

适用于探空火箭的图像采集与压缩系统*

李大伟^{1,2}, 刘成¹, 郑建华¹, 刘一腾¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100190)

摘要:针对探空火箭遥测带宽低、图像监控通路多、系统小型化等设计难点,提出一种基于 ADV212 的图像采集与压缩系统设计方案。采用可以同时支持无损和高压缩比有损压缩的 JPEG2000 图像压缩标准,提出适用于箭上图像采集特点的通道切换和中断处理策略,并以“乒乓”操作的流水线作业方式实现多路图像通道数据吞吐,通过两个实时发送通道和一个缓存发送通道向火箭遥测链路发送图像数据。提出一种具有动态帧频和压缩比的图像压缩方案,解决了探空火箭遥测带宽有限这一问题。本设计以 Virtex-4 系列现场可编程门阵列作为系统控制核心,采用 ADV7182 和 ADV212 分别完成图像的采集和压缩,分别采用静态随机存取存储器和同步动态随机存取存储器实现图像的实时传输和缓存传输。通过比较图像间的峰值信噪比值,试验并分析了适用于电荷耦合元件图像的压缩滤波器和小波变换级数,得到了较为满意的图像质量。设计较好地满足了本次空间环境垂直探测探空火箭的图像采集任务。

关键词: ADV212; JPEG2000; 探空火箭; 图像压缩; “乒乓”操作; 通道切换

中图分类号: TP752.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2017)02-071-07

Image capture and compression system for sounding rocket

Li Dawei^{1,2}, Liu Cheng¹, Zheng Jianhua¹, Liu Yiteng¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The image system design for sounding rockets faced many difficulties, such as the limited telemetry bandwidth, multiple camera channels and a limited size, therefore an appropriate image capture and compression system based on ADV212 was proposed. The images were compressed as JPEG2000 standard which support both lossless and high ratio compression, so acceptable quality images can be transmitted through the limited-bandwidth telemetry channel. An effective channel switching and interrupt processing method suitable for on-board design was proposed. The image data was transmitted by assembly line based on ping-pong operation and sent to the telemetry module on sounding rocket via two real-time channels and one buffering channel. The images compression scheme, which support both dynamic frame frequency and dynamic compression ratio, was proposed to deal with the limited telemetry bandwidth. The whole system was controlled by a Virtex-4 FPGA (field programmable gate array), and images were decoded by ADV7182 and compressed by ADV212. The real-time data transfer was approached by SRAM (static random access memory), while the buffering data transfer was approached by SDRAM (synchronous dynamic random access memory). The suitable choices of compression filter and wavelet transformation level for CCD (charge-coupled device) images were analyzed through experiments by comparing PSNR (peak signal to noise ratio) between images. This image compression system fully satisfies the image monitor mission of space environment vertical exploration sounding rocket.

Key words: ADV212; JPEG2000; sounding rocket; image compression; ping-pong operation; channel switch

与其他遥测信息相比,图像信息具有直观、具体、信息量大等优点,因而成为获取火箭飞行状况、有效载荷工作状态不可替代的手段^[1]。本系统为2016年空间环境垂直探测试验探空火箭所设计。受到无线遥测带宽的限制,在不影响观测效果的前提下,需要对采集的图像进行适度的压缩。

JPEG2000 压缩标准能满足在较低的带宽条

件下具有较好的图像质量的要求。JPEG2000 放弃了 JPEG、MPEG-X 和 H. 26X 等现有的视频图像压缩标准中使用的基于分块的离散余弦变换 (Discrete Cosine Transformation, DCT), 率先将离散小波变换 (Discrete Wavelet Transformation, DWT) 用于图像处理,因而 JPEG2000 具有很多独特的优点。例如,比 DCT 更好的压缩性能,具有

* 收稿日期:2015-10-09

基金项目:国家“863”高科技资助项目(2015AA7033045)

作者简介:李大伟(1988—),男,安徽合肥人,博士研究生,E-mail:lidawei@nssc.ac.cn;

