

基于 CUDA 的干涉型高光谱实时光谱复原处理技术

杨仁忠¹, 陈敏浩^{1,2}, 石 璐¹

(1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:随着干涉成像技术的发展, 卫星地面处理系统对干涉型高光谱数据的应用提出了实时光谱复原处理及快速成像显示的需求。针对干涉型高光谱图像数据码速率高、可并行处理性强等特点, 将干涉型高光谱复原处理算法与新兴的 CUDA 技术相结合, 进行了算法应用研究与软件设计, 实现了干涉型高光谱实时光谱复原处理技术。实验结果表明, 基于 CUDA 的干涉型高光谱数据的光谱复原处理技术能够满足地面应用系统的需求。

关键词:干涉型高光谱; 实时光谱复原处理; CUDA

中图分类号: TP 75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2011)04-0420-06

1 引言

高光谱遥感, 即高光谱分辨率遥感, 指利用很多很窄的电磁波波段(通常 $<10\text{ nm}$)从感兴趣的物体获取有关数据^[1]。高光谱遥感发展至今, 其应用已经进入多个领域, 在农业、海洋、环境与灾害监测、大气探测以及军事应用等领域具有广泛的应用。

高光谱数据来自于成像光谱仪, 光谱仪主要分为色散型成像光谱仪和干涉型成像光谱仪。干涉型成像光谱仪已经成功应用于航天航空遥感, 成为一种极具发展潜力的新型成像光谱技术。我国于2008年9月发射了环境与灾害监测预报小卫星 HJ-1A, 星上搭载的高光谱成像仪(HSI)是我国自主研发的干涉型成像光谱仪^[2]。

卫星地面系统接收干涉型高光谱数据后, 需要对数据进行光谱复原处理, 进行快视以实现质量检测, 并及时生成高光谱图像产品。与传统的 CPU 计算处理相比, GPU(Graphic Process Unit)计算处理具有更强的优势, 其强大的并行处理能力和高效的数据传输能力, 适用于具有大数据量、高并行性、高计算密度等特点的干涉型高光谱实时光谱复原处理^[3]。

根据以上的需求和基础, 对基于 CUDA 的干涉型高光谱数据实时光谱复原技术进行研究, 充分利用 GPU 的硬件资源进行并行计算, 以满足卫星地面系

统对干涉型高光谱卫星数据处理的要求。

2 现有光谱复原处理技术

干涉型成像光谱仪主要依据傅立叶变换光谱学原理, 采集目标地物的干涉图像, 从干涉图像抽取目标的点干涉序列, 对点干涉序列进行傅立叶变换等运算得到该目标的光谱信息。干涉型成像光谱仪获取的数据量非常大, 处理系统一般将实时获取的干涉图像数据进行数据压缩及存储, 后期再对其进行光谱复原处理。这种工作方式固然有其优点, 但对军事侦查等实时应用显得过于迟缓。如能将光谱复原处理实时化, 实时获得目标的光谱特征, 将为基于光谱的目标实时探测和识别等应用场合奠定良好基础, 具有重要的现实意义。

在卫星地面系统中, 地面天线接收来自高光谱遥感卫星的信号, 将信号送至记录设备中进行信号解调、数据采集等处理形成下行数据。通过计算机网络, 下行数据被发送至异地的数据处理设备。

数据处理设备需要对干涉型高光谱卫星的下行数据进行一系列处理。首先对下行数据进行帧同步得到固定格式的有效数据。对帧同步后的有效数据进行对应的解扰解压处理, 形成干涉图像数据。紧接着对干涉图像数据进行光谱复原处理, 形成光谱图像数据后进行快视或数据存储。处理流程如图 1

收稿日期: 2011-01-17; 修订日期: 2011-04-23

基金项目: 遥感卫星应用国家工程实验室项目(O92601101C)。

作者简介: 杨仁忠(1952—), 男, 北京人, 研究员, 主要从事信号采集与处理、遥感卫星数据处理、遥感卫星地面系统结构与技术研究。

E-mail: rzyang@rsgs.ac.cn。

通讯作者: 陈敏浩(1986—)男, 广东河源人, 硕士研究生, 主要从事遥感卫星数据的采集、传输与处理研究。E-mail: chenminhao327@hotmail.com。

