CPU-GPU 异构系统在光学遥感影像处理中的应用

党源源，王 昕

(长春工业大学 计算机科学与工程学院，吉林 长春 130012)

摘 要： 近年来，CPU-GPU 异构系统在光学遥感影像数据处理领域的应用得到了广泛关注。首先介绍 CPU-GPU 异构系统的体系架构及发展历程。其次，介绍光学遥感影像数据处理流程。接下来，对 CPU-GPU 异构系统在光学遥感影像预处理、后续处理领域应用现状进行介绍。最后对 CPU-GPU 异构系统在光学遥感影像数据处理系统中的应用进行分析和总结，分析可知，CPU-GPU 异构系统在光学遥感影像数据处理领域应用具有可行性且前景广阔，但仍需解决算法并行化设计、优化及 CPU 和 GPU 负载平衡等关键问题，这对推动 CPU-GPU 异构系统在光学遥感影像数据处理中的应用具有重要意义。

关键词： 遥感影像数据处理； 异构系统； 并行处理； GPU

中图分类号： TP751 **文献标志码：** A **DOI：** 10.3788/IRLA20200092

Application of CPU-GPU heterogeneous system in optical remote sensing image processing

Dang Yuanyuan, Wang Xin

(Department of Computer Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: In recent years, the application of CPU-GPU heterogeneous system in the field of optical remote sensing image data processing has received wide attention. Firstly, the architecture and development of CPU-GPU heterogeneous system were introduced. Next, the process of optical remote sensing image data processing was introduced. Then, the application of CPU-GPU heterogeneous system in optical remote sensing image preprocessing, follow-up processing data processing was introduced. Finally, the application of CPU-GPU heterogeneous system in optical remote sensing image data processing system was analyzed and summarized. The analysis shows that the CPU-GPU heterogeneous system is feasible and has a wide prospect in the field of optical remote sensing image data processing, but still needs to solve the key problems such as parallelizing design and optimization of the algorithm, the load balance of CPU and GPU, which is of great significance to promote the application of the CPU-GPU heterogeneous system in the optical remote sensing image data processing.

Key words: remote sensing image data processing; heterogeneous system; parallel processing; GPU

收稿日期： 2020-05-11； **修订日期：** 2020-06-21

基金项目： 吉林省科技发展计划项目(20190302071GX)；吉林省科技发展计划基金(201215127)；吉林省教育厅科技规划项目(JYT2014-24)

作者简介： 党源源(1980-)，女，副教授，硕士，主要从事人工智能、图像处理方面的研究。Email: 39352307@qq.com

0 引 言

随着遥感技术的不断进步，星载光学遥感器向高空间/时间分辨率、宽覆盖、多源方向发展，为用户带来了更加多样化及更高质量的海量遥感影像数据，同时对于遥感数据的存储、传输、目标提取等处理和应用也带来了极大的挑战[1-3]。遥感卫星的星载数据处理平台以及地面接收和处理系统都需要具备很强的信息处理能力，以便提高遥感数据处理的时效性。在军事目标跟踪、灾害监测救援等高时效遥感应用领域，遥感数据处理只有在极短的时间内完成，才能满足用户应用的需求。如何实现对海量遥感数据的实时处理，如何充分利用如此多的光学遥感影像数据，以满足人们对高质量遥感影像的迫切需求以及对地物和天文观测数据智能化处理的需求，遥感影像数据处理平台的实时性成为了一个急需解决的关键问题。

现阶段，国际上解决海量数据计算和实时处理算法时主要采用以图形处理单元(GPU)为主的并行处理器方案。图形处理单元目前已广泛应用于图形处理以外的应用中，如天气预报、代数计算、地质勘探、遥感数据处理、人工智能、分子动力学模拟[4]等。CPU-GPU 异构系统作为当今高性能计算平台的典型代表具有很大的发展潜力，国防科技大学研制的“天河一号”超级计算机在国际上首次采用了 CPU-GPU 异构系统，其单精度浮点数处理能力达到 2566Tflops，在 2010 年“世界超级计算机 500 强”排行榜中排名第 1，在天气预报、海洋环境模拟以及航天等方面取得了显著成就。

文中阐述了 CPU-GPU 异构系统在光学遥感影像数据处理领域的应用进展。分析了目前存在的关键技术问题以及未来发展趋势。

1 CPU-GPU 异构系统的体系架构及发展历程

1.1 CPU-GPU 异构系统的体系架构

CPU-GPU 异构系统由 CPU 和 GPU 及其对应的存储器构成，CPU 和 GPU 通常通过 PCI-E 总线进行连接实现数据交互，CPU 和 GPU 以 DMA 的方式与其各自独立的内存和显存进行通信[5]。

