

文章编号: 1007-4619(2006)05-0630-06

一种基于图像统计量的相对辐射纠正算法

张 兵¹, 张 浩^{1, 2}, 陈正超¹, 刘 翔^{1, 2}, 罗文斐^{1, 2}, 张 靛^{1, 2}

(1 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 线阵推扫式传感器, 由于在信号传输和转换以及量化过程中产生的奇偶效应, 和不同 CCD 探元的响应差异, 导致原始图像出现明显的纵向条纹, 相对辐射纠正的目的就是降低或者消除这些影响, 以恢复图像原始信息。针对宽幅线阵推扫式传感器的特点, 提出了一种基于图像自身统计量的相对辐射纠正算法——相邻列均衡法, 消除了原始图像中明显的纵向条带效应。和常规的基于图像统计量的相对辐射纠正算法相比, 这种算法的特点在于求解相对辐射定标系数时不依赖于均匀场景, 并在处理北京一号小卫星图像中得到了验证。

关键词: 北京一号小卫星; 相对辐射纠正; 奇偶效应; 去条带

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

A New Method of Relative Radioactive Correction Based on Image Statistic

ZHANG Bing¹, ZHANG Hao^{1, 2}, CHEN Zheng-chao¹, LIU Xiang LUO Wen-fei ZHANG Liang

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Vertical striping is an obvious phenomenon in pushbroom CCD image because of the different response among CCD detectors and the odd/even effect raised in signal transferring. Image relative radioactive correction is a process to reduce or eliminate these factors and resume the true radioactive information. In this paper, a new method is brought forward aiming to destripping the strips in broad swath CCD image. The method is based on the column average and standard deviation of raw image. Compared with classical methods based on image statistic, this method obtains relative radioactive calibration coefficients independent of uniform image, which is validated in the relative radioactive correction for raw image of Beijing-1 microsatellite.

Key words Beijing-1 microsatellite; relative radioactive correction; odd/even effect; destripping

1 引 言

相对辐射纠正是一项基础的图像预处理工作, 其目的是消除因 CCD 响应差异和奇偶效应^[1]造成的图像纵向条带, 这种纵向条带效应在线阵推扫式

传感器获取的图像中表现尤其明显。相对辐射纠正总的来说有两种思路, 一种是通过实验室积分球数据、星上定标数据或者图像自身统计量获得相对辐射定标系数, 进而对图像作相对辐射纠正, 另一种是将纵向条带当作周期噪声, 按照空域或频域滤波方法消除条带^[2]。

收稿日期: 2006-04-10; 修订日期: 2006-05-25

基金项目: 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 张 兵 (1969—), 研究员, 博士生导师。1991年毕业于北京大学城市与环境学系, 获得学士学位, 随后进入中国科学院遥感应用研究所, 先后获得硕士学位和博士学位。主要研究领域是高光谱遥感成像机理、信息处理和应用基础研究。已发表论著 20 余篇, 编写专著两部。

常见的基于图像自身统计量的相对辐射纠正算法有:直方图均衡法、均匀场景法、直方图匹配法等^[3-5]。直方图均衡法是从 landsat 发展而来的算法,这种方法要求图像是均匀场景或者图像的行数远远大于探测器的个数;均匀场景法要求图像是均匀场景,利用从实验室获取的每个探测元的暗电流和每个探测器的均值来求得增益和偏置,进而对图像相对辐射纠正;直方图匹配法是计算每个探测器的直方图,并匹配到参考探测器的直方图上,达到对图像相对辐射纠正的目的。空域或频域滤波方法是将纵向条带当作高频周期噪声^[2],采用 FFT 变换或者小波变换分离出噪声成分,然后利用反变换得到去噪后图像,但实际上很难将高频的地物信息和高频噪声完全分开,在滤波的同时往往会损失掉一些地物边界信息。

对于宽幅线阵推扫式传感器而言,如北京一号多光谱相机多达 10000 个 CCD 幅宽 320km,很难找到均匀场景的图像,基于均匀场景的图像的相对辐射纠正的方法难以实现,而基于滤波方法的好坏,则依赖于滤波器的选择,同时涉及空域频域运算。本

