

YU Xiao, ZHANG Yi, LÜ Lihong, ZHANG Qiang, WANG Decheng. Optical Satellite Remote Sensing Image Orthographic Fusion Method Based on Coprocessing of CPU and GPU in Domestic Cloud Platform (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(5): 1416–1424. CSTR:32142.14.cjss.2023–0069. DOI:10.11728/cjss2025.05.2023–0069

# 基于云平台 CPU 与 GPU 协同处理的光学 卫星遥感影像正射融合方法

于 潇<sup>1</sup> 张 一<sup>1</sup> 吕丽红<sup>2</sup>  
张 强<sup>1</sup> 王得成<sup>1</sup>

1(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

2(北京空间信息传输中心 北京 100094)

**摘 要** 系统探讨了基于国产云平台调度下自主可控 CPU 和 GPU 协同处理的光学卫星遥感影像正射融合方法执行效率问题, 通过数据流配置、中间数据存储访问优化等手段进一步提高了该方法执行效率. 在云平台调度下, 使用飞腾 S2500 和英伟达 A100 对高分二号卫星多光谱影像进行正射融合的试验, 结果表明, 该方法可很大程度提高光学卫星遥感影像正射融合效率, 与传统 X86 架构 CPU 与 GPU 协同的正射融合算法相比, 加速比为 14.3 倍以上, 数据处理时间压缩至 8.4 s 内, 其中 GPU 运算耗时仅 1 s, 可满足并优化大数据量的光学卫星遥感影像快速正射融合的要求.

**关键词** 正射融合, 国产云平台, CPU 和 GPU 协同处理, 数据流配置, 存储访问优化

**中图分类号** V542

## Optical Satellite Remote Sensing Image Orthographic Fusion Method Based on Coprocessing of CPU and GPU in Domestic Cloud Platform

YU Xiao<sup>1</sup> ZHANG Yi<sup>1</sup> LÜ Lihong<sup>2</sup>  
ZHANG Qiang<sup>1</sup> WANG Decheng<sup>1</sup>

1(Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094)

2(Beijing Space Information Transmission Center, Beijing 100094)

**Abstract** The processing efficiency of optical satellite remote sensing image orthographic fusion method based on coprocessing of CPU and GPU in domestic cloud platform is discussed systematically and is improved by data flow configuration and the intermediate data storage access optimization. The

2023-06-25 收到原稿, 2024-09-07 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Phytium S2500 and NVIDIA A100 are used in the cloud platform to do the orthographic fusion experiment. The experiment results show that the method can greatly improve the fusion efficiency of optical satellite remote sensing image, and the acceleration ratio is more than 14.3 times of the traditional X86 architecture CPU and GPU collaborative orthographic fusion algorithm., and the corresponding processing time is reduced to less than 8.4 s, and the GPU operation time is only 1 s, which can meet the requirements of rapid orthographic correction of the large data of optical satellite remote sensing image.

**Key words** Orthographic fusion, Domestic cloud platform, CPU and GPU coprocessing, Data flow configuration, Storage access optimization

## 0 引言

随着对地观测遥感技术的快速发展, 遥感卫星影像的空间分辨率达到亚米级, 以高分二号为代表, 卫星的星下点空间分辨率达到 0.8 m, 融合后的单景多光谱影像数据量约为 10 GByte. 随着幅宽和分辨率的提高, 影像的数据量呈倍数增长, 带来的计算需求也呈指数级增长<sup>[1]</sup>. 传统的光学遥感卫星数据 CPU/GPU 处理架构和正射融合处理主要考虑数据处理的融合质量和几何辐射精度<sup>[1]</sup>, 并未考虑大数据量带来的计算效率问题, 已无法满足国产自主可控条件下应急处理、快速响应等领域中对海量光学卫星遥感数据的快速处理的需求. 在国产自主可控的背景下, 以国产云平台调度的 CPU 协同 GPU 并行处理为代表的高性能处理架构和并行处理算法已成为遥感数据处理领域的研究热点<sup>[1-6]</sup>.

高分辨率、大幅面的遥感影像正射校正因计算密集, 导致处理过程中耗费大量时间, 这已经成为制约遥感影像快速处理的瓶颈<sup>[1]</sup>. 目前, GPU 加速遥感影像正射校正是遥感图像高性能处理领域的首选方法<sup>[2,7]</sup>. 遥感卫星影像正射(几何)校正处理算法计算密集, 且能并行处理, 非常适合利用 GPU 高性能并行处理的特点进行并行高效处理<sup>[1]</sup>. 正射(几何)校正方面, 文献[8-10]对吉林一号(Jilin-1)多光谱融合进行了研究, 并使用 Nearest-Neighbor Diffusion 方法降低了光谱失真度, 但未涉及提升效率方面的问题. 文献[11]研究了高分二号卫星, 并探究了如何在提升空间分辨率的同时保证光谱保真度, 仍未涉及融合效率方面的问题. 文献[12]给出了不同种重采样尺寸下基于 RPC 模型的几何校正算法的加速比, 证实了图像分辨率越高, CPU+GPU 架构对于几何校正速度的提升越明显. 文献[13]列出了高分四号卫星影像正射校正使用不同内插方法的 GPU 加速比和总体时

