

文章编号: 1007-4619 (2004)03-0227-07

中分辨率遥感图像条带噪声的去除

陈劲松, 邵 芸, 朱博勤

(中国科学院 遥感应用研究所开放实验室, 北京 100101)

摘 要: CMODIS 是中国第一个发射上天的中分辨率成像光谱仪, 它有 34 个波段, 波长范围从可见光到红外波段。CMODIS 数据含有大量有很高实用价值的光谱信息。但是由于 CMODIS 传感器之间对接受的地物辐射信号的响应特性不同导致 CMODIS 数据中的许多波段含有大量的条带噪声, 严重影响了 CMODIS 数据的解译和信息提取。在介绍了几种常用于 TM, MSS, SPOT 等多传感器遥感图像中的条带噪声去除方法基础上, 提出了一种新的有限长脉冲响应滤波(FIR)法, 并比较了该方法和其它几种常用方法对几何纠正后非均匀地物分布的 CMODIS 数据的去条带噪声结果。结果表明这种新方法要优于本文中提到的几种常用方法, 具有很好的去条带噪声效果, 同时保持图像原有信息。这种方法在其它多传感器遥感图像的条带噪声去除中也有很强的适用性。

关键词: CCD 信号响应; 矩匹配; 低通滤波; 傅里叶变换; 条带去除; 有限长脉冲响应滤波

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

1 引 言

神舟 3 号携中分辨率像光谱仪(CMODIS)上天运行, 标志着中国民用传感器应用研究进入了一个新阶段。作为中国首次上天的中分辨率光谱仪, CMODIS 有 34 波段, 波长范围从 0.4—12.5 μm , 波段间隔 20nm, 包含了从可见光到红外波段非常丰富的波谱信息。与以往遥感数据相比, CMODIS 改进了 AVHRR 的空间分辨率, 比 SPOT, TM, AVHRR 有更高的光谱分辨率, 是对 TM, SPOT 等其他遥感数据源一种很好的补充。结合地表, 大气等实测数据和其他遥感数据 CMODIS 可在陆地植被覆盖变化, 自然灾害监测, 大气变化研究, 海洋科学等方面得到广泛应用。但是许多波段条带噪声的出现严重影响了 CMODIS 数据的解译和信息提取, 使其不能发挥应有的作用。

条带噪声在许多星载、机载多传感器和单传感器光谱仪成像中是一种很普遍的现象^[1-4]。条带噪声主要是由于光谱仪内各 CCD 在光谱响应区内的响应函数不一致、数据系统内定标的一些轻微的错误,

或传感器对信号响应的变化等几个主要原因造成的。在已发表的文献中, 已有许多方法可用于 TM, MSS, NOAA-AVHRR, MOS-B 等数据的条带噪声去除。在上述传感器中, 条带噪声的原因主要是多传感器的信号响应不同及平台传感器信号响应的随机波动。在 CMODIS 每个波段内有 22 个 CCD 进行扫描成像。CMODIS 的条带噪声主要是由于多传感器之间的信号响应不同(不同的增益和偏移)。

目前用于 TM, MSS, NOAA-AVHRR 数据中的几种主要条带噪声去除方法有: 直方图匹配法, 主成分变换法, 矩匹配法, 空间-频率域的滤波方法, 及在 MOS-B 中的均衡补偿法。

直方图调整法^[3-17]假设每个传感器所探测的地物必须具有相同均衡的辐射分布, 将光谱仪中每个传感器所形成的子图像的直方图调整到一个参考直方图(例如整个图像的直方图)来达到去除条带目的。这种方法的前提要求有很大局限性, 对于包括不同地物的复杂地表不适用, 而且这种方法只适用于几何纠正前的图像(如图 1), 不能用于几何纠正后图像(如图 2(a))。

