

适于大视场空间相机应用的高性能ADV212控制器

李进^{1,2}, 吕增明¹, 武奕楠¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院 北京 海淀区 100039)

【摘要】针对现有基于ADV212压缩系统的ADV212控制器难以满足空间TDICCD相机的应用,提出了一种适于大视场空间TDICCD相机的高性能ADV212控制器。首先,分析了ADV212工作原理,结合CCD数据特点,提出了Custom-specific模式工作机制,在该机制下,使用乒乓操作的SDRAM构造图像帧,并以流水线作业的方式实现单片ADV212处理5通道CCD数据。最后,使用地面检测设备对ADV212控制器进行了试验验证。结果表明,ADV212控制器能快速稳定地工作,压缩一帧图像仅需7.68 ms。在压缩比指标2:1~32:1内,PSNR均在30 dB以上,在正常工作压缩比为1 bpp时平均PSNR提高了2.49 dB。该控制器满足了空间相机压缩系统的应用。

关键词 ADV212控制器; Custom-specific模式; 图像帧; 空间相机

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.05.013

High Performance ADV212 Controller for Applications of the Large Field of View TDICCD Space Camera

LI Jin^{1,2}, LÜ Zeng-ming¹, and WU Yi-nan¹

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

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences Haidian Beijing 100039)

Abstract Because ordinary ADV212 controllers of compression scheme based on ADV212 cannot satisfy the demands of space camera, a high performance ADV212 controller for space camera is proposed in this paper. The working principle of ADV212 is first analyzed and then a working mechanism of custom-specific mode is presented. In the custom-specific mode, the frame is constructed by using the ping-pong operation of SDRAM and an ADV212 is applied to compress five-channel CCD data by pipelining. The interface among CCD, ADV212 and SDRAM is managed by interrupt handling strategy. Moreover, the three parameters which affect the quality of image compression are analyzed. The verification experiments to ADV212 compression system show that compression system works fast and stably. The time needed in compressing a frame image is only 7.68 ms, all PSNRs are more than 30 dB in the compression ratio of 2:1 to 32:1, and the average PSNR is increased by 2.49 dB in the lossy compression mode when the compression ratio is 1 bpp. The performances of the proposed controller effectively meet the requirement of applications of the large field of view TDICCD space camera.

Key words ADV212 controller; Custom-specific mode; image frame; space camera

随着空间TDICCD相机在视场和分辨率指标要求上的不断提高,使数字化后的CCD图像数据量急剧增加。现有星载存储器容量和卫星信道带宽受限,无法适应空间遥感图像的海量数据。因此,非常有必要对遥感图像进行压缩。目前,星上图像硬件压缩方案主要有两类:1) 处理器上实现压缩算法。2) 采用专用图像压缩芯片。第一类压缩方案仅考虑到压缩算法中的局部性能,没有考虑压缩算法的整体性能和应用背景特点,如文献[1-2]在FPGA处理器上实现压缩算法,这类方案不仅小波变换、小波系

数实时存储以及传输处理起来十分麻烦,还要对小波系数进行处理、量化、编码等操作,对于大视场遥感相机庞大数据量的场合难以实现。第二类方案开发难度低、压缩性能好、占用资源小、易于硬件实现,可以很好地嵌入到各种系统中,成为开发者首选方案。目前图像压缩芯片性能最好的是AD公司发布的静态图像JPEG2000压缩算法的专用芯片ADV212。它采用SRAM工艺构造硬件,延迟小、功耗和成本低,工作模式通过设置内部寄存器可以灵活配置,适用于多种视频和静止图像格式的压缩处

收稿日期: 2011-11-03; 修回日期: 2012-07-24

基金项目: 国家863项目(863-2-5-1-13B)

作者简介: 李进(1984-),男,博士生,主要从事光电成像和图像压缩方面的研究。

理。基于ADV212压缩系统开发的核心是ADV212控制器的设计。目前已有应用在不同场合的ADV212控制器,但是这些控制器仅适于自身应用的场合,难以满足空间相机的应用。对于空间相机而言,ADV212控制器需要针对CCD成像单元特点以及相机结构、工作特点进行设计。

