

引用格式: Yang Renzhong, Wang Xin, Shi Lu, *et al.* Real-time Hyper-spectral Data Processing of HJ-1A based on Forman Method[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(4): 647-654. [杨仁忠, 王欣, 石璐, 等. 基于 Forman 算法 HJ-1A 高光谱数据实时处理技术研究[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(4): 647-654.]

基于 Forman 算法 HJ-1A 高光谱数据 实时处理技术研究

杨仁忠¹, 王 欣^{1,2}, 石 璐¹, 马利春^{1,2}

(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: 采用 Forman 卷积法, 基于 GPU 硬件平台, 完成了实时光谱复原处理系统关键技术研究。试验结果表明: 系统处理能力为 HJ-1A 中高光谱解压后下行数据速率的 2.82 倍, 满足实时初级产品与全分辨率移动图像显示处理的技术需求。基于 GPU 环境对 Forman 法与 Mertz 法进行比较, 针对 Forman 法采用不同处理方法进行比较, 为开展实用化系统的研制提供了数据与方法。

关 键 词: Forman; GPU; 实时光谱复原处理

中图分类号: TP 75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2013)04-0647-08

1 引 言

20 世纪 80 年代, 成像光谱^[1]概念的提出标志着遥感技术从多光谱遥感进入到高光谱遥感阶段^[2-5]。2008 年 9 月, 我国成功发射两颗环境减灾小卫星, 其中 HJ-1A 星上载有我国首次自主研制的高光谱成像仪(Hyper Spectral Imager)^[6]。这标志着我国在对地观测手段方面迈上一个新的台阶, 同时也为地面系统中高光谱数据实时复原处理系统技术提出了新的课题。

本文针对 HJ-1A 星中高光谱传感器(HSI)的谱段多、算法复杂以及下行速率高等技术特点, 围绕实时光谱复原处理系统中的成像算法、处理单元与技术手段等开展深入技术研究。干涉成像光谱仪与多光谱传感器的数据成像处理不同, 必须进行一系列复杂的光谱复原处理, 才能形成快视格式及“初级”产品格式数据。光谱复原数据处理过程中相位校正处理是关键, 采用的方法直接影响处理结果, 即图像质量^[7]。目前常用的单边采样相位校正方法有 Mertz 法^[8-9]和 Forman 法^[10-11], Forman 法虽然运

算效率较低, 但较 Mertz 法而言, 校正精度更高。

近年来随着 GPU 技术的快速发展, GPU 较 CPU 在运算能力和存储带宽上有明显优势, 而且编程简单^[12-13]。对于许多实时性要求较高的应用场合, GPU 技术为干涉型高光谱数据的实时处理提供了一个新的解决方案。

基于上述分析, 本文将针对 HJ-1A 干涉型高光谱数据, 基于 GPU 系统平台, 采用 Forman 卷积法, 设计和实现整个光谱复原处理流程, 研究分析光谱复原处理方法, 为工程化系统实现提供技术依据。

2 Forman 相位校正法^[10-11]

2.1 Forman 相位校正法的原理

在理想状态下, 干涉图 $I(\delta)$ 可以看成是光谱强度 $B(v)$ 的自相关函数, 光谱图 $B(v)$ 可由单边干涉图 $I(\delta)$ 作傅立叶余弦变换反演得到, 其数学表达式为式(1)和式(2):

$$I(\delta) = 2 \int_0^{\infty} B(v) \cos(2\pi v \delta) dv \quad (1)$$

收稿日期: 2012-02-09; 修订日期: 2012-12-06

基金项目: 高分数据地面接收系统先期攻关项目(科工高分[2010]1481号)。

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: 王 欣(1987—), 女, 湖北汉川人, 硕士研究生, 主要从事遥感卫星数据采集、传输与处理研究。E-mail: wxwg8791@163.com.

$$B(v) = 2 \int_0^\infty I(\delta) \cos(2\pi v \delta) d\delta \tag{2}$$

但在实际单边干涉系统中,由于光学系统的不对称、采样的不均匀及采样位置误差等因素的影响,所得的光谱数据与真实数据之间存在一定的误差,在式(1)、(2)的相位项 $2\pi v \delta$ 中引入了一个附加的相位因子 $\varphi(v)$,则干涉图的表达式如式(3)所示:

$$\begin{aligned} I'(\delta) &= 2 \int_0^\infty B(v) \cos[2\pi v \delta - \varphi(v)] dv \\ &= \int_{-\infty}^\infty B(v) e^{-i\varphi(v)} e^{i2\pi v \delta} dv \end{aligned} \tag{3}$$