在 CPU-GPU 异构系统中，CPU 主要完成具有较强逻辑性的事务计算以及大量的控制功能，而 GPU 则负责计算密集度高的通用并行计算任务。由于 CPU 和 GPU 承担了不同的功能，因此两者在硬件架构上有很大不同，CPU 的控制单元 (Control)设计较为复杂，为提高 ALU 的计算效率，设计了较大的缓存(Cache)来隐藏访问延迟。GPU 较大幅度地精简了控制单元并设计了成百上千个计算单元。GPU 与 CPU 在架构上最大区别就在于其设计了大量的计算单元且减少了大量的缓存，因此 GPU 的峰值计算能力远高于 CPU 的峰值计算能力。

并行计算采用多种计算资源提高处理能力并缩短计算时间。它把复杂任务分解成可由单个处理器来执行的若干个子任务协同求解同一个问题。并行计算平台、待处理的问题具有并行性和并行程序设计是开展并行计算工作的三个基本条件[6]。文中所讨论的 CPU-GPU 异构系统就是目前主流的并行计算平台之一。

通常采用绘制数据相关图的方法来寻找待处理问题是否具有并行性。数据相关图是一种有向图，其中的每个节点代表一项待处理任务，节点间的连线代表任务间的相互关系。各待处理任务间的并行性有三种模式，分别为数据并行、功能并行和流水线并行。

完成并行计算的最后一步就是进行并行程序设计，并行程序设计通常分为三个阶段：预评估、并行算法设计、性能优化[7]。上述三个阶段与所选用的并行计算平台密切相关，目前还不存在适用于所有并行计算平台的通用方法，其中性能优化是并行程序设计中的关键问题。

1.2 CPU-GPU 异构系统发展历程

随着频率墙、存储墙、功耗墙等问题的日益突出，单核 CPU 已很难再继续通过提高时钟频率来提升性能，因为器件在频率极限点上工作会产生大量的热耗，进而严重影响芯片的性能和寿命[8-9]。而且单核 CPU 在指令级并行性能上的提升也已接近其极限。因此，处理器生产商开启了从处理器单核体系结构向多核体系结构以及众核体系结构的演变。

英伟达(NVIDIA)公司于 2007 年推出了计算机统一

设备架构(Computing Unified Device Architecture, CUDA)平台,自此 CPU–GPU 异构系统逐渐得到大众广泛认可,亦从学术界走向了工业界。CUDA 与传统的 GPGPU(基于 GPU 的通用计算)开发方式不同,这是一种不需要借助图形学的 API,支持 OpenCL、OpenGL 等计算接口,同时还支持 MATLAB、Python、Java 等工具,因此大大节省了开发时间和开发成本[10-13]。

CPU–GPU 异构系统在 CUDA 推出后得到了广泛应用,目前已应用于 3D 图像的加速渲染、鱼类 DNA 测序、预测蛋白质的原生构象、基于 CT 和 MRI 影像的医学仿真分析、流体动力学仿真、神经网络训练、人脸识别等诸多领域。

2 光学遥感影像数据处理流程

根据光学遥感影像数据处理流程,将光学遥感影像划分为 4 级产品:0 级产品是最初的原始二进制数据;1 级产品是经过辐射校正处理后的辐射校正产品;2 级产品是经过辐射校正处理和系统几何校正处理后的几何校正产品;3 级产品是采用地面控制点进行几何精校正后的几何精校正产品;4 级产品是采用地面控制点和数字高程模型(DEM)进行校正后的正射校正产品。

光学遥感影像的处理通常包括预处理和后续处理两个阶段,其中预处理包括传感器辐射处理(相对辐射校正和影像复原)、传感器几何校正、系统几何校正、控制点匹配等,后续处理包括图像融合、图像分割、场景分类、目标识别和目标检测等[14-16]。

2.1 相对辐射校正

相对辐射校正又称为均匀化校正,目的是为了消除由于传感器像元的响应不一致引起的辐射不均匀效应,是对遥感影像原始数字计数值进行“再”量化的一种处理过程。相对辐射校正是各类其它辐射校正的基础[17-18]。

相对辐射校正自提出至今已历经 30 余年,目前已形成了几十种不同的方法和算法,北京大学的段依妮等对这些方法进行了分类和比较,并且对各种校正方法的适用性、存在的问题、发展趋势及评价体系等进行了系统性研究[19]。

2.2 影像复原

光学遥感卫星在成像过程中受到卫星平台颤震、大气扰动、探测器性能下降、光学系统像差、随机噪声等因素出现分辨率降低和影像细节模糊的问题。为了补偿成像过程中影像的退化效应,需要进行影像复原[20-22]。光学遥感卫星实际成像过程中影像的退化模型如公式(1)所示:

$$g(x,y)=h(x,y)\cdot f(x,y)+n(x,y) \tag{1}$$

式中:$h(x,y)$为点扩散函数(PSF);$f(x,y)$为点脉冲;$n(x,y)$为随机噪声。从公式(1)可以看出,光学遥感影像质量退化模型化为退化函数的卷积过程和噪声的引入过程。