主成分分析法将含有噪声的 PC(主成分)图像

收稿日期: 2002-11-12; 修订日期: 2003-02-17

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要项目“数字地球基础理论研究”(KZCX2-312)。

作者简介: 陈劲松(1969—), 男, 毕业于东北大学。现在是中国科学院遥感应用研究所博士生, 主要从事微波遥感应用技术, 遥感图像处理方面的研究, 已发表论文 10 篇。

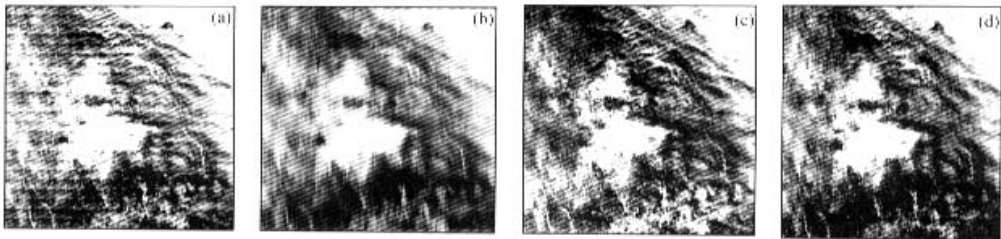


图 1 用三种方法对没有经过几何纠正的 CMODIS 图像进行条带噪声去除的结果
(a) 原始图像;(b) 传统低通滤波法结果;(c) 矩匹配法结果;(d) 新 FIR 法结果

Fig.1 No-georectified CMODIS image before and after destriping

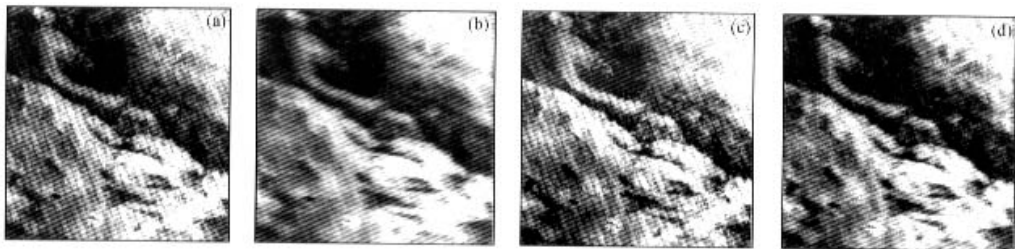


图 2 用三种方法对经过几何纠正的 CMODIS 图像进行条带噪声去除的结果
(a) 原始图像;(b) 传统低通滤波法结果;(c) 矩匹配法结果;(d) 新 FIR 法结果

Fig.2 Georectified CMODIS image before and after destriping

数据值设置为常数再反变换回原图像,来去除条带噪声。但条带噪声往往混杂在各 PC 图像中,很难去除,而且这种方法对计算量要求太高。

矩匹配法^[16]是目前比较常用的去条带方法。假设每个传感器所探测的地物具有相同式均衡的辐射分布,所记录数据的变化也与辐射校正的增益与偏移成线性关系,通过调整每个传感器的均值方差到某一参考值来达到去条带目的。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 CCD 的反射率。利用公式:

$$Y = \frac{\sigma_r}{\sigma_i} X + \mu_r - \mu_i \frac{\sigma_r}{\sigma_i}$$

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 扫描行的标准方差、均值; σ_i, μ_i 为第 I 个 CCD 扫描行的标准方差、均值。这种方法的适用性要强于直方图调整法。但在图像较小或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”,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。这种方法也只适合于几何纠正前的

数据。在 MOS-B 中使用的均衡补偿法^[11]和矩匹配法一样也有局限性很大的适用条件。

由于条带出现往往是周期性的,可在频率域中将条带去除。与其他条件相比这种方法的优点是没有前提适用条件。传统的傅里叶变换是设置高通或低通滤波器将某一频率的信号去除。这种方法可用于几何纠正前后的多传感器遥感数据。对复杂的地物分布地表,条带噪声和图像本身的纹理混杂在一起,用传统的傅里叶变换法在去除条带的同时也能去除图像的某些细节,使整个图像平滑,降低图像质量。