本文在参考国内外相关技术的基础上,根据背景项目需求,提出一种适于空间相机应用的ADV212控制器。该控制器基于Custom-specific模式工作机制及基于流水线工作和乒乓操作的SDRAM的帧构造策略突破了传统ADV212控制器架构,非常适合空间相机CCD图像特点和ADV212工作特点。本文的这些创新性技术已经在某空间多光谱相机原理样机的压缩设备上获得了应用,应用表明,可以有效地解

决大视场空间相机庞大、复杂的数据压缩处理。

1 ADV212控制器总体框架

为了说明本文的ADV212控制器的设计背景,先简要说明CCD图像压缩系统组成。以本文的某空间全色相机原理样机的压缩系统为例,CCD成像单元含有16片全色单通道输出的CCD(有效像元为6 000),每片均采用专用视频处理器进行12 bit量化,图像数据率达到5.308 Gb/s。16通道数据通过高速光纤链路传输到图像压缩单元。为了减少相机复杂度,图像压缩单元将16通道数据分为3路进行压缩,系统所采用的16片全色CCD是相同的,所以对应的3路ADV212压缩结构也是一致的。具体到每路而言,压缩系统结构如图1所示。

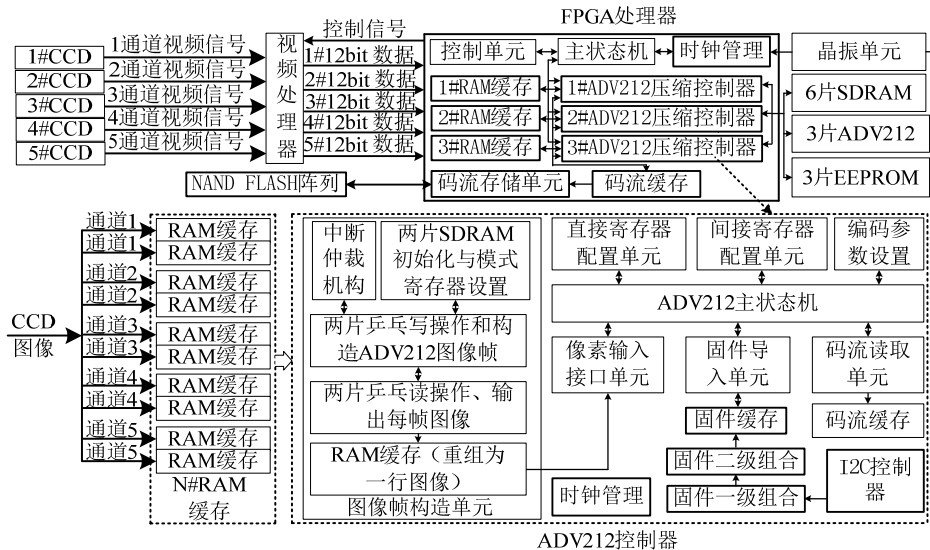


图1 系统总体结构图

5通道CCD图像数据同时输入压缩系统中,对于有损压缩工作时,每通道CCD的有效像元分为3部分进行压缩,因此压缩系统需要3片ADV212,每片ADV212负责5通道数据的2 000像元的压缩。对于无损压缩工作时,每通道CCD的有效像元分为两部分进行压缩,因此压缩系统需要2片ADV212,每片ADV212负责5通道数据的3 000像元的压缩。各通道数据先经过一级缓存器RAM进行缓存,ADV212压缩控制器负责完成管理ADV212正常工作、图像输入以及压缩码流读取等功能。本文设计的ADV212控制器结构如图1所示。控制器工作过程初始化、图像输入和码流读取分为3个阶段。初始化阶段完成:1)图像帧构造单元SDRAM工作模式和工作参数的设置;2)固件读取、两级组合、缓存和导入到ADV212中;3)ADV212直接寄存器、间接寄存器和编码参数

设置。图像输入阶段主要完成接收CCD输出图像,构造符合ADV212输入的图像帧格式,并输入到ADV212中。码流读取阶段主要完成根据中断标志读取码流FIFO中的码流并缓存到RAM中以便存入NAND FLASH中。