遥感影像复原是遥感影像质量退化的逆过程,其主要方法分为两类,第一类称为盲复原,即对影像在 PSF 未知的情况下进行复原,如娄帅等提出的基于 Contourlet 变换的迭代图像复原算法[23],汪雪林等提出的基于小波域隐马尔可夫树模型的图像复原[24];第二类是基于退化模型和知识进行图像重建的复原方法,调制传递函数(MTF)补偿法是其典型代表[25-27]。第一类方法不需要大量的先验知识,但是存在计算量大、算法复杂、收敛速度慢等问题。第二类方法避免了第一类方法的缺点,在遥感影像复原中得到了广泛应用。

2.3 几何校正

光学遥感器在轨运行时由于受到卫星位置和运动状态变化、地球自转、地球表面曲率、地形起伏以及大气折射等的影响,光学遥感影像会产生几何变形[28-30]。光学遥感影像几何校正的目的是校正原始图像的几何变形,消除畸变误差,产生一幅符合某种地图投影或图形表达要求的新图像,实现影像精确地理编码。

2.4 影像融合

遥感影像融合技术是指将多种类型传感器所获得的数据中包含的信息进行优化组合,挖掘数据中有用信息,剔除或抑制无用信息,提高目标识别的准确率和鲁棒性。遥感影像融合根据信息表征层次的不同可分为像素级融合、特征级融合和决策级融合。像素级融合保持影像细节能力强,实现代价小,但计算量大、抗干扰能力和分析能力差;决策级融合计算量小、实现代价高,但产品具有很强的分析能力和抗

干扰能力,其细节信息保持能力差。

2.5 目标识别

遥感影像目标识别在军事目标定位、自然灾害的预防、自然资源的勘探以及环境监测等方面有着重要的作用。主要的识别方法有:分形模型、模糊理论、支持向量机(Support Vector Machine,SVM)、分类判决树、粗糙集理论[31]及概率生成模型等。上述方法存在着人工提取特征方法鲁棒性方面效果欠佳、基于预设特征模型准确性低、特征模型固化、难以提高模型的表达能力、难以提取目标高层抽象信息的缺点。同时,由于遥感数据量不断增加、目标轮廓模糊、遥感影像杂波干扰较大、特征不明显等为遥感影像目标识别提出了新的挑战[32-33]。具有深层次结构的深度学习能够充分挖掘数据之间的关联,通过模拟人脑机制来解释数据,在智能识别方向具有很强的优越性,可以实现对影像特征分层提取,解决了传统特征提取面临的问题。

3 CPU-GPU 异构系统在光学遥感影像数据处理领域应用现状

3.1 CPU-GPU 异构系统在光学遥感影像预处理中的研究现状

光学遥感影像的预处理是后续处理和应用的基础,其处理的精度、质量和时间对最终产品的影响甚大。近年来,由于 CPU-GPU 异构系统在高性能计算领域的卓越表现,相关学者和科研人员也将其引入了光学遥感影像的预处理领域,开展了大量的研究工作,接下来分别就 CPU-GPU 异构系统在遥感影像的几何校正、影像复原及波段配准等预处理领域的应用现状进行阐述和总结。

首先介绍在几何校正领域的研究现状。德国宇航中心将基于数据分块的多线程技术应用到遥感影像的正射校正处理算法中,首先将遥感影像数据划分为一系列的图像帧,然后由 GPU 处理每一帧的图像及其参数,最后 GPU 将高速处理完的数据返回至 CPU 后继续处理下一帧数据,以此流程实现遥感影像数据的实时处理[34]。侯毅等使用 GPU 通用计算技术实现了遥感影像正射校正的并行处理,并验证了其效率和正确性,证明了技术可行性[35]。杨靖宇等采用 CPU-GPU 异构平台对遥感影像的正射校正方法进行了初步研究,采用执行配置优化技术提高了 Warp 占有率,同时采用共享存储器优化技术缩短了 GPU 的处理时间,但由于所采用的硬件平台所限,未对主流 GPU 硬件架构的性能优化手段进行深入研究,且未充分发挥 CPU 的计算能力[33]。吴敌等开展了基于 GPU 的遥感图像几何校正算法设计与实现,实验选取了巴遥一号卫星的图像数据进行处理,对比使用 CPU-GPU 架构进行加速处理之后所用的时间和没有使用 GPU 加速处理所用的时间,得出使用 GPU 进出并行化处理数据,可以显著提高重采样的计算速度,图像分辨率越高越明显,对于低分辨率影像,因为显存和内存数据之间的拷贝占用了一定的时间,所以对比效果不明显的结论[36]。

接下来介绍在波段配准领域的研究现状。Ashutosh Gupta 等人以 GPU 作为处理器采用数据分块的多线程技术实现了遥感影像匹配,大大提高了数字高程模型生成算法中分层阴影匹配技术的计算性能,在实验中分别采用了具有不同线程的 CPU 和英伟达公司不同型号的 GPU 进行数据处理,实验结果显示,众核 GPU 与单线程的 CPU 相比,加速比能达到 138 倍,与 32 线程的CPU 相比,加速比为 5.2 倍[37]。周海芳等研究了基于 GPU 实现遥感图像配准算法,选取了基于互信息小波分解配准算法进行 GPU 并行设计,采用面向存储级的优化策略应用于 GPU 程序,利用 CUDA 平台在 GPU 上进行了实验,最大加速比达到了 19.9 倍,实验结果证明 GPU 在遥感影像配准算法实现上的可行性并具有广阔的应用前景[38]。