此时干涉图不再对称,变为 $B(v)e^{-i\varphi(v)}$ 的傅立叶反变换,于是实测的光谱数据可以表示为:

$$B'(v) = B(v)e^{-i\varphi(v)} = \int_{-\infty}^\infty I'(\delta) e^{-i2\pi v \delta} d\delta \tag{4}$$

即真实的光谱数据为:

$$\begin{aligned} B(v) &= B'(v)e^{i\varphi(v)} = B_r'(v)\cos\varphi(v) - \\ &\quad B_i'(v)\sin\varphi(v) \end{aligned} \tag{5}$$

计算出相位角为:

$$\varphi(v) = -\arg[B'(v)] = -\arctan[B_i'(v)/B_r'(v)] \tag{6}$$

根据傅立叶变换的性质,得到:

$$I(\delta) = I'(\delta) \times F(\delta) \tag{7}$$

其中:

$$F(\delta) = \int_{-\infty}^\infty e^{i\varphi(v)} e^{i2\pi v \delta} dv = F^{-1}[e^{i\varphi(v)}] \tag{8}$$

即对实测的不对称干涉图 $I'(\delta)$ 与相位校正数据 $F(\delta)$ 作卷积运算就可以获得经过相位校正后的干涉图,然后对对称的单边干涉图作傅立叶余弦变换就可以得到光谱数据。

2.2 Forman 相位校正法的实现

Forman 法是通过在零光程差的两侧抽取一小段双边干涉图来计算相位数据,构造相位干涉图,再将相位干涉图和过零采样单边干涉图进行卷积来进行相位校正。

根据傅立叶变换的性质,设 $x(n)$ 为一 M 点序列, $h(n)$ 为一 L 点序列,则它们的线性卷积 $y(n) = x(n) \times h(n)$ 是一个 $(M+L-1)$ 点序列。而对于两个均为 N 点的序列 $x(n)$ 和 $h(n)$ 来说,它们的圆周卷积 $y(n) = x(n) \otimes h(n)$ 也为一 N 点序列,且有: $Y(k) = \text{FFT}[y(n)] = X(k) \cdot H(k)$ 。当满足序列长度 $N \geq M+L-1$ 时,圆周卷积和线性卷积相等。故在 Forman 法的实现过程中,先将两序列补零到 N 点 ($N \geq M+L-1$),再采用 FFT 计算两序列的线性

卷积,如式(9):

$$y(n) = x(n) \times h(n) = \text{IFFT}[X(k) \cdot Y(k)] \tag{9}$$

综合以上分析,设计 Forman 法的实现流程如图 1 所示。

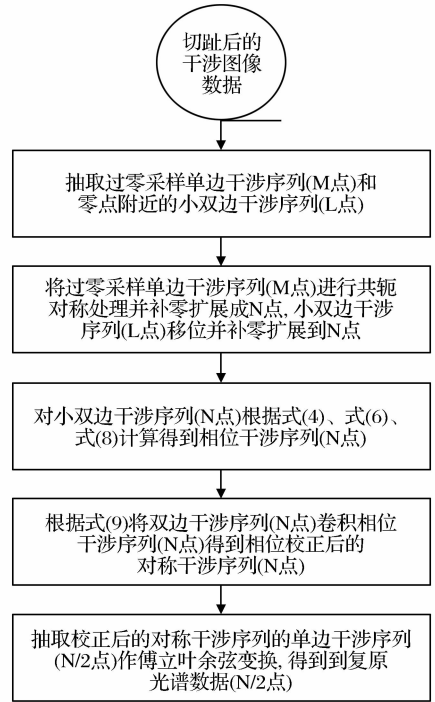


图 1 Forman 相位校正流程图

Fig. 1 Flow chart of Forman phase correction

2.3 Forman 法与 Mertz 法的比较

比较 Forman 法与 Mertz 法, Mertz 法对非线性相位误差的校正效果不佳,而 Forman 法对线性和非线性相位误差都有较好的校正效果,在某些环境下, Forman 法的校正精度比 Mertz 法高百分之几的数量级;如果干涉图严重非对称, Forman 法可通过再次卷积获得满意的对称干涉图;而且 Forman 法的实现流程可以方便地引入数字滤波函数来去除高频噪声带来的影响。Forman 法与 Mertz 法相比,其缺点是 Forman 法作卷积运算需要较长的计算时间,因而对计算速度有所影响。

