

Terra MODIS 数据 28 波段影像条带噪声去除方法

姜 湾¹ 沈焕峰¹ 曾 超² 张良培² 张洪艳² 刘欣鑫¹

1 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

摘 要: Terra 卫星 MODIS 传感器影像中多个波段数据存在条带噪声,其中第 28 波段的数据受影响较为严重,且随着时间的推移噪声强度更大、噪声类型更加复杂。针对该波段同时受探元-探元噪声与镜面条带噪声影响的特点,本文在矩匹配方法的基础上,提出了基于曲线拟合与去除信号趋势项的条带噪声去除方法。实验结果表明,相对于传统方法,本文提出的两种条带去除方法具有更强的稳健性。

关键词: MODIS; 条带噪声; 曲线拟合; 信号趋势项去除

中图分类号: P237.3; TP751.1 **文献标志码:** A

条带噪声是遥感影像中的一种常见现象,其成因包括探元之间的传递函数不同、电子装置性能差异、系统内定标误差等^[1-2]。Terra MODIS 遥感影像虽在地质地貌探求、植被以及农作物调查等领域被广泛应用,但由于探元-探元条带噪声、镜面条带噪声与随机条带噪声的干扰,其使用受到了较大限制。

目前,国内外针对遥感影像中条带噪声的处理方法主要包括频率域滤波法、空间域匹配法与基于变分模型的噪声去除方法等。频率域滤波法主要利用傅立叶变换^[3]、小波变换^[4]等框架将影像转换到频率域,并通过设计某种滤波器对噪声进行处理,此类方法往往对条带噪声的去除不彻底,同时会导致影像模糊。基于变分模型的噪声去除方法^[5]通过引入正则化技术对影像进行整体求解,条带噪声的去除效果较好,但由于其计算复杂,并不适合广泛地应用于大数据量遥感影像的处理。空间域匹配方法是当前应用最为广泛的条带噪声去除方法,常用的方法是矩匹配法^[6]与直方图匹配法^[7-8],这两种方法去除效果相当,但矩匹配法计算效率更高。

现有的空间域匹配及其改进方法主要针对探元-探元类型的条带噪声^[9],而 Terra MODIS 第 28 波段影像的噪声更加复杂,因为其条带噪声的强度随时间推移而加大,且噪声类型也更复杂,导

致已有的空间域匹配方法难以适用。因此,本文提出了基于曲线拟合与去除多项式趋势的两种噪声去除方法,以期有效去除复杂的混合型条带噪声。

1 条带噪声处理方法

1.1 矩匹配方法

遥感传感器成像中,需要将模拟信号转换为数字信号即模数转换,入瞳辐射值与影像输出值一般成线性关系。根据以上模型,空间域匹配方法假定所记录的条带数据与理想的无条带数据之间呈线性关系:

$$Y = a \cdot X + b \quad (1)$$

式中, Y 为理想影像或去条带影像; X 为受条带噪声影响的观测影像;通过求解校正系数 a 与 b 来实现条带噪声的去除。根据文献^[6]提出的矩匹配方法,相邻探测元件扫描过的区域应当具有相似的灰度值特征,MODIS 传感器按行扫描成像,因此,通过调整条带行行均值 μ_i 、标准差 σ_i 分别与参考行行均值 μ_r 、标准差 σ_r 相一致,可以求得线性校正系数 a 与 b 。

$$\begin{cases} a = \frac{\sigma_r}{\sigma_i} \\ b = \mu_r - \mu_i \frac{\sigma_r}{\sigma_i} \end{cases} \quad (2)$$

在处理探元-探元类型条带噪声时,矩匹配方

法的效果明显,但由于其参考邻近正常行的性质,处理镜面条带噪声效果并不理想。

1.2 基于插值拟合的条带噪声去除方法

本文提出了一种自定义区间的最小二乘插值拟合条带去除方法,与矩匹配方法的不同之处在于:基于插值拟合的条带噪声去除方法通过拟合正常行的均值与标准差曲线信息,插值得到条带行相应的统计量,继而计算校正系数 a 与 b 。