所示。其中,光谱复原处理是干涉型高光谱卫星数据处理中的重要环节,光谱复原处理的速度与处理效果决定了整个干涉型高光谱卫星数据处理系统的速度与处理效果,也直接决定了是否能够实现数据处理实时性的目标。

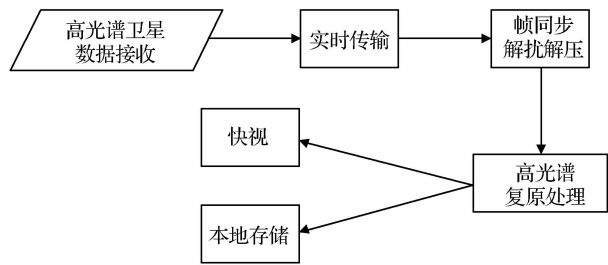


图 1 干涉型高光谱卫星数据的处理流程图
Fig. 1 Flowchart of interferential hyper-spectral satellite data processing

目前,国内外对于干涉型高光谱数据的光谱复原处理大多采用硬件运算的方式来实现。美国的 MightySat II.1 中的傅立叶变换高光谱相机中的高光谱数据处理系统采用的主要核心为 Quad TMS320C40 FPDSP(Floating Point Digital Signal Processor),该处理器的主要功能是用于高光谱数据的光谱复原处理中的快速傅立叶运算。在国内,为了使成像光谱仪能应用于目标实时探测和识别等应用场合,中国科学院西安光学精密机械研究所研究了利用大容量高速 FPGA(Field Programmable Gate Array)器件研制干涉型成像光谱仪实时数据处理片上系统的技术,该系统基本满足了地面使用的成像光谱仪的工程要求^[4]。采用 DSP (Digital Signal Processor) 与

FPGA 结合的技术,可以提高光谱复原处理的速度和精度,但是受限于单个 DSP 的特性,运算速度难以提高,因此也有研究人员提出了多 DSP 并行光谱复原技术^[5]。该技术研制的系统处理高光谱数据的码速率为 150 Mbps,处理的数据帧频为 70 Hz。

从干涉型成像光谱仪的发展来看,干涉型高光谱数据在朝着高光谱分辨率、高空间分辨率、高量化分辨率的方向发展,数据量日益增大;不同的干涉成像光谱仪获取的干涉图像数据,所使用到的复原处理算法和处理流程也各不相同。这都对基于硬件的光谱复原处理系统提出了挑战。

若采用软件处理的方式并满足干涉型高光谱卫星数据的码速率高、处理算法灵活的要求,将能够化解硬件处理系统所遇到的挑战。在工程化方面,软件处理的方式还具有操作与配置较简单、价格较低廉等优点。

3 CUDA 中光谱复原处理技术

3.1 干涉图像数据的特点

干涉型成像光谱仪得到的干涉图像数据为二维空间上像元点的干涉序列。以空间调制型干涉成像光谱仪为例,见图 2,其利用一维狭缝得到该狭缝各像元的一组点干涉序列数据(Y 轴,如小图(a)),而在与狭缝垂直的扫描方向(Z 轴)上得到另一维的像元空间信息,X 轴为幅宽,最终组成高光谱干涉图像数据立方体。二维空间中的每一个像元对应着其唯一的一组点干涉序列数据。对每一个像元的点干涉序列数据进行光谱复原处理,得到每一个像元对