2 关键技术

2.1 Custom-specific模式工作机制

ADV212工作原理为:图像通过VDATA总线输入到像素接口,像素接口对图像进行去隔行处理后输入到小波变换引擎。小波变换引擎采用5/3或9/7小波滤波器对一帧图像进行小波分解,小波系数被存入内部存储器中。待小波变换后小波系数从内部存储器被传输到3个熵编解码器中,在熵编解码器中小波系数组成以码块为单元的数据形式,然后逐个

码块进行处理。每个码块经过量化、算术编码、率失真优化以及内容建模处理后, 对处理后的数据组织成包和层生成JPEG2000码流存入内部存储器, 并通过高速总线存入码流FIFO中。最后, 采用通用读写访问协议或外部DMA引擎读取FIFO中码流, 从主机接口输出。ADV212可配置为多种接口模式, 选用何种工作模式通常成为压缩系统设计的关键。为了高效率压缩图像, 国内外很多学者在不同的应用系

统中对ADV212的工作模式进行了大量的研究, 提出了多种ADV212工作模式, 但这些工作模式不适合大视场空间相机的工作特点, 难以满足其应用。结合空间相机CCD图像特点, 权衡速度、占用资源和可行性, 本文提出一种基于HVF和标准主机的Custom-specific模式工作机制, 使多通道CCD图像数据实时压缩, 提高了整个压缩工作效率, 节省FPGA占用资源。