本文在研究其他方法的基础上,提出一种新的基于傅里叶变换(以下称 FFT)的去条带噪声新方法,在得到比其他方法好的效果同时,还保留了图像原有的信息。

2 基于 FFT 变化的新 FIR 方法

FFT 变换是一种正交变换,广泛应用于许多领域,取得了良好的效果。它可将 FFT 变换前空间中复杂的卷积运算转化为 FFT 变换后频率域中简单的乘积运算。同时,它还可以在频率域中简单而实效的实现增强处理和进行特征提取,因而在图像处

理中也得到了广泛的应用。

一维和二维离散函数的傅里叶变换为:

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

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp\left[-i2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)\right]$$

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

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \exp\left[i2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)\right] \quad (1)$$

传统的 FFT 对于去除条带这样的高频噪声是用低通滤波的方法,在空间域变现为平滑处理。具体过程为:

$$F'(u) = F(u) * H(u) \quad (2)$$

$H(u)$ 是 Butterworth 等低通滤波器。这种方法在去除噪声同时也去除大量图像本身的信息(见图 1(b),图 2(b))。为改进传统 FFT 的缺点,本文提出的新 FIR 方法具体步骤为:

2.1 选择用 FFT 把图像变换到频率域的方式

对原始图像可以选择逐行或逐列一维 FFT 变换,也可以对整个图像进行二维 FFT 变换。为得到较好的变换效果,二维 FFT 要求图像的尺寸是 2 的整数倍,而一维 FFT 变换对图像大小没有要求。因此改进的 FFT 选择逐行或逐列变换。对于几何纠正前的数据,由于条带噪声是平行分布的,对图像进行逐列 FFT;对于几何纠正后的数据要考虑图像中主要纹理的分布状况,以避免条带噪声和图像信息混淆。确定变换方式后,将大小为 $M * N$ 的图像用 FFT,变换到频率域,并得到频率谱分布:

$$f_i = \text{FFT}(f_i)$$

$$P_i(u_j) = |F_i(u_j)| \quad (3)$$

f_i 是原图像的行或列, P 是能量谱函数。 I 是行号或列号, $i = (0, \dots, M$ 或 $N)$ 。 u_j 是频率分量值, $j = (0, \dots, N$ 或 $M)$ 。 P 中每个元素的值是相应的频率分量能量值的大小。

2.2 判定条带噪声在频率域中的分布

在 P_i 中,条带噪声和图像本身的信息混杂在一起,根据能量值的大小很难判定噪声的频率分量。但是条带噪声是周期性的分布在整个图像中,每个 P_i 上都有对应的噪声分量值。针对这个特点改进的 FFT 方法先对 P_i 求和,然后再对和求平均来突出噪声,得:

$$\text{mean } P = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} P_i \quad (4)$$

其中 N 是行数或列数, i 是行号或列号。 $\text{mean } P$ 是平均行或列频谱函数(图 3(a),图 4(a))。从图中可以看出有许多类似于脉冲的突出点。这些突出点中也可能有图像本身的信息。如果每个脉冲的区间为 $[a_j, b_j]$, a_j, b_j 是这些区间对应的频率值范围。 $\text{mean } P$ 在这些区间外是递减函数。设一参数 T ,可以根据下式判定噪声点:

$$v_j = u_i \quad \text{当 } \text{mean } P(u_i) \geq T^m \text{mean } P(a_j)$$

其中 v_j 是噪声的频率值, u_i 是 (a_j, b_j) 中 $\text{mean } P$ 峰值对应的频率值, $i = 0, \dots, M$ 或 $N, j = 0, \dots, k$ 。 k 是噪声分量的个数。 T 的值可以根据去噪效果调整。 T 越小,去噪效果越好,但是图像本身的信息损失越大。