方留杨深入研究了基于 CPU-GPU 异构系统环境下光学卫星遥感数据高性能处理的理论和方法,首先详细分析了遥感影像预处理流程中各类算法的计算量和并行度,确定将 MTF 补偿、波段配准等计算量大且并行程度高的算法映射至 GPU 执行。然后结合 GPU 硬件和各算法的固有特点,研究和设计了访存优化、指令优化和传输计算堆叠 3 种性能优化策略对算法性能进行优化。最后选用资源三号卫星影像在 CPU-GPU 异构平台上对算法的性能进行了实验和验证,结果表明,4 种瓶颈算法经并行优化后的运行时间明显缩短,加速比为 32~90 倍,运行时间从 102.19~942.72 s 缩短至 1.54~12.87 s[18]。WANG

M 等研究了采用多 GPU 系统进行高分辨率光学遥感影像 MTFC 和地形整流两种耗费时间较多的算法的加速问题，通过 GPU 加速，最终达到了 MTFC 算法 102.9 倍的加速比以及地形整流算法 184.2 倍的高加速比[39]。

目前，CPU-GPU 异构系统在光学遥感影像预处理领域主要用于遥感影像的几何校正、影像复原以及波段配准等具有较大计算量且存在计算并行性的处理算法中，通过发挥 GPU 的并行计算能力，获得了较高的加速比，大大缩短了处理时间，提高了光学遥感影像预处理的时效性。然而在 CPU 与 GPU 的“协同”计算方面还有大量的工作要做，如何在充分发挥 GPU 的并行计算能力的同时，最大化发挥出 CPU 的计算能力，并实现 CPU 和 GPU 的计算负载平衡，最终实现系统级的性能最优是后续在该领域的研究重点和难点工作。

3.2 CPU-GPU 异构系统在光学遥感影像后续处理中的研究现状

CPU-GPU 异构系统在光学遥感影像后处理过程中也得到了大量的应用，特别是在光学遥感影像融合和目标识别的处理中发挥了重要的作用，接下来将分别对异构系统在影像融合和目标识别及分类领域的应用及研究现状进行阐述和分析。

首先介绍 CPU-GPU 异构系统在遥感影像融合领域的研究现状。赵进等采用 CPU-GPU 异构平台，利用英伟达公司的 CUDA 编程框架，将像素级融合的 BROVEY 变换和 YIQ 变换融合算法进行了并行研究和实验，实验结果表明，GPU 并行处理能够很好地应用于遥感图像融合算法，随着算法复杂度和问题规模愈大，GPU 的加速性能愈佳[40]。周嘉男实现了基于 GPU 的遥感影像融合重采样方法，提出了影像边缘增强算法的 CPU-GPU 协同处理方法；对于大影像融合处理，设计了利用 GPU 算法库进行加速处理的影像融合并行处理框架，提出了 HPF 融合算法和 HCS 融合算法的 GPU 并行处理方法，并采用高分一号和高分二号的全色影像进行了实验验证，验证结果显示，基于 GPU 的 HPF 影像融合算法处理影像大小为 512×512 时，与 CPU 处理相比，其加速比为 33.91；当处理影像大小为 8 192×8 192 时，其加速比为 56.57[41]。卢俊等研究了基于 GPU 的遥感影像 IHS 融合算法，把 IHS 的正反变换映射到 GPU 中进行计算，当图像大小达到 2 048×2 048 时，采用 GPU 时比采用 CPU 时的算法速度提高 4 倍，但由于其所选硬件平台性能较低，也未采用 CUDA 平台进行开发，因此实验结果未能充分发挥出主流 GPU 的性能 [42]。徐如林等研究了基于 GPU 的遥感图像 IHS 小波融合并行算法设计与实现，提出了适合融合执行流的并行映射模型，针对所选 GPU 平台，在数据传输、循环优化和线程设计方面进行了优化并进行了实验验证，最大加速比为 114 倍，证明了 GPU 通用计算在遥感影像融合领域具有广阔的应用前景[43]。