3 基于 GPU 的实时 Forman 光谱复原处理技术

3.1 高光谱数据处理流程介绍

在新型的卫星地面站系统中,高光谱卫星数据经过实时接收、采集和记录后,进入数据测试验证系统中进行实时光谱复原处理,处理流程如图 2 所示。高光谱实时光谱复原处理在整个数据接收系统中至关重要,一方面它形成快视格式光谱图像数据进行

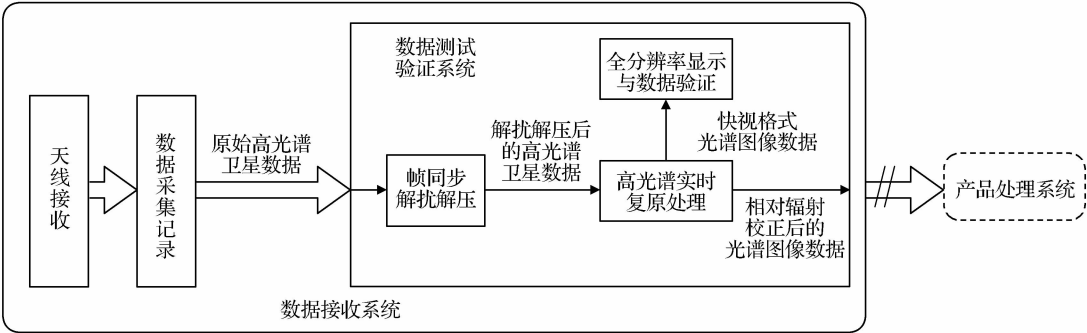


图 2 高光谱卫星数据的处理流程图

Fig. 2 Flow chart of hyper-spectral satellite data processing

全分辨率移动窗显示,因而可对记录的高光谱卫星数据进行实时的质量检测与验证;另一方面,它形成相对辐射校正后的光谱图像数据,通过网络传输给下一级产品处理系统,以便实时生成卫星数据产品,供一些实时性要求较高的应用场合使用。高光谱实时复原处理模块的速度和处理效果直接影响整个高光谱卫星数据处理流程的速度和性能,因而对于实时光谱复原处理技术的研究具有重要的现实意义。

3.2 常用的实时光谱复原处理系统平台

目前常用的实时光谱复原处理系统主要为基于计算机集群的和基于 DSP 和 FPGA 技术的处理系统平台^[14]。基于计算机集群的处理系统平台,即由大量 CPU 构成的并行处理系统,具有成本高、体积大的缺点^[15]。而采用 DSP 和 FPGA 技术的处理系统平台,在运算速度和精度上都得到了很大的提升。并且为了突破传统单处理器系统在运算速度上的限制,已经有研究人员提出了多 DSP 并行光谱复原技

术,很好地满足了干涉型高光谱图像处理数据量大、实时性高的要求。但这种基于硬件的处理系统平台不易于现场修改,无法适应高光谱数据处理流程和处理算法灵活多变的特点^[16-17]。

3.3 基于 GPU 的实时光谱复原处理系统平台

近年来,GPU 因其强大的并行计算能力和编程简单等特点引起了全球广泛的研究兴趣。GPU 与 CPU 相比更注重数据并行计算,即在不同的数据上并行执行相同的计算^[13]。而干涉型高光谱数据二维空间上的每个像元点光谱复原处理的过程是一致的,因此可利用 GPU 的高速并行计算能力进行实时光谱复原处理。设计基于 GPU 的实时光谱复原处理系统如图 3 所示,其中 HSI 数据光谱复原处理模块是在 GPU 上并行实现的。

3.4 CUDA 架构^[12,18-19]

CUDA (Compute Unified Device Architecture),即统一计算设备架构,是一种新型的硬件和软件架构,在 GPU 上进行并行数据计算的分配和