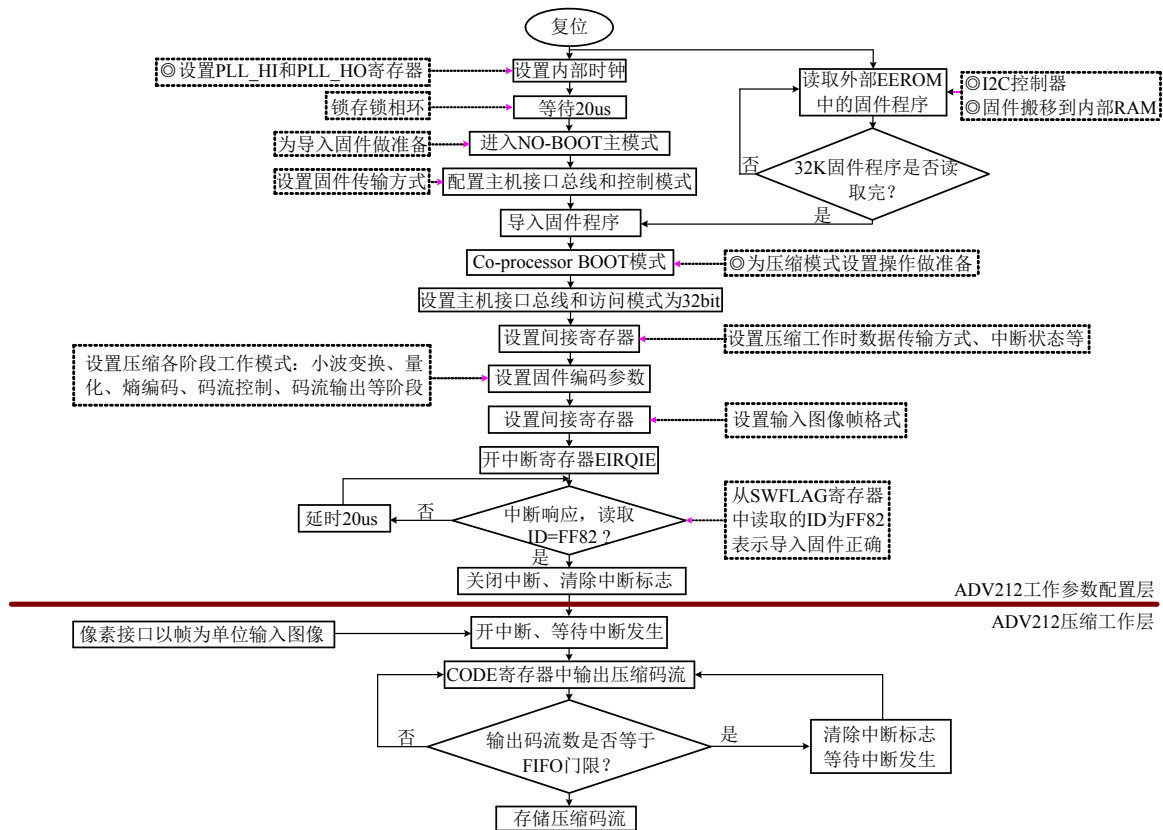


图2 Custom-specific工作模式

Custom-specific模式是一种定制工作方式, 即图像或视频输入格式不仅是标准视频格式如NTSC 4:2:2和ITU.R.BT656, 还可以根据不同的应用系统定制为特定图像或视频格式。遥感相机的TDICCD工作特点是以行为单位输出图像, 没有场和帧的概念, 且常用的视频处理器量化位数为10位和12位, 因此这种工作特点很适合Custom-specific工作模式。Custom-specific模式工作机制如图2所示。Custom-specific模式整个工作过程分为参数配置层和压缩工作层两个阶段。参数配置层主要分为3个部分: 片内锁相环时钟配置、固件程序导入、压缩工作参数和寄存器设置以及固件程序执行。锁相环时钟配置主要生成嵌入式处理系统时钟HCLK和JPEG2000规范硬件所有功能块时钟JCLK。固件程序导入是为嵌入

式RISC处理器配置工作固件程序, 以便其配置和管理整个系统运转。固件程序在NO-BOOT模式下通过32位标准HOST接口的HDATA导入。由于固件程序在外部基于串行总线协议I2C的8位EEROM存储, 为了提高效率本文采用RAM搬移策略, 即在系统复位后通过I2C协议读取固件程序并经串并转换后拼接为32位数据存储在RAM中, 然后搬移到ADV212中。固件程序执行在Co-processor BOOT模式下, 执行前需要对各种参数和寄存器进行设置, 其中定制图像数据以HVF格式通过VDATA输入, 压缩码流通过标准HOST接口HDATA输出。固件程序执行后读取ID判断固件程序导入是否正确, 待固件程序执行正确后进入压缩工作层。压缩工作层主要完成从像素接口向ADV212中输入图像数据和处理压缩码流中断

事件。

2.2 TIDCCD图像帧的构造策略

星载TIDCCD相机中,线阵CCD是对物体进行推扫成像的,CCD输出的图像以行为单位,每一行都是图像数据行。Custom-specific工作机制的像素输入是以帧为单位的。为了使CCD输出的图像数据高效率地输入到ADV212的像素接口中,本文提出一种基于流水线和SDRAM的图像构造帧策略。

以图1所示系统为例,CCD输出经视频信号处理单元进入图像实时压缩单元的图像格式以行为单位,每行由42个辅助数据和6 000个图像数据组成。辅助数据包括帧头、流水线号等信息码。ADV212每帧图像最大有效采样为1.048 Msamples,采用9/7小波滤波器(有损压缩)时,帧中每行最大有效像素为2 048,采用5/3小波滤波器(无损压缩)时,帧中每行最大有效像素为4 096。因此,单片ADV212不能对单通道CCD图像直接压缩处理。设ADV212输入帧图像垂直有效分辨率为 y ,水平有效分辨率为 x ,像素采样数为 n ,此时有:

$$xyn \leq 1.048 \times 10^6 \quad (1)$$

对于CCD输出的5通道数据均作为单色图像数据,即 $n=1$ 。当 $x=2\ 000$ 时,求得 $y \leq 524$;当 $x=3\ 000$ 时, $y \leq 349.333$ 。本文提出一种每帧图像无损压缩有效分辨率为 $3\ 000 \times 128$ 和有损压缩有效分辨率为 $2\ 000 \times 128$ 的图像帧。下面以有效分辨率为 $3\ 000 \times 128$ 为例进行分析。Custom-specific工作机制要求每帧最少有6行的水平消隐,每行最少有16个像素的垂直消隐。为了使每帧图像有效分辨率为 $3\ 000 \times 128$,本文采用补“0”的办法使每帧图像分辨率为 $3\ 042 \times 136$,即CCD每输出128行添加8行“0”,在每行开始添加42个像素“0”。添加的“0”行与“0”像素作为水平消隐和垂直消隐。每行添加42个像素“0”是因为辅助数据为42个像素,这样可以在输入ADV212中的42个垂直消隐时间内存储辅助数据。