首先选取一定大小的处理窗口,将探元周期内不同条带探元号对应的条带行包含其中,窗口内起止行对应正常探元,窗口的宽度即为影像的宽度,高度大于 T 小于 $2T$ (T 为扫描周期),以避免校正范围过大而导致部分地物灰度失真,同时又能保证校正所有的条带行。建立窗口内正常探元对应的行均值 μ 与行号 I 的拟合曲线方程:

$$\mu = a_0 \times I + a_1 \quad (3)$$

基于最小二乘原理求解 a_0 与 a_1 , 令

$$\varphi(a_0, a_1) = \sum_{i=1}^N (\mu_i - a_0 - a_1 I_i)^2 \quad (4)$$

其中, N 为窗口内正常行的数目; t 为正常行行号; 当 $\frac{\partial \varphi}{\partial a_0}$ 与 $\frac{\partial \varphi}{\partial a_1}$ 取零值时 φ 取最小值; μ 与 I 的最小二乘系数 a_0 、 a_1 可用方程组求得:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N a_0 + a_1 \sum_{i=1}^N I_i = \sum_{i=1}^N \mu_i \\ a_0 \sum_{i=1}^N I_i + a_1 \sum_{i=1}^N I_i^2 = \sum_{i=1}^N I_i \mu_i \end{cases} \quad (5)$$

在求得最小二乘拟合曲线后,将条带行号 I' 代入方程式,求得其所对应的 μ' , 并视之为条带行所对应的理想行均值。

条带行的理想标准差 σ' 与以上求解 μ' 的方式相同,不再重复介绍。最后应用矩匹配公式与理想行均值、标准差对条带行的像素灰度值进行校正:

$$Y_i = \frac{\sigma'[i]}{\sigma[i]} X_i + \mu'[i] - \mu[i] \frac{\sigma'[i]}{\sigma[i]} \quad (6)$$

式中, i 为条带行号; X_i 与 Y_i 分别表示条带数据行与校正后的理想数据行; $\mu[i]$ 与 $\sigma[i]$ 为条带行均值与标准差; $\mu'[i]$ 与 $\sigma'[i]$ 为相应的理想行均值与标准差。值得说明的是,如果用来拟合的数据包含与条带方向严格平行的条状地物时,应用此方法会存在一定的限制。但是,由于 MODIS 的幅宽较大,在实际应用中出现此情况的几率较小。

1.3 去除信号趋势项的条带噪声去除方法

探测仪采集到的信号因外界干扰往往呈现出非线性、非平稳性和非光滑性等特点,并偏离其真

实值。偏离基线随时间变化的整个过程就称为信号的趋势项,趋势项直接影响实测信号的真实性^[2,10]。

此方法中认为探元间的差异反映在影像数据上为条带噪声,然而实际上叠加于影像的信息除了条带噪声以外,还有受太阳角度、地物类型变化等影响导致的影像灰度变化过程。因此,在计算中求得的探元间的差异值包括了条带噪声与影像的灰度变化,而灰度变化的过程可认为是探元差异值的信号趋势项。为剔除条带噪声,首先需要探元差异值做一个信号趋势项的去除,然后利用去信号趋势项后的数据计算影像的校正系数。计算步骤如下。

1) 首先计算每行均值 $\mu[i]$ 与标准差 $\sigma[i]$ 。

2) 选取 T 个周期作为一个处理区间,指定区间内的正常行 k 为参考行,计算区间内每行与参考行之间的差值 $\delta\mu$, 标准差差值为 $\delta\sigma$:

$$\begin{cases} \delta\mu[i] = \mu[i] - \mu[k] \\ \delta\mu[k] = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \delta\sigma[i] = \sigma[i] - \sigma[k] \\ \delta\sigma[k] = 0 \end{cases} \quad (8)$$

此时, $\delta\mu$ 与 $\delta\sigma$ 包括了随机噪声、不同探元对应的影像灰度差值与其余外界因素对影像灰度值的影响。

3) 令探元间的差异值 $\delta\mu$, 去除最佳 N 阶多项式趋势后的值为 $\Delta\mu$, 同样地, 标准差的相应统计量为 $\delta\sigma$ 与 $\Delta\sigma$:

$$\Delta\mu[i] = \text{detrrend}(\delta\mu[i], N) \quad (9)$$

$$\Delta\sigma[i] = \text{detrrend}(\delta\sigma[i], N) \quad (10)$$

detrrend 函数主要用于信号趋势项的去除,计算方式是首先拟合自变量 $\delta\mu$ ($\delta\sigma$) 的 N 阶次曲线,然后用 $\delta\mu$ ($\delta\sigma$) 的原始值减去其拟合曲线,由此得到去除 N 阶多项式趋势以后的曲线。

