



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
03
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

非真实感图像处理 P437





第20卷第3期（总第227期）

2015年3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

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

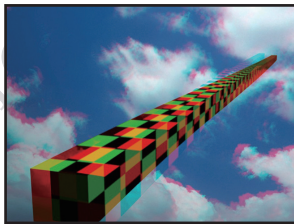
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

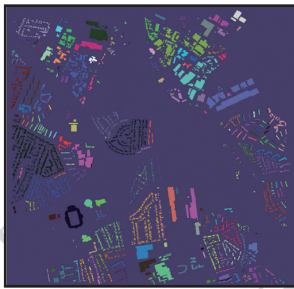
国内定价 50.00元



实时立体视觉系统中的深度映射(第0366页)



基于辐照度的运动模糊图像去模糊(第0395页)



面向智慧城市的3维城市在线可视化(第0445页)

综述

面向血管疾病诊断及预测分析的血流动力学模拟综述

徐梦佳, 杨金柱, 赵宏, 赵大哲 0297

图像处理和编码

多特征融合的车辆阴影消除

邱一川, 张亚英, 刘春梅 0311

图像分析和识别

基于局部时空特征方向加权的人体行为识别

李俊峰, 张飞燕 0320

对表情鲁棒的面部轮廓线3维人脸识别

常朋朋, 达飞鹏, 梅俊 0332

融合双层信息的显著性检测

姜霞霞, 李宗民, 匡振中, 刘玉杰 0340

面向动摄像机的高速运动目标检测

穆春迪, 谢剑斌, 闫玮, 刘通, 李沛秦 0349

匹配滤波在SAR目标单个散射部件检测中的应用

丁柏圆, 文贡坚, 钟金荣, 马聪慧 0357

图像理解和计算机视觉

实时立体视觉系统中的深度映射

李大锦, 白成杰 0366

遥感图像处理

GPU支持的SAR影像几何校正大规模并行处理

杨景辉, 程春泉, 张继贤, 黄国满 0374

基于正则化约束的遥感图像多尺度去模糊

谭海鹏, 曾炫杰, 牛四杰, 陈强, 孙权森 0386

第十届中国计算机图形学大会专栏

基于辐照度的运动模糊图像去模糊

方贤勇, 阚未然, 周健, 李黎, 郭延文 0395

对比度、颜色一致性和灰度像素保持的消色算法

王勋, 罗婷婷, 刘春晓, 彭浩宇 0408

结合因子图的多目的地地图布局优化

罗振珊, 张俊松, 范接鹏 0418

高阶连续的形状可调三角多项式曲线曲面

严兰兰, 韩旭里 0427

改进的自然图像铅笔画效果生成

黄志勇, 姚远, 张晶晶, 马凯, 任东 0437

面向智慧城市的3维城市在线可视化

潘斌, 郭小明, 陈明明, 陈为, 彭群生 0445

CONTENTS

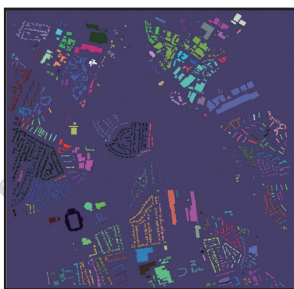
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Depth mapping in real-time stereoscopic systems (P0366)



Deblurring of motion blurred images based on the irradiance(P0395)



Online 3D city visualization for smarter cities(P0445)

Review

Survey of hemodynamics simulation for diagnosis and prediction in vascular disease

Xu Mengjia, Yang Jinzhu, Zhao Hong, Zhao Dazhe 0297

Image Processing and Coding

Vehicle shadow removal with multi-feature fusion

Qiu Yichuan, Zhang Yaying, Liu Chunmei 0311

Image Analysis and Recognition

Human behavior recognition based on directional weighting local space-time features

Li Junfeng, Zhang Feiyan 0320

Expression-robustness 3D face recognition based on facial profiles

Chang Pengpeng, Da Feipeng, Mei Jun 0332

Image saliency detection based on two-layer information fusion

Jiang Xiaxia, Li Zongmin, Kuang Zhenzhong, Liu Yujie 0340

Detecting high-speed moving targets in moving camera environments

Mu Chundi, Xie Jianbin, Yan Wei, Liu Tong, Li Peiqin 0349

The application of matched filter in detecting single scattering parts of SAR targets

Ding Boyuan, Wen Gongjian, Zhong Jinrong, Ma Conghui 0357

Image Understanding and Computer Vision

Depth mapping in real-time stereoscopic systems

Li Dajin, Bai Chengjie 0366

Remote Sensing Image Processing

GPU supported massively parallel processing for geometric correction of SAR imagery

Yang Jinghui, Cheng Chunquan, Zhang Jixian, Huang Guoman 0374

Remote sensing image multi-scale deblurring based on regularization constraint

Tan Haipeng, Zeng Xuanjie, Niu Sijie, Chen Qiang, Sun Quansen 0386

Column of Chinagraph'2014

Deblurring of motion blurred images based on the irradiance

Fang Xianying, Kan Weiran, Zhou Jian, Li Li, Guo Yanwen 0395

Decolorization with contrast, color consistency and grayscale pixel preservation

Wang Xun, Luo Tingting, Liu Chunxiao, Peng Haoyu 0408

Synthesizing multi-destinations map with factor graph

Luo Zhenshan, Zhang Junsong, Fan Jiepeng 0418

Higher-order continuous shape adjustable trigonometric polynomial curve and surface

Yan Lanlan, Han Xuli 0427

Improved algorithm for natural image pencil drawing production

Huang Zhiyong, Yao Yuan, Zhang Jingjing, Ma Kai, Ren Dong 0437

Online 3D city visualization for smarter cities

Pan Bin, Guo Xiaoming, Chen Mingming, Chen Wei, Peng Qunsheng 0445

中图法分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)03-0374-12

论文引用格式: Yang J H, Cheng C Q, Zhang J X, Huang G M. GPU supported massively parallel processing for geometric correction of SAR imagery[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(3): 0374-0385. [杨景辉, 程春泉, 张继贤, 黄国满. GPU 支持的 SAR 影像几何校正大规模并行处理[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(3): 0374-0385.][DOI:10.11834/jig.20150309]

GPU 支持的 SAR 影像几何校正大规模并行处理

杨景辉^{1,2}, 程春泉², 张继贤^{1,2}, 黄国满²

1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 中国测绘科学研究院, 北京 100830

摘要: 目的 几何校正(又称地理编码)是合成孔径雷达(SAR)影像处理流程中重要的一个步骤,具有一定的计算复杂度,需要用到几何定位模型。本文针对星载 SAR 影像,采用有理多项式系数(RPC)定位模型,提出了图形处理器(GPU)支持的几何校正大规模并行处理方法。方法 该方法充分利用 GPU 计算资源强大及几何校正过程中每个像素处理步骤一致的特点,每次导入大量像素至 GPU,为每个像素分配一个线程,每个线程执行有理函数计算、投影变换、插值采样等计算复杂度高的步骤,通过优化配置 dimGrid 和 dimBlock 参数,提升 GPU 的并行性能。该方法通过分块处理实现 SAR 影像大幅面处理,且可适用于多个不同分块大小。结果 实验结果显示其计算加速比为 38~44,为全面客观地分析 GPU 并行处理的特点,还计算了整体加速比,通过多个实验分析影响整体加速性能的因素,提出大块读写提高 I/O 性能的优化方法。结论 该方法形式简洁,通用性好,可适用于几乎所有的星载 SAR 影像、不同的影像幅面;且加速性能明显。

