

文章编号 1004-924X(2013)02-0445-09

## 星上多通道遥感图像的实时合成压缩

刘春香<sup>1,2\*</sup>, 郭永飞<sup>1</sup>, 李 宁<sup>1</sup>, 司国良<sup>1</sup>, 李云飞<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. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:**针对星上图像整合电路工作频率过高而造成的成像系统工作不稳定的问题,讨论了相机结构的改进,提出了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)平台实现星上时间延迟积分 CCD(TDICCD)遥感图像实时合成压缩的方法。介绍了星上多通道遥感图像实时合成压缩的原理。针对 TDICCD 线阵推扫成像模式的特点,使用改进的 JPEG-LS 压缩算法;通过自适应量化动态地控制码率,在 FPGA 硬件平台上实现了图像数据的实时合成压缩。试验验证结果表明,在无损压缩和 2 倍压缩时,系统主时钟从原来的 100 MHz 分别降低为 80 MHz 和 64 MHz。整合电路的工作稳定,恢复图像的峰值信噪比(PSNR)满足大于 80 dB 的要求。提出算法的存储量小,处理每行的平均时间为 57.5  $\mu\text{s}$ ,小于相机的最小行周期 63  $\mu\text{s}$ ,满足实时性要求。本文系统可靠性高,算法稳定,实现了星上多通道时间延迟积分 CCD 相机内部的实时合成压缩。

**关键词:**遥感图像;图像压缩;合成压缩;推扫式遥感相机;多通道时间延迟积分 CCD;JPEG-LS

**中图分类号:**TP751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0445

## Composition and compression of satellite multi-channel remote sensing images

LIU Chun-xiang<sup>1,2\*</sup>, GUO Yong-fei<sup>1</sup>, LI Ning<sup>1</sup>, SI Guo-liang<sup>1</sup>, LI Yun-fei<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: yu\_hit2007@163.com*

**Abstract:** To improve the understable imaging system caused by the high work frequency of image composing circuit on a satellite, the structure of a camera was innovated. A composition and compression method of Time Delay Integration CCD(TDICCD) based on a Field Programming Gate Array(FPGA) platform was proposed for satellite remote sensing data. The principle of real-time composition and compression for multi-channel satellite remote sensing data was introduced. Then, based on the characteristics of TDICCD linear array push-broom imaging mode, the improved JPEG-LS was used. By taking adaptive quantization to control the coding rate dynamically, composition and compression of image data were simultaneously achieved on the FPGA. At last, an experiment platform was estab-

收稿日期:2012-09-13;修订日期:2012-10-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61036015)

lished for the validation. Experimental results indicate that the system clock has reduced to 80 MHz and 64 MHz, respectively, from the original 100 MHz in the lossless and 2-time compression and the Peak Signal Noise Ratio(Reconstruct PSNR) of the image is higher than 80 dB. As the proposed algorithm has low storage capacity, the average processing time of one line image is  $57.5 \mu\text{s}$ , smaller than the smallest line period of the camera. The proposed algorithm is stable and the system is reliable and achieves the composition and compression of multi-channel TDICCD remote image within the camera.

**Key words:** remote-sensing image; image compression; composition and compression; push-broom remote-sensing camera; multi-channel Time Delay Integration(TDI)CCD; JPEG-LS

## 1 引言

时间延迟积分(TDI)CCD通过时间延迟积分的方法对同一目标景物进行多次光能量累加,可以获得更高的信噪比和灵敏度,因此,长焦距、小相对孔径的遥感相机通常采用TDICCD作为图像传感器。TDICCD具有多个通道同时输出图像,这样,就需要对采集到的图像进行整合。以前的相机都是采用先对图像进行整合,然后对合成的图像进行压缩,最后经数传回地面<sup>[1]</sup>。但是,随着相机的分辨率越来越高,视场越来越大,图像数据量成倍增加<sup>[2-3]</sup>。多通道TDICCD相机的像元主时钟已经超过100 MHz,有的甚至已经达到130 MHz,这就使得数据整合电路工作在非常高的频率下,甚至已经达到某些器件的极限频率。高频下的硬件电路工作状态非常不稳定,这就降低了整个成像系统的可靠性,严重时甚至无法成像。

本文研究的星上遥感图像合成压缩就是为了解决图像整合电路工作频率过高而造成的系统工作不稳定的问题,采用压缩与合成一体实现,在对图像数据进行整合的同时进行压缩,从而降低图像整合电路的频率。