从上述研究成果可以看出，由于像素级融合算法的计算量大，且其算法具有数据并行性的特点，因此采用 CPU-GPU 异构系统可以大幅度提升融合的速度。

接下来介绍 CPU-GPU 异构系统在遥感图像目标识别及分类领域的研究现状。遥感图像的目标识别是从图像中提取出感兴趣的目标并对其进行正确的标识分类。近年来，随着深度学习在图像识别和语音识别领域取得的巨大成就，在遥感图像目标识别领域中也有了逐步的应用，CPU-GPU 异构系统凭借其卓越的并行计算能力在遥感影像目标识别领域也显示了较大的优势。张帆对海上光学遥感图像目标识别与 GPU 并行加速进行了研究，采用 CUDA 架构，利用 CPU-GPU 异构系统协同完成并行处理工作，CPU 负责控制逻辑执行，在 GPU 上由内核函数负责海陆分割和边缘检测两个方面算法的并行计算，通过实验验证，海陆分割算法分别在 CPU 上串行执行和 GPU 上并行执行时，当处理图像大小为 1 024×1 024 时，GPU 的加速比为 13；当处理图像大小为 2 048×2 048 时，加速比为 18；当处理图像大小为 4 096×4 096 时，加速比为 13.6。边缘检测算法分别在 CPU 上串行执行和 GPU 上并行执行时，当处理图像大小为 2 048×2 048 时，其加速比为 19.28[44]。

郑济达研究了基于 CPU-GPU 异构系统的高光谱图像分类与目标检测，设计了基于 CPU-GPU 异构系统的并行优化方法，利用 Visual Studio/MFC 设计开发了基于 GPU 并行优化的高光谱图像分类与

目标检测系统软件,利用 CPU 的强逻辑控制能力和 GPU 高并行计算能力，通过优化大数据矩阵运算、结合 CUDA 下核函数进行子任务划分和存储器优化策略、减少 CPU 与 GPU 设备之间的交互时间占比，证明了引入 GPU 可以有效提升原有算法的执行效率[45]。许宁等采用 GPU 基于 IDL 语言对高光谱遥感影像分类中常用的 SAM(光谱角制图)、PPI(像元纯净指数)等处理算法进行并行处理,设计验证流程，实验结果表明，采用单颗 GPU 的工作站在处理 SAM 和 PPI 算法方面与 CPU 相比,其平均效率可提高 10 倍左右[46]。汤媛媛等基于 CPU-GPU 异构系统实现了高光谱遥感影像 MNF 降维的并行化,实验取得了 61.8 的最大加速比，验证了 CPU-GPU 异构系统在高光谱遥感领域的发展潜力 [47]。方民权基于 CPU-GPU 异构系统对高光谱遥感影像线性降维并行算法进行了研究与实现[48]。宋义刚等基于 GPU 对高光谱遥感图像的 PPI 进行了并行优化设计，提出了一种基于矩阵乘法的 GPU 并行优化算法,加速比达到 634 倍[49]。俞潮音结合 GPU/CUDA 架构,采用了基于离散粒子群的高光谱端元提取的并行处理算法,针对 DPS0 算法中含有大量矩阵运算,例如矩阵乘法、矩阵求逆、矩阵求和等在 CPU 上耗时较高的部分借助 CULA 库、CUBLAS 库以及编写相应的核函数,进行了并行化处理,通过实验,可以达到近 3 倍加速比[50]。甘继生在对广义组合核架构分类原理深入研究的基础上，详细学习了空间信息建模并设计了串行的广义组合核高光谱分类算法，最后分别基于 CUDA/CULA 对广义组合核函数并行进行了相应的优化，对 LORSAL 分类算法进行了并行化设计并进行了相应的优化计算，对多项式逻辑回归进行并行化设计并优化,然后利用 MFC 设计了实时分类系统,通过实验,加速比可达 7.26 倍,达到了良好的实时分类效果[51]。

目前基于 CPU-GPU 异构系统的高光谱遥感影像数据处理所存在的主要问题有:(1) 高光谱遥感算法实现时并未充分考虑数据的高维特征,因此存在着一定的局限性;(2) 并行算法设计时未考虑像元间及波谱间的数据关联性,从而影响了并行加速效果;(3) 目前的并行算法设计充分体现了 GPU 卓越的加速性能,对于算法和存储策略的优化研究不够深入。

4 关键技术问题

CPU-GPU 异构系统在光学遥感数据处理中已得到了广泛的关注并开展了大量的研究工作，利用 GPU 的并行计算能力在光学遥感影像的预处理及后续处理中已发挥了重要作用,大大缩短了处理时间,提升了处理效率。然而还需要解决如下几个技术难题,才能使其得到更加广泛的应用,取得更加突出的成绩。

(1) 要充分发挥异构系统中各处理器的能力,详细分析光学遥感影像数据处理算法与处理器的适应性,使得 CPU 和 GPU 皆能高效工作;

(2) 加强算法的优化工作,并行化算法的设计与所选的处理器和平台密切相关，要结合处理器和平台的特点进行算法的优化，缩短处理器之间的通信时间和访存延迟;

(3) 要解决处理器之间的负载平衡问题。

5 未来发展趋势

目前光学遥感影像的数据处理工作都是由地面系统完成，受制于天地链路通信资源的约束以及处理平台处理能力的限制，遥感影像处理的实时性较差。采用 CPU-GPU 异构系统搭建星载光学遥感影像数据处理平台，实现光学遥感影像的在轨实时处理与目标识别技术，将会极大地提高数据处理的时效性，也会大大提升遥感卫星的自主性和智能化水平。为此需要研究 CPU-GPU 异构系统的空间环境适应性以及节能技术,以满足空间产品高可靠、低功耗的需求。

参考文献:

[1] Gong Dun. Review on mapping space remote sensor optical system [J]. ***Chinese Optics***, 2015, 8 (5): 714-724. (in Chinese)
巩盾. 空间遥感测绘光学系统研究综述 [J]. 中国光学, 2015, 8(5): 714-724.