文以北京一号小卫星多光谱数据为研究对象,提出了一种不依赖均匀场景的基于图像自身统计的算法——相邻列均衡法,在基本不损失地物原始信息的同时很好地去掉了纵向条带效应,适合于线阵推扫式传感器图像的相对辐射纠正,并且在北京一号图像相对辐射纠正的实践中得到了验证。本文首先从理论上推导相邻列均衡法,然后以北京一号多光谱处理为例,比较各种去条带算法的效果,最后给出分析和结论。

2 相邻列均衡法

从统计意义上看,图像对应相邻列上的地物灰度值的均值和标准差应该是平缓过渡的,由于线阵传感器相邻探测器的响应和输出时的奇偶效应,图像出现明显的纵向条纹,如图 1 所示,反映在实际图像中,相邻列列均值和标准差会出现上下抖动效应^[6],这种抖动可以用来求取探测器的增益和偏置,进而对图像进行相对辐射纠正,达到消除纵向条带的目的。

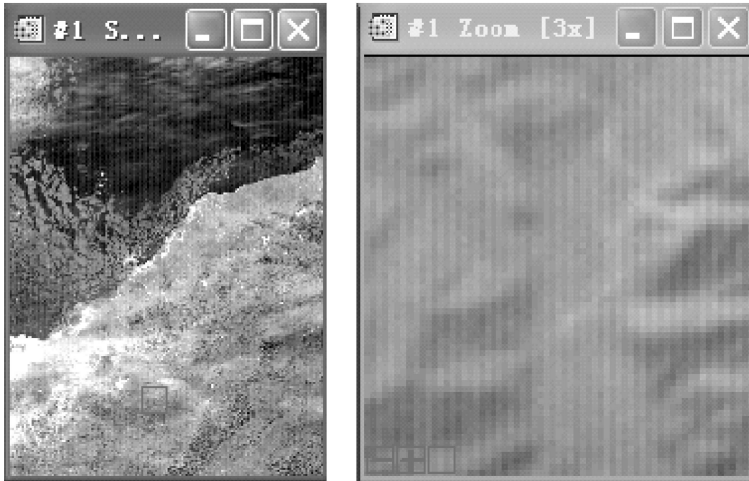


图 1 北京一号小卫星图像(左为缩小,右为 3 倍放大显示)

Fig 1 Image of Beijing-1 microsatellite(Left scroll right room by 3 times)

基于图像自身统计量求增益和偏置的原理如下^[7]:

$$DN_{cal\ i} = NG_i \cdot DN_{raw\ i} + B_i \quad (1)$$

式中, $DN_{cal\ i}$ ——相对定标后的探测组件数字计数值;
 $DN_{raw\ i}$ ——原始探测元采集的数字计数值; B_i ——第 i 个探测元归一化后的偏置量,单位 DN; NG_i ——第 i 个探测元归一化后的增益,其值通常接近 1。

对于一幅原始图像,第 i 行 j 列像素的 DN 值表示为 $DN_{raw\ i\ j}$

$DN_{raw\ j} = (DN_{raw\ 1\ j}, DN_{raw\ 2\ j}, DN_{raw\ 3\ j}, \dots)^T$
 表示第 j 列 DN 值向量。相对辐射纠正后的图像,第 i 行 j 列的像素的 DN 值表示为 $DN_{cal\ i\ j}$

$DN_{cal\ j} = (DN_{cal\ 1\ j}, DN_{cal\ 2\ j}, DN_{cal\ 3\ j}, \dots)^T$
 表示第 j 列 DN 值向量。根据公式(1)可以得到纠正前后 j 列 DN 值向量标准差和均值有如下关系:

$$\begin{aligned} Std(DN_{cal\ j}) &= NG_j * Std(DN_{raw\ j}) \\ Mean(DN_{cal\ j}) &= NG_j * Mean(DN_{raw\ j}) + B_j \end{aligned} \quad (2)$$

式中, Std 和 Mean 分别表示对向量求标准差和均值。

(2)式中关键是求出 NG_j 和 B_j , 而 $Std(DN_{raw_j})$ 和 $Mean(DN_{raw_j})$ 可以通过原始图像求得, 如果知道 $Std(DN_{ca1_j})$ 和 $Mean(DN_{ca1_j})$ 就可以求出这两个量。

