

CCSDS-IDC 位平面编码的优化实现

周文敬^{1,2}, 张学全¹, 安军社¹, 王鸣哲^{1,2}

(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: CCSDS-122.0-B-1 星载图像压缩标准所提供的压缩算法具有良好的压缩性能和较低实现复杂度. 但是, 在硬件实现该标准时数据速率和存储资源之间存在制约关系, 为了既能达到较高的数据速率又能减少硬件资源, 本文提出了组内串行, 组间并行的扫描方式, 并仿真实现了改进后的软件系统. 实验结果表明, 该扫描方式可以有效的降低硬件资源.

关键词: CCSDS; 小波变换; 位平面编码; 图像压缩

中图分类号: V19

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)09-0032-06

Optimal Implementation of Bit Plane Encoder for CCSDS-IDC

ZHOU Wen-jing^{1,2}, ZHANG Xue-quan¹, AN Jun-she¹, WANG Ming-zhe^{1,2}

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

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

Abstract: Recommended Standard CCSDS 122.0-B-1 provides a compression algorithm which has an advantage over providing a trade-off between the compression performance and the implement complexity. However, there exist restricting relations between the data rate and the storage resources while implemented on hardware. In order to reduce the hardware resources of the algorithm's implementation under low rate loss cost, in this paper we propose a novel scanning mode, which combines the serial and parallel bit plane scanning, and implement a software system based on the scanning mode. This scanning mode can reduce the hardware resources efficiently.

Key words: CCSDS; wavelet transform; bit plane encoding; image compression

1 引言

空间数据咨询委员会(CCSDS)于 2005 年 11 月颁发了适用于星载图像压缩的 CCSDS 122.0-B-1 推荐标准^[1]. 研究者们对该标准所推荐使用的压缩算法(CCSDS 算法)的实现和改进做了大量研究. Leandro 和 Delaunay 等人对离散小波变换部分提出改进了方案^[2-3]. Artigues 和 Prem 等人对位平面编码模块中新的编码方式进行了探索^[4-5]. Li 等人将 ROI(感兴趣区域)的压缩技术应用于 CCSDS-IDC 系统, 并在 Xilinx Virtex-5QV 实现, 其数据速率达到 200 Mpx/s^[6]. Manthey 等人所开发的基于 FPGA-RTAX2000S 所实现的硬件系统^[7]应用于

ESAProba-V 的 DHU 项目和德国 EnMAP 的 DSHA 项目中. 文献[8-9]实现了 CCSDS-IDC 的 FPGA 设计, 但是数据速率不高. 文献[10]实现了编码和扫描的并行系统, 在一定程度上提高了数据速率, 但其硬件资源占用较多. 文献[11]实现了全并行的扫描和流水的编码结构, 相对于全并行的扫描和编码结构在一定程度上减少了硬件资源的占用.

上述研究中位平面的扫描方法是串行或者全并行的方法, 全并行的扫描方式相对 CCSDS 原有的串行扫描方式能够减少扫描时间, 但也大幅增加了硬件资源. 为了在扫描时间增加较少的情况下, 大幅降低硬件资源, 本文在前人工作的基础上, 提出一种新的扫描结构.

2 CCSDS 算法

CCSDS 122.0-B-1 图像压缩标准支持 8-16 位二维静态图像的压缩,并且支持有损压缩和无损压缩两种方式.如图 1 所示,该算法由两大模块组成:小波变换模块^[12-13]和位平面编码模块^[3].



图 1 CCSDS-IDC 结构

在该算法中,对图像数据的去相关操作采用了三级二维 9/7 整数小波变换和 9/7 浮点小波变换.其中,浮点小波在低比特率时性能略好于整数小波变换,但是只能用于有损压缩,且浮点运算需要消耗大量的硬件资源和计算时间;整数小波变换可用于无损压缩,并能够节省大量的逻辑资源. JPEG2000 图像压缩标准采用了 5/3 变换. 5/3 小波相对于 9/7 小波,硬件复杂度低,PSNR 差异不大^[14]. 因此,本文架构推荐使用 5/3 小波变换,但对于三种小波变换方式都进行了软件实现.