Custom-specific工作机制压缩以帧为单位,但是向ADV212的像素接口中输入一帧图像也是逐行输入的。如果CCD输出的每行数据经内部RAM缓存添加垂直消隐后直接输入到ADV212像素接口,可以实现帧内的行数据格式,但无法添加水平消隐。本文采用两片乒乓操作的SDRAM作为帧构造装置。CCD输出128行图像并存入SDRAM1后,再存入SDRAM2中,在写SDRAM2的同时读取SDRAM1中已构造好的一帧图像送入ADV212进行压缩。依次类推实现SDRAM的乒乓操作。

SDRAM的乒乓操作充要条件是CCD输出128的时间内一方面需要从SDRAM中读取出136行图像数据,另一方面需要把读出一帧图像数据压缩完。因此需要考虑CCD输出、SDRAM读写以及ADV212输入三者之间的速率问题。CCD输出速率由行频决定,设CCD输出行频为 f_L ,卫星平均轨道高度为 H ,相机焦距为 f ,CCD像元尺寸为 a ,CCD输出128行积分时间为:

$$T_{\text{CCD}} = 128 \times 1 / f_L \quad (2)$$

式中, $f_L = (f/H)(V_{\text{卫星}} R_{\text{地球}} / a(H + R_{\text{地球}}))$ 。由第一宇宙速度公式求得卫星对地心速度 $V_{\text{卫星}}$ 为7 563 m/s, f_L 为2.531 kHz, T_{CCD} 为50.569 ms。设SDRAM最高工作频率为 k ,读取一帧图像时间为:

$$T_{\text{SDRAM}} = 136 \times 3\ 042 \times 1 / k \quad (3)$$

以MT48LC8M16A2P为例,最高可以工作在133 MHz,由式(3)求得 $T_{\text{SDRAM}}|_{\text{min}}$ 为3.111 ms。

ADV212最大有效分辨率输入速率为65 Ms/s,设图像帧率为 f_{Frame} ,水平有效分辨率为 V ,垂直有效分辨率为 H ,ADV212输入有效分辨率速率为 S ,ADV212输入一帧图像消耗时间为:

$$T_{\text{ADV212}} = 1 / S \quad (4)$$

其中,

$$S = HVf_{\text{Frame}} \leq 65 \times 10^6 \quad (5)$$

对于本文提出的有效分辨率 $3\ 000 \times 128$ 帧,由式(4)和式(5)求得 $T_{\text{ADV212}}|_{\text{min}} = 5.907$ ms。因此有:

$$T_{\text{SDRAM}}|_{\text{min}} + T_{\text{ADV212}}|_{\text{min}} \leq T_{\text{CCD}} \quad (6)$$

满足SDRAM乒乓操作的要求。

如果每片ADV212仅处理CCD输出一个通道数据,图1所示的压缩系统共16通道就需要48片ADV212,显然这样处理效率很低,另外星载压缩系统板面积受限制。因此本文提出一种基于流水线操作机制的单片ADV212处理多通道CCD输出图像策略。设图像帧率为 f_{Frame} ,水平有效分辨率为 V ,垂直有效分辨率为 H ,CCD输出行频为 f_L ,ADV212数据输入速度为 S ,单片ADV212处理CCD输出通道数为:

$$N = S / H \times V f_{\text{Frame}} \quad (7)$$

式中, $f_{\text{Frame}} = f_L / H$ 。由式(7)求得全色CCD行频 f_L 为2.531 kHz,在式(5)约束下由式(7)求得全色CCD的 $N \leq 8.56$,即每片ADV212最大可以同时压缩8通道CCD图像,但为了设计留有余量本文 N 取5,每片ADV212处理5通道数据。

3 实验与结果分析

3.1 无损压缩实验与分析

ADV212压缩系统无损压缩主要工作参数为: 像素时钟为50 MHz, JPG2000功能块时钟为108 MHz, 小波核类型为可逆5/3滤波器, 小波分解级数为5级, 码率控制算法为无截断方式。为了验证ADV212控制器能否在无损压缩模式下高效率的工作, 图像模拟源向ADV212压缩系统发送自校测试图形, 测试自校图形取1 024行(每行3 000像素)图像数据, 如图3a所示, 解压后为8帧图像, 对这8帧图像拼接后如图3b所示。

