

# 凸面光栅成像光谱仪图像数据实时压缩技术

刘仰川<sup>1,2</sup>, 巴音贺希格<sup>1</sup>, 崔继承<sup>1</sup>, 唐玉国<sup>1</sup>

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 凸面光栅成像光谱仪图像数据量巨大, 给数据的传输和存储带来了压力, 因此要对图像数据进行实时压缩。首先根据成像原理对图像数据的特点进行了分析, 得出去除空间相关性和谱间相关性的压缩途径; 然后, 进行了压缩算法分析, 提出了在谱间进行一阶线性预测、谱内进行 JPEG2000 压缩的三维压缩方案; 最后, 设计了基于 FPGA+ADV212 的实时压缩系统, 其中 FPGA 用于逻辑控制和预测算法实现, ADV212 用于 JPEG2000 压缩。分析结果表明: 该系统具备无损和有损压缩能力, 能够实现图像数据实时压缩。

**关键词** 成像光谱仪; 一阶线性预测; JPEG2000; ADV212; 实时压缩

**中图分类号:** TN919.81 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)04-1132-05

## 引言

成像光谱技术结合了成像技术和光谱技术, 在获取地物空间信息的同时, 还为每个像元提供几十个至几百个窄波段光谱信息。成像光谱仪输出的图像数据同时包含空间信息和光谱信息, 这使得图像数据率往往达到几百 Mbps, 如我国研制的 C-HRIS 数据率达到了 346 Mbps、美国研制的 OrbView 数据率高达 980 Mbps。遥感器的信道传输能力一般小于 300 Mbps, 这要求成像光谱仪图像数据只有进行压缩才能进行传输。此外, 不同的应用领域对压缩的要求不同, 如军事侦查要求实时传输, 但对压缩质量要求不高, 适合进行高压缩比的有损压缩; 资源探测对实时传输要求不高, 但对压缩质量要求较高, 适合进行低压缩比的无损压缩。

图像压缩算法大致经历了三代的发展: 第一代是以 DPCM 为代表的预测编码算法; 第二代是以 DCT 为代表的变换编码算法; 第三代是以 DWT 为代表的变换编码算法。普通遥感图像是二维空间数据, 直接进行二维压缩即可。而成像光谱仪图像数据是三维数据, 只有在空间和光谱维上进行三维压缩才能实现有效压缩, 这适合多种压缩相结合的压缩方案。在算法应用和硬件系统方面, 我国与国外有较大差距, 如 NASA 于 2000 年发射的 EO-1 所携带的成像光谱仪采用了基于 AISC 实现的 RICE 算法<sup>[1]</sup>, 而 2007 年搭载在

“嫦娥一号”的系统仍然采用的基于 FPGA 实现的 DPCM 算法<sup>[2]</sup>。因此, 进行成像光谱仪图像数据实时压缩研究具有重要意义。

本文以中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的凸面光栅成像光谱仪为研究对象, 以实现图像数据实时压缩为研究目的。首先根据该成像光谱仪的成像原理对图像数据的获取及其特点进行深入分析; 其次, 根据分析结果提出了在谱间进行一阶线性预测、谱内进行 JPEG2000 压缩的三维压缩方案, 并针对该方案设计了基于 FPGA+ADV212 的实时压缩系统。最后对该系统的性能进行了分析。

## 1 凸面光栅成像光谱仪

### 1.1 成像原理

凸面光栅成像光谱仪由前置光学系统和凸面光栅分光系统组成, 二者通过狭缝有机的连结起来。其中分光系统采用了由两个凹球面反射镜和一个凸面光栅组成的 Offner 同心光学系统, 这使得分光系统具有成像质量好、结构简单、性能稳定等优点<sup>[3]</sup>。

该成像光谱仪属于面阵 CCD 推扫型成像光谱仪, 光谱范围为 400~800 nm, 光谱通道数为 198, 光谱分辨率为 3 nm, 空间分辨率为 1 mrad。CCD 像元数为 1 004×1 004, 像元尺寸为 7.4 μm×7.4 μm, 由于光学系统的像面尺寸为 4.4

收稿日期: 2011-09-04, 修订日期: 2011-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(60478034), 国家创新方法工作专项项目(2008IM040700), 国家重大科研装备研制项目(ZDY2008-1), 吉林省重大科技攻关项目(09ZDGG005)及吉林省科技支撑计划项目(20106011)资助