小波系数的编码由位平面编码模块完成.该模块将小波系数进行子带加权和重新分组,并依次形成块和段.块中的系数进行联合编码,各段之间进行

独立编码.对于每个编码段,直流系数和每个块中交流系数的位深进行简化的 Rice 编码^[12],同时对直流系数的低比特位和交流系数进行位平面编码.位平面编码模块使用串行算法依次扫描段中的各个位平面,获取扫描字并将其映射成符号,再对符号进行熵编码.扫描和编码的过程分成 5 个 stage,分别对应不同块系数的编码.

CCSDS 算法中位平面的扫描和编码过程是串行执行的,处理的速度较低^[9],若由完全并行的结构实现,会占用大量资源.考虑到高位的位平面扫描时间较短,而低位的位平面扫描时间较长,若将两者并行,则编码时间取决于较长的位平面的扫描时间.如果将多个高位的位平面串行进行扫描,再与较低的位平面一起进行并行扫描,则可在数据速率降低较少的情况下大幅减少硬件资源.

3 系统实现

本文所设计的系统包括小波变换模块、位平面编码模块和图形界面.其中,小波变换模块集成了三种小波变换:5/3 整数小波、9/7 整数小波和 9/7 浮点小波.位平面编码模块集成了 DC 系数以及 AC 系数的编码模块.具体的系统结构如图 2.

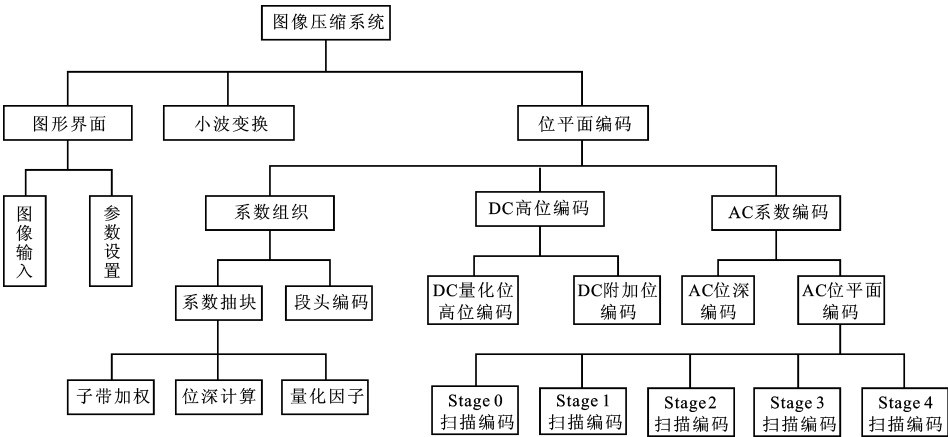


图 2 CCSDS-IDC 系统

3.1 小波变换模块

小波变换模块集成了三种小波.其中,9/7 小波在 CCSDS 中有详细的说明,因此本文仅简述 5/3 小波的实现.5/3 提升整数小波变换的公式为:

$$D_j = x_{2j+1} - [0.5(x_{2,j} + x_{2,j+2}) + 0.5]$$
$$j = 1, \dots, N-1 \tag{1}$$

$$C_j = x_{2j} - [-0.25(D_{j-1} + D_j) + 0.5]$$
$$j = 1, \dots, N-2 \tag{2}$$

$$D_{N-1} = x_{2N-1} - [x_{2N-2} + 0.5] \tag{3}$$

$$C_0 = x_0 - [-0.5D_0 + 0.5] \tag{4}$$

在本文架构中,图像经过三级二维小波变换,最终得到 10 个子带系数.

3.2 位平面编码模块

3.2.1 形成编码段

小波变换系数的 10 个子带的分布见图 3 左侧部分.为了改善图像压缩的平均效果,变换后根据加权因子对各个子带进行加权^[11].然后,每 64 个小波系数将按照一定关系组成块,如图 3 所示.相邻的块

组成一个编码段,且各段之间独立进行压缩.