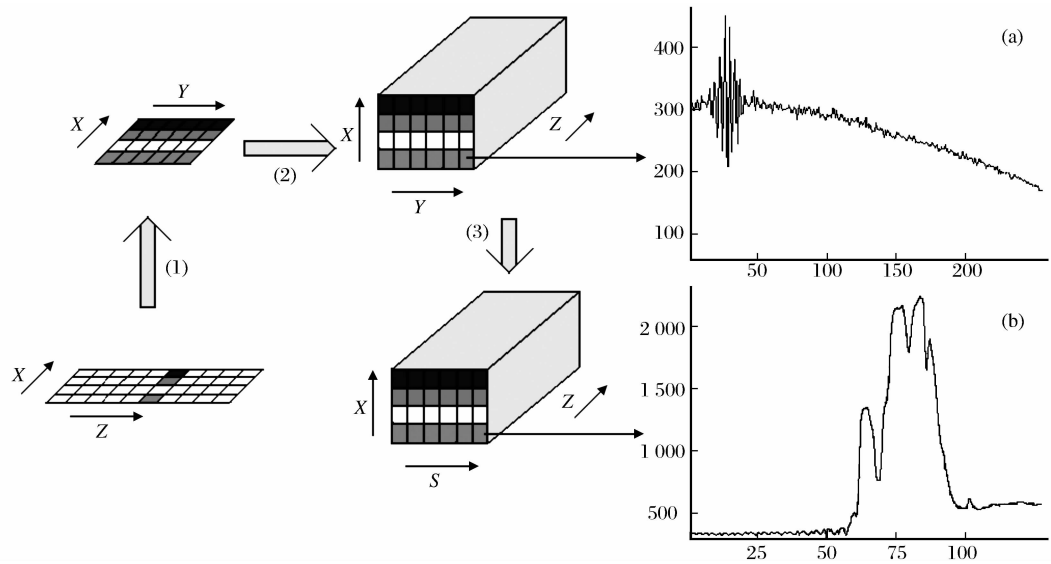


图 2 干涉数据的光谱复原处理示意图
Fig. 2 Process of spectrum reconstruction

应的光谱曲线(S 轴,如小图(b)),从而组成光谱复原后的光谱图像数据。

原始点干涉序列如图 2 中的小图(a)所示。该干涉序列为过零采样,在零点处干涉序列取得最大值。由于受暗电流等各种因素影响,干涉序列数值呈现由零点向两端逐步下降的趋势。

高光谱数据具有几十甚至几百个波段,数值一般采用 12 bit 量化或更多,数据下行速率可以达到数百 Mbps,每次上传数据总量可能超过 10 GBytes。如此大的数据量给地面数据处理带来了传输与处理上的困难。

3.2 GPU 与光谱复原处理

GPU 特别适用于解决大数据量并行数据运算的问题——在同一个程序中对许多数据进行相同的运算。由于对所有的数据元素都执行相同的程序进行计算,因此对流控制的要求并不高;由于 GPU 执行大量的数据运算并且具有高运算密度的特点,运算时间较长,故内存访问的延迟可以被忽略^[6]。

在光谱复原处理的过程中,各像元的数据交互较少,主要发生在前期的预处理阶段和后期的辐射定标处理阶段。而对每个像元对应的点干涉序列数据复原处理为光谱数据的计算过程是一致的,所以并行处理的方法非常适用于干涉图像数据的光谱复原处理。

GPU 计算的这些特点,契合了干涉图像数据的光谱复原处理中可并行处理性强、码速率高的要求,使得采用软件处理的方式进行光谱复原处理成为可能。

3.3 CUDA 技术

2006 年 NVIDIA 公司正式发布了在 GPU 上的统一计算新架构——CUDA (Compute Unified Device Architecture),它无需映射到一个图形 API (Application Programming Interface),便可在 GPU 上管理和进行并行数据计算。在进行数据计算时,运行在主机上的高密度计算的部分程序,将被转移到 GPU 中运行。

CUDA 的并行处理能力体现在其数量巨大的线程数量及线程的轻量级。图 3 说明了 CUDA 中一个内核函数(Kernel)的组成。对 CPU 运算来说,其并行的线程数受制于 CPU 的个数,而 GPU 上运行的线程数量是相当惊人的,在一个内核函数中的线程数量可以达到上千甚至上万。GPU 线程的发起是轻量的,其创建线程的系统开销非常小,线程切换所耗费的时间也相当短^[7]。