目前,图像压缩技术已经成熟,JPEG2000是业界公认最好的静态图像压缩标准,具有良好的低比特率压缩性能,对于高压缩比优势明显<sup>[2-4]</sup>。但其算法实现复杂,需要对图像变换后编码<sup>[5]</sup>。JPEG-LS算法复杂度低,不适合高于4倍的高压缩比<sup>[6-8]</sup>,其静态码率控制方法并不能适合大视场、纹理和复杂度多变的星上遥感图像的实时压缩。国内外在数据压缩方面的研究热点在于码率的精确控制、低失真率下的高压缩比等<sup>[9]</sup>。

本文在信号的处理流程上进行创新。首先介

绍了多通道TDICCD相机的结构和合成压缩的原理,考虑到本文所研究相机的线阵推扫成像模式,采用改进的JPEG-LS压缩算法,提出了通过自适应量化来动态地控制码率的方法;同时,针对本文所研究相机多通道同时输出并进行图像处理的硬件结构,给出了合成压缩算法的边界处理方式,并具体介绍了基于现场可编程门阵列(FPGA)平台的硬件实现。最后,搭建试验平台,进行了验证,并对试验结果进行分析。

## 2 多通道TDICCD遥感相机的结构

本文所研究的多通道TDICCD遥感相机原理框图如图1所示。

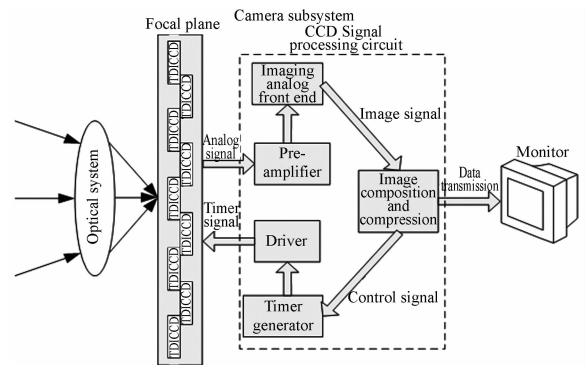


图1 多通道TDICCD拼接相机成像系统框图

Fig. 1 Block diagram of imaging system for multi-channel TDICCD camera

相机焦平面由10片TDICCD通过机械结构交错拼接而成,其中每片TDICCD结构图如图2所示。

每片TDICCD有4 096个像元,平均地由8个抽头输出,模拟CCD信号经预放大器放大后,进入视频处理器进行模数转换,再用8个ADC分别

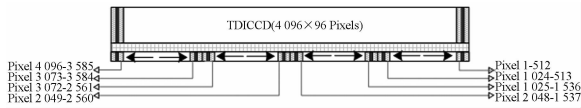


图 2 单片 TDICCD 结构图

Fig. 2 Structure of single TDICCD

对每个抽头输出的 CCD 模拟信号进行采样,最终将 12 bit 的数字图像输出到 FPGA。以前的相机都是直接在 FPGA 内将 8 路图像数据整合为 1 路,整合后的图像数据通过数据传输接口传送至图像压缩模块进行图像压缩<sup>[1,3-5]</sup>,这样,图像整合电路的工作频率为单个抽头像元时钟频率的 8 倍,这个频率会超过百兆,随着应用需求的不断提高,有时甚至会达到 130 MHz 以上,这就造成了成像系统工作的不稳定。为此,本文在相机的图像处理流程上进行了创新,在相机内部同时进行图像压缩与图像整合,单片 TDICCD 的信号流程图如图 3 所示。

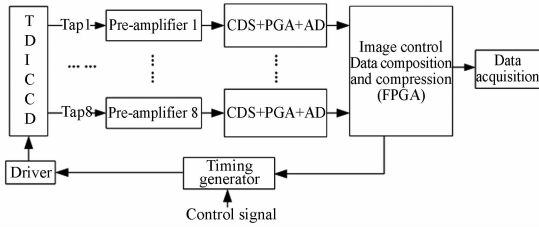


图 3 单片 TDICCD 输出信号流程图

Fig. 3 Flow chart of signal TDICCD output

本文成像系统中,每片 CCD 输出的 8 路图像数据信号后端都配有 1 个视频处理器,经过视频处理器内部的放大器和 AD 转换后的数字信号最终都输入到 FPGA 中,在 FPGA 内将图像压缩算法和图像整合过程融合在一起。采用压缩算法减少了数据量,这样就降低了图像整合电路工作频率,解决了由于图像整合电路工作频率过高而造成的成像系统工作不稳定问题。