[2] Li Deren, Tong Qingxi, Li Rongxing. Current issues in high-resolution Earth observation technology [J]. ***Sci China Earth***

Sci, 2012, 42(6): 805-813. (in Chinese)
李德仁, 童庆禧, 李荣兴. 高分辨率对地观测的若干前沿科学问题[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(6): 805-813.

[3] Li Deren, Wang Mi, Shen Xin, et al. From earth observation satellite to earth observation brain [J]. ***Geomatics and Information Science of Wuhan University***, 2017, 42 (2): 143-149. (in Chinese)
李德仁, 王密, 沈欣, 等. 从对地观测卫星到对地观测脑[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(2): 143-149.

[4] Stone J, Phillips J, Hardy D. Accelerating molecular modeling applications with graphics processors [J]. ***Journal of Computational Chemistry***, 2007, 28(16): 2618-2640.

[5] Lin Yisong, Yang Xuejun, Tang Tao. An integrated energy optimization approach for CPU-GPU heterogeneous systems based on critical path analysis [J]. ***Chinese Journal of Computers***, 2012, 35(1): 123-133. (in Chinese)
林一松, 杨学军, 唐滔. 一种基于关键路径分析的 CPU-GPU 异构系统综合能耗优化方法 [J]. 计算机学报, 2012, 35(1): 123-133.

[6] Yang Jingyu. Study on parallel processing technologies of photogrammetry data based on GPU [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2011. (in Chinese)
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: 解放军信息工程大学, 2011.

[7] Bai Hongtao. Research on high performance parallel algorithms based on GPU [D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
白洪涛. 基于 GPU 的高性能并行算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.

[8] Chen Dongdong. Research on performance optimization of CPU-GPU heterogeneous platform and its application in real-time signal simulation technologies [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
陈冬冬. CPU-GPU 异构平台的性能优化研究及其在实时信号模拟技术中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

[9] Zhang Fan, Han Shukui, Zhang Liguo. Parallel acceleration of Canny algorithm based on GPU [J]. ***Chinese Optics***, 2017, 10(6): 737-743. (in Chinese)
张帆, 韩树奎, 张立国. Canny 算法的 GPU 并行加速[J]. 中国光学, 2017, 10(6): 737-743.

[10] Luebke D. Cuda: Scalable parallel programming for high-performance scientific computing [C]//5th IEEE International Symposium on Digital Object Identifier. IEEE, 2008: 836-838.

[11] Harish P, Narayanan P J. Accelerating large graph algorithm on the GPU using CUDA [C]//International Conference on High-Performance Computing. Berlin Heidelberg: Springer, 2007: 197-208.

[12] Du P, Weber R, Luszczek P, et al. From CUDA to Open CL: Towards a performance-portable solution for multi-platform GPU programming [J]. ***Parallel Computing***, 2012, 38(8): 391-407.

[13] Xu Xuegui, Zhang Qing. Efficiency processing parallel remote sensing imagery using CUDA [J]. ***Geospatial Information***, 2011, 9(6): 47-53. (in Chinese)
许雪贵, 张清. 基于 CUDA 的高效并行遥感影像处理[J]. 地理空间信息, 2011, 9(6): 47-53.

[14] Fang Liuyang. Research on CPU/GPU cooperative high performance processing for optical satellite remote sensing data [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015. (in Chinese)
方留杨. CPU/GPU 协同的光学卫星遥感数据高性能处理方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.

[15] Fang Liuyang, Wang Mi, Li Deren. A workload-distribution based CPU/GPU MTF compensation approach for high resolution satellite images [J]. ***Acta Geodaetica et Cartographica Sinica***, 2014, 43(6): 598-606. (in Chinese)
方留杨, 王密, 李德仁. 负载分配的 CPU/GPU 高分辨率卫星影像调制传递补偿方法 [J]. 测绘学报, 2014, 43(6): 598-606.

[16] Fang Liuyang, Wang Mi, Li Deren. A CPU-GPU coprocessing orthographic rectification approach for optical satellite imagery [J]. ***Acta Geodaetica et Cartographica Sinica***, 2013, 42(10): 668-675. (in Chinese)
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(10): 668-675.

[17] Dinguirard M, Slater P N. Calibration of space-multispectral imaging sensors: a review. [J]. ***Remote Sensing of Environment***, 1999, 68(3): 194-205.

[18] Wang J N, Gu X F, Ming T, et al. Classification and gradation rule for remote sensing satellite data products. [J]. ***Journal of Remote Sensing***, 2013, 17(3): 566-577.