从统计意义上看, 相对辐射纠正后的图像的列均值和列标准差应该是平缓变化的, 而北京一号原

始图像列均值和标准差却是明显上下抖动的。本文对列均值和列标准差采用一维均值滤波的方法, 得到平缓变化的列均值和标准差, 并将得到的列均值和标准差当作相对辐射纠正后图像对应的列均值和列标准差, 这样就可以根据公式 (2) 得到相对辐射纠正系数。图 2 表示图 1 列均值和列标准差经过一维均值滤波后的效果。

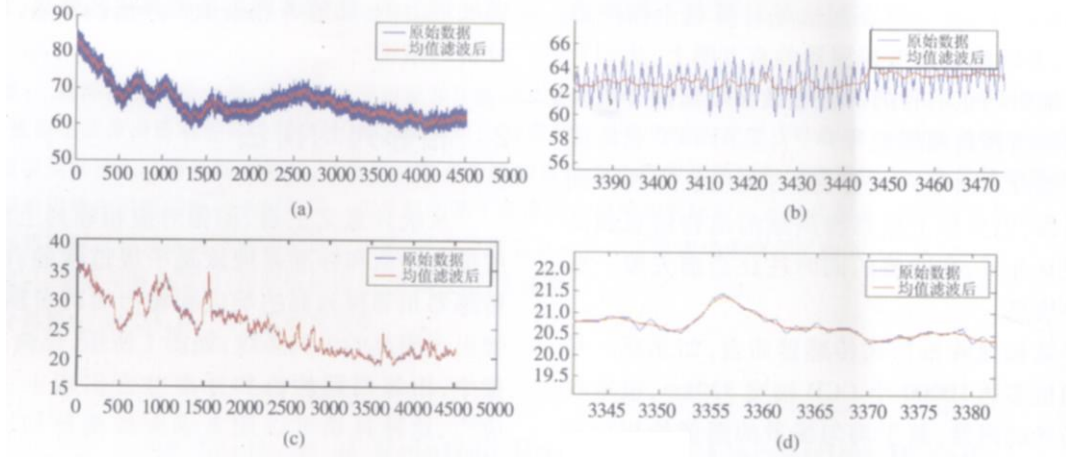


图 2 均值滤波前后的列均值标准差的比较

(a) 为全图列均值; (b) 为局部列均值; (c) 为全图列标准差; (d) 为局部列标准差

Fig 2 Comparison of column average value & standard deviation after average filtering and before

(a) is the column average of full image; (b) is the column average of some columns; (c) is the column standard deviation of full image;

(d) is the column standard deviation of some columns

可以看出, 一维均值滤波有效地消除了列均值和列标准差的局部抖动, 使得列均值和标准差变得很平滑, 可以作为相对辐射纠正后的图像列均值和列标准差。图 3 说明了一维均值滤波的原理。

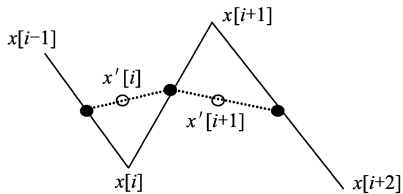


图 3 一维均值滤波原理图

Fig 3 1-dimension average filtering

图 3 中, 实线是原始值连接而成, 虚线是原始值经过均值滤波后连接而成。 $x[i-1]$, $x[i]$, $x[i+1]$, $x[i+2]$ 是原始值, $x'[i]$, $x'[i+1]$ 是均值滤波后的值

显然有:

$$x'[i] = (x[i-1] + x[i+1]) / 4 + x[i] / 2;$$

对应于图像可以得出如下关系:

$$Std(DN_{ca1_j}) = (Std(DN_{raw_{j-1}}) + Std(DN_{raw_{j+1}})) / 4 + Std(DN_{raw_j}) / 2$$

$$Mean(DN_{ca1_j}) = (Mean(DN_{raw_{j-1}}) + Mean(DN_{raw_{j+1}})) / 4 + Mean(DN_{raw_j}) / 2 \quad (3)$$