### 3 多通道遥感图像合成压缩算法

由于本文研究的相机采用 TDICCD 作为图像传感器,考虑到它的线阵推扫成像模式和多通道并行处理的成像电路硬件结构,本文利用改进的 JPEG-LS 进行合成压缩,并提出通过自适应量化控制码率的方法,得到一种适合 TDICCD 相机

的星上多通道遥感图像实时合成压缩算法。

#### 3.1 JPEG-LS 算法

JPEG-LS 采用 LOCO-I 核心算法,通过建立简单的上下文模型,在低复杂度的情况下实现压缩<sup>[6]</sup>,算法对图像逐行压缩,正适合本文所研究相机的结构。JPEG-LS 压缩编码过程如图 4 所示。

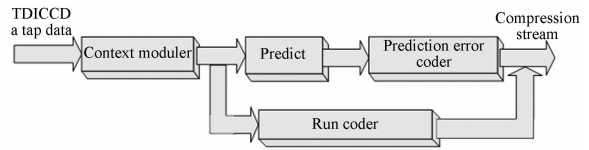


图 4 JPEG-LS 压缩编码框图

Fig. 4 Block diagram of JPEG-LS compression coding

将 TDICCD 一个通道的图像数据按行输入,首先进行上下文建模,通过上下文建模的判别,确定压缩模式,一种是正常模式,先对图像进行预测,得到预测残差后,再对预测残差进行 Golomb 编码;另一种是游程模式,对图像直接进行游程编码,压缩后的码流通过一个端口输出<sup>[8-9]</sup>。

##### 3.1.1 上下文建模

上下文建模是基于对上下文的认识,用于上下文建模和预测的因果型模板如图 5 所示。

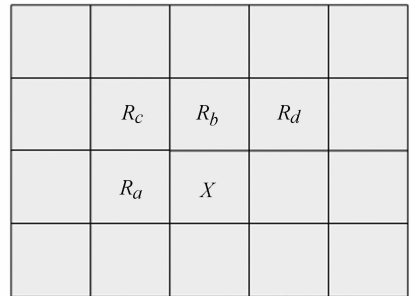


图 5 用于上下文建模和预测的因果性模板

Fig. 5 Causal template used in context modeling and forecast

采样值按从上到下、从左到右的顺序读入,采样点的上下文由  $a, b, c, d$  处像素的重建值  $R_a, R_b, R_c, R_d$  决定,采样值的上下文决定包括局部梯度的计算、模式选择、局部梯度的量化和量化梯度的合并<sup>[2]</sup>。梯度计算公式如下:

$$D_1 = R_d - R_b, \quad (1)$$

$$D_2 = R_b - R_c, \quad (2)$$

$$D_3 = R_c - R_a, \quad (3)$$

局部梯度值用来估计待编码的预测误差,根

据误差决定编码方式,若  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  的绝对值都小于等于容限值 NEAR, 进入游程编码模式;反之进入正常编码模式。NEAR 等于 0 为无损压缩,否则为近无损压缩。对于近无损压缩,在正常编码模式,则要求使用 NEAR 及  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  3 个递增非负阈值对梯度进行量化,通过梯度值与阈值的比较得到一个上下文矢量  $(Q_1, Q_2, Q_3)$ 。若矢量  $(Q_1, Q_2, Q_3)$  中  $Q_1 < 0$ , 则将矢量转化为  $(-Q_1, -Q_2, -Q_3)$ , 同时将符号标识变量设置为 -1, 否则设置为 1。最后,利用式(4)将矢量  $(Q_1, Q_2, Q_3)$  映射到整数  $Q$  上<sup>[2,9]</sup>。

$$Q = 9(9Q_1 + Q_2) + Q_3. \quad (4)$$

### 3.1.2 正常模式编码

正常模式编码包括预测和预测残差的编码。一个采样点  $x$  的估计值  $P_x$  由其相邻采样重建值  $R_a, R_b, R_c$  决定,预测公式如下:

$$P_x = \begin{cases} \min(R_a, R_b), & R_c \geq \max(R_a, R_b) \\ \max(R_a, R_b), & R_c \leq \min(R_a, R_b) \\ R_a + R_b - R_c, & \text{其它} \end{cases}, \quad (5)$$

然后根据符号标识变量的设置值进行校正,设置值为 1, 则  $P_x$  加  $C(Q)$  ( $C(Q)$  为纠正值)校正,否则减  $C(Q)$  校正。如果校正值越界,则将其设置成边界值。预测误差为采样值减去预测值  $P_x$ 。如果符号标识量的设置值为负,则预测误差取其相反数<sup>[7]</sup>。