间, 认为综合分析采用双线性内插法进行正射校正的内插计算最为合适. 图像融合方面, 针对 GPU 进行算法加速的文献相对较少, 文献[14]选用了 5 种融合方法(Brovey, Multiplicative, Gram-Schmidt, PCA 和 NNDiffuse), 对全色谱段遥感影像和多光谱遥感影像的融合影像进行定性与定量评价, Gram-Schmidt 融合在影像的清晰度、信息熵、光谱特性三个方面为最优, 亮度和交叉熵两个方面为次优. 文献[15]选用了 4 种融合方法(HSV, Gram-Schmidt, NNDiffuse 和 PCSpectral), 分别对同源和异源遥感图像进行融合效果的定性和定量评价, 同源融合中表现较为优异的是 Gram-Schmidt 和 PCSpectral, 融合影像信息量丰富, 细节纹理表现最高, 清晰度也最高. 但由于设计和实现较为简单, 以上研究并未考虑图像处理单元的性能优化策略<sup>[1]</sup>. 文献[16]认为目前基于 CPU-GPU 异构系统的高光谱数据处理存在对于算法和存储策略的优化研究不够深入的问题. 另外, 由于使用的 CPU 均为 X86 架构, 也未涉及当前主流的基于 Ampere 架构的 GPU<sup>[17]</sup>进行性能优化的理论和方法, 故也未考虑国产化 CPU 与 GPU 协同的问题<sup>[18]</sup>.

为了推动国产云平台在光学卫星遥感影像正射融合方法中的运用<sup>[19-23]</sup>, 本文采用当前主流的基于 Ampere 架构的 GPU, 针对基于国产云平台 CPU 与 GPU 协同处理架构的特点, 系统探讨了基于国产云平台 CPU 与 GPU 协同处理的光学卫星遥感影像正射融合方法, 以充分利用云平台支撑下的国产 CPU 与 GPU 协同处理架构的计算性能.

## 1 原理与方法

### 1.1 工作原理

图 1 给出了 CPU 和 GPU 协同处理系统的典型

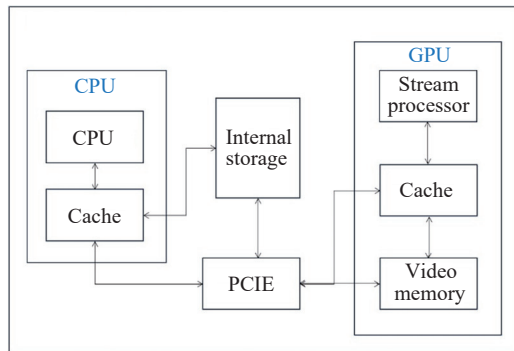


图1 CPU与GPU协同处理架构

Fig. 1 Architecture of CPU and GPU coprocessing

架构. 在使用 GPU 进行计算之前, CPU 必须先通过 PCIe (PCI Express) 总线先将数据由内存传输到 GPU 显存中; 在 GPU 计算完成之后, GPU 再将结果数据通过 PCIe 总线传输返回主机内存. 在这期间 CPU 与 GPU 之间的数据通信是必不可少的, 但是由于 PCIe 总线接口的通信带宽限制, 优化数据通信开销、数据流配置和存储访问是设计 CPU 和 GPU 协同处理系统时必须考虑的重要因素<sup>[23]</sup>.

## 1.2 正射融合原理

根据目前遥感图像处理的常用处理流程, CPU 和 GPU 协调处理下的正射融合的方法具体流程如下: 分别对输入的低分辨率多光谱图像 (Multi-spectral Scanner Image, MSS) 和高分辨率单波段图像 (Panchromatic Image, PAN) 进行基于有理多项式模型 (Rational Polynomial Coefficients Model, RPC) 的正射校正, 并将 GPU 进行正射运算后的结果暂存至 GPU 显存中; 使用图像融合算法对校正后的 MSS 和 PAN 图像数据通过 GPU 进行融合处理; 将融合的结果由 GPU 显存输出至系统内存.

### 1.2.1 正射校正

卫星遥感图像的正射校正为了避免产生结果影像的无效像素, 目前一般采用间接法<sup>[1,24]</sup>, 其中 RPC 反算和亮度内插均需要逐个像素进行, 是最耗时的环节, 也最适合在 GPU 进行计算<sup>[13]</sup>. 具体流程可参考文献<sup>[25-27]</sup>.

### 1.2.2 Gram-Schmidt 融合

Gram-Schmidt 融合方法以低分辨率遥感影像为基础, 模拟出一个谱段全色影像 (SPAN, Simulated PAN). 将 SPAN 作为 Gram-Schmidt 变换的第一分量对低分辨率遥感数据进行 Gram-Schmidt 变换, 随

后, 将高分辨率的单谱段图像替换 Gram-Schmidt 变换后的第一分量, 对替换后的数据集采用 Gram-Schmidt 逆变换<sup>[28]</sup>.