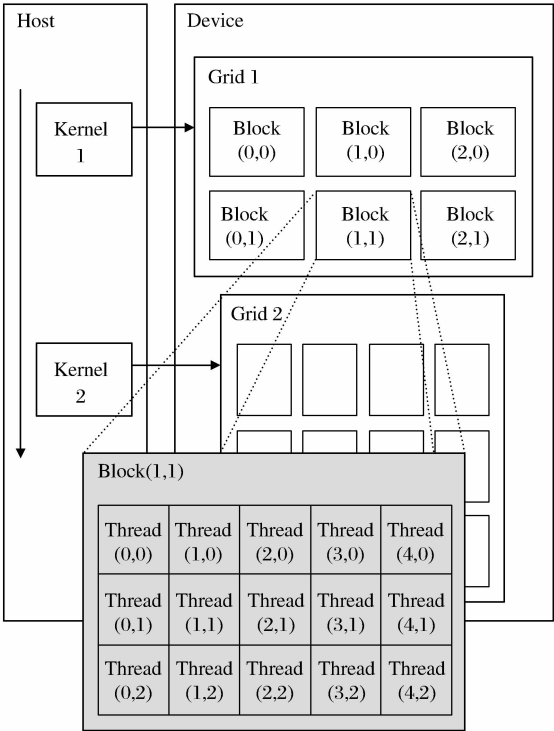


图 3 CUDA 中的内核函数组成结构

Fig. 3 Structure of a kernel in CUDA

3.4 基于 CUDA 的光谱复原处理

结合光谱复原处理的特点及 CUDA 技术的特点,本文提出了基于 CUDA 的光谱复原处理技术,在 GPU 上实现绝大部分的复原处理计算。两者的结合如图 4 所示。

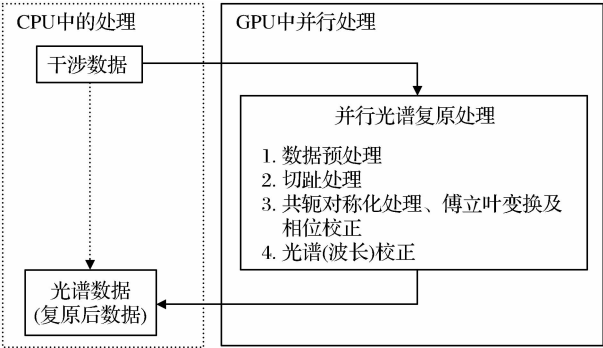


图 4 CUDA 中的光谱复原处理

Fig. 4 Spectrum reconstruction with CUDA

CUDA 中光谱复原处理流程主要分为 4 个步骤:首先对各点干涉序列做数据预处理(前期处理),再进行切趾处理,对数据作共轭对称后进行傅立叶变换,取得校正系数后对傅立叶变换的结果进行相位校正,最后进行光谱校正。

3.4.1 数据预处理

干涉图像数据经过数据预处理后才能进行下一

步的数据处理。数据预处理的主要内容是相对辐射校正、消除趋势项、去除暗电流、CCD 校正、全系统空间维校正。对于精度要求不是非常高的光谱复原处理,数据预处理只作去直流(零阶最小二乘法)处理。

由于缺乏参数,本文中数据预处理仅作模拟相对辐射校正与去直流处理。本文的 CUDA 光谱复原运算中,对应于干涉图像的每一个目标点的干涉序列,分别创建对应于各个目标点的独立线程。在该独立线程中,对干涉序列进行相对辐射校正,即序列上的每一数值乘以对应的模拟校正参数;经过相对辐射校正后,对干涉序列用零阶最小二乘法作去直流处理。

3.4.2 切趾处理

切趾处理是在点干涉序列进行的。每一点的干涉序列沿干涉序列方向乘以某一切趾函数,来抑制复原光谱中存在的旁瓣效应。常见的窗口函数有三角窗函数、矩形窗函数、高斯窗函数、Hanning 窗函数等^[8]。函数表达式如公式(1)~(3)。