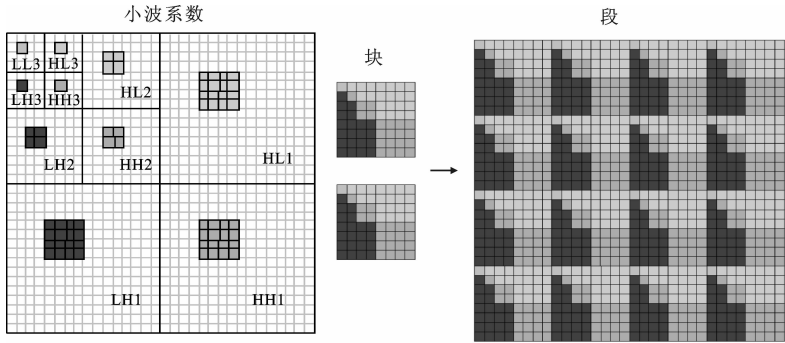


图 3 编码块和段

3.2.2 DC 系数编码和 AC 位深度编码

在形成编码段的过程中,位平面编码模块由 BitDepthDC 和 BitDepthAC 计算出 DC 系数的量化因子 q ,并根据 q 和 BitDepthAC 的关系对 DC 系数的不同部分进行不同的编码.其中,DC 系数量化高位进行简化的 Rice 编码,介于 q 和 BitDepthAC 之间的位进行作为附加位放在 DC 量化高位码流之后,在 BitDepthAC 之后的部分与 AC 系数一起进行位平面编码,AC 系数的位深也采用了简化的 Rice 编码.

3.2.3 位平面编码

位平面编码模块从最高的位平面开始编码,到最低的位平面结束.如图 4 所示,每个位平面的编码分成 5 个 Stage,各 Stage 对应不同集合的小波系数的编码.

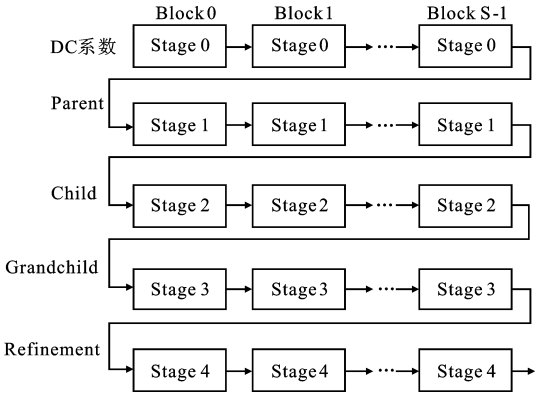


图 4 单个位平面的编码过程

每个位平面的编码过程由扫描和熵编码组成. CCSDS 标准算法对各个位平面进行串行扫描的过程中,每个块都需要扫描 BitDepthAC 多次,并需要保留位平面中各个块像素的编码状态,用于下一个位平面的扫描^[3].

由于串行扫描过程的数据速率并不理想,而全

并行的扫描方式会占用大量资源,因此,可以考虑部分位平面并行的方式.如图 5 所示,当 i 为 BitDepthAC/2 时,可以在提高数据速率的情况下将资源减少为全并行方式的一半.然而,在图像中,值较大的像素数量很少,因此较高位平面的扫描和编码的时间较短,而低位的位平面扫描和编码的时间较长.因此,在图 5 所示方式中,每组编码时间都受限于该组中耗时最长的位平面的执行时间.

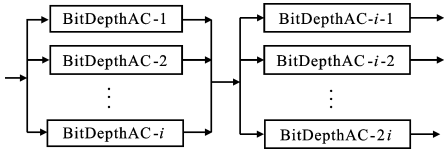


图 5 部分并行扫描(组间串行、组内并行)

为了分析不同位平面的扫描时间,选用 CCSDS 图像测试库中 11 幅 8 位图像进行实验.图 6 显示了不同图像的各个位平面与扫描时间的关系,加粗虚线表示了所有图像扫描时间的 6 阶拟合结果,其余曲线表示每幅图像的位平面和时间的关系.