针对对应的经过正射校正的单景低分辨率多光谱图像和高分辨率单波段图像进行 Gram-Schmidt 融合主要包括如下步骤<sup>[10,29]</sup>: 通过多光谱影像和全色影像的地理转换系数计算出两者之间像素坐标转换的多项式系数; 根据全色影像的横纵向像素数 ( $X$ ,  $Y$ ), 在 GPU 上执行计算模拟全色影像的线程, 共有  $\lceil X/16 \rceil \times \lceil Y/16 \rceil$  个线程块, 每个线程块中包含  $16 \times 16$  个线程. 每个线程计算模拟单波段图像对应像素的像素值, 通过规约操作 (Reduction) 和原子操作 (Atomic) 计算全色影像和模拟单波段全色影像的像素值及其平方值之和, 得到全色影像和模拟单波段全色影像的均值和标准差, 以此对全色影像中每个像素进行亮度修正计算 (Automatic Photometric Adjustment for Night images, APAN); 再针对多光谱影像中各谱段分别计算出针对模拟单波段全色影像和亮度修正计算的协方差; 最终输出图像中各谱段的每个像素坐标 ( $X$ ,  $Y$ ), 其亮度值即为通过像素坐标变换多项式计算 MSS 对应谱段的坐标 ( $X_{MSS}$ ,  $Y_{MSS}$ ), 内插并接受协方差修正的结果.

## 2 数据流配置与存储访问优化

综上所述, 方法仅为正射融合算法的基本实现, 并未考虑现有主流云平台调度 CPU 和 GPU 资源情况, 并利用数据流配置和中间数据存储访问并行优化策略提高方法的执行效率. 基于国产云平台计算资源调度下, 对处理的数据流进行合理分配, 以解决 GPU 显存容量有限的问题; 将产生的中间数据选择在显存中保存或按需重新计算, 解决显存与内存之间的数据交换的大量时间消耗问题; 同时减少算法中的逻辑分支, 优化 GPU 内部的并行处理机制. 通过上述三个策略, 提高算法的计算访存比和执行效率.

### 2.1 云平台对 CPU 和 GPU 的调度策略

传统的资源调度方式在光学卫星遥感影像正射融合处理时没有考虑基于云平台的 CPU 与 GPU 间协同处理的定制调度策略, 从而导致资源调度带来并行损耗, 使效率降低.

基于国产云平台支撑的光学卫星遥感影像正射

融合处理特性, 针对性地对云系统 CPU 及 GPU 资源调度进行了定制化改造与优化. 主要是在 GPU 方面改进支持细粒度 GPU 分片调度能力, 可以将 GPU 设备虚拟化后, 同时分配多个不同计算任务使用, 并在 CPU 与 GPU 协同方面, 将同一作业任务的 CPU 资源与 GPU 资源尽量调度到同一云计算资源分区运行, 从而实现资源均衡, 节省资源调度的时间.

## 2.2 数据流配置和存储策略优化

以原始的高分辨率单波段图像数据量为基准分析需处理的数据: 原始的低分辨率多光谱图像每个谱段的数据量为基准的 1/16, 四个谱段共计为 1/4; 正射校正后的 PAN 数据量约为基准的 1.4~1.5 倍, MSS 四个谱段共计约为 0.4 倍; Gram-Schmidt 融合时的中间数据 SPAN 和 APAN 的数据量, 以及输出融合结果图像的每个谱段的数据量与正射校正后的 PAN 数据量相同, 即基准的 1.4~1.5 倍; 其中 SPAN 计算方式主要为较为简单的算术加权及线性插值; 输出融合结果图像总数据量接近基准的 6 倍.

经过大量的分析和比较计算, 提出一种较优的数据流分配的基本原则, 也就是可以设计为将正射处理结果暂存在 GPU 显存中, 方便后续处理. Gram-Schmidt<sup>[30]</sup> 融合处理过程中 SPAN 不作为中间数据进行暂存, 而按需重新计算; 每个谱段计算完成后立即由显存传输至内存, 释放该部分显存后用于下一个谱段的计算. 具体策略如下.

(1) 针对高分辨率单波段图像 (PAN) 进行正射校正, 在利用上述方法计算像素对应高程时, 将高程数据在显存中存储, PAN 正射校正计算完成后, 在显存中存储校正后的 PAN 图像, 并释放 DEM (Digital Elevation Model) 数据.

(2) 针对低分辨率多光谱图像 (MSS) 进行正射校正中, 可利用 PAN 正射校正过程中生成的高程数据进行插值处理, 省去重新载入 DEM 数据的传输开销和重复高程计算的运算开销, MSS 正射计算完成后, 在显存中存储校正后的 MSS 图像, 并释放高程数据.

(3) Gram-Schmidt 融合处理过程<sup>[31]</sup> 相对上述所描述的基本实现方式做出两点改动. 第一, 在相关步骤计算时所需的 SPAN 中间数据改用按需计算的方式. 第二, 每个谱段计算完毕后就即输出该谱段融合结果, 并释放该部分显存, 而不是最终统一输出.

优化后的流程如图 2 所示.

## 3 试验结果与分析

以处理高分二号卫星 2019 年拍摄的一景江西省某地数据为例, 输入的 4 m 低分辨率多光谱图像 (已缩放) 的像素尺寸的幅面大小为 7300×6908 pixel (宽×高), 如图 3(a) 所示. 对应的 1 m 高分辨率单波段图像 (已缩放) 的像素尺寸为幅面大小为 29200×27620 pixel (宽×高), 如图 3(b) 所示. 使用全球 1 km 的 DEM 数据, 输出图像采用 Gauss-Kruger 投影方式<sup>[32]</sup>.

通过 ENVI (Environment for Visualizing Images) 软件分别对 MSS 和 PAN 图像单独进行正射校正后的实验输出结果对比如图 4 所示.