得到预测误差后,便可对预测误差编码。在编码前,首先要确定 Golomb 编码变量  $k$ ,  $k$  满足:

$$(N(Q) \ll k) > A(Q), \quad (6)$$

$$(N(Q) \ll (k-1)) < A(Q). \quad (7)$$

$N(Q)$  为上下文个数,  $A(Q)$  为预测误差累计大小。对预测误差重新映射,使其非负。最后,进行 Golomb 编码,并根据预测误差对  $A(Q)$ 、 $B(Q)$  (上下文累计预测误差)、 $N(Q)$  进行更新<sup>[7]</sup>。最终输出压缩码流。

### 3.1.3 游程模式编码

游程编码包括两部分:游程扫描和游程编码。对图像数据进行扫描,起始值为当前采样值,遇到不同的采样值或当前采样行结束时,终止游程扫描。如果是因为行结束而终止,则只需对游程长度值进行编码,此时可以看做对 Golomb 的一种扩展;否则,要对游程的长度值和第一个采样值进行编码,之后还需要更新变量,最后输出压缩码流<sup>[10]</sup>。

## 3.2 算法优化

从以上可以看出,1)、JPEG-LS 使用静态码率控制方法,失真控制参数一旦确定,在整个压缩过程中保持不变。对于星上图像压缩,图像的纹理和复杂度变化很大,静态码率控制肯定是不适合的;2)、量化过程只与量化误差的当前值有关,与其邻域像素值都没有关联,与 Golomb 编码也没有关联。鉴于以上两点,本文提出通过自适应量化来动态控制码率,以期达到最优的编码效率。

首先,在 0~10 内选出失真控制参数部分参数值,组成失真控制参数调节数组。在编码过程中根据失真控制参数调节数组动态调整失真控制参数值,其值变大,码率减小,恢复图像的 PSNR 下降;否则码率增加,PSNR 上升。通过大量实验,失真参数值选取为  $\{0, 1, 2, 4, 5, 6, 8, 10\}$ , 考虑到符号相反情况,共有 15 个调节步长。然后,根据实验统计经验预设一组码率控制门限  $\{0.5, 0.45, 0.35, 0.3, 0.25, 0.15, 0.05, -0.05, -0.13, -0.15, -0.25, -0.39, -0.46, -0.53\}$ , 对应于 14 个调整步长。

自适应动态码率控制方法步骤:

- 1)、图像分块,压缩过程中每 20 行划分为一块;
- 2)、根据经验和目标压缩比确定失真控制参数的初始值,初始值将影响输出码率的收敛速度;
- 3)、预设码率控制门限,每当压缩完 20 行,判断当前码率与目标码率的差,将此差值与码率控制门限比较,根据偏离范围将失真控制参数向码率收敛方向增加或减少一个步长。如果偏离范围较大,将步长设置大一些。

通过实验统计,2 倍压缩时,失真控制参数初始值取 0, 4 倍压缩时,失真控制参数初始值取 4, 大多数恢复图像的 PSNR 较高。本文算法收敛速度快,且码率控制精确。

## 4 合成压缩算法的硬件平台实现

对于多通道 TDICCD 拼接相机图像实时合成压缩系统,由于像元个数多,扫描周期短,数据量大,因而对压缩算法的实现平台提出了很高的要求。如果采用在视频处理器和 FPGA 中间增加 DSP 来压缩数据的话,虽然计算方便且实时性好,不需要对算法进行改进和优化,但是增加了图

像数据处理环节,同时加重了系统硬件负担,降低了系统可靠性。而本系统采用 FPGA 来实现数据压缩算法既不用增加额外的硬件负担,结构又非常灵活,而且 FPGA 的并行运算结构也能满足实时性的要求。

#### 4.1 边界处理

每片 TDICCD 抽头 1~抽头 8 输出的信号分别经 8 个视频处理器,转化成 12 bit 的数字图像,然后按行存入 FPGA 的 BRAM 内。边界处理示意图如图 6 所示。图中阴影区内为有效像素值,非阴影区内为增加的边界值。

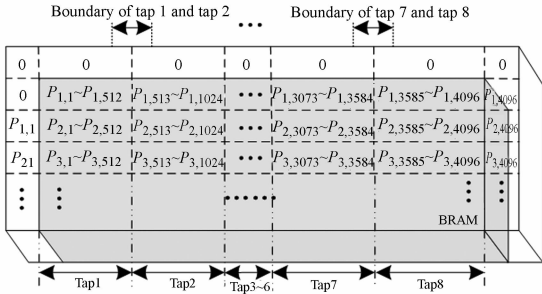


图 6 边界处理示意图

Fig. 6 Schematic of boundary dispose

将数字图像按行读入 FPGA 的 BRAM 内,存放时使 8 个抽头的图像在 BRAM 内按像元顺序连续存放,如图 6 阴影区内所示,这样,在处理抽头边界像素时,就可以依地址读取相邻抽头的一列像素值,这样就可以解决抽头间的边界问题。例如,在处理第二行的抽头 2 第 1 个像素  $P_{2,513}$

