



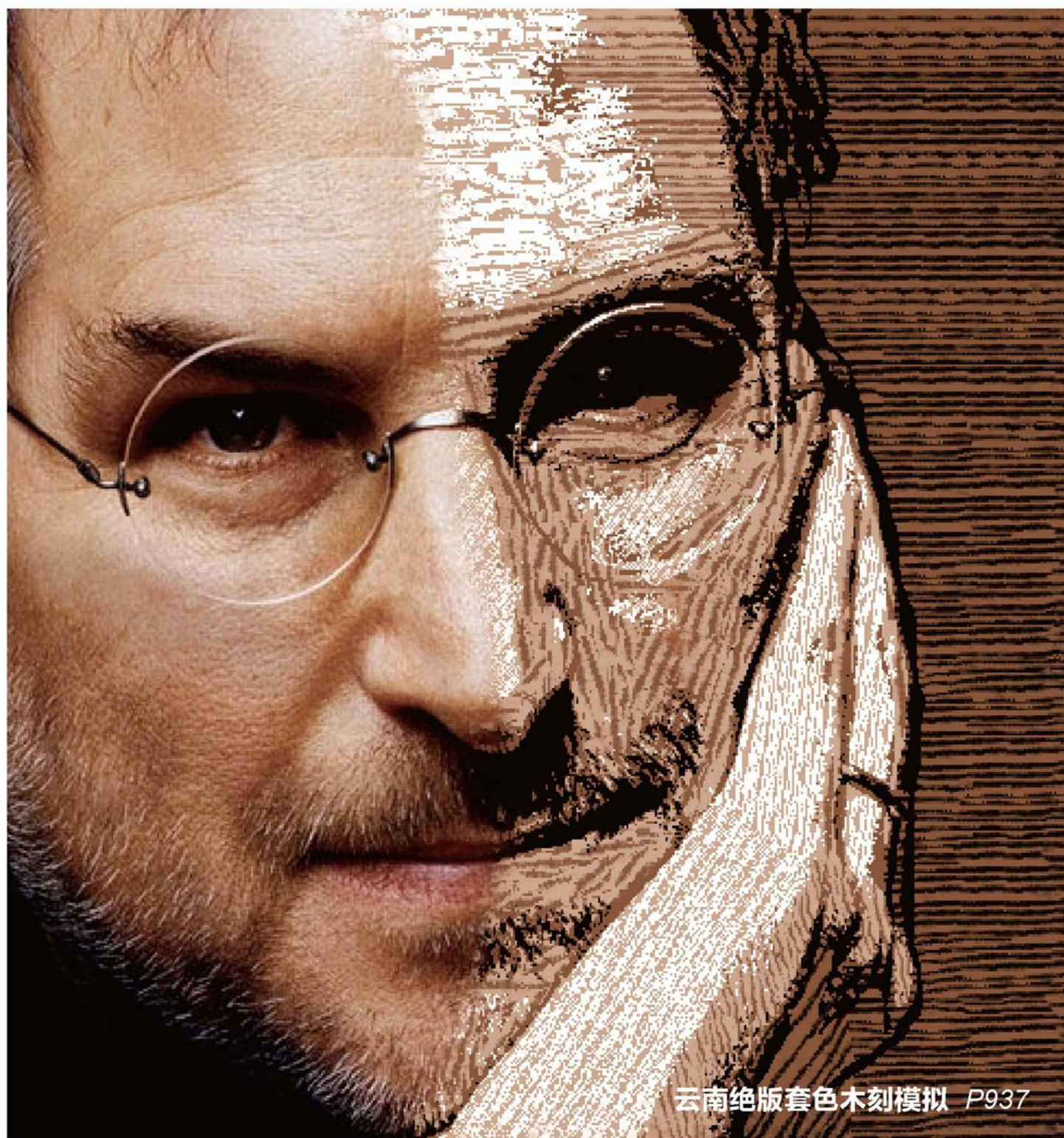
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
07
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



云南绝版套色木刻模拟 P937



第20卷第7期（总第230期）

2015年7月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

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

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

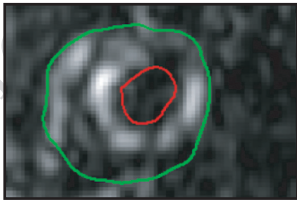
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元



基于颈动脉粥样硬化斑块的多
序列MR图像去噪与配准
(第0871页)



光滑拟合模型的IIPBDR图像
修复算法(第0895页)



基于暗原色先验的图像快速去
雾(第0914页)



个性化定制的虚拟健身系统设
计与实现(第0953页)

图像处理和编码

融合视觉感知特性的HEVC率失真优化

费马燕, 彭宗举, 李持航, 陈芬, 郁梅, 蒋刚毅 0857

结合空间信息的模糊聚类侧扫声纳图像分割

李阳, 庞永杰, 盛明伟 0865

基于颈动脉粥样硬化斑块的多序列MR图像去噪与配准

李军伟, 汪晓妍, 张剑华, 何俊丽, 管秋, 陈胜勇 0871

小波变换与纹理合成相结合的图像修复

张东, 唐向宏, 张少鹏, 黄俊泽 0882

光滑拟合模型的IIPBDR图像修复算法

鱼江, 翟东海, 聂洪玉, 李同亮 0895

图像分析和识别

噪声方差未知条件下的视频目标跟踪

陈金广, 任冰青, 马丽丽, 温静 0906

基于暗原色先验的图像快速去雾

曾浩, 尚媛园, 丁辉, 周修庄, 付小雁 0914

人体运动分析的实例学习方法

李毅, 刘兴川, 孙亭 0922

图像理解和计算机视觉

多参数加权的无缝纹理映射算法

刘彬, 陈向宁, 薛俊诗 0929

交互式云南绝版套色木刻数字化合成

王雪松, 李杰, 侯剑侠, 徐丹, 普园媛 0937

计算机图形学

基于像素的多边形等距区域子分算法

严志刚, 寿华好 0945

个性化定制的虚拟健身系统设计与实现

赵汉理, 孟庆如, 韩丽贞, 潘志庚 0953

遥感图像处理

LANDSAT-8卫星影像长条带数据处理

李亚林, 李山山, 冯钟葵, 张洪群, 陈勃 0963

MapReduce模式下高光谱图像端元提取算法加速

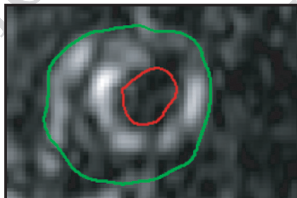
曲海成, 籍瑞庆, 刘万军, 梁雪剑 0973

基于GA-BP神经网络模型的登革热时空扩散模拟

李卫红, 陈业滨, 闻磊 0981

CONTENTS

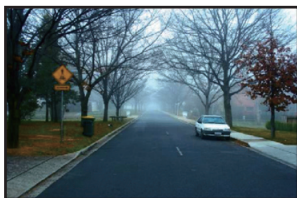
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Multiple sequence MR image de-noising and registration method based on carotid atherosclerosis plaque (P0871)



Improved IIPBDR algorithm based on smooth-fitting model (P0895)