在 X86 架构服务器 (双路 Intel 至强 E5-2630 v3 处理器, 主频 2.4 GHz, 每个 CPU 为 8 核 16 线程), 使用 CPU 计算完成 PAN 和 MSS 图像的正射校正, 以及 Gram-Schmidt 融合的总耗时, 通过多核优化 (Message Passing Interface, MPI) 后, 多次测试的平均值约为 197 s.

在国产云平台调度下的英伟达 A100 和飞腾 S2500 国产 ARM (Advanced RISC Machine) 架构服务器, 通过 CPU 和 GPU 协同处理, 但是未进行数据流配置和中间数据存储访问优化前, PAN 图像正射校正平均耗时 5.9 s, MSS 图像正射校正平均耗时 1.4 s, Gram-Schmidt 融合平均耗时 7.2 s, 合计 14.5 s, 相对于 X86 架构服务器, 使用 CPU 计算的加速比约为 13.6 倍.

经过数据流配置和中间数据存储访问优化后, 在上文所述飞腾 S2500 服务器进行 CPU 和 GPU 协同处理. PAN 和 MSS 图像的正射校正, 和 Gram-Schmidt 融合的平均总耗时为 8.4 s, 对比优化前减少了约 42.1%, 相对于 X86 架构服务器, 使用 CPU 计算的加速比约为 23.5 倍. 相应的计算结果见表 1.

输出图像如图 5 所示, 三种方式生成的图像一致. 以同一时期无人机航测的该区域 0.2 m 分辨率图像作为基准影像, 采用图像匹配的方法对输出影像进行精度检查, 匹配点数 7643, 像点残差中误差为 0.3 pixel, 一般来说, 像点残差中误差应该小于 1 pixel<sup>[33]</sup>, 本次实验的正射校正的精度符合应用要求.