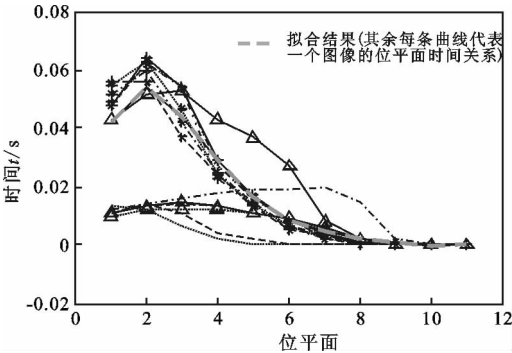


图 6 不同图像不同位平面的扫描时间

图 7 显示了 11 幅图像的位平面扫描时间的平均情况.由图 6 和图 7 可以看出,几乎所有图像的高 8 位的位平面的扫描时间远小于低 4 位的位平面的

扫描时间.按照此规律,将高位的位平面串行后再同低位的位平面并行执行,可以在损失数据速率较少的情况下,进一步减少硬件资源.

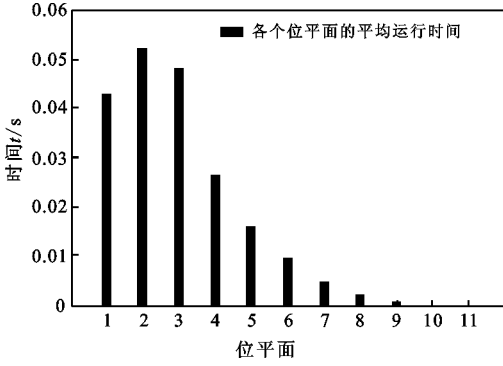


图7 位平面的平均扫描时间

基于此,我们可以采用串并结合的扫描方式进行扫描.如图8所示,以8位图像为例,经过小波变换和子带加权后,AC系数的位深扩展到12位.若将位平面分成四组,以总时间最少为约束条件时,最优分组下为:12-4、3、2、1,第1组(12-4)所有位平面串行扫描,各组之间的并行扫描.这样可以将扫描资源降低到全并行方式的四分之一.若将所有位平面分成两组,最优的分组为:12-4、1-2,此时可以进一步减少扫描资源.

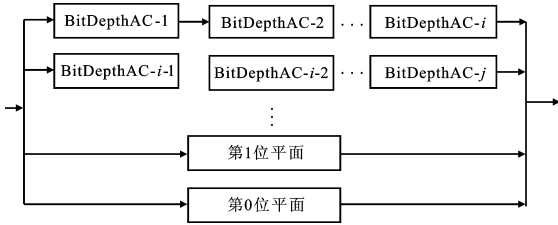


图8 串并结合扫描(组间并行、组内串行)

3.2.4 并行扫描算法

要实现位平面的并行扫描,需要去除不同位平面之间的耦合关系.定义下述编码状态字,用于表示在各个位平面中前一位平面的编码状态:

$$\text{OpenB} = \begin{cases} 1, & t_{\max}(B) = 2 \text{ (在之前被编码)} \\ 0, & \text{其他 (之前没有被编码)} \end{cases}$$

$$\text{OpenD} = \text{tword}[\{x_i\} : x_i = \begin{cases} 1, & t_{\max}(D_i) = 2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, i = 0, 1, 2]$$

$$\text{OpenG} = \text{tword}[\{x_i\} : x_i = \begin{cases} 1, & t_{\max}(G_i) = 2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, i = 0, 1, 2]$$

$$\text{OpenH}_i = \text{tword}[\{x_{ij}\}], \text{其中 } x_{ij} \text{ 满足下式:}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & t_{\max}(H_{ij}) = 2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, i = 0, 1, 2, j = 0, 1, 2, 3$$

对位平面进行扫描时,可以通过对像素的移位操作判断像素的编码状态,并由此生成编码状态字.扫描程序结合上一位平面编码状态字对下一位平面进行扫描,并生成相应的扫描字,扫描算法描述如下:

Stage1: 写入 $\text{types}_b[P]$, $\text{signs}_b(P)$.

Stage2:

(1) 生成 OpenB , 若 $\text{OpenB} = 0$, 则写入 tranB ;

(2) 如果 $\text{tranB} \neq 0$ 且 $t_{\max}(B) \neq -1$, 则生成 OpenD ;

(3) 当 $t_{\max}(D_i) \neq 2$ 时, 计算 tranD 的值; 当 i 满足 $t_{\max}(D_i) \neq 0, -1$ 时, 写入 $\text{types}_b[C_i]$ 和 $\text{signs}_b(C_i)$.