作者简介: 刘仰川, 1987 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生 e-mail: liuyangchuan2006@163.com

mm×6.6 mm, 可知有效像元数为 594×891。

凸面光栅成像光谱仪的成像原理如图 1 所示。前置光学系统起望远物镜的作用, 将远处地物成像在狭缝上, 狭缝确定了地面长度为  $y$  的穿轨扫描条带; 通过狭缝的光线经凹球面反射镜 1 反射至凸面光栅进行色散, 再由凹球面镜 2 聚焦至焦平面处 CCD 上, 最终获取被扫描条带地物在 198 个不同波段上的图像  $(y, \lambda)$ 。随着推扫的进行而获取面积为  $xy$  的地物的图像数据, 该数据总体上可作一个数据立方体  $(x, y, \lambda)$ 。

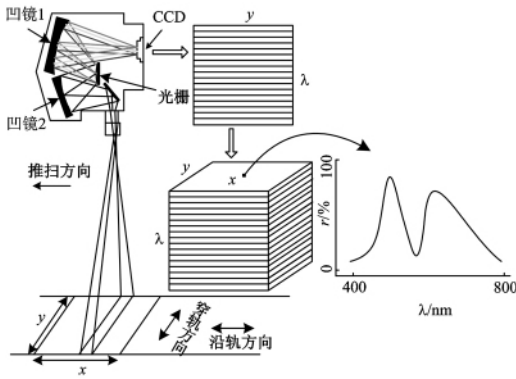


Fig 1 The imaging principle of the imaging spectrometer with convex grating

取空间维  $(x, y)$  上的任意一点, 沿光谱维  $\lambda$  方向可获取该点在不同波长上的光谱响应值。由光谱响应值可计算出反射率数据  $r(\lambda)$ , 与波长数据  $\lambda(\lambda=400, \dots, 800)$  一起经插值就可以得到该点的二维光谱曲线。光谱曲线上的极小值反映的是光谱吸收特征, 从而确定该点对应地物的类别。

## 1.2 图像数据分析

普通图像为二维图像, 仅包含空间信息, 图像数据仅具有空间相关性。而成像光谱仪图像数据为三维图像, 同时包含空间信息和光谱信息, 使得图像数据中同时具有空间和谱间相关性。

空间相关性<sup>[4]</sup>是指同一波段的空间相邻像素间的相似性, 可用自相关系数来描述, 其定义式为

$$R(k, l) = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - u_f][f(x+k, y+l) - u_f]}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - u_f]^2} \quad (1)$$

其中,  $(k, l)$  为像素间距,  $f(x, y)$  为图像灰度函数,  $(x, y)$  为空间坐标,  $M \times N$  为图像尺寸,  $u_f$  为图像灰度平均值, 即

$$u_f = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y) \quad (2)$$

谱间相关性<sup>[4]</sup>是指各波段光谱图像在同一空间位置的像素有相似性, 可用互相关系数来描述, 其定义式为

$$r_i(t) = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_i(x, y) - u_i][f_{i+t}(x, y) - u_{i+t}]}{\sqrt{(\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_i(x, y) - u_i]^2)(\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_{i+t}(x, y) - u_{i+t}]^2)}} \quad (3)$$

其中  $f_i(x, y)$  和  $f_{i+t}(x, y)$  为波段  $i$  和  $i+t$  的灰度函数,  $u_i$  和  $u_{i+t}$  为两波段的灰度平均值。

或由地物光谱理论可知, 两地物的间距越小, 两者间的相似性(相关性)就越强; 同一地物对相邻波段的反射率相近。凸面光栅成像光谱仪具有较强的空间分辨率, 使得相邻像元对应的地物间距更小, 从而导致图像数据具有较强的空间相关性; 较强的光谱分辨率使得相邻波段间距更小, 对同一地物的光谱响应更相近, 从而导致图像数据具有较强的谱间相关性。

由信息论<sup>[5]</sup>可知, 数据中的相关性会导致信息冗余, 去除(或减小)相关性就可以去除(或减少)信息冗余, 达到压缩的目的。凸面光栅成像光谱仪图像数据具有较强的空间和谱间相关性, 因此, 实现图像数据压缩的途径就是选择合适的压缩算法去除这两种相关性。

## 2 图像数据压缩方案

### 2.1 压缩算法分析

图像压缩算法主要分为三类: 基于预测的压缩算法, 以 DPCM 为代表; 基于变换的压缩算法, 以离散余弦变换(DCT)和离散小波变换(DWT)为代表; 基于矢量量化的压缩算法, 以 VQ 为代表。