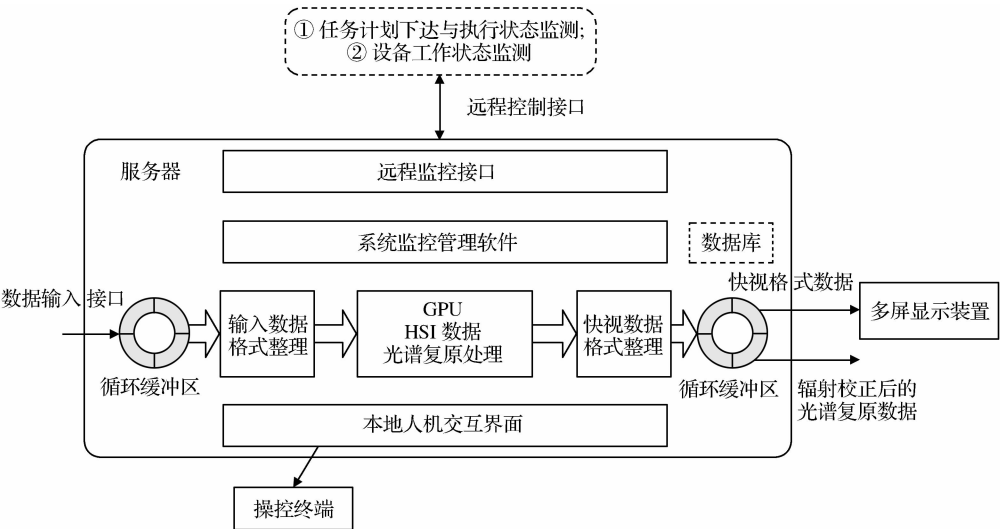


图 3 基于 GPU 的实时光谱复原处理系统结构图

Fig. 3 Structure of real-time spectrum reconstruction system based on GPU

管理,使 GPU 不仅能够执行传统的图形计算,还能够高效地执行通用计算。

CUDA 的并行计算能力强是因为其包含巨大数量的线程数,线程切换的耗费少。CUDA 编程模型如图 4 所示,在这个模型中,CPU 作为主机(Host),负责串行计算,GPU 作为设备(Device),专注于并行处

理,两者协同工作,各司其职。运行在 GPU 上的并行计算函数称为 Kernel(核函数),从图 4 还可以看出,一个 Kernel 函数为一个两层并行模型,即 Grid 中的 Block 间并行和 Block 中的 Thread 间并行。一个完整的 CUDA 程序由主机端的串行处理步骤和设备端 Kernel 函数并行处理步骤共同组成。

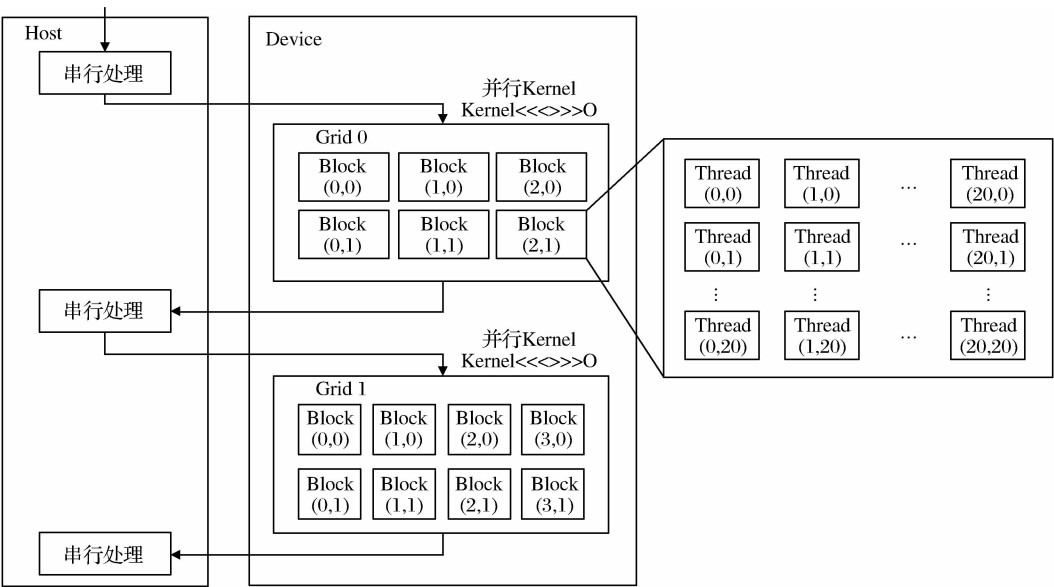


图 4 CUDA 编程模型

Fig. 4 Model of CUDA programming

3.5 基于 GPU 的实时 Forman 光谱复原处理^[20-22]