刘成(通信作者),男,副研究员,博士,E-mail:liucheng@nssc.ac.cn

渐进传输特性,可以有效避免 DCT 处理产生的块效应,图像还具有多分辨率分解特性^[2]。

目前箭上以及星上图像压缩主要采用两种方案,一是基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)或数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)实现专用的图像压缩算法,但这种方案对硬件要求较高,功耗较高,同时图像压缩的实时性受到算法复杂度的影响,并不适用于探空火箭这一应用场景。另一种方案是采用微处理器+专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)芯片,微处理器负责逻辑控制和辅助数据传输,由 ASIC 芯片负责算法的实现,现在采用越来越多的是后一种方案^[3]。

本次探空火箭观测任务主要包括头向、尾向飞行环境以及侧向电场仪伸杆展开的过程。其中针对头向和尾向飞行环境的图像清晰度和帧频要求不高,仅要求反映周边环境的状态,而对伸杆展开具体过程的图像记录要求较高,要求图像具有较高的清晰度和帧频。现在一般的设计均采用固定的压缩率和帧频,若各路图像均保留较高的清晰度和帧频,则带宽明显不够,缺少针对性的解决方案。故本设计创新性地提出一种具有动态帧频和压缩比的图像采集方案。

本套系统共采用 4 路摄像头,头向和尾向的两个摄像头图像采集频率为 1 frame/s,侧向的两个摄像头平常图像采集频率为 1 frame/s,在电场仪伸杆展开的时间段内图像采集频率提高到 20 frame/s,且采用无损压缩的图像。本次探空火箭供图像数据传输的有效遥测带宽为 600 Kbit/s,如何稳定地处理通道切换,传输动态帧频和压缩比的图像以及用有限的遥测带宽传输高帧频无损压缩的图像,将是本系统设计中必须要考虑的重点问题。

1 JPEG2000 图像压缩标准

JPEG2000 编码算法源于 David Taubman 提出的优化截取嵌入块编码(Embedded Block Coding with Optimized Truncation, EBCOT)算法,使用小波变换,采用两层编码策略,对压缩码流进行分层组织,不仅提高了压缩效率,而且压缩码流具有较大的灵活性。表 1 所示为常用的几种图像压缩方案比较^[4],由此可见 JPEG2000 可以同时支持有损和无损压缩,且效果较好,抗误码能力也较高。由于本设计采用 ASIC 芯片实现图像压缩,故对算法复杂度要求不高,综合比较起来, JPEG2000 压缩标准最为适合本应用场景。

表 1 压缩方案评估结果

Tab. 1 Compression standard evaluation results

	JPEG 2000	JPEG- LS	JPEG	MPEG-4 VTC
无损压缩效果	☆☆☆	☆☆☆☆	☆	
有损压缩效果	☆☆☆☆☆	☆	☆☆☆	☆☆☆☆
渐进传输	☆☆☆☆		☆	☆☆
算法复杂度	☆☆☆	☆	☆	☆☆☆☆
抗误码能力	☆☆☆	☆	☆	☆☆☆

JPEG2000 编码器结构框图如图 1 所示,首先预处理原始图像,将图像进行区域划分,对划分好的图像分片进行离散小波变换,然后量化得到小波系数,再对量化后的数据进行熵编码,最后形成 JPEG2000 标准的数据码流^[4]。

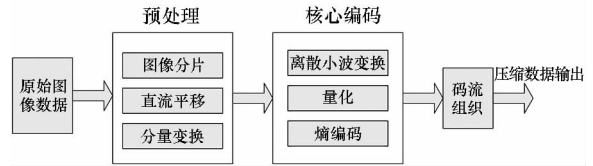


图 1 JPEG2000 压缩流程

Fig. 1 JPEG2000 compression process

JPEG2000 采用两种小波滤波器:整数 Daubechies5/3 滤波器和浮点数 Daubechies 9/7 滤波器。在进行小波变换计算的时候,只能实现有限精度存储,非整数的 9/7 滤波器的系数会损失一定的精度,故为不可逆滤波器组,只用于有损压缩。5/3 滤波器为可逆滤波器组,可实现图像的有损和无损压缩^[5]。