Stage3: 如果 $\text{tranB} = 0$ 或者 $t_{\max}(B) = -1$, Stage3 则无需进行, 否则, Stage3 包括:

(1) 生成 OpenG , 对于写入 $t_{\max}(G_i) \neq 2$, 且 $t_{\max}(D_i) \neq 0$ 写入 tranG ;

(2) 当 i 满足 $\text{tranG} = 0$ 或者 $t_{\max}(G_i) \neq 0, -1$ 时, 生成 OpenH_i , 当 i 满足 $\text{tranG} = 0$ 或者 $t_{\max}(G_i) \neq 0, -1$ 且 $t_{\max}(H_{ij}) \neq 2$, 写入 tranH_i .

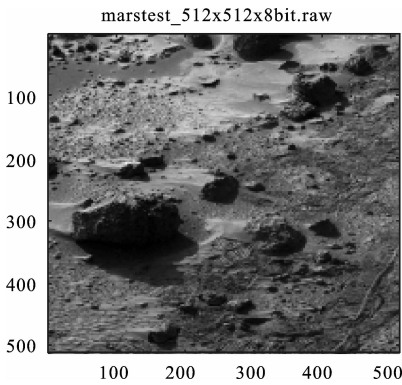
(3) 当 i 满足 $t_{\max}(G_i) \neq 0, -1$, j 满足 $t_{\max}(H_{ij}) \neq 0, -1$ 时, 写入 $\text{types}_b[H_{ij}]$ 和 $\text{signs}_b(H_{ij})$.

对于扫描算法中获得的扫描字, 若其长度为1, 则不再进行编码, 直接打入码流, 否则先将扫描字映射成符号, 再对这些符号进行熵编码, 其编码选项的选择使用最优化方法选取.

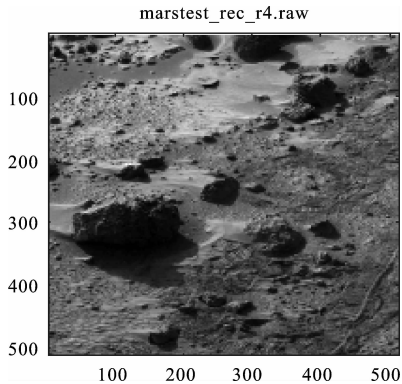
4 实验结果与性能分析

4.1 压缩性能分析

本文采用 CCSDS 提供的图像对算法进行测试. 图9表示 martest.raw 图像在压缩前和压缩解压之后的对比, 此时段的大小为16, 压缩比为4, 选用5/3小波. 三种不同的压缩参数的实验结果与 CCSDS 标准算法的对比如表1, 表2, 表3所示. 其中, S 表示段的大小, $S=\text{Full Frame}$ 表示整个图像为一个段, $S=\text{Strip}$ 表示段大小为图像宽度的1/8; CR 表示图像压缩比. 实验结果表明, 在不同的压缩参数下, 本文系统与标准 CCSDS 算法的峰值信噪比最大相差0.963 dB, 因此本文系统在压缩性能上与原系统基本一致.



(a)原图 marstest. raw



(b)重建图像
图 9 原图和重建图像

表 1 S=16, CR=4,本文系统与原始系统的 PSNR 值 dB

Image	本文 CCSDS	原始 CCSDS	差值
marstest	38.881	39.564	0.683
india_2kb4	52.075	52.746	0.671
pleiades_portdebouc_b3	49.161	50.027	0.866
sun_spot	63.292	63.759	0.467
p_160_b_f	51.294	51.183	-0.111

表 2 S=Full Frame, CR=4, 本文系统与原始系统的 PSNR 值 dB

Image	本文 CCSDS	原始 CCSDS	差值
marstest	39.738	40.552	0.814
india_2kb4	58.316	58.885	0.569
pleiades_portdebouc_b3	51.906	52.726	0.820
sun_spot	63.559	64.320	0.761
p_160_b_f	56.114	56.066	-0.048

表 3 S=Strip,CR=8, 本文系统与原始系统的 PSNR 值 dB

Image	本文 CCSDS	原始 CCSDS	差值
marstest	33.493	34.124	0.631
india_2kb4	48.239	49.161	0.786
pleiades_portdebouc_b3	41.991	42.954	0.963
sun_spot	56.606	57.380	0.774
p_160_b_f	41.688	42.132	0.444