由公式 (2) 和 (3) 可以得出:

$$NG_j = \frac{Std(DN_{ca1_j})}{Std(DN_{raw_j})};$$

$$B_j = Mean(DN_{ca1_j}) - NG_j * Mean(DN_{raw_j}) \quad (4)$$

总结以上推导过程就可以得到相邻列均衡法的算法如下:

设 σ_{i-1} , σ_i , σ_{i+1} 和 μ_{i-1} , μ_i , μ_{i+1} 分别是第 $i-1$ 列, i 列, $i+1$ 列的均值和标准差, 那么第 i 列的增益和偏置按如下方法计算

$$NG_i = \bar{\sigma} / \sigma_i \quad (5)$$

$$B_i = \mu - \mu_i * NG_i$$

其中:

$$\mu = \frac{(\mu_{i-1} + \mu_{i+1}) / 2 + \mu_i}{2}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{(\sigma_{i-1} + \sigma_{i+1}) / 2 + \sigma_i}{2}$$

3 算法验证与讨论

纵向条带效应是一种周期性的噪声,如果一种算法在消除条带效应的同时不损失地物原始信息,那么这种算法便是一种有效的相对辐射纠正算法。下面分两个方面验证相邻列均衡法的有效性:(1)能够去除明显的纵向条带效应;(2)对原始 DN 值改变不大,即不损失地物边界信息。

3.1 原始图像纵向条带去除的效果

为验证上面算法的有效性,选取了北京一号

2006年 3月 14日 03:56:59—04:00:59太平洋多光谱图像近红外波段的一部分(6028行×4508列),其缩略图见图 1。采用相邻列均衡法、频域低通滤波、直方图均衡法方法对图像进行相对辐射纠正,各种方法处理的结果如图 4所示(部分)。

从处理的结果看,频域滤波并没有完全去掉条带效应,相邻列均衡法和直方图均衡法对于条带去除的效果较好,图像明显消除了纵向条带。频域滤波方法依赖于滤波器的选择,可以通过优化滤波器最大程度地消除纵向条带,同时尽量减少对地物边界信息的损失。频率滤波去噪实际是要分离出真正的条带噪声,条带噪声表现在频域上是高频信息,而