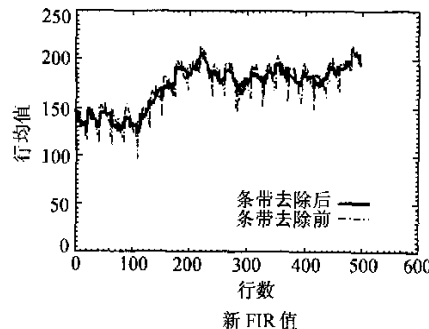
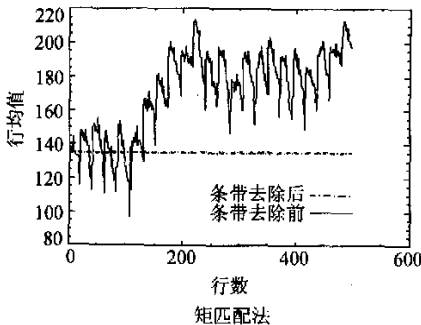


图 3 用矩匹配法和新 FIR 法对没有经过几何纠正的 CMODIS 图像进行条带噪声去除后图像行均值的变化

Fig.3 The mean value of each line of destriped No-georectified CMODIS data by moment matching and new FIR

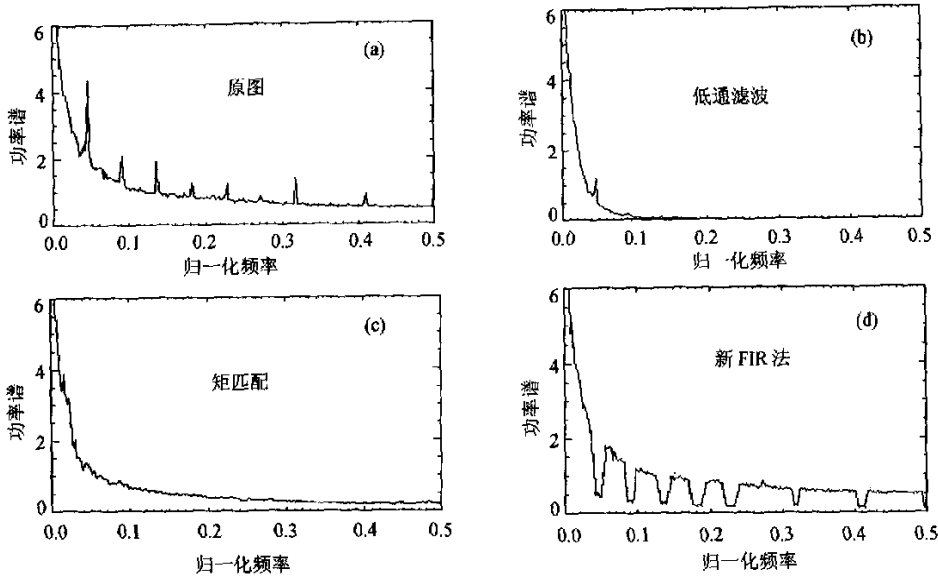


图 4 用三种方法对没有经过几何纠正的 CMODIS 图像进行条带噪声去除后图像列功率谱平均值的变化

Fig. 4 The mean column power spectrum of the No-georectified CMODIS data before and after destriping

2.3 设计滤波器将噪声去除

确定噪声的分量后,要选择高效的滤波器将噪声去除。传统的低通滤波器如 Butterworth、指数等滤波器去噪效果有限,还可能带来振铃效应。这种新的 FIR 方法用一种新的滤波器:

$$H(u) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{(u-u_i)^2}{\sigma^2}\right) & a_j \leq u_i \leq b_j \\ 1 & u_i \notin (a_j, b_j) \end{cases} \quad (5)$$