针对其中一处居民区进行局部对比, ENVI 软件单独对 MSS 图像进行正射校正后的结果如图 6(a) 所

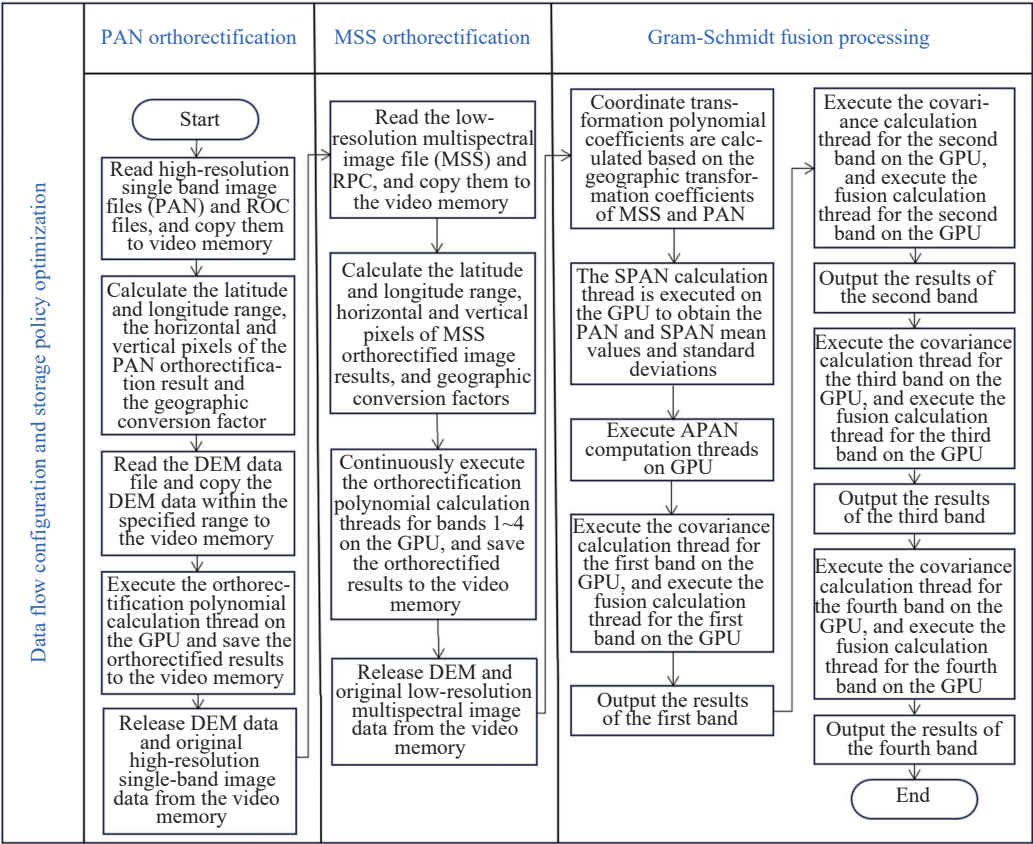


图 2 数据流配置和存储策略优化流程

Fig. 2 Flowchart of data flow configuration and storage policy optimization

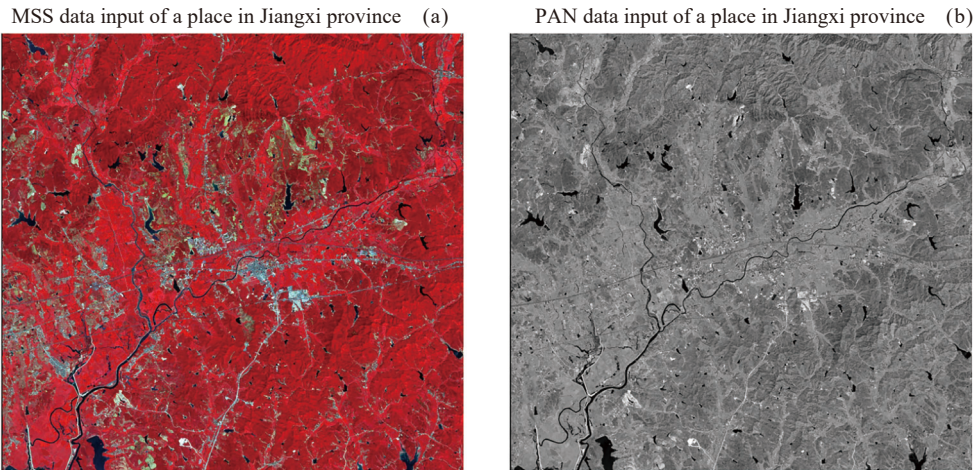


图 3 中国江西省某地多光谱与全色谱段数据对比

Fig. 3 Comparison of multispectral with whole-chromatographic data for a place in Jiangxi province

示, 单独对 PAN 图像进行正射校正后的结果如图 6(b) 所示. 本处理方法融合结果如图 7 所示.

将融合结果图像与 ENVI 软件单独对 MSS 进行正射校正处理后的图像进行比较.

(1) 各谱段的通用图像质量评价指标 UIQI (Universal Image Quality Index) 见表 2 所示, UIQI 越接近 1 表明图像越相似. 各个谱段的 UIQI 均在 0.9 左右, 说明融合结果图像与 MSS 图像有较高的相似性.

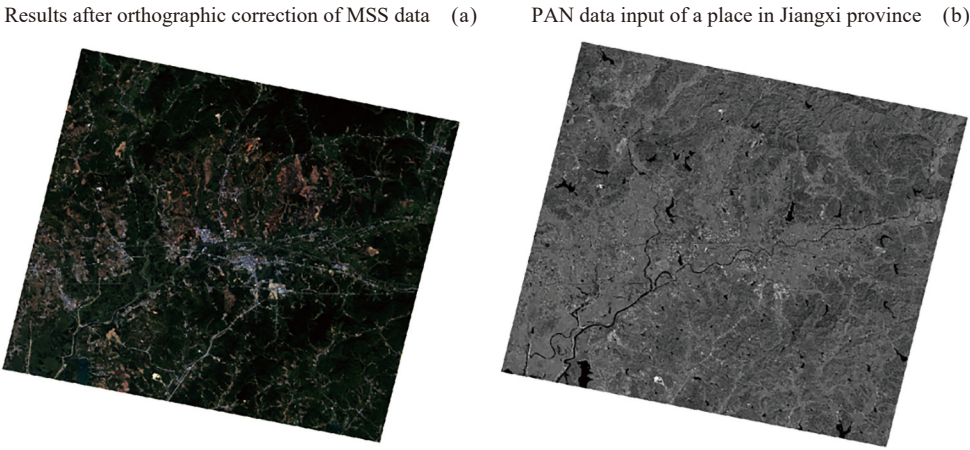


图 4 ENVI 软件单独进行正射校正的输出图像对比

Fig. 4 Comparison of output images for orthographic correction by ENVI software

表 1 多组对照实验结果

Table 1 Results of multi-group controlled experiments

| 实验组 | 服务器配置及处理方式                                           | 是否MPI优化 | 正射校正与Gram-Schmidt<br>融合平均总耗时/s |
|-----|------------------------------------------------------|---------|--------------------------------|
| 1   | X86架构服务器CPU                                          | 是       | 197                            |
| 2   | 国产云平台调度下的英伟达A100和飞腾S2500国产ARM架构<br>服务器 (CPU和GPU协同处理) | 否       | 14.5                           |
| 3   | 国产云平台调度下的英伟达A100和飞腾S2500国产ARM架构<br>服务器 (CPU和GPU协同处理) | 是       | 8.4                            |

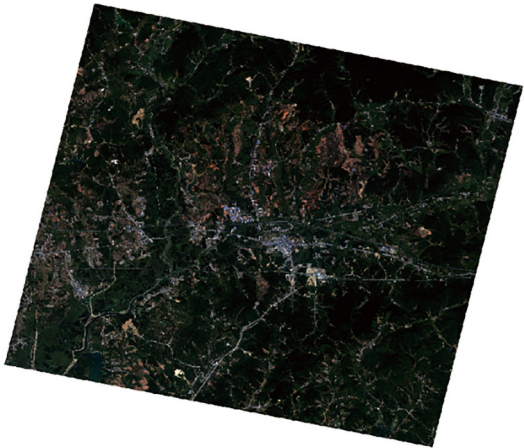


图 5 Gram-Schmidt 融合结果

Fig. 5 Gram-Schmidt fusion result

(2) 各谱段的结构相似性 SSIM (Structural Similarity Index) 见表 3 所示, SSIM 越接近 1 表明图像结构相似度越高. 各个谱段的 SSIM 均在 0.9 左右,

说明融合结果图像与 MSS 图像结构相似度比较高.