关键词: 合成孔径雷达; 几何校正; 并行计算; 图形处理器; 有理多项式模型

GPU supported massively parallel processing for geometric correction of SAR imagery

Yang Jinghui^{1,2}, Cheng Chunquan², Zhang Jixian^{1,2}, Huang Guoman²

1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

Abstract: **Objective** The geometric correction of SAR imagery is an important step in SAR image processing. This process has a certain degree of computational complexity and requires a certain geometric positioning model. A GPU-supported massively parallel processing method is presented for the geometric correction of space-borne SAR imagery. **Method** This method exploits the RPC model. The method takes full advantage of two facts. A GPU has large computational resources, and the processing steps are the same for each pixel in geometric correction. In the course of massively parallel processing, a large amount of pixels are imported into the GPU at each time, and one thread is allocated for one pixel. Each thread performs the steps, which include the calculation of rational function, transformation for projection, resampling, and so on, with high computational complexity. The optimal configuration of two parameters, i. e., dimGrid and dimBlock, improves parallel performance. Large SAR image frames with different sizes can be processed by block partition. **Result** Experimental results show that the proposed method can achieve computational speedups ranging from 38 to

收稿日期: 2014-06-17; 修回日期: 2014-11-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2011AA120401); 国家自然科学基金项目(40901229)

第一作者简介: 杨景辉(1980—), 男, 助理研究员, 武汉大学地图学与地理信息系统专业博士研究生, 主要研究方向为遥感影像高性能处理(多核并行、集群并行和 GPU 并行等)。E-mail: jhyang@vip.163.com

Supported by: National High Technology Research and Development Program of China (2011AA120401); National Natural Science Foundation of China (40901229)

44. Meanwhile, the speedup for the whole procedure is recorded to analyze the features of the GPU-based parallel computing objectively and thoroughly. The factors affecting the speedup for the whole procedure are discussed according to the results of several experiments, and an optimal approach that reads and writes a large block to promote I/O performance is proposed. **Conclusion** The straightforward method has broad applicability and can be used for most space-borne SAR sensors and for different image frame sizes. The method also achieves obvious acceleration.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); geometric correction; parallel computing; graphics processing unit (GPU); rational polynomial coefficients (RPC)

0 引言

遥感影像的几何定位是指通过对遥感影像的几何校正或立体影像同名像点的前方交会,获得影像点对应地面点的平面或3维坐标。几何定位不仅是遥感影像进行测量的直接要求,也是用于其他应用的基础。合成孔径雷达(SAR)影像是一种重要的遥感数据源,研究其几何定位及相应的几何校正处理方法具有重要的现实意义。

传感器几何构像模型建立了影像坐标与地点坐标间的函数关系,是遥感影像进行几何定位处理最基础、最重要的内容之一^[1]。几何构像模型通常分为严密模型和通用模型^[2-4]。对于SAR影像,严密模型主要有两种形式,一种为基于位置、速度和多普勒参数的模型,另一种为基于传感器状态参数(位置和姿态参数)的模型。前者主要形式有:Leberl等提出的数学模型,该模型依据距离条件和零多普勒条件构建^[5];R-D模型,原理与Leberl方法相似,考虑了多普勒频率非0值情况,具有明确的几何和物理意义。基于状态矢量的雷达影像几何构像模型主要包括雷达共线方程模型及距离—共面方程等^[6-8]。通用模型有多种形式,如有理函数模型(RFM,也称RPC模型,本文统称为RPC模型)^[9]、一般多项式模型^[10]等。由于RPC模型与严密模型有同等的精度,且适用性广,是非严密模型的主要形式,目前在星载SAR影像的几何处理中得到重视^[9, 11-13],是严密模型理想的替换模型^[14]。

近年来,基于RPC模型的SAR影像几何校正相关研究引起了广泛的关注,张过等人^[15]使用RPC模型对高分辨率SAR影像进行正射纠正,并对纠正精度进行了评价;魏晓红等人^[16]指出使用RPC模型进行SAR影像几何校正所花费计算时间远远小于R-D模型,实用性较强。虽然使用RPC模型进行几何校

正的计算效率具有一定的优势,但为取得逐像素纠正效果,每个像素需要经过有理函数计算、投影变换、插值采样等步骤,且通常情况下需要处理的像素量也较多,因此具有一定计算复杂度。该几何校正过程中,每个像素对应的处理步骤都一致,属于典型的单指令流多数数据流(SIMD)计算模式,且数据处理的运算量远大于数据调度和传输需求,此种计算特点能充分发挥现代图形处理器(GPU)的计算潜能,处理性能大大超越了传统的中央处理器应用程序。因此,应用GPU对SAR影像几何校正进行加速是一种较好的选择。

使用GPU进行并行处理方面, Lee等人综述了GPU用于遥感领域的相关研究工作^[17],肖汉和张祖勋利用CUDA(compute unified device architecture)对影像匹配进行加速^[18], Christophe等人比较了CPU多进程和GPU两种并行技术分别用于多个常用影像处理算法的处理性能^[19], Reguera-Salgado等人针对推扫式航空影像提出了一种基于GPU的实时几何校正方法^[20]。Song等人提出了GPU加速的小波解压缩系统,该系统具有针对卫星影像的SPIHT和Reed-Solomon等解码算法^[21], Tarabalka等人使用GPU进行高光谱异常检测^[22], Bernabe等人比较了多核CPU和GPU用于高光谱混合像元分解的处理性能及成本等方面^[23]。Balz等人使用GPU对雷达立体测量进行加速^[24]。Sahin和Kulur使用GPU对基于共线方程的航空影像进行正射纠正^[25]。

应用GPU进行遥感影像几何校正加速处理已有相关工作多针对光学影像,如采用共线方程对航空影像进行正射纠正^[25],采用线阵航空影像直接定位模型进行几何纠正^[20],卫星严格轨道模型进行几何校正^[26],和采用RPC模型对光学卫星影像进行几何校正^[27]。基于RPC模型的光学影像几何校正和基于RPC模型的SAR影像几何校正差别较小,只是在求解RPC参数和数据类型支持(SAR数据通常为复数类型)上有一定的差别。因此基于RPC模型的光学

和 SAR 影像几何校正可相互借鉴。本文相比文献[27]的不同在于,本文给出了使用 GPU 进行几何校正的详细技术细节、处理步骤,优化了参数设置,进行了不同块大小分块处理实验,不但记录了计算加速比,还记录了整体加速比,分析了影响处理性能的因素。

基于 GPU 的 SAR 影像加速处理相关工作较少,目前仅提出了基于 RPC 模型的雷达立体测量方法^[24],相关工作没有扩展至几何校正加速处理。由于星载 SAR 卫星轨道稳定,有利于高精度拟合 RPC 参数^[4]。本文利用星载 SAR 影像附带的 RPC 参数或者通过本文方法拟合的 RPC 参数,提出基于 GPU 的 SAR 影像几何校正大规模并行处理方法。