基于对 Forman 相位校正法的研究,结合 GPU 技术及 CUDA 架构的特点,本文实现了基于 GPU

的实时 Forman 光谱复原处理。光谱复原处理的流程及 GPU 与 CPU 任务的分解如图 5 所示,该流程分为以下 4 个部分。

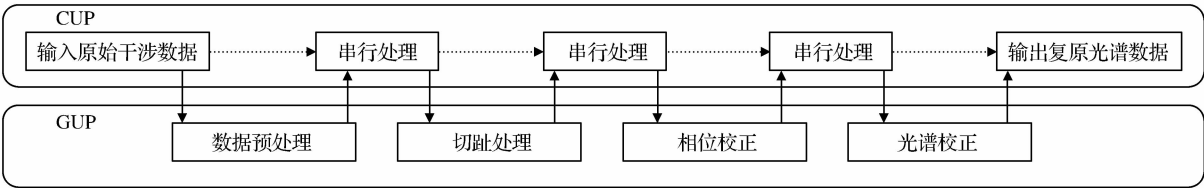


图 5 CUDA 中的光谱复原处理

Fig. 5 Spectrum reconstruction with CUDA

(1)数据预处理

结合 CUDA 编程模型和高光谱干涉数据的特点,干涉图像二维空间中的每一个目标点都对应一个独立线程来对其干涉序列进行数据预处理。本文的数据预处理主要进行去直流处理和相对辐射校正,即先对干涉序列用零阶最小二乘法去除直流成分,然后将干涉数据乘以对应的相对辐射校正参数进行相对辐射校正。经过数据预处理,去除了干涉图中的直流分量,并校正了各探元之间的响应度差异,方便对干涉图进行后续处理。由于缺乏参数,本

文采用的相对辐射校正参数是模拟值。

(2)切趾处理

在实际情况下,采集的干涉图被系统剪切为有限长度,导致干涉图在截断处出现尖锐的不连续性,复原后的光谱存在旁瓣效应。为了抑制正负旁瓣,需要对每一个目标点的干涉数据沿干涉序列方向乘以某一切趾函数进行切趾处理,来缓和这种不连续性。常用的切趾函数有三角窗函数、矩形窗函数、高斯窗函数、Hanning 窗函数等^[23],各切趾函数的初始化在参数初始化阶段完成。本文采用三角窗函数

对各目标点的 256 个干涉数据进行切趾处理。

(3)相位校正

本文基于 GPU 利用 Forman 卷积法对干涉图进行相位校正,校正流程如图 1 所示。首先根据零光程差的位置(29)抽取过零采样单边干涉序列(256 点)和小双边干涉序列(57 点)。然后对过零采样单边干涉序列作共轭对称处理,补零扩展成 512 点的双边干涉序列,小双边干涉序列也移位补零成 512 点的干涉序列。根据小双边干涉序列计算相位数据,构造相位干涉序列(512 点)。根据式(9)将相位干涉序列(512 点)与双边干涉序列(512 点)进行卷积,得到校正后的对称干涉序列(512 点)。抽取对称干涉序列(512 点)的单边干涉序列(256 点)进行傅立叶变换,即得到复原光谱图像数据。本文利用 CUDA 提供的针对 GPU 高度优化的高性能数学函数库进行傅立叶变换,极大地提升了计算效率。

(4)光谱校正

相位校正后的光谱图像数据,其横坐标仍为序列编号,需经光谱校正才能得到真实的光谱曲线。因缺乏参数,本文模拟了若干谱线的光谱波长 λ 及相应的序列编号 n 。根据这些参数,可计算得到所有谱段对应的光谱波长 λ 。将波长 λ 换算成波数 ν ,然后根据波数与序列编号的关系 $\Delta \nu / \Delta n = C$ 计算得到所用谱段对应的序列编号,采用线性插值法即可求出每个谱段对应的光谱图像数据。本文通过光谱校正,最终得到了 128 个谱段对应的光谱波长 λ 及其光谱图像数据。

4 实验及分析

为了实现基于 GPU 高光谱数据的实时处理与成像显示,并比较 Forman 卷积法与 Mertz 乘积法这两种光谱复原方法,本文采用 Forman 法和 Mertz

法,分别在 Matlab 环境中、CPU 环境中(C 语言实现)、GPU 环境中(C 语言、CUDA 平台)实现光谱复原处理。为便于比较,3 种环境的输入数据均采用 HJ-1A 星 2009 年 5 月 18 日的第 3 743 轨数据。

4.1 在 Matlab 环境下的光谱复原结果

在 Matlab 环境下仿真高光谱卫星数据处理流程,分别采用 Forman 法和 Mertz 法去除相位误差,比较两种方法得到的复原光谱图像数据,结果显示:在 Matlab 环境下,Forman 法和 Mertz 法的处理结果值相同。结果表明两种方法均能有效地进行相位校正,但因 Matlab 计算精度的原因,无法显示 Forman 法在校正精度上的优势。由于在 Matlab 环境下数据的处理函数比较准确,而且处理结果已得到分步验证,可以将 Matlab 环境中得到的光谱复原数据作为参考值,来验证在其他两种环境下的光谱复原处理结果。