三角窗函数:

$$w(x) = 1 - \frac{|x|}{L}, x = -\frac{N}{2} : \frac{N}{2} \quad (1)$$

矩形窗函数:

$$w(x) = 1, x = -\frac{N}{2} : \frac{N}{2} \quad (2)$$

高斯窗函数:

$$w(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), x = -\frac{N}{2} : \frac{N}{2} \quad (3)$$

在 CUDA 中对干涉数据进行下一步运算之前,参照公式(1)~(3)等窗口函数,经过程序初始化,预先计算得到各切趾函数的切趾系数,避免了复原处理时的重复运算。光谱复原运算中,程序在 GPU 中创建数量巨大的线程对预处理后的干涉数据进行并行切趾运算。

3.4.3 傅立叶变换及相位校正

对于干涉序列,由于各种因素,导致下传干涉序列数据的零点相对于原点产生不确定的微小位移 ϵ ,相当于整个干涉图相对于理想的干涉图漂移了一个位置误差 ϵ ,那么该干涉图的傅立叶变换,也即是复原光谱,将产生误差。依据傅立叶变换的位移定理,理想光谱 $B(v)$ 与复原光谱 $B'(v)$ 的关系如式(4)。

$$\begin{aligned} B'(v) &= \int_{-\infty}^{+\infty} I(x - \epsilon) w(x - \epsilon) \exp(-i2\pi vx) dx \\ &= \exp(i2\pi v \epsilon) \cdot B(v) \end{aligned} \quad (4)$$

所引入的复原光谱的误差可以用一相位项 $\exp\{i\theta(v)\}$ 来表达,其中 $\theta(v) = 2\pi v \epsilon$ 。

双边采样干涉图无需进行专门的相位校正处理,而单边采样干涉图的相位误差不能用求模的方法自动消除,所以一般都采用过零采样的方式来校正相位误差。对过零采样的干涉图进行相位校正,方法主要有 Connes 求平方根法、Mertz 乘积法、Forman 卷积法。基于快速运算的考虑,此次并行处理算法采用的方法为 Mertz 法。

在进行傅立叶变换之前,还需要对过零采样的单边干涉图进行共轭对称化处理,形成双边干涉图。

对于 Mertz 法的实现,邢廷等^[9]在文章中提出了对 Mertz 法的改进,将实序列离散傅立叶变换的性质与相位校正的具体处理相结合,优化了 Mertz 法的计算处理。本文也对此种方法进行了初步实验(以下均称 Mertz 改进法)。

在本文基于 CUDA 的复原处理中,首先根据干涉序列的零光程差位置(即辐射亮度最大的数值)对单边的干涉数据进行共轭对称化处理,形成对称的双边干涉图;对双边干涉图进行傅立叶变换之前,必须对 CUDA 的傅立叶变换进行配置,并将需要进行傅立叶变换的双边干涉数据由主机内存传输至显卡内存。傅立叶变换中使用了 CUDA 提供的针对 GPU 高度优化的高性能数学函数库。在傅立叶变换后,参照公式(4),建立误差项因子,对傅立叶变换后得到的光谱进行相位校正。

3.4.4 光谱(波长)校正

傅立叶变换后得到的光谱图像数据,其横坐标仍为像素值。复原后的光谱曲线需要进行光谱定标,才能得到真实的光谱曲线。在理论上需要对所有的谱段进行光谱定标,而在实际中,可以用尽可能多的不同波长的单色光,进行若干个波段的标定。

校正时,根据任意两条以上谱线的光谱 λ 以及相应的谱段编号 n ,可以计算其他所有数据点的对应光谱谱段;对于所需的某一固定谱段的数值,由于可能与已有的各光谱谱段存在一定的波长误差,将从各光谱谱段抽取所选两端最邻近谱段的数值,然后采用线性插值的方法计算得到该值。