其中 (a_j, b_j) 是噪声区间, u_i 是这一区间内噪声峰值对应的频率值。参数 σ 用来控制去噪效果。 σ 越大,去噪效果越好,但图像信息损失越大。这种滤波器将噪声能量等于 0,振铃效果也小。将 $H(u)$ 逐次与 $F_i(u)$ 相乘,得:

$$F'_i(u) = F_i(u) * H(u) \quad i = (0, \dots, M \text{ 或 } N)$$

反变换回原图像,得:

$$f'_i = \text{FFT}(F'_i(u)) \quad (6)$$

f'_i 为得到的去噪后的图像。

2.4 去条带噪声效果的评价

得到结果图像后,需要对其去噪效果进行评价。这种改进的用噪声去除率 NR 和图像保真度 ID 两个指标来评价各种去条带方法的效果。设:

$$N = \sum_{i=0}^k \text{mean}P(u_i) \quad S = \sum_{j=1}^{N-1} \text{mean}P(u_j) \quad (7)$$

u_i 射噪声对应的频率值, u_j 是非噪声信息对应的频率值。 N 值为平均频率谱中条带噪声的总能量, S 为平均频率谱中图像本身信息的总能量。 NR 和 ID 为:

$$NR = N_0/N_1 \quad ID = S_1/S_0 \quad (8)$$

N_0 和 S_0 图像去噪前噪声和图像本身的能量和, N_1 和 S_1 图像去噪后平均能量谱中条带噪声对应点的能量和和图像本身信息的能量和。

3 实验数据

本文选取几何纠正前后两种数据进行方法研究。几何纠正前的数据选择的是 2002 年 5 月 22 日记录的 CMODIS 数据。数据范围包括河北,山东,山西地区。这一地区包括有农田,植被,水,裸土,城市,山脉等地物。其中第 16 波段(波长 $0.70\mu\text{m}$)含有大量条带噪声,14 波段($0.66\mu\text{m}$)质量较高,几乎没有条带噪声。为研究方便从这两个波段中各选取一块大小为 500×500 的对应子图像,这一块地物包括有水,山脉,植被,裸土和城市等,地物分布是非均一的。如图 1(a)。

几何纠正后的数据采用的是 2002 年 5 月 22 日记录的 CMODIS 数据。数据范围包括北京地区及渤海湾一部分。这一地区拥有农田,水库,裸土地,建筑物,植被,河流,道路桥梁等典型地物,提供了非常丰富的地表信息。从中选取条带噪声严重的 3 波段

(0.44 μm)和基本上不含条带噪声的 5 波段(0.48 μm)作为实验数据。从这两个波段中也各取任一块大小为 500 \times 500 的对应子图像。这一块地物包括有山脉,植被,裸土等,地物分布是非均一的。如图2(a)。

4 实验结果及分析

将以上几种方法应用于实验数据,得出如图 1—图 5 的结果。

从以上各方法应用的视觉效果来看(图 1、图 2),对于几何纠正前的数据:

(1)传统的低通滤波方法有一定的效果,但是还有一些残余条带,同时消除了地物的细节,使图像变得模糊。

(2)用矩匹配法改善了整个图像的质量,去除了条带噪声,但图像中出现了“带状效应”。

(3)新 FIR 不仅有效的去除了条带,还突出了许多细节,取得了良好的视觉效果。

对于几何纠正后的数据:

(1)传统的低通滤波方法有一定的效果,但是还有残余条带,同时消除了地物的细节,使图像变得模糊。

(2)矩匹配法改无法去除条带。

(3)新 FIR 去除了大部分条带,取得了良好的视觉效果。但是仍然有一些残余条带,一些位置的

图像有轻度模糊。

结合视觉效果结论,对以上几种方法的处理结果作定量分析:

(1)图 3 表明对于几何纠正前的 CMODIS 数据,用改进的 FIR 法去条带后的图像的均值和与原图像的均值和相差不大,变化趋势也相同。而矩匹配法使图像的行均值为一常数,使图像不能反映地物的波谱特性。造成图像失真的原因在于:如果图像中的地物种类多,分布无规律,传感器中每个 CCD(即每行)所扫描的地物变化也很大,均值和方差也不同。而矩匹配法把原本非一致的各行均值看作近似相等,把所有行的均值和方差都调整到某一个参考行的均值和方差上,从而导致图像上反映的地表光谱信息的分布发生畸变。