预测算法是根据像素间存在相似性的特点, 利用前一个或多个像素预测当前像素, 然后对实际值和预测值的差(即预测误差)进行编码。预测越准确, 误差就越小, 在同等精度要求下, 编码所用的比特就越少, 达到数据压缩的目的。DPCM 具有低复杂度、高压缩比等优点, 仅需加法或减法运算, 易于硬件实现。

变换算法是通过正交函数将图像从空间域转换为能量较集中的变换域, 然后对变换系数进行量化和编码, 从而达到缩减数码率的目的<sup>[6]</sup>。DCT 属不可逆变换, 只能用于有损压缩, 其变换效率虽高, 但重构图像存在“方块效应”和“纹理噪声”。DWT 具有多分辨率、高压缩效率等优点, 具备可逆和不可逆变换能力, 可用于有损和无损压缩。

矢量量化算法是将数据分割成相同系统的小块, 找到一个矢量列表(称为码书), 通过向码流中写入一个指向码书中块的指针来对各个块进行压缩<sup>[7]</sup>。VQ 等矢量量化算法主要问题是具有较高的编码复杂度, 其计算量随着矢量维数的增加而呈指数增长, 所以该算法很少用于成像光谱仪图像数据的压缩。

为了兼顾算法的复杂度、压缩效率和压缩质量, 需要结合 DPCM 和 DWT 提出适合成像光谱仪图像数据压缩的方案。预测器是 DPCM 的核心, 利用它可以得到具有较低相关性的残差图像; JPEG2000 是基于 DWT 的最新图像压缩标准, 在去除空间冗余方面具有较高的压缩效率和压缩质量, 能实现有损和无损压缩, 且具有实现该标准的 ASIC 芯片来满足实时性要求。因此, 针对凸面光栅成像光谱仪图像数据, 提出谱间一阶线性预测和谱内 JPEG2000 压缩相结合的三维压缩方案。

### 2.2 压缩方案流程

在凸面光栅成像光谱仪输出的单帧图像中,各波段的光谱像在光谱维均占 3 列像元,如图 2 所示。

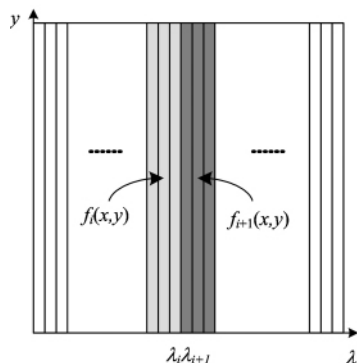


Fig 2 Single frame image

谱间一阶线性预测就是对应同一空间位置的两相邻波段的像素间进行预测,得到预测误差,如式(4)所示

$$e_{i+1} = f_{i+1}(x, y) - \hat{f}_{i+1}(x, y) \quad (4)$$

其中  $\hat{f}_{i+1}(x, y) = f_i(x, y)$  为预测器输出的  $f_{i+1}(x, y)$  的预测值。

在进行谱间预测时,第一帧图像作为参考帧要直接传输,然后从第二帧图像开始分别以前一帧预测当前帧的图像。多帧图像的预测误差经缓存可得到具有一定空间尺寸的单波段残差图像,如图 3 所示。单波段残差图像经 JPEG2000 压缩最终得到 JP2 格式的压缩图像。

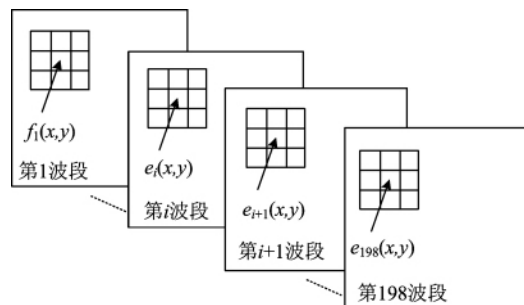


Fig 3 Single band image series

经以上分析,得到的压缩方案流程如图 4 所示。

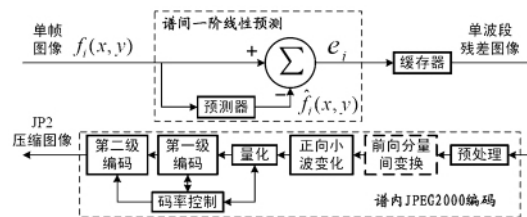


Fig 4 The process of compression scheme

在压缩过程中,由于一阶线性预测是无损过程,因此方案实现有损和无损压缩完全由 JPEG2000 压缩决定。解压缩是压缩的逆过程,先经过 JPEG2000 解码得到残差图像,后经谱间逆预测得到重建图像。