4) 利用 $\Delta\mu$ 对原行均值进行校正,得到校正后的行均值:

$$\mu'[i] = \mu[i] - \Delta\mu[i] \quad (11)$$

$$\sigma'[i] = \sigma[i] - \Delta\sigma[i] \quad (12)$$

5) 求得第 i 行理想均值 $\mu'[i]$ 与标准差 $\sigma'[i]$ 后,以此作为参考行,利用线性校正公式(13)求去噪影像。式(13)中, X 与 Y 分别表示校正前、后影像。

$$Y_i = \frac{\sigma'[i]}{\sigma[i]} X_i + \mu'[i] - \mu[i] \frac{\sigma'[i]}{\sigma[i]} \quad (13)$$

对探元间差异值进行信号趋势项的去除过程如图 1 所示。图 1 中选取了影像前 100 行为例,可以看出信号趋势表现为递减的直线,在去除信号趋势项后得到的差值曲线趋势项与 x 轴平行。

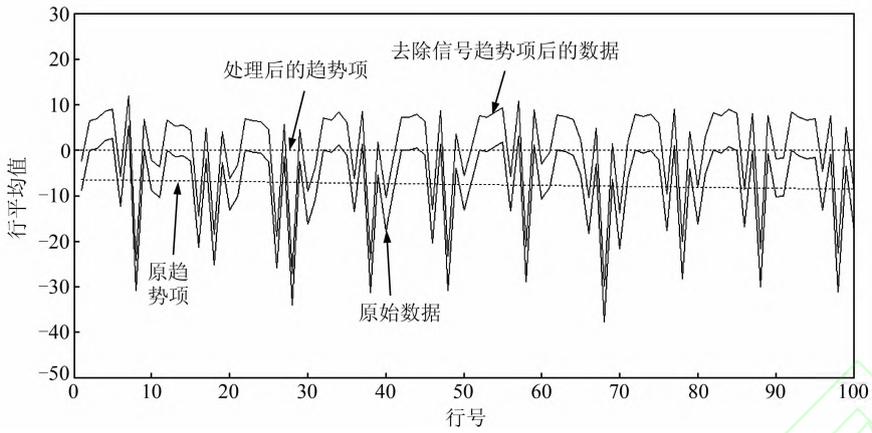


图1 对影像前100行行均值差值去一次线性趋势前后的曲线

Fig. 1 $\delta\mu$ Curves of the First 100 Columns in Image Before and After Detrending

结合1 000 m分辨率MODIS影像的传感器特点,通过多次实验发现在处理区间宽度为5个连续的扫描带(即连续5个扫描周期)时去条带效果最佳,同时也能最好地实现影像亮度的均匀过渡。

2 实验与分析

2.1 数据与评价参数

本文处理的影像为Terra MODIS第28波段的L1-B数据,空间分辨率1 000 m。影像数据的采集时间分别为格林尼治标准时间2004-11-16和2010-08-16。截取400像素×400像素大小的区域进行处理。

本文使用方差逆系数(inverse coefficient of variation, ICV)与噪声消除率(the ratio of noise reduction, NR)对处理结果影像进行定量评价。首先选取10像素×10像素大小的亮度均匀区域计算ICV值,同时,为了全面反映影像质量情况,每个影像选取4个代表性区域计算ICV值。计算公式为:

$$ICV = \frac{R_a}{R_s} \quad (14)$$

其中, R_a 为所对应区域内所有像素灰度值的均值; R_s 代表区域内所有像素灰度值的标准差。ICV值

越大则说明影像信噪比越高,信息包含越多。

NR用于在频率域评价结果影像,公式为:

$$NR = \frac{N_0}{N_1} \quad (15)$$

式中, N_0 为原始影像平均能量谱中条带与图像本身信息的能量和; N_1 则表示结果影像平均能量谱中的能量和。

2.2 实验结果影像

2.2.1 2004年11月影像实验

图2(a)为2004年11月获取的影像数据,可以看出其主要受探元-探元条带噪声的影响。图2(b)~2(d)分别列出了矩匹配方法和本文两种方法的去条带结果。从目视效果而言,三种方法的去噪效果都比较好。图3给出了图像的行均值曲线,一般情况下,若影像不受条带噪声的影响,则其对应的行均值曲线应该光滑而且过渡自然;从图3(b)~3(d)的对比可见,去除信号趋势项的去噪方法对噪声去除最彻底,但存在校正过度的问题,相比而言,插值拟合去噪方法在影像信息保持方面要优于另外两种方法。

表1给出了定量评价结果。在影像信噪比方面,插值拟合去噪方法要优于矩匹配方法与去除信号趋势项的方法,结合行均值对比图(图3)可知,图3中的周期性起伏越剧烈对应的ICV值则