时,就可以依地址获取抽头 1 的  $P_{2,512}$ 、 $P_{1,512}$ ,与抽头 2 的  $P_{1,513}$ 、 $P_{1,514}$  共同形成像素  $P_{2,513}$  的上下文,以便下一步的预测、编码,形成最终压缩码流。因此,抽头间不存在边界问题。

对于整幅图像的边界问题,如图 6 非阴影区所示,在整幅图像的边界增加一行两列,即第一行上面增加一行,第一列前和最后一列后各增加一列。增加的行和列初始化为:第一行均为 0;第一列前 2 个数据为 0,从第三个数据开始均等于上一行图像数据的第一个值;最后一列数据均等于当前图像数据行的最后一个值<sup>[7]</sup>。

#### 4.2 FPGA 硬件实现

用 FPGA 对算法进行硬件实现是将合成压缩算法转化为硬件原语,在 FPGA 内部进行逻辑运算以及 RAM 的存取,以此来实现多通道图像数据的实时合成压缩。下面介绍具体的硬件实现方案。

FPGA 的选择主要考虑以下三点:大容量的内部数据存储能力、丰富的逻辑资源和足够的 IO 管脚。基于此,FPGA 选用 Xilinx 公司 Virtex2 系列的 XC2V3000-BG728,它有 96 个独立嵌入式  $18 \times 18$  乘法器,12 个数字时钟管理器以及 1 728 kbits 的 BRAM<sup>[11-12]</sup>。每片 TDICCD 抽头 1~抽头 8 的输出信号先经过预放电路,再由 TDA9965 内部的 ADC 转换成数字信号,然后送入 FPGA 中进行实时合成压缩,最终得到压缩后 8 合 1 的 TDICCD 图像压缩数据流,合成压缩算法 FPGA 内硬件实现框图如图 7 所示。

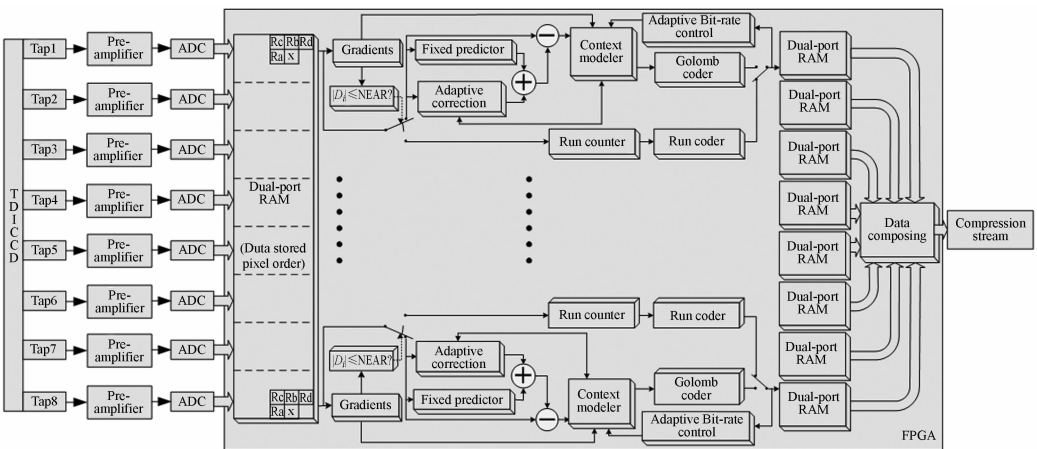


图 7 多通道实时合成压缩方法硬件框图

Fig. 7 Block diagram of hardware for multi-TDICCD composition and compression

如图 7 所示,经视频处理器变换后的数字图像按行输入到 FPGA 的双端口 RAM 内,8 个抽头的图像在 RAM 内按像元顺序连续存放。具体的上下文建模实现:在一个时钟周期内,读入下一个  $x$ ,同时将当前  $x$  的重建值作为下一个  $R_a$ ,将当前的  $R_b$  作为下一个  $R_c$ ,当前  $R_d$  作为下一个  $R_b$ ,从 RAM 中读出的值作为下一个  $R_d$ ,将当前  $R_a$  存入 RAM 作为下一行的邻域值。这样,用这种实现方法只需存储一行像素点就可以完成,大大节省 FPGA 的片内资源,并且不需要再增加外存储设备。同时,在图像像素点读入的同时,就可以进行上下文搜索,增强了实时压缩能力。具体实现步骤如下:

1) 初始化。初始化预设的上下文值  $A[0 \dots 364]$ 、 $B[0 \dots 364]$ 、 $C[0 \dots 364]$ 、 $N[0 \dots 364]$  以及失真控制参数和码率控制门限,初始化游程编码的表及索引。将抽样值  $x$  指向图像第一个像素。

2) 计算梯度值。若  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  都小于容限值 NEAR,转向 8); 否则进行 3)。

3) 梯度值量化。将梯度值  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  量化为上下文矢量  $(Q_1, Q_2, Q_3)$ ,并将其映射到范围为 1 ~ 364 的上下文条件  $Q$ 。

4) 根据公式(5),计算预测值  $P_x$ ,然后根据符号标识变量的设置值和利用  $C(Q)$  进行修正。

5) 计算预测误差。将真实像素值减去预测值,并将其映射到预定范围内。

6) 计算 Golomb 编码参数  $k$ ,对预测误差编码。

7) 每压缩完 20 行,将实际码率与目标码率的差与码率控制门限进行比较,调节失真控制参数,动态地控制码率。

8) 更新  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $N$  并返回第 1) 步。

9) 游程扫描,进行游程编码<sup>[13-14]</sup>。

最后,整理形成的码流,并与辅助数据打包,8 合 1 整合输出,其中,对辅助数据不进行压缩。

采用 VHDL 语言实现本文算法的 FPGA 原型,其功能仿真和时序仿真结果与软件仿真一致。此外,在程序设计时采用交错时钟沿的流水线设计方法来提高系统性能,采取乒乓操作增加系统的并行性,保证系统实时性。具体实现结果见表 1。

表 1 本文算法 FPGA 实现结果

Tab. 1 Implemented results by proposed algorithm

Index	Performance
Target device	Xilinx XC2V3000-BG728
Language	VHDL
Synthesize tool	Xilinx ISE 10.1
Clock	64 MHz
Slice	3 680
Resource utilization	25.7%

## 5 实验结果与分析

为了验证多通道 TDICCD 拼接相机图像实时合成压缩方法的性能,构建如图 8 所示的试验平台。

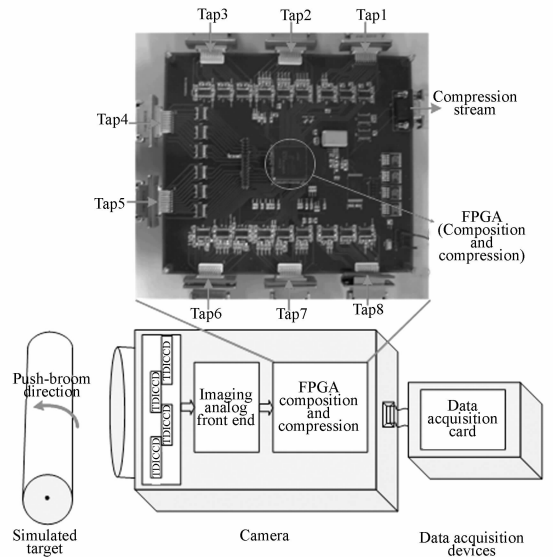


图 8 试验平台

Fig. 8 Experiment platform

如图 8 所示,模拟目标源为转速可精确控制的滚筒,箭头方向为相机的成像推扫方向,滚筒上附有高分辨率的实验图像和遥感图像的特制图片。通过精确控制推扫速度和调焦,模拟目标通过光学系统在相机的焦平面上清晰成像,然后通过成像模拟前端处理,每片 TDICCD 输出 8 路图像信号,信号以差分形式通过 8 个端口送入图像合成压缩板,合成压缩后的压缩码流通过数据采集卡传到计算机,进行图像的解压缩和数据分析。