4.2 在 CPU 环境下的光谱复原结果

CPU 运行环境为:
操作系统:Microsoft Windows7 旗舰版;
处理器:Intel(R)Core(TM)i7 CPU @ 3.07GHz;
内存:3.00GB RAM;
编译环境:Microsoft Visual Studio 2008。

将在 CPU 环境下采用 Forman 和 Mertz 法得到的复原光谱图像数据与在 Matlab 环境下得到的参考值进行比较,同时利用式(10)计算数据间的标准偏差:

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (B(n) - B'(n))^2}{N - 1}}$$
 (10)

其中: N 表示数据量 ($N = 131\ 072\ K$), 结果如表 1 所示。

表 1 CPU 环境下 Forman 法与 Mertz 法光谱复原结果的比较

Table 1 Spectrum reconstruction results comparisons between Forman and Mertz in CPU environment

标准偏差	Matlab Mertz	Matlab Forman	CPU Mertz	CPU Forman
CPU Mertz	0.7070	0.7070	0	0.7070
CPU Forman	0.0138	0.0138	0.7070	0

4.3 在 GPU 环境下的光谱复原结果

GPU 环境为:
操作系统:Windows7 旗舰版 32 位;
处理器: Intel (R) Core (TM) i7 CPU 950 @ 3.07GHz;
内存:3.00GB RAM;
显卡型号: Tesla C 1060;

编译环境: Microsoft Visual Studio 2008、NVIDIA CUDA 编译器 NVCC。
将在 GPU 环境下采用 Forman 法和 Mertz 法得到的复原光谱图像数据与在 Matlab 环境下得到的参考值进行比较,利用式(10)计算数据间的标准偏差,其中 N 表示数据量 ($N = 131\ 072\ K$), 结果如表 2 所示。

表 2 GPU 环境下 Forman 法与 Mertz 法光谱复原结果的比较

Table 2 Spectrum reconstruction results comparisons between Forman and Mertz in GPU environment

标准偏差	Matlab Mertz	Matlab Forman	GPU Mertz	GPU Forman
GPU Mertz	0.7070	0.7070	0	0.7070
GPU Forman	0.0151	0.0151	0.7070	0

4.4 光谱复原处理速度

在 CPU 和 GPU 环境下分别采用 Forman 法和 Mertz 法实现光谱复原,计算测得 5 次处理速度的平均值,结果如表 3 所示。

表 3 不同环境及方法下处理速度的比较

Table 3 Processing speed comparisons in different environments and methods

平均处理速度/Mbps	Mertz	Forman
CPU	15.96	5.10
GPU	462.63	302.13

4.5 实验数据分析

由表 1、2 可以看出,以 Matlab 环境下得到的复原结果为参考值,Forman 法较 Mertz 法标准偏差略小,在 CPU 和 GPU 环境下 Forman 法较 Mertz 法精度提高了约 1%,证实了 Forman 法对相位误差的校正效果比 Mertz 法更好,光谱复原后得到的图像质量较好。

根据表 3 可知,在相同的环境下,Forman 法较 Mertz 法运算速度低。这些数据证实了 Forman 法与 Mertz 法各自的优缺点,说明了基于 GPU 实现实时光谱复原处理时,应基于不同的应用要求选择合适的光谱复原方法,若对复原结果精度要求更高,应选择 Forman 法;若对处理速度要求更高,则选择 Mertz 法。

由表 3 可以看出,对于同一种方法,在 GPU 环境下的运算效率较 CPU 环境下的处理有极大的优势,Forman 法的平均处理速度达到 302.14 Mbps, Mertz 法达到 462.63 Mbps,均大于 HJ-1A 星光谱解压后的下行数据速率 107 Mbps,说明 Forman 及 Mertz 光谱复原处理技术在 GPU 系统平台上均能满足当前地面接收系统对干涉型高光谱卫星数据实时处理的要求,验证了基于 GPU 系统平台实现实时光谱复原处理的可行性,并且为基于 GPU 的实时光谱复原处理系统的实现提供了关键技术。

从基于 GPU 的实时 Forman 光谱复原处理后图像数据的 128 个波段中抽取 3 个波段(R:40,G:51,B:66)进行假彩色显示,结果如图 6 所示。