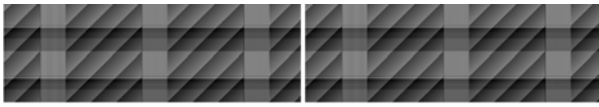


图3 压缩与解压缩图像(压缩比为0.443 641 bpp)

由图3可知原始图像和解压图像没有任何区别, 这是由于压缩为无损压缩, 原始图像和解压图像的每个像素值都完全一样。

表1为采用本文的ADV212控制器的压缩方案与其他压缩算法硬件实现时占用资源和耗时比较情况。由表1知本文控制器的压缩方案工作效率远优于其他压缩方法, 其中, LUT占用减少了61%, RAM占用减少了29.7%。压缩大小为128×3 000图像仅需7.68 ms, 节省时间达到80%。

表1 占用 FPGA 资源和耗时比较

方法	占用LUT	占用BRAM/Kb	耗时/128×3 000
JPEG2000 ^[3]	13 975	111.062	230.4ms
CCSDS ^[4]	7 981	137.472	51ms
JPEG-LS ^[5]	8 400	220	38.4ms
本文方法	3 102	78	7.68ms

3.2 有损压缩实验与分析

ADV212压缩系统工作参数小波类型改为9/7滤波器, 码流控制算法为目标大小截断, $(\epsilon_0, \mu_0)=(10, 5)$ 。压缩系统要求有损压缩比指标在2:1~32:1范围内, 正常工作有损压缩比设定为8:1。ADV212有损压缩比通过参数RCVAL设置, 设图像帧大小为M×N, 像素位数为K bit, 压缩比为Q, 则RCVAL=(Hex)MNK/8Q, 对于测试图像M=3 000, N=128, K=8, 如压缩比为4:1、8:1和32:1的RCVAL值分别为: 0x2EE00、0xBB80、0x2EE0。测试图像取20帧, 在不同压缩比下压缩后经解压得到的重构图像如图4所示。由图4可知压缩系统在指标范围内解压缩后图像非常清晰, 达到遥感图像压缩指标要求。



图4 压缩与解压缩图像

为了测试压缩系统有损压缩性能, 压缩存储服务器向模拟源注入不同纹理特征的遥感图像, 在不同的压缩比下分析PSNR(峰值信噪比), 有:

$$PSNR = 10 \lg(2^B - 1)^2 / MSE \quad (8)$$

式中, MSE为原始图像和重建图像的均方误差。测试结果如表2所示。图5为文献[6-10]中遥感图像有损压缩算法的平均PSNR。

表2 有损压缩 PSNR dB

缩比/bpp	Pyramids	HKCEC	Boulder	Izmir Turkey
4	60.217 9	63.915 8	62.342 7	55.506 6
2	50.265 0	55.068 8	52.175 6	44.444 3
1	43.973 5	45.561 8	45.821 6	38.625 6
0.75	41.992 7	42.732 5	43.646 2	36.816 2
0.5	39.506 5	39.498 5	41.241 2	35.104 8
0.25	36.254 9	35.866 0	37.785 9	32.491 2

由表2可知, 本文压缩方案压缩比在工作指标范围内PSNR均在30 dB以上, 重建后图像为好的重建图像^[11]。比较表2和图5可知, 本文压缩方案在压缩比指标范围内均优于其他方法, 其中正常工作压缩比为1 bpp时平均PSNR达到43.49 dB, 比现有压缩方法高2.49 dB。

