): 393-398. ]
- [ 8 ] Huang X Y, Zhou R L, Luo H. Method for removing the stripe noises with neighboring-region interpolation algorithm in modis images [ J ]. *Geospatial Information*, 2008, 6 ( 1 ): 101-103. [ 黄晓园,周汝良,罗辉. MODIS 影像条带噪声去除邻域插值法研究 [ J ]. *地理空间信息*, 2008, 6 ( 1 ): 101-103. ]
- [ 9 ] Wu J, Zhang C. Destriping MODIS images with self -correlation interpolation algorithm [ J ]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2006, 21 ( 3 ): 253-258. [ 吴军,张昌. MODIS 影像条带噪声去除的自相关插值法 [ J ]. *遥感技术与应用*, 2006, 21 ( 3 ): 253-258. ]
- [ 10 ] Tang J W, Gu X F, Niu S L, et al. Cross calibration between CBERS-02/CCD and MODIS based on the water targets [ J ]. *Science in China Series E*, 2005 ( Z1 ): 59-69. [ 唐军武,顾行

- 发,牛生丽,等. 基于水体目标的 CBERS-02 卫星 CCD 相机与 MODIS 的交叉辐射定标[J]. 中国科学: E 辑,2005( Z1 ): 59-69. ]
- [11] Giovanni C, Marco D, Thomas W. Striping removal in MOS-B data [J]. IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing, 2000, 38 ( 3 ): 1439-1446.
- [12] Niu S L, Tang J W, Guo M H, et al. A study on striping removal based on the equalization curves [J]. Remote Sensing Information, 2007, 3: 44-48. [ 牛生丽, 唐军武, 郭茂华, 等. 基于均衡化曲线的条带消除研究[J]. 遥感信息, 2007, 3: 44-48. ]
- [13] Xiang H B, Liu J S. Detection and removal of the stripes in MODIS 1B image [J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15 ( 1 ): 123-146. [ 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): 123-146. ]
- [14] Horn B K P, Woodham R J. Destriping Landsat MSS images by histogram modification [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1979, 10(1): 69-83.
- [15] Wegener M. Destriping multiple sensor imagery by improved histogram matching [J]. Int. J. Remote Sensing, 1990, 11 ( 5 ): 859-875.
- [16] Wang J S. Horizontal striped noise and its elimination of TM thermal Band 6 imagery [J]. Remote Sensing Technology and Application, 1995, 10 ( 1 ): 53-56. [ 王杰生. TM 热红外图像的横纹条带噪声及消除 [J]. 遥感技术与应用, 1995, 10 ( 1 ): 53-56. ]
- [17] Chen J S, Shao Y, Zhu B Q. 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. ]
- [18] Gao H L, Gu X F, Yu T, et al. Destriping of hyperspectral image based on multi-band image matching [J]. Infrared, 2011, 32(2): 28-33. [ 高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 基于多波段匹配的超光谱成像仪图像条带噪声去除方法研究 [J]. 红外, 2011, 32(2): 28-33. ]
- [19] Gadallah F L, Csillag F. Destriping multisensor imagery with moment matching [J]. Int. J. Remote Sensing, 2000, 21 ( 12 ): 2505-2511.
- [20] Liu Z J, Wang C Y, Wang C. 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. ]
- [21] Zhang B, Zhang H, Chen Z C, et al. A new method of relative radioactive correction based on image statistic [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(5): 630-635. [ 张兵, 张浩, 陈正超, 等. 一种基于图像统计量的相对辐射纠正算法 [J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 630-635. ]