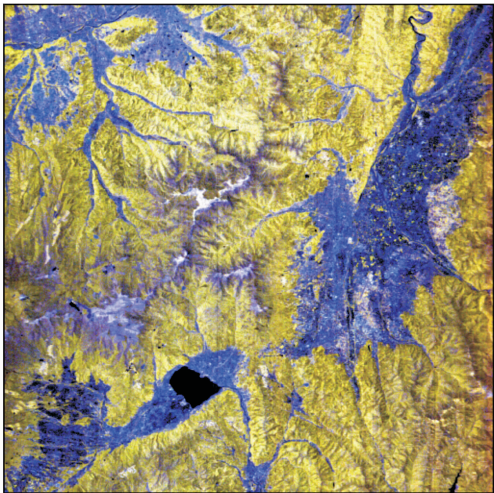


图 6 基于 GPU 的实时 Forman 光谱复原处理后图像数据的假彩色显示

Fig. 6 RGB display of real-time spectrum reconstruction data of Forman method based on GPU

5 结 语

本文采用 Forman 卷积法,基于 GPU 硬件平台,完成了实时光谱复原处理系统关键技术研究。试验结果表明:基于 GPU 构建的试验系统处理的最低速度为 HJ-1A 中高光谱解压后下行数据速率的 2.82 倍,满足实时初级产品与全分辨率移动图像显示的技术需求。文中对 Forman 与 Mertz 法进行比较,证实了 Forman 法相位误差校正精度高,但处理速度低的特点,为实用系统研制的方法选择提供了依据。

本文实验中,由于辐射定标、光谱定标参数的缺乏,采用模拟参数进行光谱复原的结果不能作为目标地物的准确光谱数值。故在结果分析时只能对 Forman 法与 Mertz 法在校正精度进行相对分析,并不能得到准确的复原结果。

参考文献(References):

[1] Zhang Chunmin. Interference Imaging Spectroscopy[M]. Beijing: Science Publishing Company, 2010. [张淳民. 干涉成像光谱技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]