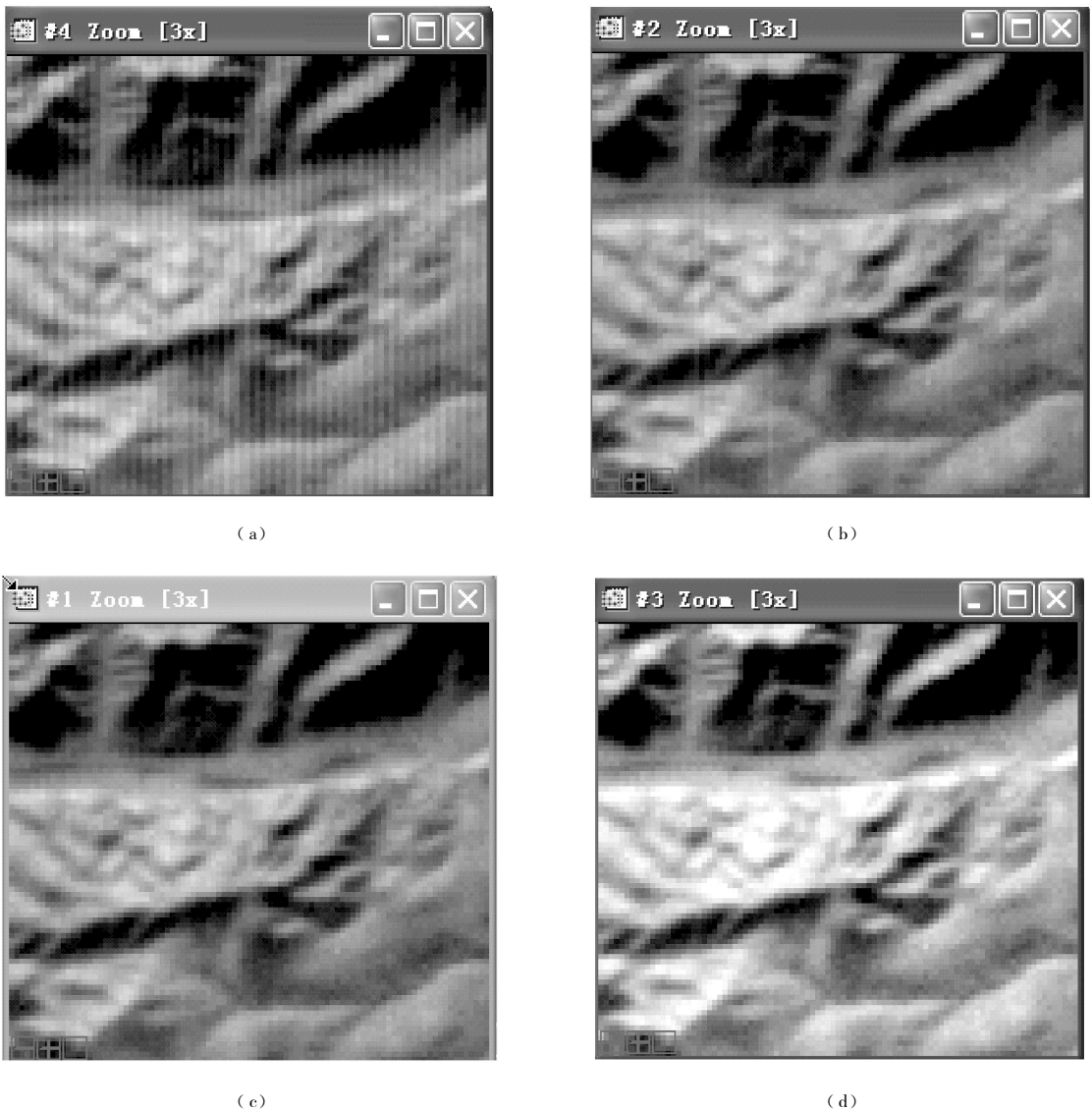


图 4 原始图像和三种相对辐射定标处理的结果比较

(a) 原始图像; (b) 频域滤波处理后图像; (c) 相邻列均衡法处理后图像; (d) 直方图均衡法处理后图像

Fig 4 Comparison among raw image and three result images by different relative radioactive correction methods

(a) the raw image; (b) the result image corrected by low frequency filtering; (c) the result image corrected by neighbor column equalization; (d) the result image corrected by histogram equalization

明显变化的地物边界也是高频信息,二者往往叠加在一起很难分离,去噪的过程不可避免地要损失一部分地物的高频信息。

3.2 去除条带后对于原始信息的保留效果

图 5 是三种方法处理后的图像与原始图像的差值图像,为直观显示方便对差值图像均加 20,选择对应的部分做比较,差值图像含有地物边界信息越少,说明这种方法对于保留地物边界信息的效果越好。