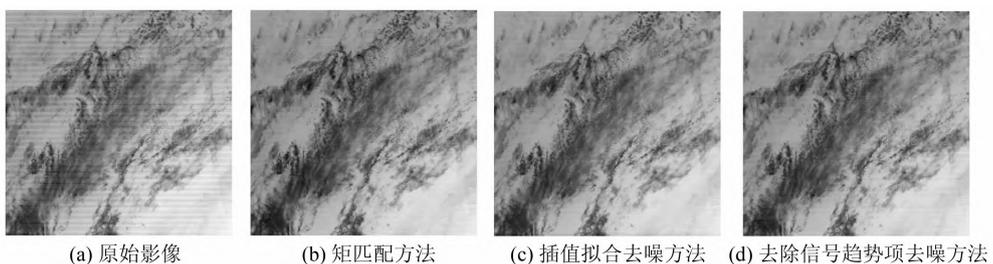


图2 2004-11-16 Terra MODIS第28波段影像去噪结果对比

Fig. 2 Terra MODIS Band 28 Subimages Acquired in 16th November 2004 Before and After Destriping

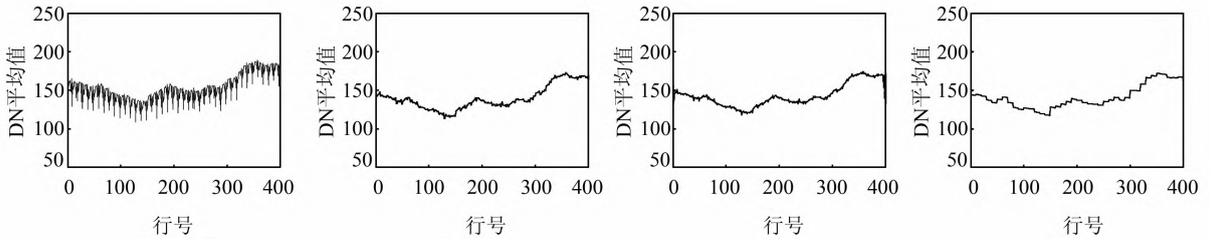


图 3 对应图影像的行均值分布

Fig. 3 Mean Cross-Track Profiles of MODIS Images in Fig. 2

越小,相反曲线越平滑对应的 ICV 值则越大;在噪声消除率方面,去除信号趋势项的方法要优于其他两种方法。

表 1 原始影像与去除条带噪声后结果影像的 ICV 与 NR 值对比

Tab. 1 ICVs and NRs of Original and Destriped MODIS Data

	ICV	NR
原始影像	13.477 1	1.000 0
矩匹配	32.404 0	30.547 1
插值拟合去噪方法	45.345 4	56.343 5
去除信号趋势项方法	56.346 2	97.382 6

2.2.2 2010 年 8 月影像实验

利用 2010 年的数据进行实验,如图 4 所示。由于受较为严重的镜面与探元-探元混合型噪声影响,所以三种方法处理结果的对比较为明显。通过表 2 中的影像评价因子可以看出,在处理 2010 年受混合条带噪声影响的 MODIS 影像时,去除信号趋势项方法可以获得最高的 NR 值,说明这种方法能最好地恢复影像信息,使整幅影像的灰度自然过渡。在影像信息的信噪比方面,去除信号趋势项与插值拟合去噪方法的效果都优于矩匹配方法,表明应用这两种方法对影像进行条带噪声剔除后,影像的信噪比更高。

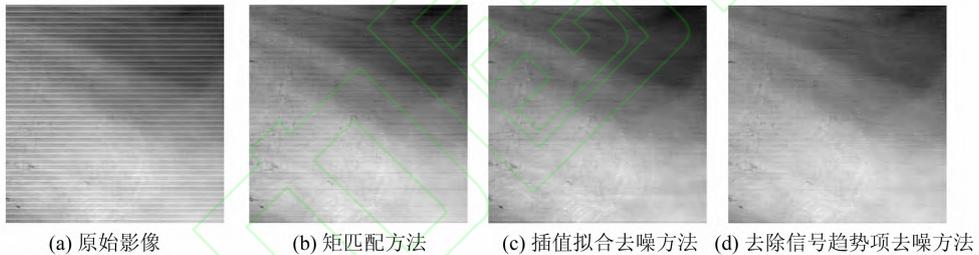


图 4 2010-08-16 Terra MODIS 第 28 波段影像去噪结果对比

Fig. 4 Terra MODIS Band 28 Subimages Acquired in 16th August 2010 Before and After Destriping