1 基于 RPC 参数的几何校正大规模并行处理方法

1.1 RPC 模型及 RPC 参数的计算

RPC 模型^[1, 4]通过有理多项式系数,拟合影像点坐标与经纬度坐标间的对应关系。RPC 模型的形式为

$$\begin{cases} R_n = \frac{N_{umR}(Y_n, X_n, Z_n)}{D_{enR}(Y_n, X_n, Z_n)} \\ C_n = \frac{N_{umC}(Y_n, X_n, Z_n)}{D_{enC}(Y_n, X_n, Z_n)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, X_n, Y_n, Z_n 为地面点归算至 $\langle -1, 1 \rangle$ 之间的地理坐标, R_n, C_n 为像点归算至 $\langle -1, 1 \rangle$ 之间的影像坐标, $N_{umR}, D_{enR}, N_{umC}, D_{enC}$ 为三元三次多项式,其形式记为 p_i ,有

$$X_n = \frac{X - X_{off}}{X_{scale}}, Y_n = \frac{Y - Y_{off}}{Y_{scale}}, Z_n = \frac{Z - Z_{off}}{Z_{scale}}$$

$$R_n = \frac{R - R_{off}}{R_{scale}}, C_n = \frac{C - C_{off}}{C_{scale}}$$

$$p_i = a_{i1} + a_{i2}X_n + a_{i3}Y_n + a_{i4}Z_n + a_{i5}X_nY_n + a_{i6}X_nZ_n + a_{i7}Y_nZ_n + a_{i8}X_n^2 + a_{i9}Y_n^2 + a_{i10}Z_n^2 + a_{i11}X_nY_nZ_n + a_{i12}X_n^3 + a_{i13}X_nY_n^2 + a_{i14}X_nZ_n^2 + a_{i15}X_n^2Y_n + a_{i16}Y_n^3 + a_{i17}Y_nZ_n^2 + a_{i18}X_n^2Z_n + a_{i19}Y_n^2Z_n + a_{i20}Z_n^3$$

$R_{off}, C_{off}, X_{off}, Y_{off}, Z_{off}$ 为像点的像素坐标和地理坐标的偏移参数, $R_{scale}, C_{scale}, X_{scale}, Y_{scale}, Z_{scale}$ 为像点和地理坐标的比例系数, $a_{ij} (i=1, 2, 3, 4; j=0, 1, 2, \dots, 20)$ 为 RPC 系数。

RPC 参数需要通过已知点来拟合,根据已知点

的来源, RPC 参数求解有与地形无关和与地形相关两种方式,前者通过严密模型产生虚拟控制点进行求解,后者通过实测获取一定数目的控制点进行求解^[9]。本文采用地形无关的方式,通过 SAR 影像的 R-D 几何模型计算每个格网点和高程层对应的虚拟控制点,用于 RPC 参数计算。RPC 根据分母的不同,有 9 种不同的形式^[9]。在已知严密模型并获取足量虚拟控制点的情况下,分母不同且取 3 阶多项式 RPC 参数时, RPC 的拟合精度是最高的,此时共有 78 个 RPC 待定参数(另外 5 个偏移参数和 5 个比例系数根据影像对应的地面坐标范围和影像像素坐标范围确定,式(1)中两个分母项多项式的常数项参数取 1)。

虚拟控制点主要利用 R-D 模型和地球椭球模型联合求解, R-D 方程为

$$\begin{cases} R = \sqrt{(X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2 + (Z - Z_s)^2} \\ f_D = 2[(X - X_s)V_X + (Y - Y_s)V_Y + (Z - Z_s)V_Z] / \lambda R \end{cases} \quad (2)$$

式中, $(X, Y, Z), (X_s, Y_s, Z_s, V_X, V_Y, V_Z)$ 为地心直角坐标系中地面点坐标和 SAR 天线中心状态矢量, λ, f_D, R 分别为 SAR 波长、多普勒频率及雷达波实测距离。地球椭球模型为

$$\frac{X^2 + Y^2}{(a + h)^2} + \frac{Z^2}{(b + h)^2} = 1 \quad (3)$$

式中, a, b 为地球椭球的长短轴。

假设在影像行列范围均匀划分 $m \times n$ 个规则格网,在高程范围内均匀划分 k 个高程层。针对每个影像格网点,其影像坐标为 (x, y) ,利用获取影像的星历、姿态等数据插值计算该点对应的成像参数 $(R, f_D, X_s, Y_s, Z_s, V_X, V_Y, V_Z)$;针对每个高程层,能确定其高程值 h 。根据影像坐标 (x, y) 成像时刻插值出的成像参数和高程 h ,利用 R-D 模型和地球椭球模型,算出影像格网点对应的地面点坐标 (X, Y, Z) ,将此坐标转换成地理坐标 (L, B, h) ,则 (x, y) 和 (L, B, h) 组成一对虚拟控制点。格网点影像坐标和地面高程层高程坐标任意组合,获得 $(m+1) \times (n+1) \times (k+1)$ 个虚拟点作为计算 RPC 参数的控制点。以 RPC 参数为未知数,每个控制点可根据式(1)建立两个误差方程,根据所有控制点组建而成的误差方程组可简写为

$$V = BX - L \quad (4)$$

式中, V 为改正数向量, X 为 RPC 系数未知数向量, B 为未知数系数矩阵, L 为常数项向量。由于待求参数较多, 参数间存在强相关性, 参数的稳健求解一直是 RPC 参数获取的关键与难点。本文利用刘斌等人^[28]提出的基于岭参数的谱修正迭代方法, 实现 RPC 参数稳健求解。即将法方程两边同时加上 kX (k 为岭参数), 按式(5)迭代求解, 即

$$X^i = (B^T B + k)^{-1} (B^T L + kX^{i-1}) \quad (5)$$

式中, i 为迭代的次序。求解 RPC 参数的详细过程请参考文献[28]。

为了验证 RPC 参数的求解精度, 依次取每个格网的中心点影像坐标和相邻高程层高中值, 计算相应地面点坐标, 可获得 $m \times n \times k$ 个已知点, 作为 RPC 模型精度的虚拟检查点。

RADARSAT-2 影像 SLC (single look complex) 产品提供相应的 RPC 参数, 其相应的模型可通过式(1)进行描述, 没有提供 RPC 参数的 SAR 卫星影

像可根据本文描述的方法进行拟合, 该方法已在 TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, ENVISAT ASAR, ALOS PALSAR 等星载 SAR 影像处理中得到验证。

1.2 几何校正大规模并行处理方法

有了 RPC 模型和相应的参数后, 就可以进行 SAR 影像的几何校正。本文几何校正基本思路为, 先根据影像大小确定几何校正后影像的边框大小, 然后通过一定的计算确定边框内每个像素的灰度值, 即为几何校正后影像。确定每个像素的灰度值的计算过程由 GPU 完成, 由于待处理的像素量巨大, 且每个像素处理步骤一致, 本文利用该并行性, 为每个像素分配一个线程, 同时对大量的像素进行处理, 极大提高计算效率。

采用通用性较强的 NVIDIA 公司统一计算架构 CUDA^[29], 主机和 GPU 协同处理完成整个流程, 主机负责影像读写和与 GPU 之间的数据传输, GPU 主要负责几何校正运算, 整个处理流程如图 1。