Fast image haze removal base on dark channel prior (P0914)



Design and implementation of the personalized virtual fitness system(P0953)

Image Processing and Coding

- Human perception features based rate distortion optimization for HEVC
Fei Mayan, Peng Zongju, Li Chihang, Chen Fen, Yu Mei, Jiang Gangyi 0857
- Side-Scan sonar image segmentation via fuzzy clustering with spatial constrains
Li Yang, Pang Yongjie, Sheng Mingwei 0865
- Multiple sequence MR image de-noising and registration method based on carotid atherosclerosis plaque
Li Junwei, Wang Xiaoyan, Zhang Jianhua, He Junli, Guan Qiu, Chen Shengyong 0871
- Image inpainting based on combination of wavelet transform and texture synthesis
Zhang Dong, Tang Xianghong, Zhang Shaopeng, Huang Junze 0882
- Improved IIPBDR algorithm based on smooth-fitting model
Yu Jiang, Zhai Donghai, Nie Hongyu, Li Tongliang 0895

Image Analysis and Recognition

- Video target tracking algorithm with the noise variance unknown
Chen Jinguang, Ren Bingqing, Ma Lili, Wen Jing 0906
- Fast image haze removal base on dark channel prior
Zeng Hao, Shang Yuanyuan, Ding Hui, Zhou Xiuzhuang, Fu Xiaoyan 0914
- Example-based approach for human motion analysis from videos
Li Yi, Liu Xingchuan, Sun Ting 0922

Image Understanding and Computer Vision

- Seamless texture mapping algorithm based on multi parameter weighted
Liu Bin, Chen Xiangning, Xue Junshi 0929
- Interactive digital synthesis of Yunnan out-of-print woodcuts
Wang Xuesong, Li Jie , Hou Jianxia, Xu Dan, Pu Yuanyuan 0937

Computer Graphics

- Pixel based domain subdivision algorithm for polygon offsetting
YAN Zhigang, SHOU Huahao 0945
- Design and implementation of the personalized virtual fitness system
Zhao Hanli, Meng Qingru, Han Lizhen, Pan Zhigeng 0953

Remote Sensing Image Processing

- Study on processing method of LANDSAT-8 long strip satellite imagery
Li Yalin, Li Shanshan, Feng Zhongkui, Zhang Hongqun, Chen Bo 0963
- Acceleration of hyperspectral image endmember extraction based on MapReduce pattern
Qu Haicheng, Ji Ruiqing, Liu Wanjun, Liang Xuejian 0973
- Simulation of spatio-temporal diffusion of dengue fever based on the GA-BP neural network model
Li Weihong, Chen Yebin, Wen Lei 0981

中图法分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)07-0963-10

论文引用格式: Li Y L, Li S S, Feng Z K, Zhang H Q, Chen B. Study on processing method of LANDSAT-8 long strip satellite imagery[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(7): 0963-0972. [李亚林, 李山山, 冯钟葵, 张洪群, 陈勃. LANDSAT-8 卫星影像长条带数据处理[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(7): 0963-0972.] [DOI:10.11834/jig.20150713]

LANDSAT-8 卫星影像长条带数据处理

李亚林^{1,2}, 李山山¹, 冯钟葵¹, 张洪群¹, 陈勃¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 目的 LANDSAT-8 卫星发射以来, 美国地质调查局(USGS)向全球发布 WRS(world reference system)分幅体系下的标准景产品, 该产品覆盖区域较小。针对面向区域遥感应用需要较大覆盖范围长条带卫星影像的问题, 提出一种长条带数据处理方法。方法 长条带处理分为预处理、辐射校正和几何校正 3 个部分, 包含了预处理、长条带数据辐射一致性纠正和姿轨数据精化等过程, 解决了长条带影像处理的关键技术。结果 利用 3 组 LANDSAT-8 数据进行实验, 本文方法处理得到的长条带影像, 辐射均匀性得到提高, 整体精度同单幅标准景产品的精度相当, 且效率较传统的分景处理再镶嵌的方式提高了 45.9%。结论 本文 LANDSAT-8 长条带处理方法能够得到高质量的长条带影像, 且处理效率较高, 能够有效满足大区域遥感应用的数据需求。

关键词: LANDSAT-8; 长条带数据; 辐射校正; 几何校正

Study on processing method of LANDSAT-8 long strip satellite imagery

Li Yalin^{1,2}, Li Shanshan¹, Feng Zhongkui¹, Zhang Hongqun¹, Chen Bo¹

1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

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

Abstract: **Objective** Since the launching of the LANDSAT-8 satellite, the U. S. Geological Survey has released LANDSAT-8 standard scene products around the globe based on worldwide reference system. However, the coverage areas of a standard scene product are too small to satisfy regional remote sensing application, which needs long strip satellite products. The conventional method to obtain long strip satellite product is process-and-mosaic, which brings several problems, such as seam line problem and low processing efficiency. A novel LANDSAT-8 long strip satellite data processing method is proposed to solve the shortages of the conventional method. **Method** The proposed method was divided into three steps. First, in the preprocessing stage, auxiliary data were checked, and the imagery and the auxiliary data of LANDSAT-8 long strip satellite data were matched according to the uniqueness of data acquisition time. Second, in the radiometric correction stage, temperature sensitivity correction factor was introduced to eliminate the disproportion in brightness in LANDSAT-8 long strip satellite imagery, and a smoothing algorithm was proposed to avoid the seam line problem inside LANDSAT-8 long strip satellite imagery. Third, in the geometric correction stage, achieving high-precision georeferencing from LANDSAT-8 long strip products was needed for provision of good quality exterior orientation elements. Several algorithms were adopted to refine exterior orientation elements (mainly include orbit data and attitude data). Data verification algorithm were employed

收稿日期: 2015-01-21; 修回日期: 2015-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301383)

第一作者简介: 李亚林(1990—), 男, 现为中国科学院遥感与数字地球研究所信号与信息处理专业硕士研究生, 主要研究方向为遥感数据处理相关技术。E-mail: liyl@radi.ac.cn

通信作者: 张洪群, 正高级工程师, E-mail: zhanghq@radi.ac.cn

Supported by: National Natural Science Foundation of China (41301383)

to identify and eliminate failure exterior orientation elements. Smooth filtering and Lagrange interpolation algorithm were used to keep continuity of orbits data. Orbital motion affections in gory data were removed, and Kalman filtering algorithm was introduced to obtain high accuracy of attitude data by combining it with the original attitude data. **Result** Experiments are designed and conducted on three sets of LANDSAT-8 long strip satellite data, which were obtained in different time intervals and had different sizes. The conventional process-and-mosaic method were applied for comparison. Experimental results showed that the long strip satellite products produced by the proposed method obtain geometric accuracy same as those of the products produced by conventional method. Moreover, the long strip satellite products produced by the proposed method have no seam line problems. In addition, the efficiency comparison of two methods showed that the processing efficiency of proposed method increased by 45.9% on average. **Conclusion** The proposed method achieves high-quality long strip satellite imagery with a high efficiency than the conventional method, thereby greatly satisfying the needs of regional remote sensing applications.