JPEG2000 使用的 DWT 是一个 2 维小波滤波器组,包含 2 个 1 维双通道滤波器,分别对图像进行水平和垂直方向的滤波。每进行一次 2 维 DWT 变换,产生 4 个子带,分别为 LL(水平低通、垂直低通)、LH、HL、HH,下一次 DWT 分解都是对前一次产生的 LL 子带进行,并产生 4 个新的子带,图 2 是进行 3 次 DWT 分解后的子带示意图。LL 子带包含图像的低频成分,即图像的基本信息,也是重建图像最重要的成分,而其他高频子

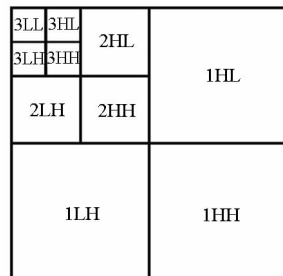


图 2 三级小波变换分解

Fig. 2 3-level wavelet decomposition

带,包含图像的细节信息,可以恢复图像的细节特征。DWT 能够有效去除图像数据间的相关性^[6]。

2 系统整体设计

箭载图像采集系统的控制核心选用 Xilinx 的 Virtex -4 系列 FPGA 芯片 XC4VLX60。XC4VLX60 含有 26 624 个逻辑单元,共计 2 880 Kb 容量的块状随机存取存储器(Random Access Memory, RAM),能够充分满足设计的需要。在本设计中,FPGA 完成包括外围芯片控制、只读存储器(Read Only Memory, ROM) IP 核生成、固件加载、参数配置、图像数据缓存、打包、下行传输等功能。

图 3 为系统设计框图,本系统采用 4 个分辨率为 720 × 576 的低功耗 PAL 制式电荷耦合器件

(Charge-Coupled Device, CCD)摄像头,输出为单端复合视频广播信号(Composite Video Broadcast Signal, CVBS),单个摄像头功耗仅为 0.6 W。CVBS 信号经视频采集芯片 ADV7182 转换为 8 位 ITU-R BT. 656 YCrCb 4 : 2 : 2 格式,再通过图像压缩芯片 ADV212 进行 JPEG2000 压缩,各路通道数据通过静态随机存取存储器(Static Random Access Memory, SRAM)进行“乒乓”操作缓存,高频采集的图像则直接由同步动态随机存储器(Synchronous Dynamic Random Access Memory, SDRAM)进入缓存发送通道,图像数据由数据调度模块进行数据流控制,再经由 RS - 422 通道发给箭载数传设备。本设计包含两条图像链路,图 4 所示为单路图像链路连接图。