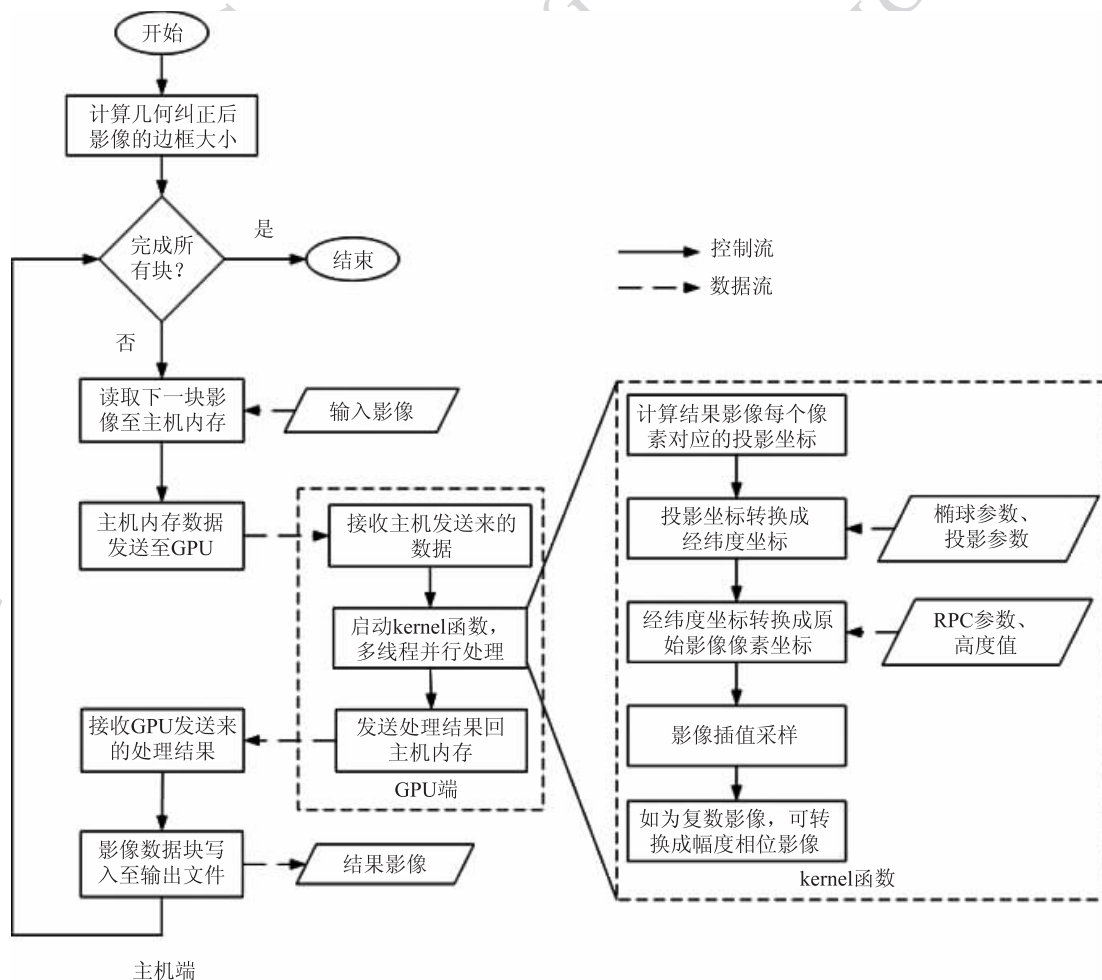


图1 GPU支持的SAR影像几何校正处理流程

Fig. 1 The flowchart of geometric correction of SAR imagery supported by GPU

首先使用 RPC 模型的反解公式计算结果影像的边框大小(即给定像点坐标与高程值确定像点对应的经纬度坐标),根据边框大小创建相应的影像文件。该步骤计算量非常小,且不具有并行性,由 CPU 串行处理效率更高。实际应用过程中,因一整幅影像过大,GPU 卡上存储容量有限,且计算过程中每个线程需要为各步骤定义多个浮点型变量,存储消耗较大,不可能一次将整景影像数据全部导入 GPU 进行处理。采用分批导入导出 GPU 的方法,根据结果影像边框大小进行大块划分,由每个结果影像块范围确定其对应的输入影像中的范围,主机读取数据块后,发送至 GPU。

数据由主机内存传输至 GPU 后,中央处理器发指令启动 kernel 函数,kernel 函数同时启动多个 CUDA 线程对 SAR 影像进行几何校正,每个 CUDA 线程处理一个像素,每个线程的处理步骤一致,如图 1 右侧虚线框,依次完成以下计算步骤:

1) 计算结果影像每个像素对应的投影后地面坐标,投影坐标根据结果影像左上角点地面坐标、像素相对左上角的偏移量和地面采样分辨率进行计算;

2) 利用投影参数和椭球参数等将投影坐标转换成经纬度坐标,采用我国最新的 CGCS2000 坐标系和高斯—克吕格投影;

3) 根据 RPC 模型将经纬度坐标转换成原始影像像素坐标,转换过程中需要用到 RPC 参数和高度值,本文所用高度值取影像对应地区的平均高度值,也可以根据外部提供的高程模型获得每个点的高程值;

4) 所计算的原始影像像素坐标往往不是整数,因此需要进行影像插值采样,为得到好的插值效果,采用双三次采样方法(bicubic),虽然该方法运算量较大,但因 GPU 具有强大计算能力,完全不会降低处理效率,见第 2.2 节实验结果;

5) 如果 SAR 影像为复数影像,还可转换成幅度相位影像。

GPU 处理结果发送回主机,主机将结果数据块写入结果影像文件,处理完一大块数据后紧接进行下一块处理,直至最后一块。本文方法只用到单个 CPU 处理核心和一个 GPU,没有再用到其他计算资源。

多 CUDA 线程并行处理时,线程按照 Grid 和 Block 两级模式进行管理(如图 2 所示),根据需要可同时启动成千上万个线程进行计算。本文采用 Fermi 架构的 NVIDIA Quadro 5000 GPU 卡(见第

2.1 节中表 2),具有 352 CUDA 核心,每 32 CUDA 核心组成一个 SM(streaming multiprocessor)^[30],共有 11 个 SM,每个 SM 最大驻留线程个数为 1 536 个^[29]。设置参数时具有一定的限制^[29]:一是每个 Block 设置的最大线程个数为 1 024;二是每个 SM 最大驻留 Block 个数为 8。

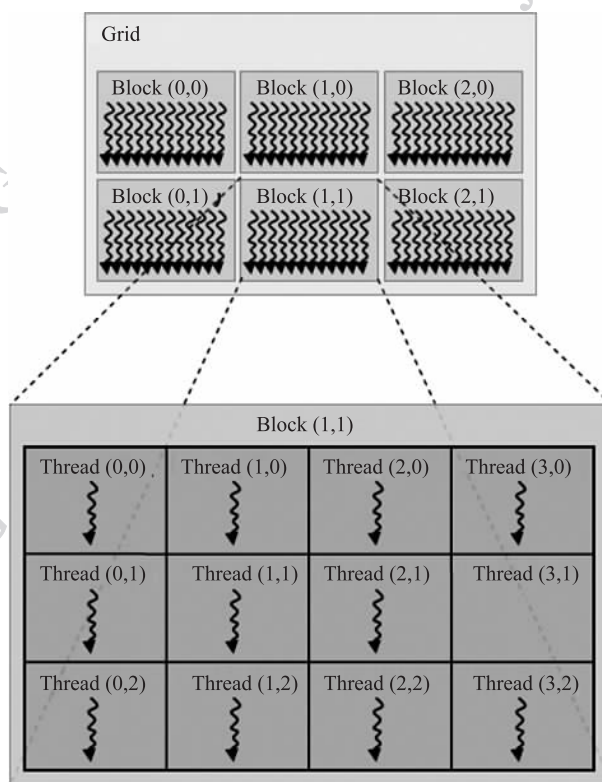


图 2 CUDA 中的线程^[29]

Fig. 2 Threads in CUDA^[29]

为更好地与 2 维影像对应,配置 Block 时参数按照 2 的次方进行选择,且长宽保持一致,如 dimBlock(8,8),dimBlock(16,16),dimBlock(32,32)等,经分析,dimBlock(16,16)为最优选择,每个 Block 设置的线程个数为 $16 \times 16 = 256$,小于 1 024;每个 SM 只需要驻留 $6(1\,536/256 = 6)$ 个 Block,小于 8。因此 dimBlock(16,16)既符合了限制,又为每个 SM 分配了最大数量的线程。其他配置为每个 SM 分配的线程数都小于其最大驻留线程数 1 536。