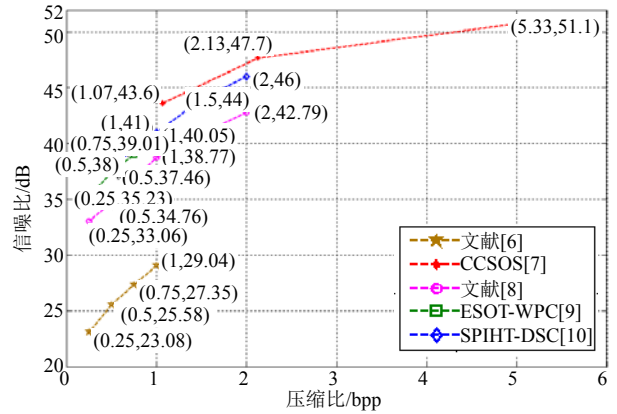


图5 其他方法的平均PSNR

4 结论

本文提出一种适于大视场空间TDICCD相机应用的高性能ADV212控制器, 该控制器采用Custom-specific模式工作机制、基于流水线作业和乒乓操作的SDRAM帧构造策略, 包括3 000×128和2 000×128图像帧以及添0实现水平与垂直消隐, 提高了压缩系统工作性能。最后, 使用自主研发的地面检测设备对某空间多光谱相机样机的ADV212压缩设备平台

进行了试验验证。结果表明,压缩系统占用资源少,LUT占用减少了61%,RAM占用减少了29.7%。处理速度快,压缩大小为 $128 \times 3\ 000$ 图像仅需7.68 ms,节省时间达到80%。在系统指标2:1~31:1范围内,PSNR均在30 dB以上,正常工作压缩比1 bpp时平均PSNR达到43.49 dB,比现有压缩方法高2.49 dB。该控制器为大视场空间相机的图像数据整体硬件压缩实现提供了一种很好的解决方案。同时可以为未来星上专用图像压缩芯片的设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] 张学全, 顾晓东, 孙辉先. CCSDS星载图像压缩模块的FPGA设计与实现[J]. 半导体光电, 2009, 30(6): 935-939.
ZHANG Xue-quan, GUO Xiao-dong, SUN Hui-xian. Design and implementation of CCSDS based on board image compression unit using FPGA[J]. SEMI Conductor Optoelectronics, 2009, 30(6): 935-939.
- [2] 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 Jian-jun, LIU Bo. Hardware implementation of lossless image compression[J]. Opt Precision Eng, 2011, 19(4): 922-928.
- [3] MA Tao, WEN De-sheng. A study of JPEG2000 encoding system and its VLSI implementation[J]. Acta Photonica sinica, 2009, 38(4): 1011-1019.
- [4] 陈哲, 涂国防, 张灿, 等. 基于FPGA的CCSDS图像数据压缩系统的设计[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(1): 101-107.
CHEN Zhe, TU Guo-fang, ZHANG Can, et al. Design of CCSDS image compression system based on FPGA[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 28(1): 101-107.
- [5] 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 Hong-liang, LIU Jin-guo. Lossless image compression of Remote sensing Images Base on the JPEG-LS[J]. Opto-Electronic Technology, 2009, 29(3): 206-210.
- [6] 王磊, 吴家骥, 白静. 基于整型可逆时域交叠变换的遥感图像压缩[J]. 光子学报, 2010, 39(12): 2251-2256.
WANG Lei, WU Jia-ji, BAI Jing. Remote sensing image compression based on reversible integer time domain lapped transform[J]. ACTA Photonica Sinica, 2010, 39(12): 2251-2256.
- [7] ALBERT L, CHANG C F. Implementation of CCSDS data compression for remote sensing image[J]. SPIE, 2010(7810): 78100W-1-78100W-10.
- [8] TIAN Xin, WANG Chun-ming, TAN Yi-hua, et al. ROI image compression algorithm for reconnaissance satellite systems[J]. SPIE, 2009(7498): 74982C-1-74982C-7.
- [9] 米德伶, 冯鹏, 魏彪, 等. 扩展方向树的遥感图像小波包压缩算法[J]. 光电工程, 2008, 35(1): 94-99.
MI De-ling, FENG Peng, WEI Biao, et al. Wavelet packet compression algorithm for remote sensing images with extended spatial orientation tree[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(1): 94-99.
- [10] 宋娟, 李云松, 吴成柯. 基于分层树集合分割的分布式干涉多光谱图像压缩[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 358-363.
SONG Juan, LI Yun-song, WU Cheng-ke. Compression for distributed interferential multispectral image based on set partitioning in hierarchical trees[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 358-363.
- [11] NICHOLS S, KIM H, HUMOS A A, et al. A performance evaluation on DCT and wavelet-based compression methods for remote sensing images based on image content[J]. IEEE, 2009, 30(2): 358-363.

编辑 漆蓉