(3) 各谱段的亮度均值见表 4 所示. 各个谱段的像素均值在融合前后均比较接近, 说明融合结果图像的光谱信息继承度较高.

(4) 光谱相关系数见表 5, 光谱相关系数越接近 1 表明光谱畸变越小. 各个谱段的光谱相关系数均在 0.9 左右, 说明融合结果图像与 MSS 图像之间的光谱畸变很小.

## 4 结语

提出了一种基于国产云平台 CPU 与 GPU 协同处理的光学卫星遥感影像正射融合方法, 利用江西省的高分二号影像进行实验, 综合定性及定量的评价指标, 此方法不仅有较高的加速比, 而且在正射校正与图像融合方面均具有较好的精度指标, 满足实际应用需求.

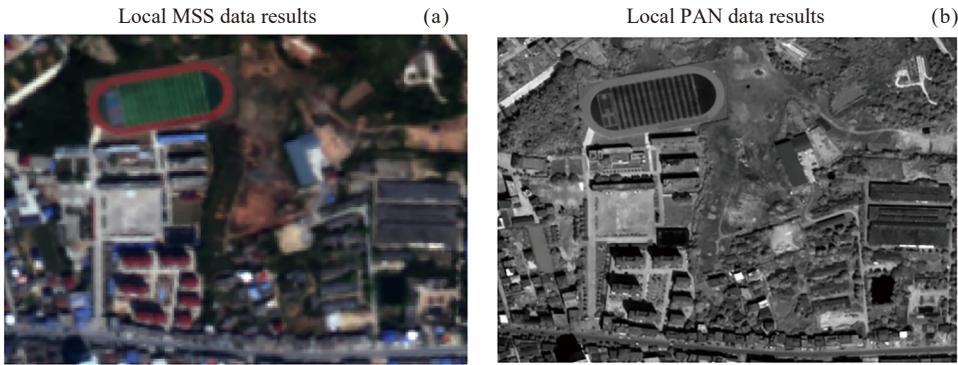


图 6 ENVI 软件单独进行局部正射校正的输出图像对比

Fig. 6 Comparison of the output image of ENVI software for local orthographic correction



图 7 局部融合结果

Fig. 7 Local fusion result

表 2 通用图像质量评价

Table 2 General image quality evaluation

| 谱段    | 通用图像质量评价指标 |
|-------|------------|
| 蓝谱段   | 0.884341   |
| 绿谱段   | 0.881685   |
| 红谱段   | 0.900098   |
| 近红外谱段 | 0.904558   |

表 3 结构相似性

Table 3 Structural similarity

| 谱段    | 结构相似性    |
|-------|----------|
| 蓝谱段   | 0.905893 |
| 绿谱段   | 0.898183 |
| 红谱段   | 0.907704 |
| 近红外谱段 | 0.910948 |

表 4 亮度均值

Table 4 Average brightness

| 谱段    | MSS均值      | 融合结果均值     |
|-------|------------|------------|
| 蓝谱段   | 321.998567 | 321.77095  |
| 绿谱段   | 258.338339 | 258.186605 |
| 红谱段   | 173.628840 | 173.585835 |
| 近红外谱段 | 389.297872 | 389.379371 |

表 5 光谱相关系数

Table 5 Spectral correlation coefficients

| 谱段    | 光谱相关系数   |
|-------|----------|
| 蓝谱段   | 0.884392 |
| 绿谱段   | 0.881768 |
| 红谱段   | 0.900149 |
| 近红外谱段 | 0.904606 |

参考文献

[1] FANG Liuyang, WANG Mi, LI Deren. A CPU-GPU co-processing orthographic rectification approach for optical satellite imagery[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, **42**(5): 668-675 (方留杨, 王密, 李德仁. CPU 和 GPU 协同处理的光学卫星遥感影像正射校正方法 [J]. *测绘学报*, 2013, **42**(5): 668-675)

[2] FANG Xudong. Research on CPU-GPU Heterogeneous Parallel Technology for Large-Scale Scientific Computing [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009 (方旭东. 面向大规模科学计算的 CPU-GPU 异构并行技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009)

[3] CHEN Teng, LI Wei. Design of JPEG2000 decoding optimization algorithm based on GPU and CPU co-accelera-