[19] Duan Yini, Zhang Lifu, Yan Lei. Relative radiometric correction methods for remote sensing images and their applicability analysis [J]. ***Journal of Remote Sensing***, 2014, 18(3): 607-617. (in Chinese)
段依妮, 张立福, 晏磊. 遥感影像相对辐射校正方法及适用性研究[J]. 遥感学报, 2014, 18(3): 607-617.

[20] Xu L, Zheng S, Jia J Y. Unnatural l0 sparse representation for natural image deblurring [C]//Computer Vision and Pattern Recognition, 2013 IEEE Conference on, 2013: 1107-1114.

[21] Wang Guodong, Xu Jie, Pan Zhenkuan. Blind image restoration based on normalized hyper laplacian prior term [J]. ***Opt Precision Eng***, 2013, 21 (5): 1340-1348. (in Chinese)
王国栋, 徐洁, 潘振宽. 基于归一化超拉普拉斯先验项的运动模糊图像盲复原 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(5): 1340-1348.

[22] Yan Jingwen, Peng Hong, Liu Lei. Remote sensing image restoration based on zero-norm regularized kernel estimation [J]. ***Opt Precision Eng***, 2014, 22 (9): 2572-2579. (in Chinese)
闫敬文, 彭鸿, 刘蕾. 基于 L0 正则化模糊核估计的遥感图像复原[J].光学 精密工程, 2014, 22(9):2572-2579.

[23] Lou Shuai, Ding Zhenliang, Yuan Feng. Iterative image restoration algorithm based on contourlet transform [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2009, 29(10): 2768-2773. (in Chinese)
娄帅, 丁振良, 袁峰. 基于 Contourlet 变换的迭代图像复原算法[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2768-2773.

[24] Wang Xuelin, Zhao Shubin, Peng Silong. Image restoration based on wavelet-domain hidden Markov tree model [J]. ***Chinase J Computers***, 2005, 28(6): 1006-1012. (in Chinese)
汪雪林, 赵书斌, 彭思龙. 基于小波域隐马尔可夫树模型的图像复原[J]. 计算机学报, 2005, 28(6): 1006-1012.

[25] Zhang Peng, Liu Tuanjie, Wang Hongqi. MTF estimation based on system model for linear CCD camera and image recovery [J]. ***Optical Technique***, 2009, 35(3): 394-398. (in Chinese)
张朋, 刘团结, 王宏琦. 线阵 CCD 相机 MTF 的系统模型估计法与图像复原[J]. 光学技术, 2009, 35(3): 394-398.

[26] Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun. MTF calculation and image restoration based on slanted-edge method[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2010, 30(10): 2891-2897. (in Chinese)
李铁成, 陶小平, 冯华君. 基于倾斜刃边法的调试传递函数计算机图像复原[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2891-2897.

[27] Gu Hangfa, Li Xiaojun, Min Xiangjun. On-orbit MTF estimation and MTF compensation of CCD camera in CBERS-02 satellite [J]. ***Science in China Series E Information Sciences***, 2005, 35(1): 26-40. (in Chinese)
顾行发, 李小军, 闵祥军. CBERS-02 卫星 CCD 相机 MTF 在轨测量及图像 MTF 补偿 [J]. 中国科学: 信息科学, 2005, 35(1): 26-40.

[28] 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. (in Chinese)
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.

[29] Yang Jingyu, Zhang Yongsheng, Li Zhengguo. GPU-CPU cooperate processing of RS image ortho-rectification [J]. ***Geomatics and Information Science of Wuhan University***, 2011, 36(9): 1043-1046. (in Chinese)
杨靖宇, 张永生, 李正国. 遥感影像正射纠正的 GPU-CPU 协同处理研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36 (9): 1043-1046.

[30] Wang Chunyuan. Research on geometric correction and object recognition for remote sensing image [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
王春媛. 遥感图像几何校正及目标识别技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

[31] Chunyan L, Huanxin Z, Hao S, et al. Combing rough set and RBF neural network for large-scale ship recognition in optical satellite images [J]. ***Bulletin of Sport Science & Technology***, 2014, 17(1): 682-691.

[32] Zhang Risheng, Zhang Yanqin. Study on high-resolution remote sensing image recognition and classification based on deep learning [J]. ***Information & Communications***, 2017(1): 110-111. (in Chinese)
张日升, 张燕琴. 基于深度学习的高分辨率遥感图像识别与分类研究[J]. 信息通信, 2017(1): 110-111.

[33] Long Siyuan, Zhang Bao, Song Ce. Object detection based on improved speeded-up robust features [J]. ***Chinese Optics***, 2017, 10(6): 719-725. (in Chinese)
龙思源, 张葆, 宋策. 基于改进的加速鲁棒特征的目标识别[J]. 中国光学, 2017, 10(6): 719-725.

[34] Thmoas U, Kurz F, Rosenbaum, et al. CPU-based orthorectification of digital airborne camera images in real time [C]//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, XXXVII(B1): 589-594.