### 3 实时压缩系统设计

#### 3.1 系统总方案

在图像压缩领域,算法的实现方案主要分为两种<sup>[8]</sup>:一种是在逻辑芯片(如 FPGA)或信号处理芯片(如 DSP)内部开辟算法;另一种是逻辑芯片+ASIC 方案,其中逻辑芯片进行逻辑控制和辅助数据转换,ASIC 进行算法实现。一阶线性预测仅减法运算,易于在具备并行处理能力的 FPGA 上实现;JPEG2000 算法较复杂,为满足实时性要求,要采用专用芯片 ADV212 实现<sup>[9]</sup>。此外,在进行谱间预测和谱内 JPEG2000 压缩之前,均需要对图像数据进行大容量缓存。如果选择片内缓存,片内 RAM 资源至少要达到 MB 量级,只有高性能 FPGA 才能满足要求,这势必增加开发成本。为了同时满足低成本和缓存要求,采取片外缓存片内处理的方案。在这里,选择 Spartan-3 系列的 XC3S1000 作为主控芯片,片外采用四片 Micron 公司的 MT48LC32M16A2P-75 组成两组乒乓缓存。系统总方案如图 5 所示。

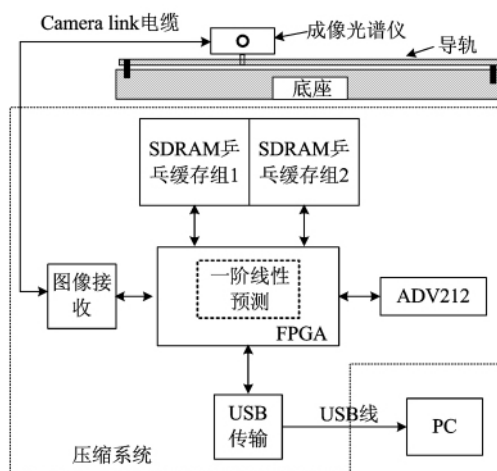


Fig 5 The whole scheme of compression system

系统主要由数据传输模块、谱间一阶线性预测模块和谱内 JPEG2000 压缩模块组成。其中,数据传输模块由图像接收和 USB 传输电路组成,负责接收原始图像数据和向 PC 传输 JP2 压缩码;谱间一阶线性预测模块由 SDRAM 乒乓缓存组 1 和 FPGA 组成,完成对原始图像数据进行谱间一阶线性预测;谱内 JPEG2000 压缩模块由 SDRAM 乒乓缓存组 2 和 ADV212 组成,完成对单波段残差图像的 JPEG2000 压缩。下面对各个模块进行设计。

#### 3.2 数据传输模块设计

成像光谱仪的相机采用 Camera Link 接口输出,图像的量化深度为 10bits,最大帧频 50Hz。选择 DS90CR288A, DS90LV031A 和 DS90LV019 芯片分别完成 Camera Link 中视频、相机控制和串行通信三部分 LVDS 信号与 TTL 信号之间的转换,硬件连接图如图 6 所示。DS90CR288A 将 4 对图像数据信号 X0-~X0+, X1-~X1+, X2-~X2+, X3-~X3+ 和 1 对相机输出时钟信号 XCLK-~XCLK+ 转

换成 RxOUT[0..27]和 RxCLKOUT。DS90LV031A 将 FPGA 输出的 Din[1..4]转换成 4 对 LVDS 信号 Dout1-~Dout1+, Dout2-~Dout2+, Dout3-~Dout3+和 Dout4-~Dout4+ 完成对相机的操作。DS90LV019 完成对 2 对 LVDS 信号 SerTC-~SerTC+和 SerTFG-~SerTFG+的转换,完成对相机各种参数的设置。