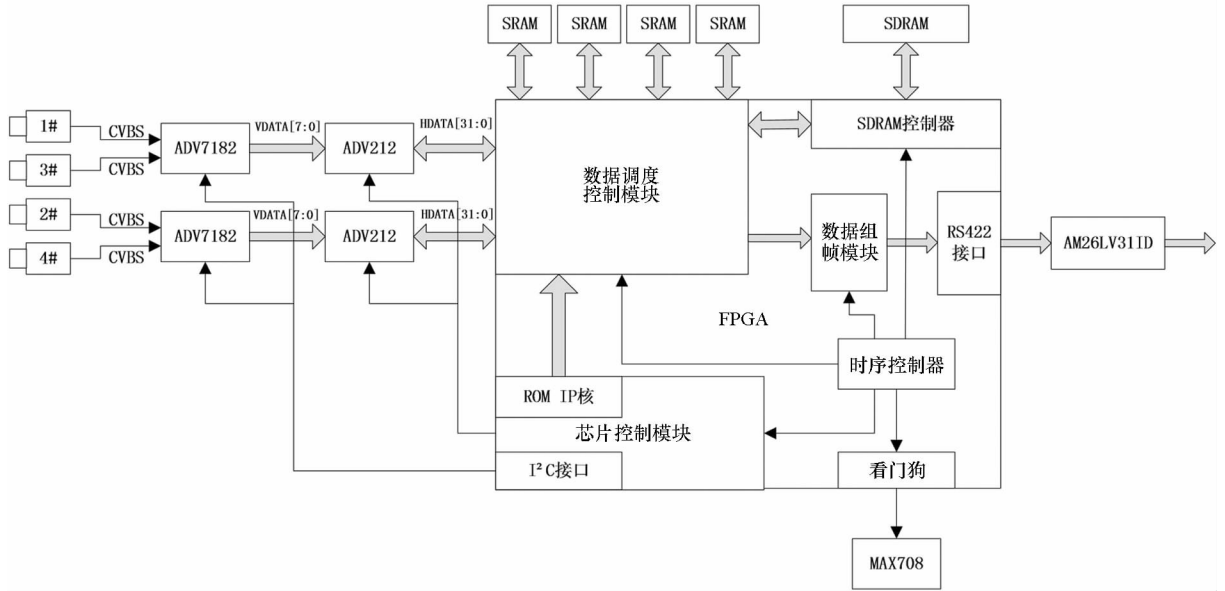


图 3 系统功能框图

Fig.3 Functional block diagram of the system

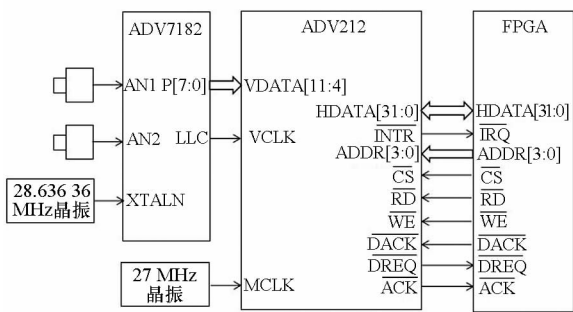


图 4 单路图像链路连接图

Fig.4 Connection scheme of single image channel

3 系统设计的关键模块

3.1 图像采集模块

本设计采用 ADI 公司的工业级芯片

ADV7182 实现图像的采集。ADV7182 为 10 位、4 倍过采样标清电视视频解码器,能够实现 NTSC/PAL/SECAM 视频制式的自动检测。最多支持 4 路的 CVBS 视频信号输入,具有快速的切换能力。支持目前较为流行的 8 位 ITU-R BT. 656 YCrCb 4 : 2 : 2 输出格式。

ITU-R BT. 656 视频信号包括以下几部分:有效视频的起始符(Start of Active Video, SAV),有效视频的终止符(End of Active Video, EAV),Blank 和 Active Video。其中 Blank 为消隐信号,用“80、10”填充,Active Video 为有效视频信号,共 720 个像素数据。SAV 和 EAV 信号由 4 个字节组成,前三个字节为:FF、00、00,第四个字节包含该行像素在整帧数据帧的位置以及区分 SAV 和 EAV 信号等信息^[7]。

在 ADV7182 正常工作前,需要通过集成电路 (Inter-Integrated Circuit, I²C) 总线对其内部寄存器进行配置。本设计的 I²C 接口控制采用 Verilog 语言实现,寄存器配置期间的状态机转移如图 5 所示。在时钟信号高电平时,数据线发送下降沿表示 I²C 开始通信,然后按位发送 ADV7182 芯片地址 ADDR,外加一位写标识。该地址的 ADV7182 将数据线拉低表示应答。然后发送 ADV7182 内部寄存器地址 SUBADDRESS,在 ADV7182 发送应答信号后,FPGA 发送该寄存器所要配置的值,成功写入后 ADV7182 再次应答。所有寄存器配置完毕后,FPGA 在时钟高电平时在数据线上发送一个上升沿表示配置结束。

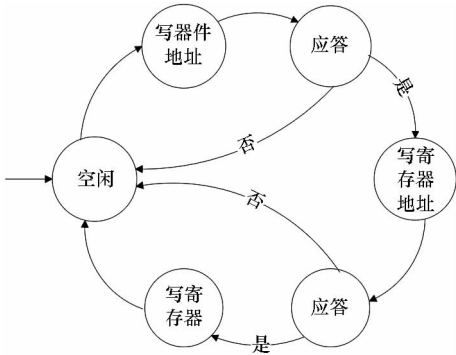


图 5 ADV7182 配置时的状态机转移图
Fig.5 Transformation of state machine during ADV7182 configuration