表 4 不同扫描方式下时间和资源百分比值 %

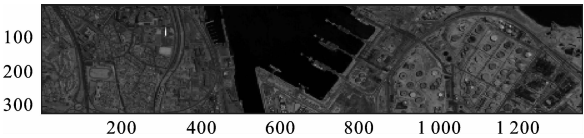
扫描方式	四组并行	两组并行	全串行	全并行
扫描时间	100	180	337	86.2
扫描资源	100	50	25	300

4.2 串并结合扫描时间分析

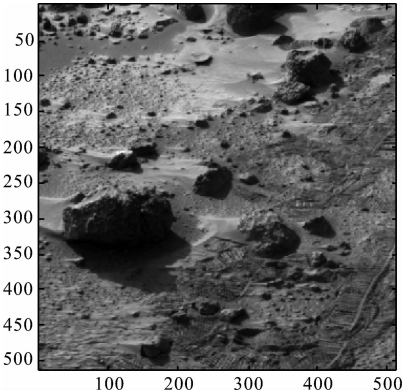
在测试中,本文对 CCSDS 图像库中 11 幅 8 位图像的扫描时间和占用资源进行了统计. 表 4 显示了不同扫描方式所需要的时间和资源的相对于 4 组并行方式归一化后的结果. 实验结果表明,相对于四组并行的扫描方式,当选用两组并行的扫描方式时,资源减少了一半,但时间增多了 80%;当选用全串行的扫描方式时,资源仅仅占用 25%,但是时间却增多了 237%;当选用全并行的扫描方式时,资源是四组并行的三倍,但是时间减少到了 86.2%. 因此,当综合考虑时间和资源时,四组并行的扫描方式的扫描时间相对于全并行方式的扫描时间仅略有增加,却能大幅减少 CCSDS 的硬件资源.

4.3 测试图像

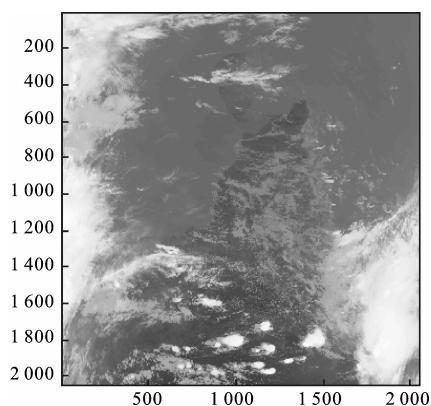
本次实现所使用的部分测试图像如图 10 所示.



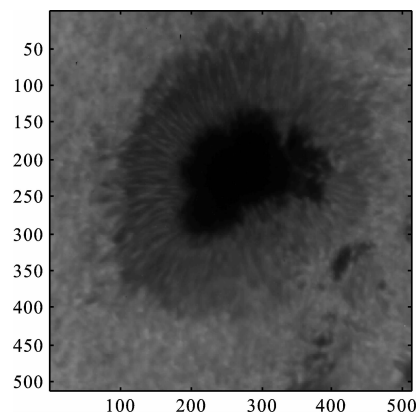
(a) pleiades_portdebouc_b3_1376×320×12 bit. raw



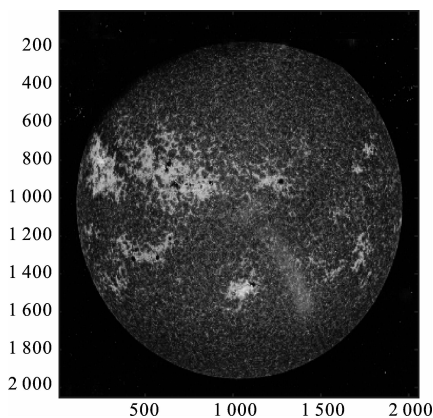
(b) marstest_512×512×8 bit. raw



(c) india_2kb4_2048×2048×10 bit, raw



(d) sun_spot_512×512×8 bit, raw



(e) p_160_b_f_2048×2048×10 bit, raw

图 10 测试图像

5 结束语

本文在 CCSDS 122.0-B-1 图像压缩算法的基础上实现了基于 5/3 变换和并行的位平面扫描方式的软件系统,并对比分析了全并行、全串行、两组并行和四组并行情况下所需要的扫描时间和扫描资源。实验表明,相对于全并行扫描方式,4 组并行扫描方式可以在总的扫描时间增多 16.1% 的情况下,将扫描资源的占用减少到原来的 33.3%。因此,本文架构能够在付出较少时间代价的条件下,大幅降