本文模拟了若干谱线的光谱 λ 以及相应的谱段编号 n 等必要参数,对相位校正后的复原光谱采用线性插值的方式进行光谱校正,得到了 128 个谱段的复原光谱图像数据以及每一谱段编号所对应的光谱 λ 。

4 实验及分析

本文的光谱复原算法分别在 CPU 环境中(C++ 语言实现)和 GPU 环境中(C 语言、CUDA 平台)得

到程序实现。本文还对 Mertz 法与 Mertz 改进法在 CPU 环境及 GPU 环境下的计算效果进行比较。运行环境分别如下：

CPU 环境：

- 操作系统:Microsoft Windows XP Professional Service Pack 3
- 处理器:Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E4500 2.20 GHz
- 内存:Kingston DDR2 SDRAM PC5300 2 048 M
- 编译环境:Microsoft Visual Studio 2005

GPU 环境：

- 操作系统、处理器、内存与 CPU 环境相同。
- 显卡型号:NVIDIA GeForce 9600GT
- 编译环境:Microsoft Visual Studio 2005、NVIDIA CUDA 编译器 NVCC。

本文中的实验输入数据(干涉图像数据)来自 HJ-1A 卫星于 2009 年 5 月 18 日获取的数据(已经过解压与解密,未经过光谱复原处理)。

在不同环境和不同的输入数据量进行光谱复原处理实验,得到的实验结果见表 1。

表 1 不同环境及方法下的处理性能比较
Table 1 Performance comparisons in different environments and methods

| 算法 | 输入数据量/Mb | CPU 环境下运行速度/Mbps | | GPU 环境下运行速度/Mbps | |
|-----------|--------------|------------------|--------|------------------|--------|
| | | 第一次 | 第二次 | 第一次 | 第二次 |
| Mertz 法 | 128(64 帧) | 23.477 | 23.961 | 430.97 | 453.90 |
| Mertz 改进法 | 128(64 帧) | 25.211 | 25.687 | 327.36 | 372.09 |
| Mertz 法 | 1 024(512 帧) | 23.778 | 23.819 | 458.98 | 455.31 |
| Mertz 改进法 | 1 024(512 帧) | 25.169 | 25.190 | 387.73 | 381.23 |

由表 1 可看出,在 GPU 环境下获得的运算速度最高能够达到 CPU 环境下的 19 倍,处理速度最高达到 458 Mbps,平均处理帧频可达到 227 Hz,相对于 CPU 处理有极大优势。在 CPU 环境下,Mertz 改进法能够比未改进前的 Mertz 算法加速大约 7%;而在 GPU 环境下运行速度反而大大降低,速度降低约 24%。这是受 CUDA 的读取存储架构影响,反复的主机内存与设备内存间的数据传输消耗了较长的时间,致使运算速度下降。

从运行结果可以看出,基于 CUDA 的光谱复原技术能够满足当前地面干涉型高光谱卫星数据处理

中大于 70 Hz 帧频的处理速度要求。

从光谱复原处理后形成的光谱图像数据的 128 个谱段中,抽取 3 个波段(第 39 谱段、第 49 谱段、第 64 谱段)进行假彩色显示,如图 5 所示。

5 结 语

从目前并行算法的效率来看,在数据组织、设备内存分配、主机内存与设备内存之间的访问上,针对特定的主机设备和显卡设备,优化数据的分配、线程的分配,尽量减少主机内存与设备内存之间的数据传输,可以进一步提升光谱复原运算的速度。

由于辐射定标、光谱定标等参数的缺乏,实验中使用的参数仅为模拟参数,实验得到的光谱不能作为目标地物的准确光谱数值,本文未能进行光谱复原后光谱数据精度上的对比与研究。

参考文献(References):

[1] Pu Ruiliang, Gong Peng. Hyper-spectral Remote Sensing and Application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. [浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 高等教育出版社, 2000.]