3.2 图像压缩与码流控制

国际标准化组织和国际电信联盟于 2000 年 12 月正式推出了 JPEG2000 标准,该标准采用以离散小波变换为主的多解析编码方法,具有许多优良的特性。ADV212 是 ADI 公司推出的一款基于 JPEG2000 标准的视频和高带宽静止图像编解码芯片,它能实现 JPEG2000 图像压缩所必需的高强度计算同时产生适用于大多数应用的码流,并且能够根据不用的应用场景,提供不同级的 JPEG2000 压缩,通过对其内部寄存器的设置,可以达到限定最大输出码流的功能,这非常适用于探空火箭带宽有限的应用场合。

ADV212 视频图像压缩芯片正确初始化是硬件压缩系统的关键。图 6 所示为 ADV212 初始化流程图。ADV212 初始化主要是配置其直接寄存器、间接寄存器、加载固件等。直接寄存器包括配置 ADV212 的时钟模式、引导模式和总线模式,间接寄存器主要配置图像压缩参数,比如图像格式、压缩模式、输出格式、输出码流等。本设计中采用的是 PAL 制式 CCD 摄像头,其输出图像流为奇

偶场交错,故 ADV212 输入图像格式寄存器 VFORMAT 应该赋值 0x09,即工作在 PAL de-interlaced 模式下,将奇偶场图像合并后再进行压缩。

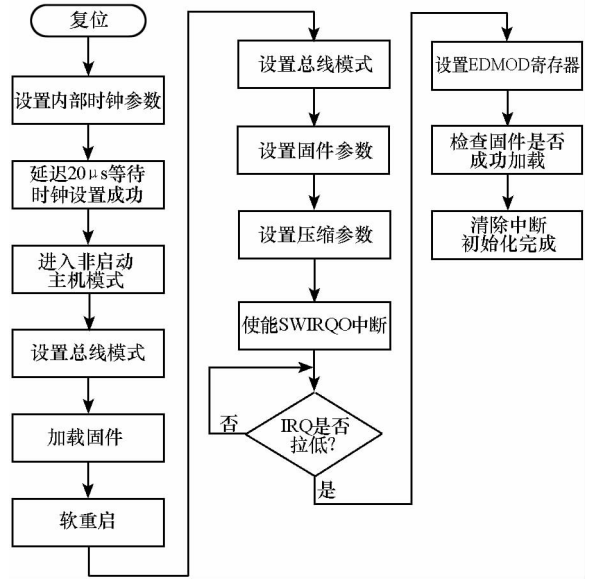


图 6 ADV212 初始化流程图
Fig.6 Initialization of ADV212

ADV212 正常工作除了需要进行必要的参数配置外,还需要加载压缩固件。本系统选用了 ADI 官网上最新版本的 encode_2_18_3COMP_0.sea 压缩固件,它实际上是 8192 个宽度为 32 bit 的数组。本设计采用的加载固件的方案是充分利用 Virtex-4 的片上块状 RAM 资源,生成一个具有 ROM 功能的 IP 核,宽度为 32 bit,深度为 8192,然后将 sea 文件转换为该 IP 核可以直接调用的 coe 文件,存储到片上块状 RAM 内。固件程序在 NO-BOOT 模式下通过 32 位标准 HOST 接口的 HDATA 导入。这种方案可以避免增加格外的片上存储芯片,简化设计,同时相比传统的 FLASH 存储方式,固件加载速度更为迅速。

为了使 ADV212 输出符合遥测带宽限制,必须对其进行码流控制,可通过配置 RCTYPE 和 RCVAL 两个寄存器来实现有损压缩输出码流控制^[8]。令 RCTYPE = 1,即可限定输出数据码流的最大带宽 ≤ RCVAL × (1 + 5%)。RCVAL 值的配置与 BW 有如下关系:

$$RCVAL = \frac{BW \times \eta}{8 \times (1 + 5\%)} \quad (1)$$

其中 η 为数据占比,大小为:

$$\eta = \frac{408}{422} \quad (2)$$

根据本发探空火箭的带宽限制以及任务需求,本设计提出了一种具有动态帧频和压缩比的

图像压缩方案。伸杆展开前,四路摄像头均以 70.4 : 1 对图像进行压缩;伸杆展开期间,拍摄伸杆的两路摄像头对图像进行无损压缩,且采样帧频为 20 frame/s,另外两路摄像头仍以 70.4 : 1 对图像进行压缩;伸杆展开结束后,四路摄像头以 105.6 : 1 对图像进行压缩,空余下来的带宽用来传输之前缓存的内容;缓发结束后,系统恢复到 70.4 : 1 的压缩比对图像进行压缩。本设计对 RCVAL 值的配置如表 2 所示。