- tion[J]. *Electronics World*, 2020(10): 99-101 (陈腾, 李微. 基于 GPU 和 CPU 协同加速的 JPEG2000 解码优化算法设计 [J]. 电子世界, 2020(10): 99-101)
- [4] GAO Yuan, GU Wenjie, DING Yuheng, *et al.* Design and implementation of CPU and GPU cooperative scheduling algorithm with heterogeneous clusters[J]. *Computer Engineering and Design*, 2020, **41**(2): 592-601 (高原, 顾文杰, 丁雨恒, 等. 异构集群中 CPU 与 GPU 协同调度算法的设计与实现 [J]. 计算机工程与设计, 2020, **41**(2): 592-601)
- [5] ZHANG Longxiang, CAO Yunpeng, WANG Haifeng. GPU collaborative computing model for complex applications in large-scale data processing[J]. *Application Research of Computers*, 2020, **37**(7): 2049-2053 (张龙翔, 曹云鹏, 王海峰. 面向大数据复杂应用的 GPU 协同计算模型 [J]. 计算机应用研究, 2020, **37**(7): 2049-2053)
- [6] JIANG Yanhuang, YANG Xuejun, YI Huizhan. Parallel algorithm of geometrical correction for satellite images[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2004, **27**(7): 944-951 (蒋艳凰, 杨学军, 易会战. 卫星遥感图像并行几何校正算法研究 [J]. 计算机学报, 2004, **27**(7): 944-951)
- [7] XIAO Han, ZHANG Zuxun. Parallel image matching algorithm based on GPGPU[J]. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 2010, **39**(1): 46-51 (肖汉, 张祖勋. 基于 GPGPU 的并行影像匹配算法 [J]. 测绘学报, 2010, **39**(1): 46-51)
- [8] CHEN Chao, CHEN Bin, MENG Jianping. Geometric correction of remote sensing images based on Graphic Processing Unit[J]. *Command Information System and Technology*, 2012, **3**(1): 76-80 (陈超, 陈彬, 孟剑萍. 基于 GPU 大规模遥感图像的几何校正 [J]. 指挥信息系统与技术, 2012, **3**(1): 76-80)
- [9] HOU Yi, SHEN Yannan, WANG Ruisuo, *et al.* The discussion of GPU-based digital differential rectification[J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2009, **32**(3): 10-11 (侯毅, 沈彦男, 王睿索, 等. 基于 GPU 的数字影像的正射纠正技术的研究 [J]. 现代测绘, 2009, **32**(3): 10-11)
- [10] DU Hui. Image fusion and quality evaluation of Jilin-1 satellite[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, **42**(5): 123-126 (杜慧. 吉林一号卫星影像融合及质量评价 [J]. 测绘与空间地理信息, 2019, **42**(5): 123-126)
- [11] XIAO Chang, YU Xiaomin, HAN Yifei. Research on image fusion technology of GF-2 satellite[J]. *Geospatial Information*, 2018, **16**(6): 13-16 (肖昶, 余晓敏, 韩逸飞. 高分二号卫星影像融合技术研究 [J]. 地理空间信息, 2018, **16**(6): 13-16)
- [12] WU Di, WANG Hongqiang, ZOU Tongyuan. Design and implementation of geometric correction algorithm for remote sensing image based on GPU[J]. *China Computer & Communication*, 2020, **32**(3): 38-40,43 (吴敌, 汪红强, 邹同元. 基于 GPU 的遥感图像几何校正算法设计与实现 [J]. 信息与电脑, 2020, **32**(3): 38-40,43)
- [13] XIAO Lingyuan, LI Xin, YANG Bo. Quick orthographic rectification based on CUDA[J]. *Journal of Geomatics*, 2019, **44**(1): 74-78 (肖聆元, 李欣, 杨博. 基于 CUDA 架构的 GF4 影像快速正射纠正 [J]. 测绘地理信息, 2019, **44**(1): 74-78)
- [14] YIN Xueyong, YE Yushuang. Comparison and evaluation of remote sensing image fusion methods[J]. *Sci-Tech Innovation & Productivity*, 2020(6): 52-56,60 (殷学永, 叶雨爽. 遥感影像融合方法的比较与评价 [J]. 科技创新与生产力, 2020(6): 52-56,60)
- [15] WANG Fuping, CHEN Chaoran, WU Wenghui. Remote sensing image fusion of the same group and different groups based on GF-1 and ZY-3[J]. *Jiangxi Cehui*, 2021(2): 26-29 (王福平, 陈超然, 吴翁慧. 基于 GF-1 号与 ZY-3 号遥感影像同源异源融合研究 [J]. 江西测绘, 2021(2): 26-29)
- [16] DANG Yuanyuan, WANG Xin. Application of CPU-GPU heterogeneous system in optical remote sensing image processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, **49**(S1): 20200092 (党源源, 王昕. CPU-GPU 异构系统在光学遥感影像处理中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2020, **49**(S1): 20200092)
- [17] HU Yi, CHEN Daokun, YANG Chao, *et al.* Many-core parallel optimization of level-3 BLAS function on domestic SW26010-Pro processor[J]. *Journal of Software*, 2024, **35**(3): 1569-1584 (胡怡, 陈道琨, 杨超, 等. 国产 SW26010-Pro 处理器上 3 级 BLAS 函数众核并行优化 [J]. 软件学报, 2024, **35**(3): 1569-1584)
- [18] QI Jian. NVIDIA updates Ampere architecture to comprehensively improve GPU application performance[J]. *Intelligent Manufacturing*, 2020(12): 30-31 (齐健. NVIDIA 更新 Ampere 架构, 全面提升 GPU 应用性能 [J]. 智能制造, 2020(12): 30-31)
- [19] QUAN Jicheng, WANG Ping, WANG Hongwei. Orthorectification of optical aerial images by GPU acceleration[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(11): 2863-2871 (全吉成, 王平, 王宏伟. 计算机图形处理器加速的光学航空影像正射校正 [J]. 光学精密工程, 2016, **24**(11): 2863-2871)
- [20] GONG Xunqiang, HOU Zhaoyang, LÜ Kaiyun, *et al.* Remote sensing image fusion method combining improved Laplacian energy and parameter adaptive dual-channel unit-linking pulse coupled neural network[J]. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 2023, **52**(11): 1892-1905 (龚循强, 侯昭阳, 吕开云, 等. 结合改进 Laplacian 能量和参数自适应双通道 ULPCNN 的遥感影像融合方法 [J]. 测绘学报, 2023, **52**(11): 1892-1905)
- [21] XU Wei, YANG Defang, CHEN Lihao, *et al.* Fusion processing of multisource remote sensing images for extracting characteristic information from the Geladandong Snow Mountain area[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, **43**(2): 370-385 (许伟, 杨德芳, 陈李昊, 等. 多源遥感影像融合处理提取格拉丹东雪山区域特征信息 [J]. 地质科技通报, 2024, **43**(2): 370-385)
- [22] TIAN Weiming, LIU Fuqiang, XIE Xin, *et al.* Research on parallel acceleration processing technology of SAR back projection algorithm based on two granularities and mix-