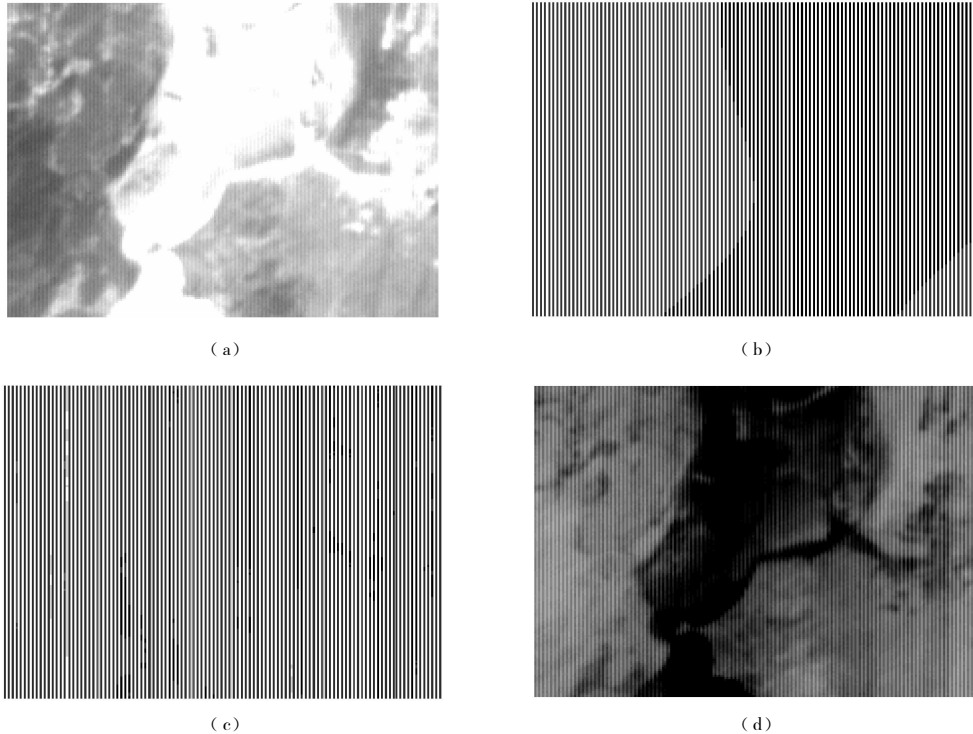


图 5 各种方法处理后与原始图像的差值图像 2% 线性拉伸显示

(a) 原始图像; (b) 低通滤波后与原始图像的差值图像; (c) 相邻列均衡法处理后与原始图像的差值图像;
(d) 直方图均衡法处理后与原始图像的差值图像

Fig 5 Difference images of different result images subtracted from raw image shown by 2% linear stretch

(a) the raw image; (b) the difference of the result image by low filtering subtracted from the raw image;
(c) the difference of the result image by neighbor column equalization subtracted from the raw image;
(d) the difference of the result image by histogram equalization subtracted from the raw image

以上两方面的比较说明,相邻列均衡法不但去除了条带效应,而且最大程度的保留了原始地物信息,证明了这种算法的有效性。

3.3 算法的进一步讨论

图 6 示出了这幅图像经过各种方法处理后列均值和原始图像列均值 (1496—1525 列) 的变化情况。

可以看出,原始图像列均值上下局部抖动变化;直方图均衡法处理后图像列均值处处相等,没有

可以看出,直方图均衡法处理后的图像与原始图像的差值图像,表现出明显的边界效应,这说明直方图均衡法处理会损失较多的地物边界信息;低通滤波方法和相邻列均衡法能比较好地保留地物边界信息,但是低通滤波对于明显变化的边界信息仍然会有所损失,并且这种损失地物边界信息的程度直接与滤波器的选择有关;相邻列均衡法处理后与原始图像的差值图像基本上是纵向条纹,这表明这种方法比直方图均衡法和低通滤波更好地保留了地物原始信息。

考虑到地物列灰度均值的变化,人为均一化列灰度均值,容易改变原始地物辐射信息;低通滤波和相邻列均衡法处理后列均值的变化变得比较平缓;相邻列均衡法处理的效果相对好一些。

直方图均衡法本身是一种比较好的相对辐射纠正算法,在利用均匀场景图像求得相对定标系数时有较好的效果^[3],或者对较少探测器基于图像自身采用这种方法也能得到很好的效果^[5],但是对于北京一号宽幅线阵推扫式探测器成像方式,在缺少星上定标系

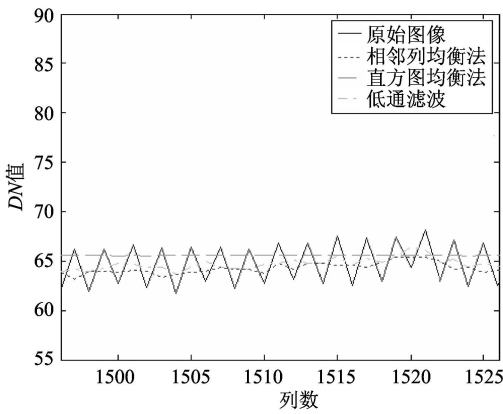


图 6 各种方法处理前后列均值的变化

Fig 6 Changes of column average value after processing and before

统的情况下,很难找到均匀场景,这种方法不可避免地改变了地物原始辐射信息。频域滤波方法依赖于滤波器的选择而且会有较大的运算量,在遥感图像预处理中采用这种算法会大大降低图像处理的速度。从处理效果和效率看,相邻列均衡法是一种实用的相对辐射纠正算法,这种算法不要求原始图像是均匀图像,在基本不损失原始地物信息的情况下,去除了纵向条带效应,取得了很好效果。