在 2.2.2 节分别实验了 5 种分块大小: $2\,048 \times 2\,048$, $3\,072 \times 3\,072$, $4\,096 \times 4\,096$, $5\,120 \times 5\,120$, $6\,144 \times 6\,144$ 。不同分块大小对应的 Grid 配置都为 dimGrid(块长/16,块长/16),此种配置通用性较强,可适应于不同分块大小。

使用本文 GPU 及相应的配置,线程调度执行如

图3,过程如下:每个像素分配一个线程,每256个线程形成一个Block,每6个Block分配给一个SM,当前分配给SM的Block执行完毕后,再执行和分配新的Block。分配给SM的每个Block中每32个线程组成一个Warp,每个Block由8个Warp组成,每个SM包含48个Warp。根据Fermi架构^[30],每个

SM具有两个Warp调度器和两个指令发送单元,允许两个Warp并发执行,执行时每个Warp对应16个CUDA核心。在SM中,Warp是调度单位,且Warp数量越多,并行性能越高,本文方法每个SM包含最大Warp数(48个)^[29],针对采用的GPU卡优化了处理性能。

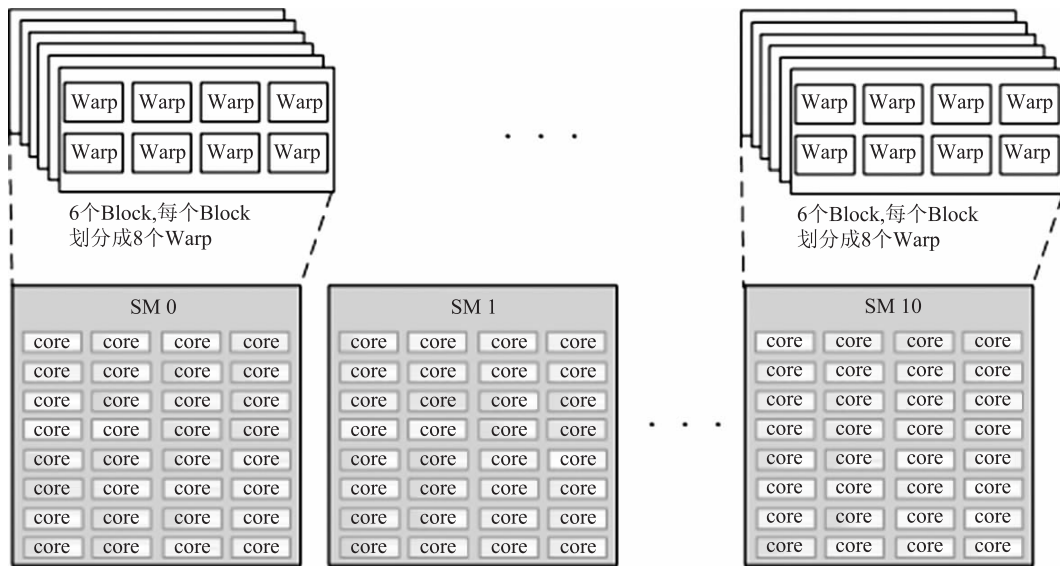


图3 Quadro 5000 GPU卡中线程调度与执行

Fig. 3 Thread scheduling and execution in Quadro 5000 GPU card

因此,本文方法CUDA环境^[29]中两个重要的参数Grid和Block设置如下: $\text{dimBlock}(16,16)$, $\text{dimGrid}(\text{块长}/16, \text{块长}/16)$,此配置提高GPU计算资源使用率,且通用性强。相比CPU串行处理方法,基于GPU的SAR影像大规模并行处理方法将多个运算量大的步骤交给了GPU进行处理,GPU利用其处理核心多的特点,同时启动大量线程,每个线程处理一个像素,多个线程同时计算,提高了计算效率。同时,本文采用的逐像素处理方法也较好地保证校正后影像效果。

2 实验结果与分析

2.1 计算平台与实验数据

计算平台由两部分构成:主机系统和GPU加速卡。主机系统为DELL图形工作站,配置如表1。GPU加速卡为主机自带的显卡,无需额外配置新的加速卡,其配置如表2。该GPU卡目前属中等性能的专业显卡,价格适中,即可用于图形绘制又可进行计算加速,性价比高,实用性强。

表1 主机系统配置

Table 1 Configurations of the host computer

Dell Precision T7500 工作站	配置
CPU	Intel Xeon X5675, 主频 3.06 GHz
内存	48 GB
磁盘	SAS 15000 转, 500 G
操作系统	Windows 7 Professional, Service Pack 1, 64-bit
编译环境	Visual Studio C++ 2010, NVIDIA CUDA 4.0

表2 GPU加速卡配置

Table 2 Configurations of the GPU card

NVIDIA Quadro 5000	配置
GPU 架构	NVIDIA Fermi 架构
CUDA 核心数	352
单精度浮点计算能力	718.08 Gigafllops
双精度浮点计算能力	359.04 Gigafllops
卡上总存储大小	2.5 GB GDDR5
存储接口	320-bit
存储带宽	120 GB/s

为兼顾不同情况,采用两完整景 SAR 影像进行实验。一景为 RADARSAT-2 SLC 影像,影像自带 RPC 参数,需要将复数影像转换成幅度相位影像;另一景为 TerraSAR-X 幅度影像,影像没有附带 RPC 参数,使用本文方法进行 RPC 参数拟合。

RADARSAT-2 影像: 自带 RPC 参数,SLC 复数影像,输入 2 个通道,分别对应实部和虚部,影像大小为 $13\,042 \times 11\,812$ 像素,数据类型为有符号 16 位整型,文件大小 589 MB。影像对应平原地区,设置几何校正处理所需高度值为该区域平均高度。纠正后影像转换成幅度相位数据,对应地面采样分辨率为 3.0 m,影像大小为 $9\,244 \times 8\,762$ 像素,输出数据类型同输入影像,文件大小 311 MB。

TerraSAR-X 影像: 影像没有附带 RPC 参数,使用本文方法进行 RPC 参数拟合,输入为单通道,对应为幅度值,影像大小为 $17\,088 \times 32\,637$,数据类型为无符号 8 位整型,文件大小 532 MB。影像对应山区,设置纠正处理所需高度值为该区域平均高度。纠正后影像仍为幅度值,对应地面采样分辨率为 3.0 m,影像大小为 $14\,337 \times 21\,719$ 像素,输出数据类型同输入影像,文件大小 299 MB。

2.2 实验结果

几何校正前后 RADARSAT-2 影像显示如图 4,图 4(a) 只显示其实数通道,图 4(b) 只显示幅度通道。几何校正前后 TerraSAR-X 影像显示如图 5。Fermi 架构单精度浮点运算完全符合 IEEE 754-2008 规范,本文运算采用单精度浮点运算,因此 CPU 和