Key words: LANDSAT-8; long strip products; radiometric correction; geometric correction

0 引言

美国 LANDSAT 系列卫星作为在国际上有重要地位的陆地观测卫星,其获取的数据迄今已在全球变化研究、农业、林业、地质、资源管理、地理学、制图、水质、海岸研究等若干领域得到大量应用^[1]。但是,目前在轨的 LANDSAT 系列卫星中,LANDSAT-5 设备老化,已停止获取数据;LANDSAT-7 设备有故障,获取的数据质量较差^[2-3]。为保持 LANDSAT 数据的连贯性,美国地质调查局(USGS)及美国国家航空航天局(NASA)联合制造了 LANDSAT-8 卫星,并于 2013 年 2 月 11 日发射升空^[4-5]。LANDSAT-8 卫星沿用了 LANDSAT-5/7 数据分景管理的方式,采用 WRS(worldwide reference system)参考系,这是一种依据卫星地面轨迹重复规律,结合星下点成像特性形成的固定地面参考网格,网格的 2 维坐标采用 PATH 和 ROW 进行标识^[6]。LANDSAT-8 的数据处理以该坐标系统下的标准景数据为基本单元,并且只向用户提供该坐标系下的单幅标准景产品。

标准景产品覆盖区域较小,当存在较大区域范围遥感应用数据需求时,传统方法为先分别处理覆盖该范围单幅标准景数据,再进行镶嵌。张登荣等人^[7]利用重叠区域选取控制点进行自动配准完成影像的匹配,通过 Wallis 变换进行整体色彩调整,并通过加权平滑处理对接缝线进行调整。李长春等人^[8]利用 SURF(speeded up robust feature)算法提取特征点,再使用 RANSAC(random sample consensus)算法剔除误匹配特征点后,进行镶嵌处理得到长条带

影像。卫征等人^[9]首先对影像进行几何精校正,然后利用图像的地理信息进行镶嵌。这些处理方法存在两方面的问题:首先,多景图像镶嵌生成长条带影像不仅在接缝和色调上易出现不一致,而且当镶嵌精度不高时还会出现细微的影像错位,影响结果的几何定位精度^[10];其次,传统方法需对占单景面积 20% 以上的相邻两景间的重叠部分进行重复处理,而且,镶嵌和匀光处理也需要消耗较多时间,导致数据的处理效率较低。

本文在分析 LANDSAT-8 数据及其处理算法特点的基础上,提出了直接对 LANDSAT-8 长条带数据进行处理的方法,采用分数数据预处理、辐射校正和几何校正 3 个步骤解决长条带数据处理面临的问题。最后利用 3 组真实影像实验从辐射、几何校正效果和处理效率两个方面对本文方法进行验证和评价。

1 LANDSAT-8 标准景处理方法

LANDSAT-8 标准景数据处理过程可以分为 3 个步骤^[11]:标准景数据的生成、辐射校正和几何校正,其流程如图 1 所示。

1) 标准景数据生成。LANDSAT-8 卫星将从传感器获取的原始数据传送到地面站,地面系统对其进行同步、解扰、解包并提取图像数据、辅助数据,再根据 WRS-2 参考系进行物理分景,生成未经校正的标准景数据。

2) 标准景辐射校正。对标准景数据进行辐射校正,主要是校正传感器灵敏度特性偏差引起的误差^[12]。首先,消除传感器异常导致的图像噪点;然

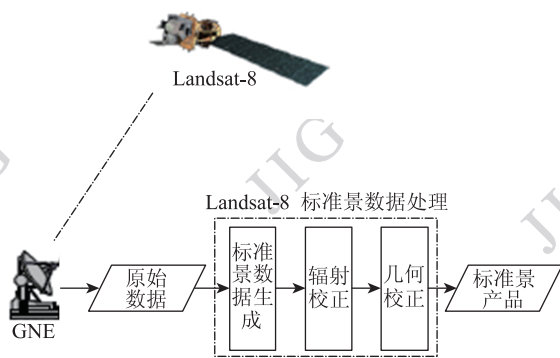


图1 标准景数据处理流程

Fig. 1 Standard scene data processing flow chart

后通过相对辐射校正完成传感器的归一化处理;最后,进行绝对辐射校正将图像 DN(digital number)值转换为大气表观反射率。

3) 标准景几何校正。采用严密物理成像模型^[13]进行几何校正,通过视线矢量建模的方法,建立地物点图像坐标和地面坐标之间的关系,并根据计算出的映射关系对像元进行重采样得到系统级几何校正结果。

2 LANDSAT-8 长条带数据处理方法

与标准景数据处理不同,长条带数据处理针对卫星下传的长条带数据,该数据可能存在缺失,且随数据量的增加,成像积分时间变长、数据跨度增大。因此,在长条带数据处理过程中需考虑以下3方面的问题:

1) 地面站接收过程中,LANDSAT-8 通过星地传输链路向地面传送数据,包括长条带图像数据和长条带辅助数据。由于数据传输不稳定,下传数据会出现误码和缺失,导致长条带图像数据和长条带辅助数据的失配。因此,需对长条带图像数据和长条带辅助数据进行匹配,以保证后续辐射校正和几何校正的准确进行。

2) 长条带数据成像积分时间较长导致长条带数据内部不同标准景的辐射响应存在差异。因此,在长条带数据辐射校正中,需考虑整体辐射特性并对其进行校正。

3) 几何校正采用视线矢量模型是一种严密成像模型,该模型的成立基于两个假定^[14]:(1) 卫星在近圆轨道上运行;(2) 姿轨数据具有较高的精度。对于长条带数据,其运行轨道仍可看作是近圆轨道,

但是,由于轨道运动、卫星摄动等因素的影响,卫星下传原始姿轨数据的误差会随时间发生非线性变化,如果直接使用下传的原始姿轨数据,将会导致几何校正误差随长条带数据的增长变大^[15-16],需要对轨道和姿态模型进行修正。

针对上述问题,从长条带数据预处理、长条带数据辐射校正和长条带数据几何校正3个方面对长条带数据进行处理。

2.1 长条带数据预处理

LANDSAT-8 卫星的图像数据和图像校正所必需的传感器信息、姿轨信息等辅助数据分开传送,它们之间通过数据获取的时间信息联系起来。长条带辅助数据和图像数据的获取时间是唯一确定的,图像数据通过拉格朗日插值得到对应的辅助数据。在长条带数据处理中,图像畸变的消除需要图像对应的辅助数据。因此,当长条带图像数据和辅助数失配时,以辅助数据的时间范围为基准对图像数据进行匹配。

长条带数据预处理流程如图2所示。为保证两类数据匹配的准确性,首先进行辅助数据的有效性检验,以辅助数据的采样时间差为基准,通过对比相邻两条辅助数据的时间差和采样时间差来确定辅助数据的有效性,如果与采样的时间差一致,则认为该条数据是有效数据,如果不一致,则认为是无效数据,将其剔除。然后,再根据辅助数据的时间区间对