应用本文方法分别进行无损、2 倍、4 倍合成压缩试验,下面以其中获取的两幅图像为例进行



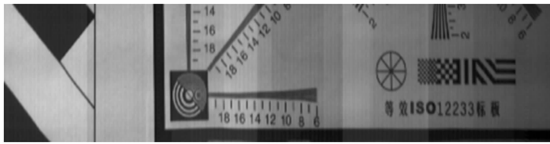
(a)原图像

(a) Actual image



(b) 无损压缩后恢复的图像

(b) Reconstructed image with lossless compression



(c) 2 倍压缩图像

(c) Reconstructed image with 2-time compression



(d) 4 倍压缩图像

(d) Reconstructed image with 4-time compression

图 9 推扫图像压缩效果

Fig. 9 Push-broom image compression



(a) 原图像

(a) Actual image



(b) 无损压缩后恢复的图像

(b) Reconstructed image with lossless compression



(c) 2 倍压缩图像

(c) Reconstructed image with 2-time compression



(d) 4 倍压缩图像

(d) Reconstructed image with 4-time compression

图 10 遥感图像压缩结果

Fig. 10 Remote sensing image compression

分析。图 9、图 10 分别给出了原图像和压缩后的恢复图像。

从主观角度,图像实时合成压缩效果很好。下面从客观角度,利用压缩比和 PSNR 对图 9 和图 10(12bit)压缩效果进行分析<sup>[15]</sup>,分析结果见表 2。

表 2 图像合成压缩性能指标

Tab. 2 Performance indexes of composition and compression

	图 9			图 10		
	Lossless	2 times	4 times	Lossless	2 times	4 times
Bit-rate/bpp	6.630 25	5.998 63	2.998 65	9.369 51	5.999 27	3.011 84
PSNR/dB	—	90.13	76.89	—	85.96	73.32

从表 2 可以看出,本文算法在无损压缩时,压缩比分别为 1.8 和 1.3;2 倍压缩时,峰值信噪比高达 85.96 dB,为近无损压缩;4 倍压缩时,达 73 dB 以上。同时,在 2 倍和 4 倍压缩时,本文算法的码率控制精确。利用存储量、处理时间对本合成压缩系统性能进行评估,结果见表 3。

表 3 合成压缩系统性能指标

Tab. 3 Performance index of system

	Lossless	2 times	4 times
Memory/Kbit	1 013	960	864
Clock number	4 601	3 376	2 981

本文算法所需的存储量约占 FPGA 的 BRAM 的  $1\ 013/1\ 728=58.6\%$ , 处理速度也非常快, 无损压缩时, 压缩每行的平均处理时间为

$$4\ 601/(80 \times 10^6) \times 10^6 = 57.5\ \mu\text{s}. \quad (8)$$

压缩每行的平均处理时间远小于相机的最小行周期  $63\ \mu\text{s}$ , 满足实时性要求。

在先对图像进行整合后再进行压缩时, 系统主时钟需为  $100\ \text{MHz}$ , 经过长线传输后时钟占空比很差, 有时会发生错数现象。若采用本文方法, 经过大量试验验证, 在无损压缩时, 系统主时钟为  $80\ \text{MHz}$ ; 在 2 倍压缩时, 系统主时钟工作频率为  $64\ \text{MHz}$ 。成像系统工作稳定, 恢复图像的 PSNR 可以达到  $80\ \text{dB}$  以上, 满足成像质量的要求; 在 4 倍压缩时, 系统主时钟为  $48\ \text{MHz}$ , 但成像质量一般。可以得出结论, 2 倍压缩已经足够满足本成像系统的需要。

## 参考文献:

- [1] 张学全. 基于 FPGA 的星载图像压缩系统实现方法研究[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2009:13-26.  
ZHANG X Q. *Implementation of Onboard Image Compression System Using FPGA*[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, 2009:13-26. (in Chinese)
- [2] 吴乐南. 数据压缩[M]. 电子工业出版社, 2005:90-93.  
WU L N. *Data Compression* [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2005:90-93. (in Chinese)
- [3] 高婷, 吴成柯, 王柯伊, 等. JPEG2000 中一种 EBCOT 并行体系的研究[J]. 空间电子技术, 2010, (1):70-73.  
GAO T, WU CH K, WANG K Y. A parallel coder for EBCOT in JPEG2000 [J]. *Space Electronic Technology*, 2010, (1):70-73. (in Chinese)
- [4] WANG CH, WU ZH L, CAO P, *et al.*. An efficient VLSI architecture for lifting-based discrete wavelet transform [C]. ICME Proceedings, Beijing, China, 2007, 1575-1578.
- [5] PAPANIKOLAKIS M E, KAKAROUNTAS A