表 2 RCVAL 值配置
Tab.2 Configuration of RCVAL

时序	图像通道 码流分布	RCVAL	图像 压缩比
伸杆展开前	150 Kbit/s × 4	0x450F	70.4 : 1
伸杆展开期间	2 Mbit/s × 2	—	5 : 1
	150 Kbit/s × 2	0x450F	70.4 : 1
缓发期间	80 Kbit/s × 4	0x2E0A	105.6 : 1
缓发结束后	150 Kbit/s × 4	0x450F	70.4 : 1

3.3 数据传输控制

本设计图像数据传输分为实时发送通道和缓存发送通道。高压缩比的图像数据通过“乒乓”操作转移到两片 SRAM 内作为实时通道,高频采集的图像数据搬到 SDRAM 内作为缓存通道,实时通道的优先级高于缓存通道。然后由数据调度模块进行发送通道切换和控制,最后由 RS422 通道传输给火箭数传模块。

“乒乓”操作是一种数据流水线传输方式,把“乒乓”操作模块看作一个整体,从这个模块的两端来看数据,输入数据流和输出数据流是连续不断的,没有任何停顿。“乒乓”操作常常应用于流水线算法,完成数据的无缝缓冲与处理。典型的“乒乓”操作方法如图 7 所示。

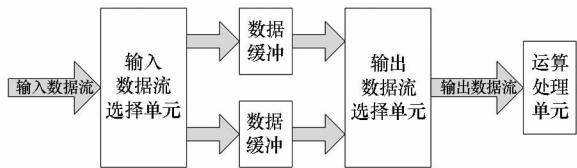


图 7 FIFO“乒乓”操作

Fig.7 Ping-pong operation of FIFO

对两片 SRAM 进行“乒乓”缓存的流程为,先将一帧数据包写入 SRAM₁,等待写完一帧数据包后,再向 SRAM₂ 写入下一帧数据包,然后依次进行。在对 SRAM₁ 进行写数据的同时,可以

对 SRAM₂ 进行读操作;同样地,在对 SRAM₁ 进行读数据的同时,可以对 SRAM₂ 进行写操作;使用两片 SRAM 进行“乒乓”操作,从而完成数据包流水线式的无缝发送^[9]。

3.4 视频通道切换

本系统中 1#、3#摄像头连接一片 ADV7182, 2#、4#摄像头连接一片 ADV7182。平常工作状态下,FPGA 通过 I²C 接口控制两片 ADV7182 每隔 0.5 s 切换一次通道,成功切换通道后,通过跳帧手段跳过第 1 张可能不太稳定的图片。这样 4 路摄像头每路每秒取一帧有效图像。当图像采集电路板收到电场仪伸杆展开提醒信号时,系统进入伸杆展开状态,头向和尾向摄像头帧频和压缩比保持不变,侧向的两个摄像头即 3#和 4#摄像头,拍摄电场仪伸杆展开过程。配置其图像帧频为 20 frame/s,且图像为无损压缩。此时视频数据量较大,先缓存在 SDRAM 内。伸杆展开过程结束后,摄像头恢复到之前每路帧频 1 frame/s 的状态。

1#、3#摄像头以及 2#、4#摄像头为分时复用,要求在每次视频通道切换后,每帧图像必须稳定,不能出现丢帧情况,而且应当具有一定的容错能力,假如当一个摄像头发生故障,能够适应性调整切换机制,而不会发生“死等”现象^[10]。

平常工作状态下切换通道时,通过 ADV212 的 LCODE 管脚输出状态确定 FPGA 已接收到完整的一帧图像,然后关闭 HDATA 通道,重新配置 ADV7182 的 INSEL 通道选择寄存器,切换通道,配置成功后重新打开 HDATA 通道,FPGA 接收完一帧图像后,再重新切换,如此重复。本图像采集与压缩系统已通过随机振动、低气压、温度循环等环境模拟试验以及常温 168 h 老练试验,未出现图像丢包丢帧情况,通道切换算法稳定可靠。