表 2 原始影像与去除条带噪声后结果影像的 ICV 与 NR 值对比

Tab. 2 ICVs and NRs of Original and Destriped MODIS Data

	ICV	NR
原始影像	9.004 6	1.000 0
矩匹配	31.398 8	23.060 1
插值拟合去噪方法	37.371 1	27.043 8
去除信号趋势项方法	43.678 9	30.699 5

矩匹配方法;在探元-探元条带噪声为主时,去除信号趋势项方法定量评价指标最高,但基于插值拟合的去噪方法可更好地对原始影像的信息进行有效保持;在处理混合型条带噪声时,去除信号趋势项的去噪方法要优于其他两种方法,能够实现强噪声的有效抑制。

参 考 文 献

[1] Xue Lijun, Li Zitian, Li Changle. Study on The Hyper-Spectral CCD Imager Non-uniformity Correction Algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(5): 693-696(薛利军,李自田,李长乐. 光谱成像仪 CCD 焦平面组件非均匀性校正技术研究[J]. *光子学报*, 2006, 35(5): 693-696)

[2] Corsini G, Diani M. Striping Removal in MOS-B Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2000, 38(3): 1 439-1 446

3 结 语

本文提出了基于曲线拟合与去除信号趋势项两种条带噪声去除方法,分别选取 2004 年与 2010 年的数据进行了实验,并与传统的矩匹配方法进行了对比。实验结果证明,无论从目视效果还是定量评价方面,本文提出的两种方法都优于

- [3] Chen Jingsong, Shao Yun, Zhu Boqin. Destriping CMODIS Based on FIR Method[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(30): 227-233 (陈劲松, 邵芸, 朱博勤. 中分辨率遥感图像条带噪声的去除[J]. 遥感学报, 2004, 8(30): 227-233)
- [4] Yang Zhongdong, Zhang Wenjian, Li Jun. De-striping for MODIS Infrared Band Data via Wavelet Shrinkage[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(1): 23-20 (杨忠东, 张文建, 李俊. 应用小波收缩方法剔除 MODIS 热红外波段数据条带噪声[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 23-30)
- [5] Shen H F, Zhang L P. A MAP-based Algorithm for Destriping and Inpainting of Remotely Sensed Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 47(5): 1 492-1 502
- [6] Gadallah F, Csillag L F, Smith E, et al. Destriping Multisensor Imagery with Moment Matching[J]. *Int J Remote Sensing*, 2000, 21(12): 2 505-2 511
- [7] Preesan R, Wataru T, Yoshifumi Y. Restoration of Aqua MODIS Band 6 Using Histogram Matching and Local Least Squares Fitting[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2008, 47(2): 613-627
- [8] Kautsky J, Nichols N K, Jupp D, et al. Smoothed Histogram Modification Image Processing[J]. *Comput Vis & Image Process*, 1984, 26: 271-291
- [9] Zhen Fengbin, Zhi Jingjing, Gao Hailiang, et al. Improved Destriping Algorithm Hyperspectral Images[J]. *Computer Science*, 2010, 37(5): 265-267 (郑逢斌, 支晶晶, 高海亮, 等. 一种高光谱图像条带噪声去除改进算法[J]. 计算机科学, 2010, 37(5): 265-267)
- [10] Xiao Libo, Ren Jianting, Yang Haifeng, et al. Study on Vibration Signal Pre-processing Method Based on MATLAB [J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(8): 330-333 (肖立波, 任建亭, 杨海峰, 等. 振动信号预处理方法研究及其 MATLAB 实现[J]. 计算机仿真, 2010, 27(8): 330-333)

Destriping Method for Band 28 of Terra MODIS Images

JIANG Wan¹ SHEN Huanfeng^{1,2} ZENG Chao² ZHANG Liangpei²
ZHANG Hongyan² LIU Xinxin¹

¹ School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Stripe noise can be found in many bands of Terra MODIS data, especially in the 28th band. Additionally, the problem gets more serious and complex with time changes. In many cases, the data suffers from detector, detector stripes and mirror stripes noise, this paper proposes an interpolation fitting destriping algorithm and an detrending destriping algorithm both based on a moment matching method. Experimental results and quantitative analyses verify the efficacy of these two new destriping algorithms.

Key words: MODIS; stripe noise; curve-fitting; detrending

First author: JIANG Wan, postgraduate, specializes in theories and methods of remote sensing image processing and quantitative remote sensing. E-mail: wande412@whu.edu.cn

Corresponding author: SHEN Huanfeng, PhD, professor. E-mail: shenhf@whu.edu.cn

Foundation support: The National 973 program of China, No. 2009CB723905; the National Natural Science Foundation of China, No. 40971220.