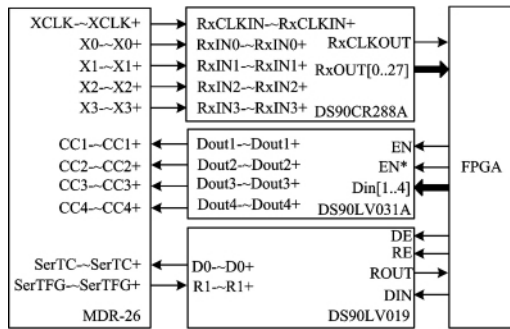


Fig 6 The conversion circuits' connections

选择 Cypress 公司的 CY7C68013A 作为 USB 芯片,它支持 480 Mbps 的高速传输模式,硬件连接图如图 7 所示。24CL02 用来存储用户 PID/VID, TCM811TR 用来提供复位监测功能。通过固件程序将 CY7C68013 设置成 SlaveFIFO 传输模式, FPGA 在 SLWR 有效时的每个 IFCLK 的上升沿将数据通过 FD[0..15]写入,然后经 DPLUS 和 DMINUS 信号线传输值 PC 机。

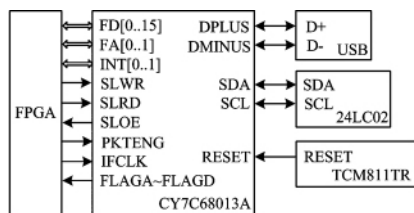


Fig 7 CY7C68013's connections

### 3.3 谱间一阶线性预测模块设计

谱间一阶线性预测模块硬件连接如图 8 所示。

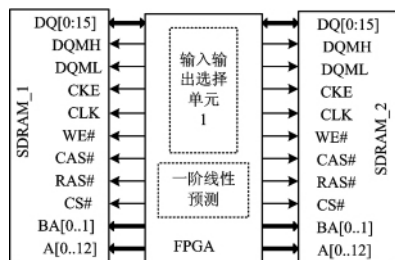


Fig 8 The spectral prediction module's connections

FPGA 经命令输入管脚 WE#, CAS# 和 RAS# 为对 SDRAM 先后进行行打开和列打开,然后经 BA[0..1]和 A[0..12]对有效像元的地址进行选择,达到剔除无效像元、减少数据量的目的。原始图像数据经 DQ[0..15]被写入或读出 SDRAM。FPGA 对读出的原始图像数据进行一阶线性预测处理,得到残差图像数据,并将其送入 JPEG2000 压缩模

块进行压缩。其中, FPGA 内部的输入输出选择单元 1 负责对 SDRAM\_1 和 SDRAM\_2 之间的切换,完成乒乓操作。

### 3.4 JPEG2000 压缩模块

JPEG2000 压缩模块硬件连接图如图 9 所示。

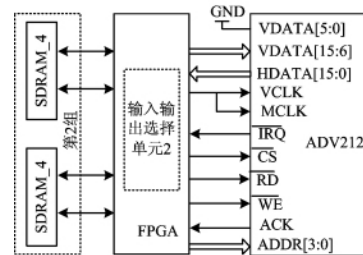


Fig 9 The JPEG2000 compression module's connections

ADV212 可以工作在视频模式和原始数据模式,在这里选择后者。上电时, FPGA 通过 ADI 公司提供的固件对 ADV212 的编码参数进行设置,选择无损压缩或一定压缩比的有损压缩。FPGA 从 SDRAM 乒乓缓存组 2 内读取单波段残差图像,经视频总线 VDATA 送入 ADV212 压缩芯片。由于总线 VDATA 是 16 位宽,而图像数据为 10 位宽,所以要将低 6 为接地。ADV212 在片选 CS, WE 和 VCLK 等控制下进行压缩,得到的 JP2 码通过主机接口总线 HDATA [0..15]输出。由于总线 HDATA[0..15]与 USB 的数据总线 FD[0..15]位宽相同, FPGA 可以直接将 JP2 码流写入 CY7C68013 向 PC 进行传输。

## 4 性能分析

图像实时压缩系统进行能否正常工作的关键是系统能否在最大输入数据率下对数据正常处理,并输出在最大传输能力内的数据率。凸面光栅成像光谱仪在最大帧频 50 Hz 下会输出最大数据率,压缩系统中数据率的变化及对应的作用模块如图 10 所示。