(2)表 1 显示低通滤波法 NR 值较大 ID 却较小。说明有一定的效果,但图像失真严重。矩匹配法图像有一定的失真,

去噪效果有限。新 FIR 尤其是对几何纠正前的数据 NR 和 ID 都很高,说明这种方法再去噪同时,图像有很高的保真度。

(3)图 4 和图 5 表明低通滤波法在去除噪声的同时,也去除了大量图像本身的信息。矩匹配法去除了部分噪声,基本上保留了图像原有的信息。新的 FIR 对几何纠正前的数据区除了几乎全部噪声,但对于仍然有少量残余噪声。

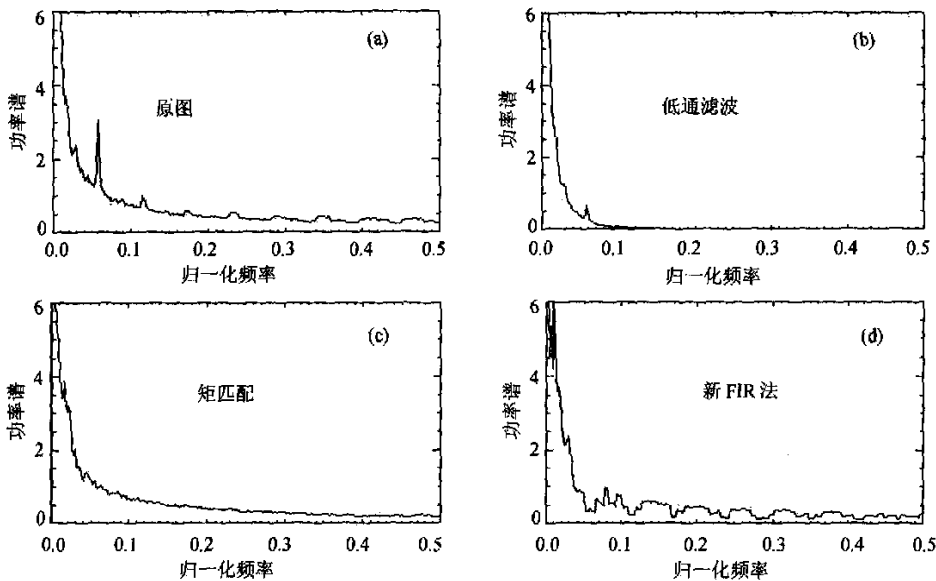


图 5 用三种方法对经过几何纠正的 CMODIS 图像进行条带噪声去除后图像行功率谱平均值的变化

Fig. 5 The mean line power spectrum of the georectified CMODIS data before and after destriping

表 1 CMODIS 图像参数在用三种方法去除条带噪声的变化
Table 1 The parameter of CMODIS image before and after destriping

数据类型	条带噪声去除方法	图像像元平均值	图像像元标准差	噪声去除率(倍)	图像保真度
几何纠正前	原始图像	171.5	47.08	1	1
	低通滤波	171.0	37.85	8.6	0.6
	矩匹配	135.0	35.32	2.05	0.82
	新 FIR	170.5	45.33	10.7	0.93
几何纠正后	原始图像	88.5	46.35	1	1
	低通滤波	88.0	38.14	1.7	0.59
	矩匹配	104.6	36.23	1.2	0.85
	新 FIR	88.1	44.88	4.0	0.90

5 结 论

用传统的傅里叶变换法在频率域和空间域中可以去除几何纠正前后 CMODIS 数据中的条带。但是在去除条带的同时也能去除某些细节,使整个图像平滑,降低图像质量。矩匹配法假设每个传感器所探测的地物在视觉上和统计值上具有相似性。但在图像较小或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”,图像失真严重。而且这种方法只适用于几何纠正前的图像,不能用于几何纠正后图像。改进的 FIR 法不仅有效地去除了条带,仍然保持了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。这种方法与其他几种方法相比另一个优点就是没有前提条件,可用于 CMODIS 几何纠正前后的数据,也可应用在像 TM 等其他多传感器遥感图像数据的条带噪声去除中。这种方法的缺陷是计算步骤多,计算量大。但是它良好的去条带效果和目前计算机技术的发展可以弥补它的不足。