GPU 处理结果无差别。采用的逐像素处理方法具有更好的影像纠正效果。

2.2.1 RPC 参数拟合

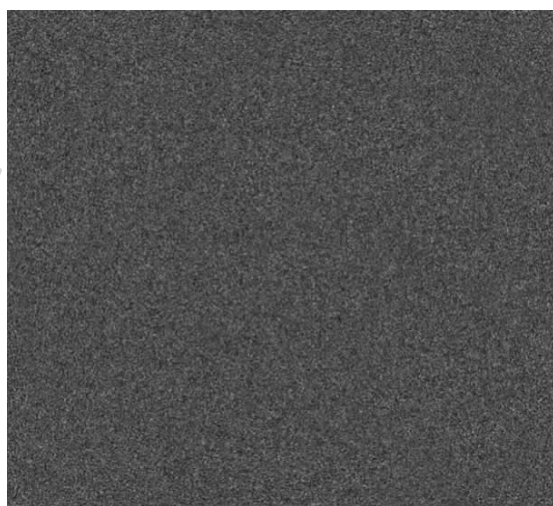
TerraSAR-X 影像使用本文方法进行 RPC 参数拟合,其对应的高度范围为 $0 \sim 5\,000$ m,1.1 节提到的 m, n, k 取值分别为 $m=66, n=164, k=11$,其与严密传感器模型(R-D 模型)的拟合精度如表 3。

2.2.2 不同分块大小下的计算加速比

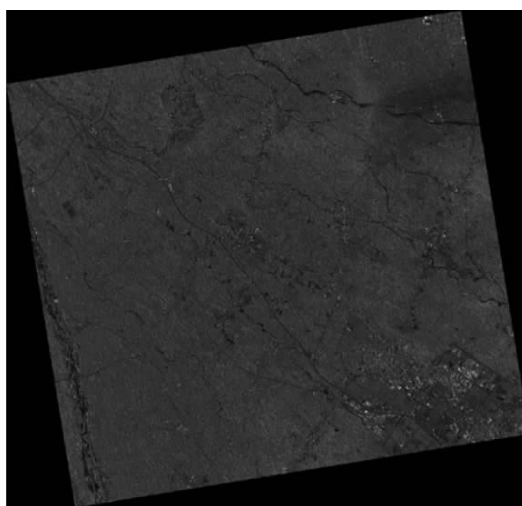
分别实验 5 种分块大小: $2\,048 \times 2\,048$, $3\,072 \times 3\,072$, $4\,096 \times 4\,096$, $5\,120 \times 5\,120$, $6\,144 \times 6\,144$ 。没有再实验更大的块,是因为选用的 GPU 卡上显存不足(本文 GPU 卡总存储为 2.5 GB),如果 GPU 具有更大的显存,可实验更大块。通过分块进行导入导出是一种实用性较强的方法,虽然目前高端的 GPU 卡上存储已经可达到 6 GB 甚至更高,但待处理的整景影像大小是不确定的,目前的趋势是单景影像越来越大,动辄达到 2 GB 以上,因此不可能单次完全导入。另外,表 4 和表 5 的实验结果表明分块导入并不影响 GPU 计算效率,不同分块配置其计算加速性能基本一致。

本文分别记录了不同分块配置情况下单个块 CPU 串行处理和 GPU 并行处理所用时间,其中 CPU 串行处理只利用单个处理核心,整个流程全部由 CPU 完成,即图 1 右侧虚线框内各步骤全部交由 CPU 进行处理。根据 CPU 串行处理和 GPU 并行处理所用时间,基于 GPU 的并行计算加速比定义为

$$S(g) = t_s / t_g \quad (6)$$



(a) 几何校正前(显示实数部分)



(b) 几何校正后(显示幅度部分)

图 4 RADARSAT-2 影像

Fig. 4 The RADARSAT-2 images

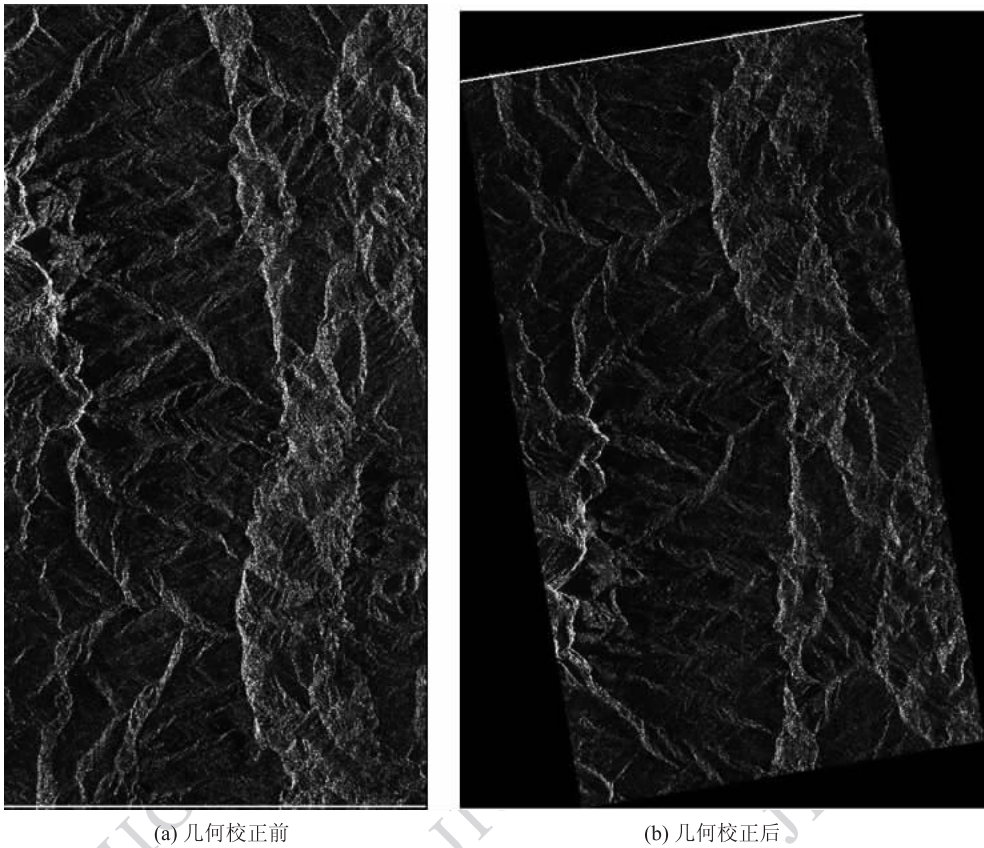


图 5 TerraSAR-X 影像
Fig. 5 The TerraSAR-X images

表 3 TerraSAR-X 影像 RPC 参数拟合精度

Table 3 Fitting accuracy of RPC parameters for the TerraSAR-X image						/像素
	轨道向精度	垂轨向精度	平面精度	轨道向最大误差	垂轨向最大误差	平面最大误差
检查点	0.000 322	0.000 125	0.000 381	0.000 784	0.000 396	0.000 791
控制点	0.000 315	0.000 117	0.000 345	0.000 777	0.000 381	0.000 783

式中, t_s 是 CPU 串行处理所用时间; t_g 是 GPU 并行处理所用时间, 记录的 GPU 计算时间为数据从主机内存导入至 GPU 时间、GPU 处理时间和处理结果从 GPU 导出至主机内存 3 部分时间总和。

表 4 和表 5 分别给出了 RADARSAT-2 和 TerraSAR-X 数据不同块大小配置情况下 CPU 串行和 GPU 并行处理单块处理所用时间, 其加速比分别在两个表的最后一行给出。数据表明, RADARSAT-2 数据不同分块配置其加速比在 39 ~ 41 倍左右, TerraSAR-X 数据不同分块配置其加速比在 44 ~ 46 倍左右, 本文记录的时间只精确到小数点后 2 位, 因 GPU 完成 $2\,048 \times 2\,048$ 块大小所用时间极短, 记录时间时会存在一定的误差。针对同