[2] Qiu Yuehong, Wen Desheng, Zhao Baochang, et al. Interference Imaging Spectrometer of Chang'E-1 Satellite[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 489-494. [邱跃洪, 汶德胜, 赵葆常, 等. 嫦娥一号卫星干涉成像光谱仪电子学设计[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 489-494.]

[3] Javier S, Manuel P, Christian T, et al. GPUs for Parallel On-

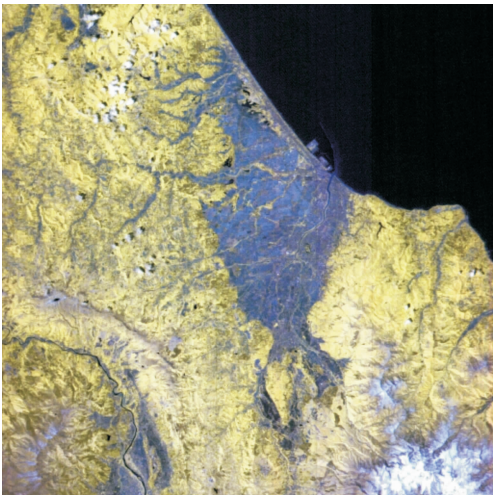


图 5 光谱复原处理后图像数据的假彩色显示
Fig. 5 RGB display of reconstructed data

board Hyper-spectral Image Processing[J]. International Journal of High Performance Computing Applications, 2008, 22(4):424-437.

[4] Yin Shimin, Xiang Libin, Zhou Jinsong, *et al.* Real-time Data Processing of Interferential Imaging Spectrometer based on FPGA[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2007, 26(4): 274-278. [殷世民, 相里斌, 周锦松, 等. 基于 FPGA 的干涉式成像光谱仪实时数据处理系统研究[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(4):274-278.]

[5] Liu Qianwen, Hu Bingliang, Duan Xiaofeng, *et al.* A System of Interference Hyper-spectral Reconstruction based on Multi-DSP[J]. Microcomputer Information (Embedded System & SOC), 2009, 25(6-2): 222-224. [刘倩雯, 胡炳樑, 段晓峰, 等. 基于多 DSP 的干涉超光谱复原系统设计[J]. 微计算机信息(嵌入式与 SOC), 2009, 25(6-2):222-224.]

[6] NVIDIA Corporation. NVIDIA CUDA Compute Unified Device Architecture Reference Manual[M/OL]. <http://developer.nvidia.com/category/zone/cudazone>, 2008, 7.

[7] Deng Peizhi. CUDA Programming Model[J]. Programmer, 2008, (5):84-85. [邓培智. CUDA 编程模型[J]. 程序员, 2008, (5):84-85.]

[8] Zhang Wenjuan, Zhang Bing, Zhang Xia, *et al.* Effects of Apodization Functions of Imaging Fourier Transform Spectrometer on Reconstructed Spectrum[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2008, 27(3):227-240. [张文娟, 张兵, 张霞, 等. 干涉成像光谱仪切趾函数对复原光谱的影响分析[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(3):227-240.]

[9] Xing Ting, Wang Mochang, Gong Huixing. A Method to Improve the Computing Efficiency of Mertz Method in Fourier Transform Spectroscopy[J]. Acta Optical Sinica, 1999, 19(3): 354-359. [邢廷, 王模昌, 龚惠兴. Mertz 法傅立叶光谱计算过程的改进[J]. 光学学报, 1999, 19(3):354-359.]

Interferential Hyper-spectral Real-time Spectrum Reconstruction Technology based on CUDA

YANG Ren-zhong¹, CHEN Min-hao^{1,2}, SHI Lu¹

(1. Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With the development of interference imaging spectrometry, ground applications have posed higher requirements for higher processing rate and real time processing in spectrum reconstruction. In this paper, reconstruction methods and CUDA programming are especially discussed, a spectrum reconstruction technology based on the developing CUDA technology is presented. Experiments show that this method can significantly improve the processing rate of spectrum reconstruction and meet the demands of ground applications.

Key words: Interferential hyper-spectral; Real-time spectrum reconstruction; CUDA