表 1 是三种方法对于处理 $M \times N$ 的图像 (M, N 均为 2 的整数幂,这样 FFT 变换才有较快效率)时间复杂度比较。

表 1 各种方法计算时间复杂度比较

Table 1 Comparison of calculating time complexity by different methods

方法	计算时间复杂度
相邻列均衡法	$O(M \times N)$
直方图均衡法	$O(M \times N)$
FFT 正反变化频域滤波	$O(M \times N \times \log(\max(M, N)))$

4 结 论

总结起来,以上三种方法的特点如下:

(1)从图像纵向条带去除效果看,直方图均衡法和相邻列均衡法效果要优于简单的频域滤波,当然,可以通过优化频域滤波方法得到更好的效果,文献 [2] 在这方面做了有益的探索。但滤波去噪的方法在一定程度上会损失掉地物的高频信息。

(2)从对原始地物信息保留程度看,相邻列均衡法较好地保留了地物的原始信息,频域低通滤波可以

通过选择较好的滤波器或采用小波变换的方法更好地保留原始地物信息,直方图均衡法会较大改变原始的地物信息,这会影响到数据进一步的量化应用。

(3)从处理效率看,频域滤波牵涉到空域频域变换,这样会耗去大量的处理时间和内存;而相邻列均衡法和直方图均衡法只需计算每列的均值和标准差,计算较为简单,处理过程很快。

在处理原始图像的过程中发现,相邻列均衡法是一种有效的相对辐射纠正算法,这种算法充分利用相邻列地物灰度值统计意义上的平缓变化的性质,在不依赖于均匀图像的情况下,求得探测器的归一化增益和偏置,进而对图像作相对辐射纠正。在实践中,针对北京一号小卫星缺少星上定标系统的情况,本文把这种方法应用到处理北京一号多光谱原始图像中,有效地去掉了原始图像的条带效应,为图像的进一步量化应用奠定了基础。

参 考 文 献 (References)

[1] Zhong W, Liang Q, Xu F, et al The System Study of CBERS-1 Satellite CCD Camera in Level-0 [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2003, 23(12): 41-46 [钟文,梁钦,徐锋等, CBERS-1 卫星 CCD 相机零级图像处理研究 [J]. 航天返回与遥感, 2002, 23(12): 41-46]

[2] Chen J S, Shao Y. Destrting CMODIS Data by Power Filtering [J]. IEEE Transaction on GeoScience and Remote Sensing, 2003, 41(9): 2119-2124

[3] Zeng Y, Zhang Y F, Xu J Y, et al Analysis of Laboratory Radiometric Calibration Algorithm of CBERS-02 CCD Camera [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2005, 26(2): 41-45 [曾湧,张宇烽,徐建艳等. 中巴资源一号卫星 02 星 CCD 相机实验室辐射定标算法分析 [J]. 航天返回与遥感, 2005, 26(2): 41-45]

[4] Samer L Hijazi A One-Year Radiometric Evaluation of the Advanced Land Imager (ALI) [D]. South Dakota State University: Masters of Science, 2003

[5] Gyanesh Chander, Dennis L Helder, Wayne C Boneyk. LANDSAT-4/5 BAND 6 Relative Radiometry [A]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing [C]. 2002, 40(1): 206-210

[6] Garcla J C, Moreno J Removal of Noises in CHRIS/PROBA IMAGES- Application to Space Campaign Data [A]. Proc of the 2nd CHRIS/Proba Workshop ESA/ESRIN [C]. Frascati Italy, 28-30 April ESA SP-578, July 2004

[7] Chen Z H. A Research on the Technology of On-orbit Calibration and Validation of China DMC Microsatellite [D]. Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences. Ph. D. Dissertation, 2004. [陈正超. 中国 DMC 小卫星在轨测试技术研究 [D]. 博士论文. 中国科学院遥感应用研究所, 2004.]