一数据, 不同分块大小配置所取得的加速比基本一致, 说明数据块大到一定程度后, 如本文的 $2\,048 \times 2\,048$ 大小, 可充分发挥 GPU 计算能力, GPU 处理效率基本一致。

表 4 RADARSAT-2 影像不同块大小完成单块计算所用时间
Table 4 Computational times to finish a single block of different sizes for the RADARSAT-2 image

	块大小				
	2 048	3 072	4 096	5 120	6 144
CPU 串行/s	3.48	7.79	14.48	21.84	32.90
GPU/s	0.09	0.20	0.35	0.56	0.83
加速比/倍	39	39	41	39	40

表5 TerraSAR-X 影像不同块大小单块计算所用时间
Table 5 Computational times to finish a single block of different sizes for the TerraSAR-X image

	块大小				
	2 048	3 072	4 096	5 120	6 144
CPU 串行/s	2.85	6.71	11.84	19.49	26.35
GPU/s	0.06	0.15	0.27	0.42	0.59
加速比/倍	48	45	44	46	45

2.2.3 不同分块大小下的整体加速比

为了全面客观地分析 GPU 并行处理应用于 SAR 影像几何校正的特点,还分别记录了在 2 048 和 5 120 两种分块配置下完成整景影像几何校正所用全部时间,包括:计算时间、输入输出(I/O)时间、程序初始化及结果文件创建等所用时间。

表 6 和表 7 分别给出了 2 048 和 5 120 两种分

块配置下完成 RADARSAT-2 整景影像所用时间。程序初始化和文件创建等所用时间两种分块配置下基本一致,约在 6~7 s;计算时间为整景影像所有块累加时间,两种分块配置下所用时间基本一致,加速比也一致,其加速比与表 4 中单块加速比也一致;I/O 时间略有不同,5 120 块配置较 2 048 块配置时间更短,约少 2 s 左右,说明大块读写的性能更高,同时可以看出无论是采用 GPU 和 CPU 其 I/O 性能是一致的,因为都是基于同一磁盘系统和文件系统。同时也根据 3 部分总时间计算了相应的加速比(为区别于计算加速比,称为整体加速比),因 CPU 串行处理和 GPU 并行处理除计算时间外其他两部分时间基本一致,即使计算时间大大缩小,其整体加速比也明显下降,整体加速比只有 4 倍左右。因 I/O 时间、程序初始化及结果文件创建时间两种处理模式基本一致,本文没有计算其加速比。

表6 完成 RADARSAT-2 整景影像所用时间(分块大小:2 048 × 2 048)
Table 6 Times to finish the whole RADARSAT-2 image (Block size: 2 048 × 2 048)

	文件创建、初始化等	计算时间	I/O 时间	总时间
CPU 串行/s	5.57	66.83	15.6	88
GPU/s	7.04	1.70	14.26	23
加速比/倍		39.3		3.8

表7 完成 RADARSAT-2 整景影像所用时间(分块大小:5 120 × 5 120)
Table 7 Times to finish the whole RADARSAT-2 image (Block size: 5 120 × 5 120)

	文件创建、初始化等	计算时间	I/O 时间	总时间
CPU 串行/s	6.5	67.35	13.15	87
GPU/s	6.85	1.76	12.39	21
加速比/倍		38.3		4.1

表 8 和表 9 分别给出了 2 048 和 5 120 两种分块配置下完成 TerraSAR-X 整景影像所用时间。其规律与 RADARSAT-2 影像实验结果基本一致,文件创建、程序初始化等时间和 I/O 时间 CPU 串行与 GPU 并行处理所用时间一致;I/O 时间方面,5 120 块配置较 2 048 块配置时间更短,减少了 6 s 多;计

算时间不同块配置下所用时间一致,加速比也一致,加速比略高于 RADARSAT-2 情况,达到 44 倍左右。因 CPU 串行处理计算时间占总时间大部分(分别为 232 中 213.46,228 中 213.99),整体加速比有了明显的提高,2 048 分块情况下达 10 倍,5 120 分块情况下达 13 倍。

表8 完成 TerraSAR-X 整景影像所用时间(分块大小:2 048 × 2 048)
Table 8 Times to finish the whole TerraSAR-X image (Block size: 2 048 × 2 048)

	文件创建、初始化等	计算时间	I/O 时间	总时间
CPU 串行/s	5.76	213.46	12.78	232
GPU/s	5.47	4.89	13.64	24
加速比/倍		43.7		9.7

表9 完成 TerraSAR-X 整景影像所用时间(分块大小:5 120 × 5 120)
Table 9 Times to finish the whole TerraSAR-X image (Block size: 5 120 × 5 120)

	文件创建、初始化等	计算时间	I/O 时间	总时间
CPU 串行/s	6.33	213.99	7.68	228
GPU/s	5.03	4.95	7.02	17
加速比/倍		43.2		13.4

以上实验结果说明,通过提高分块大小能优化 I/O 性能,能减少 I/O 操作所消耗的时间,提高整体性能。因此,在 GPU 存储空间允许的情况下,分块时尽量选择大块配置进行 GPU 支持的并行处理。

2.3 结果分析

根据以上实验结果,进行了深入的分析:

1)使用分块导入 GPU 进行遥感影像处理是一种实用的技术手段,分块时,数据块大到一定程度后,如 2 048 × 2 048 大小,针对本文采用的 GPU 加速卡,可充分发挥 GPU 计算能力,GPU 处理效率基本一致,两组数据计算加速比分别达到 39 倍和 43 倍。分析其原因是本文的 5 种块配置都能具有很高的 GPU 线程占有率,每个像素分配一个线程,每个数据块所需的线程个数远超于 GPU 所有 SM 最大驻留线程数的总和,充分发挥了 GPU 的计算性能。

2)因采用 GPU 并行只能减少计算时间,其他两部分时间不变,造成整体加速比明显下降,因此减少这两部分时间也能很好地提高性能,文件创建、程序初始化等时间已很难减少,I/O 读写能力通过一定的方法可以优化,通过大块读写提高了 I/O 性能,减少了 I/O 时间,提高了整体性能。分析其原因,SAR 影像进行大块连续读写时,块越大,中断的次数越少,其连续读写能力更强。

3)对比表 4 和表 5 发现,完成单块计算所用时间,RADARSAT-2 影像要大于 TerraSAR-X 影像,原因是 RADARSAT-2 影像数据块包含 2 个通道,2 个通道要进行 2 次插值(但只需一次有理函数计算、投影变换),且还进行了复数影像与幅度相位之间的转换,其计算量要大于 TerraSAR-X 影像数据块。但单块数据 RADARSAT-2 影像加速比却小于 TerraSAR-X 影像,原因是 RADARSAT-2 影像数据块需要在 GPU 和主机内存之间进行更多的数据交换,其交换的数据量是 TerraSAR-X 影像的 4 倍(通

道数和所用数据类型占有存储空间分别倍增)。

4)以 5 120 × 5 120 分块为例,比较表 7 和表 9 两个实验数据取得的整体加速比,可以看出 TerraSAR-X 影像整体加速比明显高于 RADARSAT-2 影像,主要原因是 CPU 串行处理时 TerraSAR-X 影像 I/O 时间占总的时间比例很小,而计算时间占总的时间却非常的高。因 GPU 并行处理并不能减少 I/O 时间,却能大幅减少计算时间,因此针对 CPU 串行处理计算时间占比高的应用,整体加速效果更好。比较两个实验数据,虽然两个实验数据需要进行的 I/O 量(输入输出文件大小)基本一致,但 RADARSAT-2 影像单个像素点占有存储空间是 TerraSAR-X 的 4 倍,RADARSAT-2 整景影像只有 9 244 × 8 762 个像素点要计算(每个像素点虽然包含两个通道,但只要进行一次有理函数计算和投影变换,两次插值计算,比 TerraSAR-X 影像像素点多出的运算量主要为一次插值运算,表 4 和表 5 结果显示,单块数据 RADARSAT-2 运算量约为 TerraSAR-X 的 1.3 ~ 1.4 倍),而 TerraSAR-X 整景影像有 14 337 × 21 719 个像素点要计算,TerraSAR-X 影像所需计算量远大于 RADARSAT-2 影像,且 TerraSAR-X 影像文件具有更高的读写性能(表 9 显示的 I/O 时间小于表 7)。