4 图像压缩效果比较与压缩参数选择

采用 ADV212 对图像进行压缩需要配置一系列 JPEG2000 压缩参数,其中比较重要的是小波滤波器以及小波变换级数的选择。为了找到适合本设计中 CCD 图像的压缩参数配置,在方案确定前进行了一系列试验,通过峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 这一参考值对各种参数下压缩的图像进行了比较。

PSNR 经常用作图像压缩领域中图像失真的判断标准。若两个 $m \times n$ 单色图像 I 和 K ,它们的均方误差 (Mean Square Error, MSE) 定义为:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \| I(i,j) - K(i,j) \|^2 \quad (3)$$

则 PSNR 定义为:

$$PSNR = 10 \lg \frac{(2^B - 1)^2}{MSE} \quad (4)$$

式中, B 为每个像素采样点的深度。对于本设计中的 RGB 图像而言, 每点有 R, G, B 三个深度为 8 bit 的采样值, 其均方误差是 R, G, B 三个通道均方误差的平均值, 进而可求得 PSNR 值^[11]。

9/7 滤波器在有损压缩时表现较好, 对于 ADV212 芯片, 有三种小波滤波器可供选择: 可逆 5/3 滤波器、不可逆 5/3 滤波器和不可逆 9/7 滤波器。可逆 5/3 滤波器用于无损压缩, 不可逆 5/3 滤波器和不可逆 9/7 滤波器均可用于无损压缩, 其中不可逆 9/7 滤波器被认为在高压比下有较好的效果^[12]。普通图像在不可逆 9/7 滤波器下, 随着小波变换级数的增加, PSNR 逐渐增加, 当小波变换级数大于 5 时, PSNR 逐渐趋于不变^[6]。

本试验中图像 I 为原始图像, K 为压缩后的图像, 分别在 9/7 和 5/3 滤波器下采用 1~5 级小波变换, 然后比较各张压缩图像的 PSNR 值。

通过 MATLAB 对探空火箭 CCD 摄像头图像数据进行分析所得结果如图 8 所示。可以发现, 在 9/7 滤波器下, 随着小波变换级数的增加, 所得图像的 PSNR 越来越高; 而在 5/3 滤波器下, 随着小波变换级数的增加, 所得图像的 PSNR 越来越低, 符合预期结果。综合比较起来, 在 9/7 滤波器下采用 5 级小波变换压缩后的图像 PSNR 更高, 故在本设计中选择这种配置进行 JPEG2000 压缩。图 9 为本设计图像压缩效果以及与相同压缩比的 JPEG 图像之间的比较, 可以发现 JPEG2000 压缩后的图像有较为满意的图像质量, 且优于相同压缩比的 JPEG 图像, 当压缩比为 105.6 时, JPEG 图像已出现明显的块效应失真。

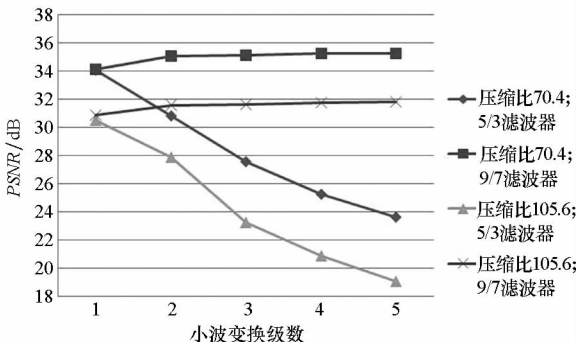


图 8 不同配置下图像的 PSNR

Fig. 8 PSNR of images with different configuration

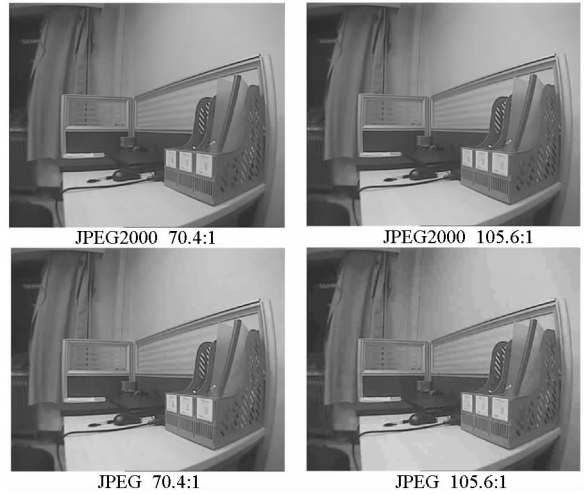


图 9 不同压缩比下 JPEG2000 与 JPEG 图像效果比较

Fig. 9 Images performance with different compression ratio between JPEG2000 and JPEG