[35] Hou Yi, Shen Yannan, Wang Ruisuo. The discussion of GPU-based digital differential rectification [J]. ***Modern Surveying and Mapping***, 2009, 32(3): 10-11. (in Chinese)
侯毅, 沈彦男, 王睿索. 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.

[36] Wu Di, Wang Hongqiang, Zou Tongyuan. Design and implementation of GPU-based analog image geometric correction algorithm [J]. ***Information and Computer (Theoretical Edition)***, 2020, 32(3): 38-40, 43. (in Chinese)
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(理论版), 2020, 32(3): 38-40, 43.

[37] Ashutosh G S, Devakanth N T P, Srinivasan B G K. A

GPU based image matching approach for DEM generation using stereo imagery[C]//2011 Nirma University International Conference on Engineering, 2011: 1-5.

[38] Zhou Haifang, Zhao Jin. Parallel programming design and storage optimization of remote sensing image registration based on GPU [J]. ***Journal of Computer Research and Development***, 2012, 49(S): 282-286. (in Chinese)
周海芳, 赵进. 基于 GPU 的遥感图像配准并行程序设计与存储优化[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(S): 282-286.

[39] Wang M, Fang L Y, Li D, et al. Using multiple GPUs to accelerate MTF compensation and georectification of high-resolution optical satellite images [J]. ***IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing***, 2015, 10(8): 4952-4972.

[40] Zhao Jin, Liu Changming, Song Feng. Study of remote sensing image fusion parallel algorithms based on GPU [J]. ***Microcomputer & Its Application***, 2013, 32(6): 35-37. (in Chinese)
赵进, 刘昌明, 宋峰. 基于 GPU 的遥感图像融合并行算法研究[J]. 微型机与应用, 2013, 32(6): 35-37.

[41] Zhou Jianan. Study on image fusion for remote sensing based on GPU [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
周嘉男. 基于 GPU 的遥感影像融合方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.

[42] Lu Jun, Zhang Baoming, Huang Wei. IHS transform algorithm of remote sensing image data fusion based on GPU [J]. ***Computer Engineering***, 2009, 35(7): 261-263. (in Chinese)
卢俊, 张保明, 黄薇. 基于 GPU 的遥感影像数据融合 IHS 变换算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(7): 261-263.

[43] Xu Rulin, Zhou Haifang, Jiang Jingfei. Design and implementation of a parallel algorithm of the HIS and Wavelet based image fusion for remote sensing based on GPU [J]. ***Computer Engineering & Science***, 2012, 34(8): 135-141. (in Chinese)
徐如林, 周海芳, 姜晶菲. 基于 GPU 的遥感图像 IHS 小波融合并行算法设计与实现 [J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(8): 135-141.

[44] Zhang Fan. Target recognition and parallel acceleration with GPU in marine remote sensing image[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
张帆. 海上光学遥感图像目标识别与 GPU 并行加速[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.

[45] Zheng Jida. Hyperspectral image classification and target detection based on GPU [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016. (in Chinese)
郑济达. 基于 GPU 的高光谱图像分类与目标检测 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.

[46] Xu Ning, Xiao Xinyao, Hu Yuxin. Validation and analysis of high performance computer on hyperspectral imagery based on GPU [J]. ***Journal of Geomechanis***, 2015, 21 (2): 190-198. (in Chinese)
许宁, 肖新耀, 胡玉新. GPU 用于高光谱数据高性能计算的应用实践与分析[J]. 地质力学学报, 2015, 21(2): 190-198.

[47] Tang Yuanyuan, Zhou Haifang, Fang Minquan. Hyperspectral remote sensing image data processing on GPU [J]. ***Information Security and Technology***, 2015, 43 (2): 46-51. (in Chinese)
汤媛媛, 周海芳, 方民权. 基于 GPU 的高光谱遥感影像数据处理[J]. 信息安全与技术, 2015, 43(2): 46-51.

[48] Fang Minquan. Parallel algorithm re-search and realization of linear dimensionality reduction for hyperspectral image on CPU/GPU [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
方民权. CPU/GPU 异构系统下高光谱遥感影像线性降维并行算法研究与实现[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.

[49] Song Yigang, Ye Shun, Wu Zebin. Parallel optimization of pixel purity index algorithm based on GPU for hyperspectral remote sensing image [J]. ***Spacecraft Recovery & Remote Sensing***, 2014, 35(4): 74-80. (in Chinese)
宋义刚, 叶舜, 吴泽彬. 基于 GPU 的高光谱遥感图像 PPI 并行优化[J]. 航天返回与遥感, 2014, 35(4): 74-80.

[50] Yu Chaoyin. Parallelization of end element extraction algorithm for hyperspectral images of discrete particle swarm optimization based on GPU [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2018. (in Chinese)
俞潮音. 基于 GPU 的离散粒子群高光谱图像端元提取算法并行化研究[D].重庆: 重庆邮电大学, 2018.

[51] Gan Jisheng. Parallel classification of hyperspectral image GPU based on generalized combinatorial core [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
甘继生. 基于广义组合核的高光谱图像 GPU 并行分类[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.