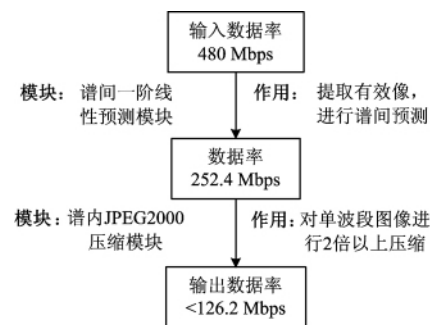


Fig 10 Data rate changes and their effect modules

成像光谱仪输入的最大数据率为 480 Mbps ( $1004 \times 1004 \times 10 \text{ bits} \times 50 \text{ Hz} = 480 \text{ Mbps}$ ), 经过谱间一阶线性预测模块后, 数据率变为 252.4 Mbps ( $594 \times 891 \times 10 \text{ bits} \times 50 \text{ Hz} = 252.4 \text{ Mbps}$ )。ADV212 所具备的 JPEG2000 标准能实现 1.5 以上的无损压缩和任意压缩比的有损压缩<sup>[10]</sup>, 可知经谱内 JPEG2000 压缩模块后, 输出 JP2 码数据率小于 126.2

Mbps。USB2.0 的最大传输能力是 480 Mbps, 可知该系统可以完成对上位机的数据传输。

以上分析表明, 该系统具备无损和有损压缩能力, 能对凸面光栅成像光谱仪图像数据进行实时压缩。

## 5 结 论

设计的凸面光栅成像光谱仪图像实时压缩系统能够对图

像数据进行有效压缩, 满足数据传输能力要求。同时, 该系统具备有损和无损压缩能力, 能够提供具有不同压缩质量的图像, 能同时满足不同应用领域的压缩要求, 实现了一机多用。此外, 由于凸面光栅成像光谱仪属于色散型成像光谱仪, 可知该系统可以为其他色散型成像光谱仪的图像数据实时压缩系统开发提供借鉴。

## References

- [1] Smith T. Wideband Advanced Recorder Processor (WARP) Validation Report. NASA Goddard Space Flight Center, March 19, 2002.
- [2] Yu Guoxia, Vladimirova Tanya, Sweeting Martin N. Acta Astronautica, 2009, 64: 988.
- [3] Lobb D R. Proc. SPIE, 1997, 3118, 339.
- [4] LIU Heng-shu, PENG Feng-hua, HUANG Lian-qing(刘恒殊, 彭风华, 黄廉卿). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2001, 19(4): 392.
- [5] Shannon C E. The Bell System Technical Journal, 1948, 27: 379, 623.
- [6] LIU Wen-yao(刘文耀). Photoelectric Image Processing(光电图像处理). Beijing: Publishing House of Electronics Industry(北京: 电子工业出版社), 2002. 177.
- [7] WANG Xin-nian, ZHANG Tao(王新年, 张涛). Digital Image Compression Technique(数字图像压缩技术实用教程). Beijing: China Machine Press(北京: 机械工业出版社), 2009. 70.
- [8] CHEN Ning-meng, LIU Lei-bo, ZHANG Li(陈柠檬, 刘雷波, 张利). Television Technology(电视技术), 2007, 31(6): 81.
- [9] ADV212 JPEG2000 Video Codec Data Sheet Rev.0. Analog Devices Inc, 2006.
- [10] WU Lin-feng(吴林峰). JPEG2000 and Its Application in Compression of Hyperspectral Remotesensing Images(PhD Dissertation)(JPEG2000 及其在高光谱图像压缩中的应用(博士论文)). Xi'an: Northwest Institute of Technology(西安: 西北工业大学), 2005.

# A Technology of Real-Time Image Compression for Convex Grating Imaging Spectrometer

LIU Yang-chuan<sup>1,2</sup>, Bayanheshig<sup>1</sup>, CUI Ji-cheng<sup>1</sup>, TANG Yu-guo<sup>1</sup>

- 1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
- 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The huge amount of convex grating imaging spectrometer image data brings much pressure to data transmission and storage, so the image must be compressed in real time. Firstly, the image characteristics were analyzed according to the imaging principle, and the compression approach to removing spatial correlation and spectral correlation was achieved; Secondly, the compression algorithms were analyzed and the 3-D compression scheme of one-order linear compression in spectral dimension and JPEG2000 compression in spatial dimension was proposed. Finally, a real-time compression system based on FPGA and ADV212 was designed, in which FPGA was used for logic control and implementation of prediction algorithm, and ADV212 was used for JPEG2000 compression. The analysis result shows that the system has the ability of lossless and lossy compression, enabling real-time image compression.

**Keywords** Imaging spectrometer; One-order linear prediction; JPEG2000; ADV212; Real-time compression

(Received Sep. 4, 2011; accepted Dec. 5, 2011)