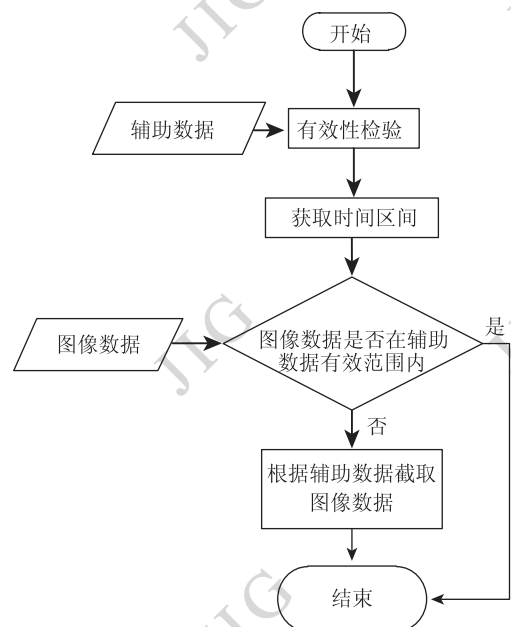


图2 长条带数据的预处理流程

Fig. 2 Long strip satellite data preprocessing flow chart

图像数据进行截取,最终获得时间同步后的辅助数据与图像数据。

2.2 长条带数据辐射校正

LANDSAT-8 传感器响应特性会随着成像积分时间增长而发生变化,导致其变化的主要因素是传感器焦平面温度^[17]。在长条带数据辐射校正中,通过校正成像过程中传感器焦平面温度变化的影响,可消除长条带影像内部各区间的辐射差异。

LANDSAT-8 采用一套热控系统来保持传感器焦平面的温度,该设备只能保证较短时间范围内传感器

$$CF_T(l) = \begin{cases} CT(sc_i) & l \in sc_i, l \notin sc_{i+1} \\ \frac{(l - l_s(sc_{i+1})) \times CT(sc_i) + (l - l_e(sc_i)) \times CT(sc_{i+1})}{l_e(sc_i) - l_s(sc_{i+1})} & l \in sc_i, l \in sc_{i+1} \\ CT(sc_{i+1}) & l \notin sc_i, l \in sc_{i+1} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $CF_T(l)$ 表示长条带图像数据中第 l 行的温度校正系数, sc_i 表示长条带数据中的第 i 个标准景; $CT(sc_i)$ 表示长条带数据中第 i 个标准景的温度校正系数, $l_s(sc_i)$ 为长条带图像数据中第 i 个标准景的起始行号, $l_e(sc_i)$ 为长条带图像数据中第 i 个标准景的终止行号。该方法特别针对长条带数据内连续标准景之间重叠区域,采用梯度下降的处理方法使不同分段之间线性平滑过渡,进而保证相邻景间辐射变化的连续性。

在绝对辐射校正中,利用计算得到的长条带数据温度校正系数,修正传感器温度对传感器偏置和增益的影响,即可准确消除长条带影像内部各区间的辐射差异^[18]

$$\frac{L(l, s) - B \times CF_T(l)}{G} = f(Q(l, s)) \quad (2)$$

式中, L 为图像上像元的输出辐射值, l 为图像的行号, s 为列号, f 为线性响应函数,利用该函数可消除传感器的非线性误差,以保证传感器的输入和输出线性相关, Q 为像元的 DN 值, B 为偏置值, G 为增益。

2.3 长条带数据几何校正

为消除成像轨道变长导致的原始姿轨数据的非线性变化,进而避免几何校正误差随条带数据的增长变大,需对下传的原始姿轨数据进行精化处理^[20]。原始姿轨数据的精化包括轨道数据的精化处理和姿态数据的精化处理。对原始轨道数据进行有效性检验,剔除其中的偶然误差。利用平滑滤波拟合出高精度的光滑连续轨道,通过插值即可得到

焦平面温度的稳定。对标准景来说,可近似认为传感器焦平面温度为一个定值。但是,长条带数据成像积分时间较长,整体而言,传感器焦平面温度波动较大。因而需要获取成像期间传感器焦平面的温度信息来校正温度变化对传感器响应的影响。LANDSAT-8 在传感器焦平面上安装热敏电阻以 1 Hz 的频率收集焦平面温度信息,根据该信息分段计算焦平面温度与传感器参考温度之间的关系得到温度校正系数,再利用该校正系数来精确修正温度对传感器响应特性的影响。长条带数据温度校正系数为

任意时刻的精密轨道数据^[19]。原始姿态数据由星敏感器量测,其绝对精度较高,但是相对精度较低。因此,在姿态数据精化处理中,引入相对精度较高的陀螺仪量测的姿态数据,使用卡尔曼滤波进行融合,得到精化后的姿态数据。需要注意的是,在进行姿态合成之前,需首先剔除原始姿态数据中的偶然误差,并消除轨道运动造成的陀螺仪数据量测误差。卫星原始姿轨数据的精化流程如图 3 所示。

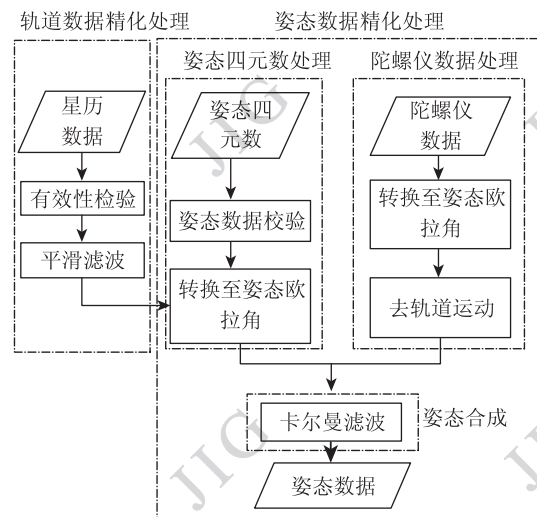


图3 姿轨数据精化流程

Fig. 3 Orbit data and attitude data refine algorithm flow chart

2.3.1 轨道数据精化

下传辅助数据中的轨道数据的有效性检验以位置矢量为参考,根据轨道数据中的位置矢量计算卫星轨道半径,将其与卫星设计轨道半径进行比较,可以检验轨道数据是否有效。对于有效的星轨道数

据,利用相邻两条轨道数据的位置变化量和速度变化量计算理论时间差,比较两条轨道数据的理论时间差与实际记录时间差,并将两者差值进行平差处理,从而对有效轨道数据的采样时间进行平滑。最后对平滑后的轨道采样时间,利用拉格朗日插值进行内插即可得到精化后的轨道数据。

2.3.2 姿态数据精化

1)姿态四元数精化。星敏感器测量得到原始姿态数据以姿态四元数的形式存储,可用矢量表达式 (x, y, z, w) 来描述, x, y, z 代表姿态欧拉轴的方向, w 代表欧拉转角。该矢量表达式满足约束方程

$$x^2 + y^2 + z^2 + w^2 \leq 1 + \varepsilon \quad (3)$$

式中, ε 表示一个微小量,作为四元数的检验阈值。

利用该方程对姿态四元数进行有效性检验,以剔除错误的姿态四元数。

对于有效的姿态四元数,将其转换为姿态欧拉角。获得姿态方向余弦矩阵

$$\mathbf{M}_{\text{rpy}} = \mathbf{M}_{\text{orb2eci}}^{-1} \times \mathbf{M}_{\text{nrc2eci}} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{M}_{\text{nrc2eci}}$ 表示由有效的姿态四元数构建的导航参考坐标系(nrc)向地心惯性坐标系(eci)的转换矩阵, $\mathbf{M}_{\text{orb2eci}}$ 表示精化后的轨道数据构建的轨道坐标系(orb)向地心惯性坐标系的转换矩阵。