3 结 论

提出了 GPU 支持的 SAR 影像几何校正大规模并行处理方法,采用的 RPC 模型形式简洁,其并行处理方法易于实现,通用性好,可应用于几乎所有的星载 SAR 影像。提出的分块导入处理方法实用性强,不仅可满足大幅面 SAR 影像处理需求,还可充分发挥 GPU 强大的计算能力,通过实验显示其计算加速比可达 38 ~ 44 倍。通过深入分析发现计算时间占总的时间比例高的应用,整体加速效果更好。相同计算规模条件下,所需的 I/O 量越少越好,读写

性能越高越好。本文 5 种不同块大小配置可取得几乎一致的加速比,但大数据块配置具有更好的读写性能,可减少读写时间,提高了整体加速性能。因此,在实际应用 GPU 进行大数据量 SAR 影像处理时,尽可能选用显存大的 GPU 卡,尽量采用大数据块,通过选用性能更高的磁盘系统,优化影像文件组织等提高数据读写性能。

参考文献 (References)

- [1] Tao C V, Hu Y. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, 67(12): 1347-1358.
- [2] Toutin T. Review article: geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(10): 1893-1924.
- [3] Grodecki J, Dial G. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational functions [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, 69(1): 59-68.
- [4] Fraser C S, Dial G, Grodecki J. Sensor orientation via RPCs [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 60(1): 182-194.
- [5] Leberl F W. *Radargrammetric Image Processing* [M]. Norwood, MA: Artech House, 1990.
- [6] Konecny G, Schuhr W. Reliability of radar image data [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1988, 27(B1): 456-469.
- [7] Cheng C C, Zhang J X, Huang G M, et al. Range-Cocone equation with doppler parameter for SAR imagery positioning [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(6): 1444-1458. [程春泉,张继贤,黄国满,等. 考虑多普勒参数的 SAR 影像距离——共面方程及其定位 [J]. *遥感学报*, 2013, 17(6): 1444-1458.]
- [8] You H J, Ding C B, Fu K. SAR image localization using rigorous SAR collinearity equation model [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(2): 158-162. [尤红建,丁赤飏,付琨. SAR 图像对地定位的严密共线方程模型 [J]. *测绘学报*, 2007, 36(2): 158-162.]
- [9] Zhang G, Fei W B, Li Z, et al. Evaluation of the RPC model for spaceborne SAR imagery [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2010, 76(6): 727-733.
- [10] Huang G M, Yue X J, Zhao Z, et al. Block adjustment with airborne SAR images based on polynomial ortho-rectification [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(6): 569-572. [黄国满,岳昔娟,赵争,等. 基于多项式正射纠正模型的机载 SAR 影像区域网平差 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2008, 33(6): 569-572.]
- [11] Zhang L, He X Y, Balz T, et al. Rational function modeling for spaceborne SAR datasets [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(1): 133-145.
- [12] Zhang L, Balz T, Liao M S. Satellite SAR geocoding with refined RPC model [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 69(1): 37-49.
- [13] Zhang G, Li D R. The algorithm of computation RPC model's parameters for satellite imagery [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(12): 2080-2088. [张过,李德仁. 卫星遥感影像 RPC 参数求解算法研究 [J]. *中国图象图形学报*, 2007, 12(12): 2080-2088.] [DOI:10.11834/jig.20071208]
- [14] Habib A, Kim K, Shin S, et al. Comprehensive analysis of sensor modeling alternatives for high-resolution imaging satellites [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, 73(11): 1241-1251.
- [15] Zhang G, Li D R, Qin X W, et al. Geometric rectification of high resolution spaceborne SAR image based on RPC model [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(6): 942-948. [张过,李德仁,秦绪文,等. 基于 RPC 模型的高分辨率 SAR 影像正射纠正 [J]. *遥感学报*, 2008, 12(6): 942-948.]
- [16] Wei X H, Zhang L, He X Y, et al. Spaceborne SAR image geocoding with RFM model [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(5): 1094-1099. [魏晓红,张路,贺雪艳,等. 基于有理函数模型的星载 SAR 影像几何校正 [J]. *遥感学报*, 2012, 16(5): 1094-1099.]
- [17] Lee C A, Gasster S D, Plaza A, et al. Recent developments in high performance computing for remote sensing: a review [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(3): 508-527.
- [18] Xiao H, Zhang Z X. Parallel image matching algorithm based on GPGPU [J]. *Acta Geodaetica 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.]
- [19] Christophe E, Michel J, Inglada J. Remote sensing processing: from multicore to GPU [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(3): 643-652.
- [20] Reguera-Salgado J, Calvino-Cancela M, Martín-Herrero J. GPU geocorrection for airborne pushbroom imagers [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(11): 4409-4419.
- [21] Song C, Li Y, Huang B. A GPU-accelerated wavelet decompression system with SPIHT and reed-solomon decoding for satellite images [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(3): 683-690.
- [22] Tarabalka Y, Haavardsholm T V, Kåsen I, et al. Real-time anomaly detection in hyperspectral images using multivariate normal mixture models and GPU processing [J]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2009, 4(3): 287-300.

- [23] Bernabe S, Sanchez S, Plaza A, et al. Hyperspectral unmixing on GPUs and multi-core processors: a comparison [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(3): 1386-1398.
- [24] Balz T, Zhang L, Liao M. Direct stereo radargrammetric processing using massively parallel processing [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 79(1): 137-146.
- [25] Sahin H, Kulur S. Orthorectification by using GPGPU method [J]. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 2012, 1: 165-170.
- [26] Fang L, Wang M, Li D, et al. CPU/GPU near real-time preprocessing for ZY-3 satellite images: relative radiometric correction, MTF compensation, and geocorrection [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 87(1): 229-240.
- [27] Sun Y W, Liu B, Sun X L, et al. RFM-based fast geometric correction of satellite imagery jointly using CPU and GPU [C] // The 18th China Symposium on Remote Sensing. Beijing: Science Press, 2012: 716-723. [孙义威, 刘斌, 孙喜亮, 等. CPU/GPU 协同下基于 RFM 的卫星遥感影像快速几何校正 [C] // 第十八届中国遥感大会论文集. 北京: 科学出版社, 2012: 716-723.]
- [28] Liu B, Gong J Y, Jiang W S, et al. Improvement of the iteration by correcting characteristic value based on ridge estimation and its application in RPC calculating [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(4): 399-402. [刘斌, 龚健雅, 江万寿, 等. 基于岭参数的谱修正迭代法及其在有理多项式参数求解中的应用 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(4): 399-402.]
- [29] Nvidia. NVIDIA CUDA C Programming Guide, Version 4.0 [R]. Nvidia Corporation, 2011.
- [30] Nvidia. NVIDIA's Next Generation CUDA Compute Architecture: Fermi, V1.1 [R]. Nvidia Corporation, 2009.