- ing precision of GPU[J]. *Journal of Signal Processing*, 2023, **39**(12): 2213-2224 (田卫明, 刘富强, 谢鑫, 等. 基于 GPU 粗细粒度和混合精度的 SAR 后向投影算法的并行加速研究 [J]. 信号处理, 2023, **39**(12): 2213-2224)
- [23] CHEN Hu, ZHOU Pengling. Programming model for domestic high-performance many-core processor[J]. *Journal of Computer Applications*, 2023, **43**(11): 3517-3526 (陈虎, 周鹏灵. 面向国产高性能众核处理器的编程模型 [J]. 计算机应用, 2023, **43**(11): 3517-3526)
- [24] YANG Jingyu. Research on GPU Parallel Processing of Photogrammetric Data[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011 (杨靖宇. 摄影测量数据 GPU 并行处理若干关键技术研究 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2011)
- [25] LI Deren, WANG Shugen, ZHOU Yueqin. Introduction to Photogrammetry and Remote Sensing[M]. 2nd ed. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2008 (李德仁, 王树根, 周月琴. 摄影测量与遥感概论 [M]. 第二版. 北京: 测绘出版社, 2008)
- [26] LI Junjie, FU Qiaoyan. Influence analysis of DEM on the orthorectification of SuperView-1 satellite images[J]. *Geospatial Information*, 2021, **19**(9): 50-52,60 (李俊杰, 傅俏燕. DEM 对高景卫星影像正射校正的影响分析 [J]. 地理空间信息, 2021, **19**(9): 50-52,60)
- [27] LIANG Wenhai, CHEN Qi, YANG Chengling. Orthorectification analysis of GF-1 image based on rational function model[J]. *Jiangsu Science and Technology Information*, 2021, **38**(7): 43-46 (梁文海, 陈琦, 杨承伶. 基于有理函数模型的 GF-1 影像正射校正分析 [J]. 江苏科技信息, 2021, **38**(7): 43-46)
- [28] YU Haiyang, YAN Baikun, GAN Fuping, et al. Hyperspectral image fusion by an enhanced Gram Schmidt spectral transformation[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, **23**(5): 39-42 (于海洋, 闫柏琨, 甘甫平, 等. 基于 Gram Schmidt 变换的高光谱遥感图像改进融合方法 [J]. 地理与地理信息科学, 2007, **23**(5): 39-42)
- [29] TONG Yingping, QUAN Yinghui, FENG Wei, et al. Multi-source remote sensing image fusion method based on spatial-spectrum information collaboration and Gram-Schmidt transform[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, **44**(7): 2074-2083 (童莹萍, 全英汇, 冯伟, 等. 基于空谱信息协同与 Gram-Schmidt 变换的多源遥感图像融合方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2022, **44**(7): 2074-2083)
- [30] LI X H, LIN Y C, MENG M M, et al. Gram-Schmidt based hybrid beamforming for mm Wave MIMO systems[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2016, **23**(6): 53-59
- [31] LING F Y, MANOLAKIS D, PROAKIS J. A recursive modified Gram-Schmidt algorithm for least-squares estimation[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, & Signal Processing*, 1986, **34**(4): 829-836
- [32] SONG S J, SUN J, XU J Q. ARCA: A tool for area calculation based on GPS data[C]//26th International Conference on Database Systems for Advanced Applications. Taipei, China: Springer, 2021: 612-616
- [33] MA Feng, SUN Xu, GAO Lianru, et al. Research on orthorectification accuracy of GF-4 satellite image[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2019, **40**(1): 74-82 (马冯, 孙旭, 高连如, 等. “高分四号”卫星正射校正精度分析 [J]. 航天返回与遥感, 2019, **40**(1): 74-82)

## 作者简介



于 潇 女, 1980 年 10 月出生, 现为北京通信与跟踪研究所副研究员, 主要研究方向为 GPU 在云平台环境中的应用。

E-mail: [yuxiao801026@126.com](mailto:yuxiao801026@126.com)



张 一 女, 1997 年 4 月出生, 现为北京跟踪与通信技术研究所研究实习生, 研究方向为人工智能和云技术在数据处理中的应用。

E-mail: [MinnieZ423@163.com](mailto:MinnieZ423@163.com)



张 强 (通信作者) 男, 1979 年 3 月出生, 现为北京通信与跟踪研究所研究员, 主要研究方向为人工智能和云技术在数据处理中的应用。

E-mail: [13581688087@126.com](mailto:13581688087@126.com)