然后,计算得到姿态欧拉角,即滚动角、俯仰角和偏航角 $(\theta_{\text{roll}}, \theta_{\text{pitch}}, \theta_{\text{yaw}})$ 为

$$\begin{cases} \theta_{\text{roll}} = -\tan^{-1}\left(\frac{\mathbf{M}_{\text{rpy}}[2][1]}{\mathbf{M}_{\text{rpy}}[2][2]}\right) \\ \theta_{\text{pitch}} = \sin^{-1}(\mathbf{M}_{\text{rpy}}[2][0]) \\ \theta_{\text{yaw}} = -\tan^{-1}\left(\frac{\mathbf{M}_{\text{rpy}}[1][0]}{\mathbf{M}_{\text{rpy}}[0][0]}\right) \end{cases} \quad (5)$$

2)陀螺仪数据处理。卫星在飞行过程中,受到各种摄动力以及地球自转因素的影响,需要调整卫星姿态,使卫星飞行方向与轨道坐标系的指向一致,这导致陀螺仪数据受到轨道运动的影响,对于跨度较大的长条带数据,其影响尤为严重。因此,需要去除轨道运动对陀螺仪数据的影响。陀螺仪数据去轨道运动的流程如下:

(1)利用姿态四元数转换的姿态欧拉角的平均值构造轨道坐标系到姿态控制系统坐标系(acs)的转换矩阵 $\mathbf{M}_{\text{orb2acs}}$ 。

(2)根据陀螺仪数据 t_0 时刻与 t_n 时刻的星历分别构造该时刻轨道坐标系向地心惯性坐标系的转换矩阵 $\mathbf{M}_{\text{orb2eci}|t_0}$ 、 $\mathbf{M}_{\text{orb2eci}|t_n}$ 。

(3)分别计算 t_0 时刻与 t_n 时刻地心惯性坐标系向姿态控制系统坐标系的转换矩阵

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{\text{eci2acs}|t_0} = \mathbf{M}_{\text{orb2acs}} \times \mathbf{M}_{\text{eci2orb}|t_0} \\ \mathbf{M}_{\text{eci2acs}|t_n} = \mathbf{M}_{\text{orb2acs}} \times \mathbf{M}_{\text{eci2orb}|t_n} \end{cases} \quad (6)$$

(4)根据 $\mathbf{M}_{\text{eci2acs}|t_0}$ 和 $\mathbf{M}_{\text{eci2acs}|t_n}$ 计算 t_0 时刻到 t_n 时刻轨道运动引起的陀螺仪欧拉角误差

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{acs}_n2\text{acs}_0} &= \mathbf{M}_{\text{eci2acs}|t_0} \times \mathbf{M}_{\text{acs}_n2\text{eci}|t_n} \\ \begin{cases} \Delta\varphi_{\text{roll}} = -\frac{\tan^{-1}(\mathbf{M}_{\text{acs}_n2\text{acs}_0}[2][1]/\mathbf{M}_{\text{acs}_n2\text{acs}_0}[2][2])}{t_n - t_0} \\ \Delta\varphi_{\text{pitch}} = \frac{\sin^{-1}(\mathbf{M}_{\text{acs}_n2\text{acs}_0}[2][0])}{t_n - t_0} \\ \Delta\varphi_{\text{yaw}} = -\frac{\tan^{-1}(\mathbf{M}_{\text{acs}_n2\text{acs}_0}[1][0]/\mathbf{M}_{\text{acs}_n2\text{acs}_0}[0][0])}{t_n - t_0} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\Delta\varphi_{\text{roll}}$ 为陀螺仪滚动角误差, $\Delta\varphi_{\text{pitch}}$ 为陀螺仪俯仰角误差, $\Delta\varphi_{\text{yaw}}$ 为陀螺仪航偏角误差。

(5)根据陀螺仪欧拉角误差修正陀螺仪滚动角、俯仰角、偏航角

$$\begin{cases} \varphi_{\text{roll}} = -\varphi_{\text{roll}} - \Delta\varphi_{\text{roll}} \\ \varphi_{\text{pitch}} = -\varphi_{\text{pitch}} - \Delta\varphi_{\text{pitch}} \\ \varphi_{\text{yaw}} = -\varphi_{\text{yaw}} - \Delta\varphi_{\text{yaw}} \end{cases} \quad (8)$$

对修正后的陀螺仪欧拉角,计算相邻数据间陀螺仪欧拉角的差,其与陀螺仪数据的采样时间的比即为陀螺仪滚动、俯仰、航偏角速率 $(\dot{\varphi}_{\text{roll}}, \dot{\varphi}_{\text{pitch}}, \dot{\varphi}_{\text{yaw}})$ 。

3)姿态误差去除。在遥感卫星运动过程中,卫星姿态变化受运行因素影响较小,其变化较为稳定,可将其看做与时间线性相关,因而可采用卡尔曼滤波器,将姿态四元数构造的姿态欧拉角数据与陀螺仪量测的陀螺仪欧拉角速率数据合成来去除姿态数据的误差^[20]得到精化后的姿态数据。其过程如图4所示。

假设 LANDSAT-8 卫星的姿态状态矢量为

$$\mathbf{S} = [\mathbf{A}, \mathbf{IMU}]^T$$

式中, $\mathbf{A} = [\theta_{\text{roll}}, \theta_{\text{pitch}}, \theta_{\text{yaw}}]$ 为姿态四元数处理得到的卫星滚动、俯仰、偏航姿态矢量, $\mathbf{IMU} = [\dot{\varphi}_{\text{roll}}, \dot{\varphi}_{\text{pitch}}, \dot{\varphi}_{\text{yaw}}]$ 为陀螺仪数据处理得到的卫星滚动、俯仰、偏航角速率矢量。

姿态数据的误差去除主要分为以下步骤:

(1)利用 $K-1$ 状态下姿态矢量的估计值及对应的误差协方差矩阵估计值,计算 K 状态下姿态状态矢量预测值及对应的误差协方差矩阵预测值

$$\mathbf{S}_K^p = \Phi \mathbf{S}_{K-1} \quad (9)$$

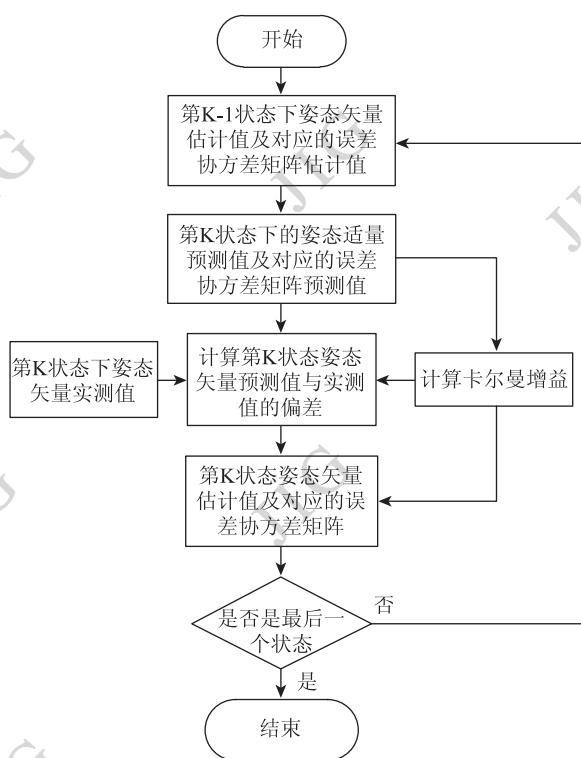


图4 姿态误差去除流程

Fig. 4 Attitude data error remove algorithm flow chart

$$P_K^p = \phi P_{K-1} \phi^T + Q \quad (10)$$

式中, S_{K-1} 、 P_{K-1} 为 $K-1$ 状态下姿态矢量的估计值及对应的误差协方差矩阵估计值, S_K^p 、 P_K^p 为 K 状态下姿态状态矢量预测值及对应的误差协方差矩阵预测值, ϕ 为状态转移矩阵, Q 为过程噪声矩阵。

表1 实验数据基本参数

Table 1 Basic parameters of the experimental data

项目	条带 1	条带 2	条带 3
图像获取时间	2013-01-23	2014-08-15	2014-07-30
图像标识	PATH:128 ROW:027 ~ 031	PATH:127 ROW:025 ~ 034	PATH:127 ROW:020 ~ 043
图像覆盖区域	蒙古—内蒙古	山西—湖南	内蒙古—广西
数据大小/G	4.8	11.2	24.8
经纬度范围	40.73°~48.55°N 108.08°~113.06°E	36.44°~51.38°N 112.56°~110.98°E	23.52°~57.87°N 105.07°~119.37°E

3.2 辐射校正效果分析

为验证本文方法辐射校正的效果,以条带1为例,分别采用传统方法(单景处理再镶嵌方法)和本文方法进行处理,处理结果如图5所示。

由图5可知,相较于传统方法,本文方法通过辐

(2) 计算 K 状态下姿态矢量的预测值和 K 状态下姿态矢量实测值之间的偏差

$$E_K = Z_K - HS_K^p \quad (11)$$

式中, Z_K 为 K 状态下姿态矢量的实测值, H 为系统输出矩阵。

(3) 计算卡尔曼增益

$$G = P_K^p H^T (HP_K^p H^T + R)^{-1} \quad (12)$$

式中, R 为测量噪声协方差矩阵。

(4) 应用式(11)计算得到的姿态角偏差和式(12)计算的卡尔曼增益,对姿态矢量预测值进行修正得到 K 状态下姿态矢量的估计值

$$S_K = S_K^p + GE_K \quad (13)$$

(5) 计算 K 状态下的姿态矢量误差协方差矩阵估计值

$$P_K = P_{K-1} - GHP_{K-1} \quad (14)$$

然后回到步骤1),进入下一时刻 $K+1$ 状态下的过程,直至所有状态处理完毕,迭代结束。

3 实验结果及分析

3.1 实验数据

选取3组不同获取时间、不同大小的 LANDSAT-8 长条带数据作为实验数据。3组实验数据分别包含5、10和24个标准景,标准景间的重叠度均为24.8%,其基本参数如表1所示。

射校正,很好地消除了长条带结果内部的辐射差异,且由于本文方法对长条带数据做整体处理,并在重叠部分采用梯度下降的处理方法使不同分段之间线性平滑过渡,因此处理得到的长条带影像在接缝和色调上表现一致。

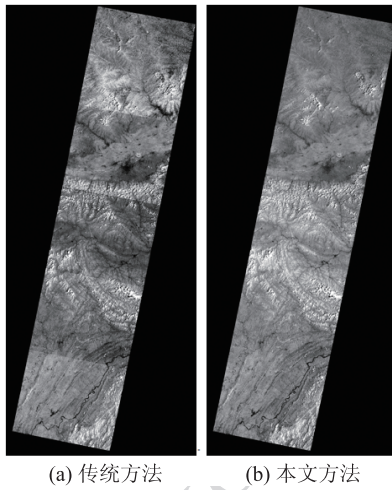


图5 传统方法和本文方法处理结果对比
Fig. 5 Comparison of the results of traditional and proposed method

3.3 几何校正精度分析

为验证长条带几何校正产品的精度,对3组实验数据进行处理,从处理得到3组长条带影像中分别人工选取50、100、220个检查点,所有检查点均匀分布在长条带影像所包含的标准景影像范围内,主要分布在角点、中心区域以及连续景的重叠区域,而且均为明显地物,如道路交叉口、建筑物拐角等,通过与USGS发布的GLS2005(global land survey 2005)控制点库^[21]对比分析两种方法的几何精度水平。计算每个检查点的偏移矢量,其方向表示该点相对于控制库中检查点的偏移方向,矢量长度表示偏移的大小,以此评价影像的几何校正精度。

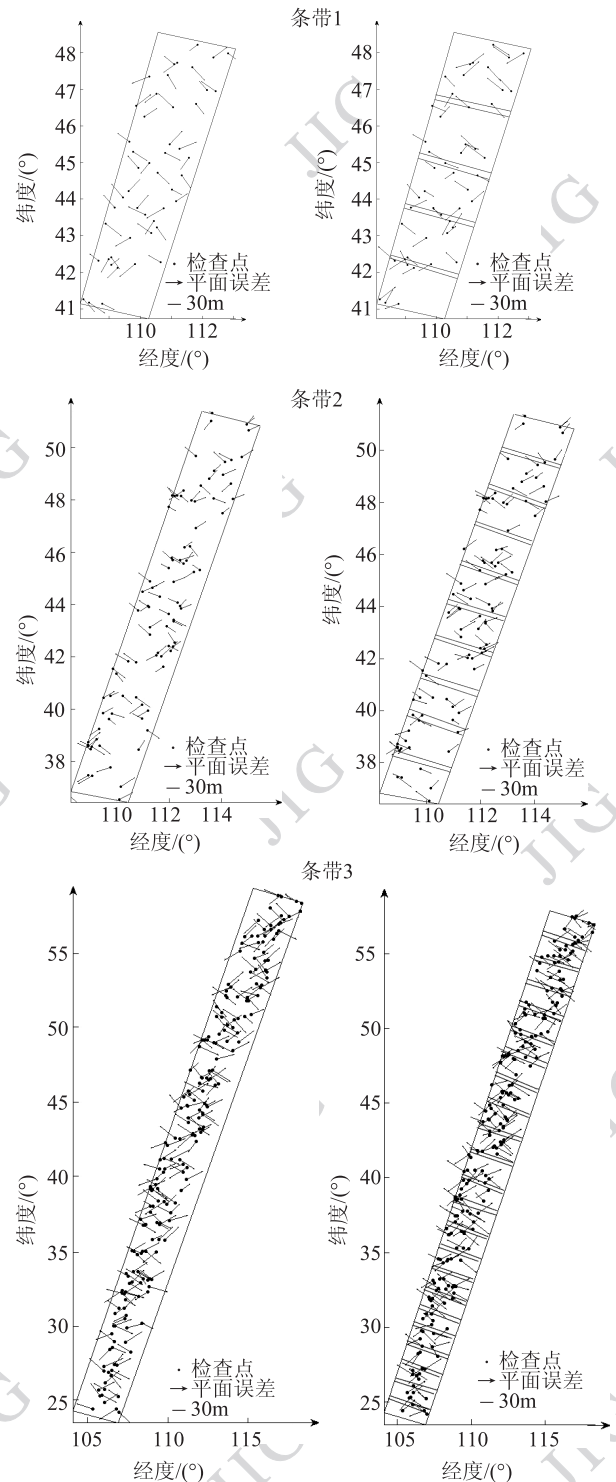
3组实验数据中,检查点在本文方法处理得到的长条带影像和标准景产品中的分布和误差矢量结果如下图6所示。