- [2] Yang Zhehai, Han Jianfeng, Gong Dapeng, *et al.* The Development and Application of Hyperspectral Remote Sensing Technology[J]. Marine Charting, 2003, 23(6): 55-60. [杨哲海, 韩建峰, 宫大鹏, 等. 高光谱遥感技术的发展与应用[J]. 海洋测绘, 2003, 23(6): 55-60.]
- [3] 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]. 北京: 高等教育出版社, 2000.]
- [4] Tong Qingxi, Zhang Bing, Zheng Lanfen. Hyperspectral Remote Sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. [童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感——原理、技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.]
- [5] Jin Xizhe, Yu Bingxi. The History and Current Status of Imaging Fourier Transform Spectrometer (IFTS) [J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1998, 21(4): 5-30. [金锡哲, 禹秉熙. 干涉成像(傅立叶变换)光谱仪发展概述[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1998, 21(4): 25-30.]
- [6] Xiang Libin, Wang Zhonghou, Liu Xuebin, *et al.* Hyperspectral Imager of the Environment and Disaster Monitoring Small Satellite[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(3): 257-262. [相里斌, 王忠厚, 刘学斌, 等. “环境与灾害监测预报小卫星”高光谱成像仪[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(3): 257-262.]
- [7] Zhao Xiang, Lu Jing, Gong Adu, *et al.* Operational Spectrum Reconstruction of Data from the Fourier Transform Hyperspectral Imager Onboard HJ-1A Satellite[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(7): 610-614. [赵祥, 陆婧, 宫阿都, 等. HJ-1A 星干涉成像光谱仪数据业务化光谱重建[J]. 科学通报, 2010, 55(7): 610-614.]
- [8] Mertz L. Auxiliary Computation for Fourier Spectrometry[J]. Infrared Physics, 1967, 7(1): 17-23.
- [9] Xing Ting, Wang Mochang, Gong Huixing. A Method to Improve the Computing Efficiency of Mertz Method in Fourier Transform Spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(3): 355-359. [荆廷, 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): 355-359.]
- [10] Forman L, Steel W H, Vanasse G A. Correction of Asymmetric Interferograms Obtained in Fourier Spectroscopy[J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(1): 59-63.
- [11] Sun Yamin, Yin Dekui. A Improved Algorithm for Correction of Remote Sensing Interferograms based on Forman Method [J]. Signal Processing, 2008, 24(6): 1048-1051. [孙雅敏, 殷德奎. 基于 Forman 法对遥感干涉图像进行相位校正的改进[J]. 信号处理, 2008, 24(6): 1048-1051.]
- [12] Sanders J, Kandrot E. CUDA by Example: An Introduction to General-Purpose GPU Programming [M]. Addison-Wesley Professional, 2010.
- [13] Zhang Zhaohui, Liu Junqi, Xu Qinjian. Analysis and Application of the GPU Parallel Computing Technology[J]. Information Technology, 2009, (11): 86-89. [张朝晖, 刘俊起, 徐勤建. GPU 并行计算技术分析与应用[J]. 信息技术, 2009, (11): 86-89.]
- [14] Plaza A, Chang C I. Clusters Versus FPGA for Parallel Processing of Hyperspectral Imagery[J]. International Journal of High Performance Computing Applications, 2008, 22(4): 366-385.
- [15] Javier S, Manuel P, Christian T, *et al.* GPUs for Parallel On-Board Hyperspectral Image Processing[J]. International Journal of High Performance Computing Applications, 2008, 22(4): 424-437.
- [16] Liu Qianwen, Hu Bingliang, Duan Xiaofeng, *et al.* A System of Interference Hyper-spectral Reconstruction based on Multi-DSP[J]. Control and Automation, 2009, 25(17): 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, 2009, 25(17): 222-224.]
- [17] Zhang Jing, Li Zitian, Duan Xiaofeng. System of High-speed DSP Parallel Processing based on DSP + FPGA[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(23): 6214-6217. [张静, 李自田, 段晓峰. 采用 DSP + FPGA 为核心实现 DSP 的高速并行处理系统[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(23): 6214-6217.]
- [18] NVIDIA Corporation. NVIDIA CUDA Compute Unified Device Architecture Reference Manual[M/OL]. <http://developer.nvidia.com/category/zone/cuda-zone>, 2008, 7.
- [19] Deng Peizhi. CUDA Programming Modal[J]. Programmer, 2008, (5): 84-85. [邓培智. CUDA 编程模型[J]. 程序员, 2008, (5): 84-85.]
- [20] Li Suning, Zhu Rihong, Li Jianxin, *et al.* Method of Reconstruction of Fourier Transform Spectroscopy[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(2): 268-272. [李苏宁, 朱日宏, 李建欣, 等. 傅立叶干涉成像光谱技术中的重构方法[J]. 应用光学, 2009, 30(2): 268-272.]
- [21] Xiang Libin, Yuan Yan. Some Aspects of Data Processing of the Single Sided Interferogram[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(12): 1869-1874. [相里斌, 袁艳. 单边干涉图的数据处理方法研究[J]. 光子学报, 2006, 35(12): 1869-1874.]
- [22] Li Zhigang, Wang Shurong, Li Futian. Data Processing for Interferogram of Ultraviolet Fourier Transform Spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2000, 20(2): 203-205. [李志刚, 王淑荣, 李福田. 紫外傅立叶变换光谱仪干涉图数据处理[J]. 光谱学与光谱分析, 2000, 20(2): 203-205.]

Real-time Hyper-spectral Data Processing of HJ-1A based on Forman Method

Yang Renzhong¹, Wang Xin^{1,2}, Shi Lu¹, Ma Lichun^{1,2}

(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: In this paper, a real-time spectrum reconstruction system of Forman method based on GPU is proposed. Experiments show that the processing rate of the system is 2.82 times as high as the data rate of HJ-1A satellite and meet the demands of real time generation of primary products and full resolution display based on moving window. Forman method and Mertz method are compared based on GPU. In addition, the Forman method is analyzed in three different processing environments. These researches provide necessary data and methods to the construction of a practical system.

Key words: Forman; GPU; Real-time spectrum reconstruction

国内第一台全自主飞行的高光谱无人机研发成功

欧普特公司(www.goldway.com.cn)根据客户的需求在美国 HeadWall 公司全反射式成像光谱仪和国内先进的小型无人机技术的基础上开发了全集成、全自动的高光谱成像系统 HyperSpectral UAV。系统由 4 部分构成:小型全自主飞行的固定翼无人机和操控系统软件、Micro\HyperSpec 微型成像光谱仪、GPS/INS 模块、高速数据采集与存储模块、光谱成像控制与采集软件、光谱图像几何校正软件。系统的主要技术特点:

- (1)系统轻便:可以方便地装载在 SUV 后备箱内运输;
- (2)全自主飞行的无人机:安全性高,对操作人员的要求很低;
- (3)弹射起飞、安全伞降:对场地大小没有特殊要求;
- (4)续航时间长:3 小时的航行时间;
- (5)系统集成度高:包含了飞行平台、高光谱图像采集、存储、几何校正;
- (6)光谱范围宽:400~1 000 nm 或者 900~1 700 nm 可选。