参 考 文 献 (References)

- [1] AHERN F J, Brown R J, Cihlar J, Gauthier R, Murphy J, Neville R A and Teillet P M. Radiometric correction of visible and infrared remote sensing data at the Canada Centre for Remote Sensing[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1984, 8:1349—1376.
- [2] Algazi V R and Ford G E. Radiometric equalization of nonperiodic striping in satellite data[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981, 16:287—295.
- [3] Bernstein R, Lotspiech J B, Myers H J H, Kolsky H G and Lees R D. Analysis and Processing of Landsat-4 sensor data using advanced image processing techniques and technologies[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1984, 22:192—221.
- [4] Crippen R E. A simple spatial filtering routine for the cosmetic removal of scan-line noise from Landsat TM P-tape imagery[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1989, 55:327—331.
- [5] 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, 51:1483—1493.
- [6] Fischel D. Validation of the Thematic Mapper radiometric and geometric correction algorithms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1984, 22:237—242.
- [7] Fusco L, Frei U, Treverse D, Blonda P N, Pasquariello C and Milillo G. Landsat TM image forward/reverse scan banding: characterization and correction[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7: 557—575.
- [8] Horn B K P, Woodham R J. Destriping Landsat MSS images by histogram modification[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1979, 10:69—83.
- [9] Kieffer H H, Cook D A, Eliason E M, Eliason P T. Intradband radiometric performance of the Landsat Thematic Mappers[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1985, 51:1331—1350.
- [10] Malaret B, Bartolucci L A, Lozano D F, Anuta P E, McGillem C D. Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper data quality analysis[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1985, 51:1407—1416.
- [11] Murphy J M, Butlin T, Duff P F, Fitzgerald A J. Revised radiometric calibration technique for Landsat-4 Thematic Mapper data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1984, 22: 243—251.
- [12] Poros D J, Peterson C J. Methods for destriping Landsat Thematic Mapper images—a feasibility study for an online destriping Landsat Thematic Mapper Image Processing System (TIPS)[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1985, 51:1371—1378.
- [13] Rohde W G, Lo L K, Pohl R A. EROS data center Landsat digital enhancement techniques and imagery availability[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1978, 4:63—76.
- [14] Singh A. Thematic Mapper5 radiometric correction research and development results and performance[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1985, 51:1379—1383.
- [15] Srinivasan R, Cannon M, White J. Landsat data destriping using power filtering. *Optical Engineering*, 1988, 27:939—943.
- [16] Weinteb M P, Xie R, Lienesch J H, Crosby D S. Destriping GOES

images by matching empirical distribution functions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 29:185—195. [17] Gadallah F L, Csillag F. Destriping multisensor imagery with moment matching[J]. *INT. J. Remote Sensing.*, 2000, 21(12):2505—2511.

Destriping CMODIS Based on FIR Method

CHEN Jin-song, SHAO Yun, ZHU Bo-qin

(*Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract: As the first Chinese moderate resolution spectrometer in SZ-3 spacecraft, CMODIS contain abundant spectral information with 34 channels in the range from visible to infrared. But sensor to sensor variation within instruments often leads to striping in many channels of CMODIS. The striping noise can distractingly and obstructively affect the interpretation and application of CMODIS data. This paper discusses the methods previously used in striping removal of TM, MSS, MOS-B and presents a new FIR method based on FFT transformation. The Application results of the method to geometrically corrected CMODIS data and non-geometrically corrected CMODIS data and quantitative analysis of the results show that the new method can achieve a better result than the previously used methods mentioned in this paper in removing striping noise of CMODIS data and preserve the spectral characteristic of original image. The new method is also applicable in striping removal of other multisensor remote Sensing data.

Key words: CCD signal response; moment matching; FFT; destriping; FIR