利用式(15)(16)分别计算3组实验数据采用传统方法和本文方法获得的长条带影像的误差和误差均方差

$$E = \sqrt{(x_c - x_s)^2 + (y_c - y_s)^2} \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(E_i - \bar{E})^2}}{n}} \quad (16)$$

式中, E 是长条带影像同名点相对于控制点库中检查点的误差大小, (x_c, y_c) 表示控制点库中检查点的平面坐标, (x_s, y_s) 表示长条带影像同名点的平面坐标, $RMSE$ 是误差均方差, E_i 表示点 i 的误差, $\bar{E}$ 表示所有点的平均误差, n 表示检查点的个数。



(a) 长条带影像检查点定位误差矢量 (b) 条带对应标准景通过地理信息镶嵌后检查点定位误差

图6 长条带影像和标准景产品定位误差分布图
Fig. 6 Residual distribution of check points for long strip product produced by the proposed method and conventional method

3组实验数据采用本文方法和传统方法获得的长条带影像的平均定位误差、最大及最小定位误差和定位误差均方差对比如表2所示。

表 2 本文方法与传统方法获得的长条带结果定位误差对比
Table 2 Comparison of the residual of proposed method and conventional method

项目	长条带结果			标准景镶嵌结果		
	条带 1	条带 2	条带 3	条带 1	条带 2	条带 3
	/m					
平均误差	57.6	56.5	59.8	55.9	56.7	57.2
最大误差	77.2	79.5	80.7	78	77.5	79.2
最小误差	26.5	27.8	28.8	24.8	28.3	27.1
误差均方差	3.95	3.98	4.09	4.07	4.32	4.48

由表 2 可知,相对于传统方法,本文方法获得的 3 组长条带影像的最大误差随着条带增长,分别增大了 0.8 m、1 m 和 1.5 m,误差增大量较小(小于 0.05 个像元),结合图 6 的定位误差分布,可近似地认为几何定位误差并未随条带的增长而增大。由长条带结果和标准景镶嵌结果的误差均方差可知,长条带结果残差的大小更加地一致,说明姿轨参数的精化使长条带数据的定位精度更加稳定。

根据表 2 的对比结果可知,包含 5 景、10 景和 24 景的长条带数据经本文方法处理得到的长条带影像与传统方法得到的长条带影像相比,平均误差

均小于 60 m(2 个像元),最小误差均小于 30 m(1 个像元),最大误差均小于 90 m(3 个像元),满足系统级几何校正的精度要求。

以上结果说明本文方法总体几何定位精度与传统方法基本相当,且可以避免几何校正误差随条带数据的增长而变大。

3.4 长条带数据处理效率对比分析

将 3 组实验数据分别采用本文处理方法和传统方法进行处理,在相同的硬件和软件环境下,对比两种方法的处理效率。

硬件及软件环境如表 3 所示,在该环境下本文方法和传统方法的处理效率对比结果如表 4 所示。

表 3 硬件及软件环境
Table 3 The hardware and software of experiment environment

配置项	说明
CPU	4 个 Intel 6 核 Xeon E5 4610 处理器
内存	32 G (DDR3-10600/8500)
硬盘	10000 转 600 G SAS * 2
操作系统	CENTOS65-64 2. 6. 32-431. 29. 2. el6. x86_64
编译器	gcc version 4. 4. 7
测试线程数	8

表 4 本文方法和传统方法的效率对比
Table 4 The processing efficiency comparison of proposed method and conventional method

数据	处理方法	数据预处理	辐射及几何校正	镶嵌处理	总和
条带 1	本文方法执行时间/s	1. 6	1 042	—	1 043. 6
	传统方法执行时间/s	525	1 159	478	2 160
	效率提高量/%	—	10. 1	—	51. 7
条带 2	本文方法执行时间/s	2. 4	2 385	—	2 387. 4
	传统方法执行时间/s	950	2 744	805	4 499
	效率提高量/%	—	13. 1	—	46. 9
条带 3	本文方法执行时间/s	2 213	6 131	—	8 344
	传统方法执行时间/s	2 520	6 866	2 304	13 690
	效率提高量/%	12. 2	10. 8	—	39. 1

从表 4 的测试结果可知,3 组实验数据采用本文方法的处理效率较传统方法分别提高了 51. 7%、46. 9% 和 39. 1%。这一实验结果表明,本文方法的处理效率较传统方法平均提高 $(51. 7\% + 46. 9\% + 39. 1\%) / 3 = 45. 9\%$,原因在于:1) 在长条带数据预

处理中,传统方法需计算长条带数据内每个标准景的范围,并将其从长条带数据中提取出来,生成标准景数据,而本文方法只需匹配图像数据和辅助数据即可,因此,处理效率较传统方法要高 10% 以上,尤其是对于条带 1 和条带 2 这种图像数据和辅助数据

已匹配的长条带数据,本文方法的数据预处理的耗时相对于传统方法可忽略不计;2)在长条带数据辐射和几何校正中,传统方法要对长条带数据内每个标准景数据分别进行处理,这就导致长条带数据内连续景之间叠区域的重复处理,而重叠部分平均为标准景数据量的24.8%,长条带数据省去了重复进行辐射与几何校正处理需要消耗的时间,处理效率较传统方法提高了约10%;3)传统方法需要对标准景产品进行镶嵌处理之后才能得到长条带数据产品,而使用本文方法可直接得到长条带数据产品,无需镶嵌操作。

4 结 论

针对美国地质调查局仅能够提供 LANDSAT-8 标准景数据产品,而无法提供满足大范围遥感应用的长条带影像的问题,在分析 LANDSAT-8 卫星标准景产品处理方法的基础上,提出一种基于 LANDSAT-8 卫星影像的长条带数据处理方法。该方法通过以长条带数据为处理单元进行预处理、辐射校正以及几何校正处理,消除了因成像积分时间长而造成的辐射和几何误差,得到了高精度的长条带影像。利用3组数据进行实验可知:

1)采用本文提出的长条带数据方法可直接对长条带数据进行处理,得到无畸变的长条带影像,且经过整体辐射校正,消除了长条带数据内部的辐射差异,避免传统方法在多景镶嵌时造成的接缝线问题。

2)本文方法的几何校正精度的平均误差在2个像元以内,与传统方法得到的长条带影像的几何校正精度基本相当,且通过对比3组长条带影像的最大误差发现,两种方法得到的长条带影像的最大误差的差距在0.05个像元以内,可近似认为几何定位误差并没有随数据的增长而变大。

3)本文方法对长条带数据进行一体化处理,省去了长条带数据分景和镶嵌的步骤,且不需要对长条带数据内部各景之间的重叠部分(占标准景数据量的20%以上)进行重复处理,平均处理效率提高约45.9%,在3组实验中,小范围的长条带数据(5景)的处理时间小于17 min,超长的长条带数据(24景)的处理时间约为2 h,能够满足区域大数据量遥感应用的需求。

参考文献 (References)

- [1] Williams D L, Goward S, Arvidson T. Landsat: yesterday, today and tomorrow [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2006, 72 (10): 1171-1178. [DOI: 10.14358/PERS.72.10.1171]
- [2] Loveland T R, Cochrane M A, Henebry G M. Landsat still contributing to environmental research [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23 (4): 182-183. [DOI: 10.1016/j.tree.2008.01.002]
- [3] Jiang G Z, Han B, Gao Y B, et al. Review of 40-year earth observation with Landsat series and prospects of LDCM [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17 (5): 1033-1048. [姜高珍, 韩冰, 高应波, 等. Landsat 系列卫星对地观测 40 年回顾及 LDCM 前瞻 [J]. *遥感学报*, 2013, 17 (5): 1033-1048.] [DOI: 10.11834/jrs.20132296]
- [4] Knight E J, Kvaran G. Landsat-8 operational land imager design, Characterization and performance [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6 (11): 10286-10305. [DOI: 10.3390/rs6110286]
- [5] Lulla K, Duane Nellis M, Rundquist B. The Landsat 8 is ready for geospatial science and technology researchers and practitioners [J]. *Geocarto International*, 2013, 28 (3): 191-191. [DOI: 10.1080/10106049.2013.812346]
- [6] Li J P, Li Y G, Liu X F. Research on the estimate method of Landsat WRS grid coordinate position [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31 (3): 52-53. [李锦萍, 李永刚, 刘秀芳. Landsat 卫星 WRS 网格坐标位置估算方法的研究 [J]. *测绘科学*, 2006, 31 (3): 52-53.] [DOI: 10.3771/j.issn.1009-2307.2006.03.017]
- [7] Zhang D R, Yu L, Zhang H K, et al. Fast mosaic method for optical remote sensing images [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2009, 11: 1988-1993. [张登荣, 俞乐, 张汉奎, 等. 光学遥感影像快速镶嵌方法 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2009, 11: 1988-1993.] [DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2009.11.008]
- [8] Li C C, Qi X D, Lei T J, et al. Research on unmanned aerial vehicle images mosaic quickly based on improved SURF algorithm [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, 29 (5): 22-25. [李长春, 齐修东, 雷添杰, 等. 基于改进 SURF 算法的无人机遥感影像快速拼接 [J]. *地理与地理信息科学*, 2013, 29 (5): 22-25.]
- [9] Wei Z, Chen Z C, Zhang B, et al. Study on mosaic technology and mapping of China based on the multispectral images of Beijing-1 small satellite [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 11 (6): 787-791. [卫征, 陈正超, 张兵, 等. CBERS-1 影像全国数字镶嵌与制图 [J]. *中国图象图形学报*, 2006, 11 (6): 787-791] [DOI: 10.11834/jig.200606132]
- [10] Xiong J X, Zhang Y J, Zheng M T, et al. An SRTM assisted im-

- age matching algorithm for long-strip satellite imagery[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(5): 1103-1117 [熊金鑫, 张永军, 郑茂腾, 等. SRTM 高程数据辅助的国产卫星长条带影像匹配[J]. *遥感学报*, 2013, 17(5): 1103 - 1117.] [DOI: 10.11834/jrs.20132224]
- [11] Micijevic E, Morfitt R. Operational calibration and validation of landsat data continuity mission sensors using the image assessment system (IAS)[C]// IEEE Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu, HI: IEEE 2010;2291-2294. [DOI:10.1109/IGARSS.2010.5652207]
- [12] Montanaro M, Levy R, Markham B. On-Orbit radiometric performance of the Landsat 8 thermal infrared sensor[J]. *Remote Sensing*, 2014,6(12):11753-11769.
- [13] Poli D, Toutin T. Review of developments in geometric modelling for high resolution satellite pushbroom sensors[J]. *The Photogrammetric Record*, 2012, 27 (137): 58-73. [DOI: 10.1111/j.1477-9730.2011.00665.x]
- [14] Kim T, Kim H, Rhee S. Investigation of physical sensor models for modelling SPOT 3 orbits[J]. *The Photogrammetric Record*, 2007, 22 (119): 257-273. [DOI: 10.1111/j.1477-9730.2007.00441.x]
- [15] Yuan X X, Wang T Y. Block adjustment for CBERS-02B satellite images[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(2): 310-324. [袁修孝, 汪韬阳. CBERS-02B 卫星遥感影像的区域网平差[J]. *遥感学报*, 2012, 16(2): 310-324.] [DOI: 10.11834/jrs.20121025]
- [16] Zhang G, Pan H B, Tang X M, et al. Block adjustment of ZY-3 long strip scenes[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(9):1098 -1102. [张过, 潘红播, 唐新明, 等. 资源三号测绘卫星长条带产品区域网平差[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2014, 39(9):1098-1102.]
- [17] Markham B L, Dabney P W, Murphy-Morris J E, et al. The Landsat data continuity mission operational land imager (OLI) radiometric calibration[C]//IEEE Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu, HI: IEEE, 2010; 2283-2286. [DOI:10.1109/IGARSS.2010.5652789]
- [18] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of currecurrent radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(5): 893-903.
- [19] Cheng C Q, Deng K Z, Sun Y S, et al. Study of block adjustment for long-strip satellite CCD images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(2):162-168 [程春泉, 邓喀中, 孙钰珊, 等. 长条带卫星线阵影像区域网平差研究[J]. *测绘学报*, 2010, 39(2):162-168.]
- [20] Liu Z J, Wu M P, Hu X P. Kalman filter design for multi-sensors satellite attitude determination[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2001, 23(6):28-32 [刘志俭, 吴美平, 胡小平. 多敏感器卫星姿态确定的卡尔曼滤波器设计[J]. *国防科技大学学报*, 2001, 23(6):28-32.] [DOI: 10.3969/j.issn.1001-2486.2001.06.008]
- [21] Xiao Q, Feng Z K, Li S S. Characteristics of the GLS2005 control point database and application on geometric correction[J]. *Remote Sensing Information*, 2013,28(5):63-68 [肖倩, 冯钟葵, 李山山. GLS2005 控制点库介绍及应用[J]. *遥感信息*, 2013,28(5):63-68.