## 6 结 论

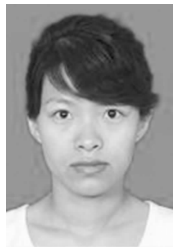
本文提出了针对相机内部的星上 TDICCD 遥感图像的实时合成压缩方法。在相机的图像处理流程上进行创新, 提出了通过自适应量化来动态地控制码率的方法。将图像数据按像元顺序在 FPGA 的 BRAM 内连续存放, 当处理通道边界时, 按地址读取相邻通道数据来解决相邻通道边界问题, 并给出了具体的硬件实现结构。最后, 搭建硬件试验平台, 进行了验证。实验结果显示无损压缩时, 系统主时钟为  $80\ \text{MHz}$ ; 2 倍压缩时, 系统主时钟为  $64\ \text{MHz}$ , 恢复图像的 PSNR 可以满足  $80\ \text{dB}$  以上的要求。每行图像的平均处理时间  $57.5\ \mu\text{s}$  小于相机的最小行周期  $63\ \mu\text{s}$ , 满足实时性要求。从试验结果来看, 本文方法资源占用率小、处理时间少且算法健壮稳定, 有效地解决了整合电路工作频率过高而带来的成像系统工作不稳定的问题。

- P. Efficient high-performance implementation of JPEG-LS encoder [J]. *Journal of Real-time Image*, 2008, (3):303-310.
- [6] 沈洪亮, 刘金国. 基于 JPEG-LS 的遥感图像无损压缩技术[J]. 光电子技术, 2009, 29(3):206-210.  
SHEN H L, LIU J G. Lossless image compression of remote sensing images base on the JPEG-LS [J]. *Optoelectronic Technology*, 2009, 29(3):206-210. (in Chinese)
- [7] SHEIKH H R, BOVIK A C. Image information and visual quality [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2006, 15(2):430-444.
- [8] 郝勇峥. 基于 JPEG-LS 算法的星载图像压缩系统设计[D]. 西安: 西安电子科技大学硕士学位论文, 2011, 17-24.  
HAO Y ZH. *Design of Onboard Image Compression System Based on JPEG-LS Algorithm*[D]. Xi'an: Xidian University, 2011, 17-24. (in Chinese)
- [9] AMEER S, BASIR O. Image compression using plane fitting with inter-block prediction [J]. *Image and Vision Computing*, 2009, (27):385-390.
- [10] 王建军, 刘波. 适于硬件实现的无损图像压缩[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4):922-928.  
WANG J J, LIU B. Hardware implementation of



- lossless image compression [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):922-928. (in Chinese)
- [11] ZHANG X Y, CHENG X K, LI X W, *et al.*. Key optimization techniques in JG-LS ip core design [J]. *Journal of Electronics*, 2010, 27(1):94-98.
- [12] 宋娟, 李云松, 吴成柯, 等. 基于  $L_{\infty}$  最小搜索和陪集码的高光谱图像无损及近无损压缩[J]. *电子学报*, 2011, 39(7):1551-1555.  
SONG J, LI Y S, WU CH K. Lossless and near-lossless compression of hyperspectral images based on search for  $L_{\infty}$  minimum and coset coding[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(7):1551-1555. (in Chinese)
- [13] 徐勇, 徐智勇, 张启衡, 等. 适于硬件实现的低复杂度图像压缩[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9):2262-2267.  
XU Y, XU ZH Y, ZHANG Q H, *et al.*. Low complexity image compression scheme for hardware implementation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2262-2267. (in Chinese)
- [14] 郭永彩, 苏渝维, 高潮. 基于 FPGA 的红外图像实时采集系统设计与实现[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(3):515-519.  
GUO Y C, SU Y W, GAO CH. Design and implementation of real time infrared image collection system based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(3):515-519.
- [15] 陈永红, 史泽林, 赵怀慈, 等. 空谱联合预测高光谱图像无损压缩 rice 算法[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(1):105-110.  
CHEN Y H, SHI Z L, ZHAO H C, *et al.*. Spatial-spectral associated prediction-based rice algorithm for hyperspectral image lossless compression [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(1):105-110.

#### 作者简介:



刘春香(1983—),女,吉林长春人,博士研究生,2007年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事光电成像技术及星上图像压缩等方面的研究。E-mail: yu\_hit2007@163.com



李 宁(1983—),男,吉林白山人,助理研究员,2012年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事红外辐射定标研究。E-mail: ningli521@qq.com



李云飞(1971—),男,吉林榆树人,工学博士,副研究员,主要从事光电成像中计算机应用技术方面的研究。E-mail: liyf@ciomp.ac.cn



司国良(1979—),男,吉林长春人,副研究员,2001年于吉林大学获得学士学位,主要研究方向为大规模集成电路设计。E-mail: siguol@sina.com

#### 导师简介:



郭永飞(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1990年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电技术应用,CCD在计算机中的应用等方面的研究。E-mail: guoyongfei@163.com