5 结论

本套图像采集与压缩系统最大限度地利用了有限的遥测带宽, 提出了一种具有动态帧频和压缩比的图像压缩方案, 可同时传输高帧频无损压缩和低帧频高压比率的图像。采用 JPEG2000 压缩标准, 解决了高码流的图像与有限带宽之间的矛盾, 获得了该带宽下较为满意的图像质量。采用两片 ADV212 完成四路图像压缩, 图像通道和工作模式可以稳定切换, 以“乒乓”操作的流水线作业方式实现多路图像通道数据吞吐。通过试验得出适用于 CCD 图像的压缩滤波器和小波变换级数。设计具有功耗小、集成度高、灵活性强等特点。

参考文献 (References)

[1] 湛德荣, 包国兴, 胡宏华, 等. 运载火箭飞行状态图像箭上实时压缩技术研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(11): 2058 - 2059.
CHEN Derong, BAO Guoxing, HU Honghua, et al. Onboard real time compression of launch vehicle telemetry images [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30 (11): 2058 - 2059. (in Chinese)

[2] Charrier M, Cruz D S, Larsson M. JPEG2000, the next millennium compression standard for still images [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems, 1999, 1: 131 - 132.

[3] Yu G X, Vladimirova T, Sweeting M N. Image compression systems on board satellites [J]. Acta Astronautica, 2009, 64(9/10): 988 - 1005.

[4] Skodras A, Christopoulos C, Ebrahimi T. The JPEG 2000 still image compression standard [J]. IEEE Signal Processing

- Magazine, 2001, 18(5): 36 – 58.
- [5] Antonini M, Barlaud M, Mathieu P, et al. Image coding using the wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, 1(2): 205 – 220.
- [6] Rabbani M, Joshi R. An overview of the JPEG 2000 still image compression standard [J]. Signal Processing: Image Communication, 2002, 17(1): 3 – 48.
- [7] ITU-R Recommendation BT. 656. Interfaces for digital component video signals in 525 – line and 625 – line television systems operating at the 4 : 2 : 2 level of Recommendation ITU-R BT. 601 (Part A) [S]. ITU Radiocommunication, 1995.
- [8] Analog Devices Inc. . ADV212 JPEG2000 programming guide[DB/OL]. (2007 – 02 – 26) [2016 – 09 – 25]. ftp://ftp.analog.com/pub/Digital_Imaging/ADV212_UserGuide_PG_Datasheet/ADV212_ProgrammingGuide_Rev2.0.pdf.
- [9] 杨世锡, 梁文军, 于保华. 振动信号多通道同步整周期数据采集卡设计[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(1): 23 – 28.
- YANG Shixi, LIANG Wenjun, YU Baohua. Design of multiple channels synchronous capture of integral-period vibration signal [J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2013, 33(1): 23 – 28. (in Chinese)
- [10] 陈萍, 王林林, 陈志敏, 等. 探空火箭图像采集与压缩系统的研究与实现[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(2): 47 – 60.
- CHEN Ping, WANG Linlin, CHEN Zhimin, et al. Study and implementation of sounding-rocket picture capture and compression system [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(2): 47 – 60. (in Chinese)
- [11] 刘雷波. JPEG2000 静止图像压缩关键技术研究及 VLSI 实现[D]. 北京:清华大学, 2004: 20 – 21.
- LIU Leibo. Research on the key technologies of JPEG2000 still image compression and VLSI implementation [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004: 20 – 21. (in Chinese)
- [12] Sutikno T A, Mochammad F. Bulletin of electrical engineering and informatics [M]. Universitas Ahmad Dahlan, 2012: 57 – 58.