低 CCSDS 所需要的硬件资源。

参考文献:

- [1] CCSDS. CCSDS 122.0-B-1. Recommended standard for image data compression[S]. Washington DC, USA: CCSDS, 2005.
- [2] Ito L H, Pinho M D S. Reducing the complexity of the CCSDS standard for image compression decreasing the DWT filter order[C]// SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2014: 92441V-14.
- [3] Delaunay X, Chabert M, Charvillat V, et al. Satellite image compression by post-transforms in the wavelet domain[J]. Signal Processing, 2010, 90(2):599-610.
- [4] Artigues G. Discrete wavelet transform fully adaptive prediction error coder: image data compression based on CCSDS 122.0 and fully adaptive prediction error coder[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013, 7(1):2058-2071.
- [5] Prem J, Mathew D. Modified CCSDS image data compression[C]// International Conference on Devices, Circuits and Systems. Melbourne, Victoria, Australia, IEEE, 2014:1-6.
- [6] Manthey K, Krutz D, Juurlink B. Reconfigurable architecture for real-time image compression on-board satellites[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2015, 9(1):097497.
- [7] Li A L, Zhou G, Fiethe B, et al. Efficient implementation of the CCSDS 122.0-B-1 compression standard on a space-qualified field programmable gate array[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013, 7(1): 7796-7797.
- [8] 陈裕华,顾晓东,张忠伟,等. 最新 CCSDS 图像压缩算法研究与实现[J]. 空间科学学报, 2007, 27(6): 519-522.
- [9] 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.
- [10] 张学全. 基于 FPGA 的星载图像压缩系统实现方法研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2009.
- [11] 陆懿. CCSDS-IDC 星载图像压缩算法 VLSI 设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.
- [12] CCSDS. Report concerning image data compression, CCSDS 120.1-G-1[R]. Washington DC, USA: CCSDS, 2007.
- [13] 张旭东. 图像编码基础和小波压缩技术:原理、算法和标准[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

(下转第 42 页)

参考文献:

[1] 冯亚林, 张蜀平. 集成电路的现状及其发展趋势[J]. 微电子学, 2006, 35(2): 173-176.

[2] Ke H, Zhongliang D, Qiong S. Verification of AMBA bus model using system verilog[C]//Electronic Measurement and Instruments, 2007. ICEMI07. 8th International Conference on. Ho Chi Minh, Vietnam, IEEE, 2007: 776-780.

[3] 金湘亮, 陈杰, 郭晓旭, 等. 基于 IP 核复用技术的 SoC 设计[J]. 半导体技术, 2002, 26(4): 16-21.

[4] 郭炜, 魏继增, 郭箬, 等. SoC 设计方法与实现 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2013.

[5] 朱运航, 李雪东. 基于 IP 核复用的 SoC 设计技术探讨[J]. 微计算机信息, 2006, 23(8): 114-116.

[6] 赵乾, 俞慧月, 史佳欢, 等. 一种 IP 核 AMBA 总线兼容性验证的通用方法研究[J]. 中国集成电路, 2010, 18(1): 59-62.

[7] 谢惠敏, 郭东辉. 可重构的串行高级加密标准加解密电路设计[J]. 计算机应用, 2013, 32(2): 450-454.

[8] 何明星, 林昊. AES 算法原理及其实现[J]. 计算机应用研究, 2002, 18(12): 61-63.

作者简介:

朱恒静 女, (1964-), 研究员. 研究方向为元器件可靠性保证.

赤 诚 男, (1993-), 硕士研究生. 研究方向为 IP 核设计与验证.

李 杰 男, (1990-), 博士研究生. 研究方向为集成电路可靠性设计.

王熙庆 女, (1989-), 工程师. 研究方向为元器件可靠性保证.

祝 名 男, (1979-), 高级工程师. 研究方向为元器件可靠性设计与保证.

肖立伊(通讯作者) 女, (1961-), 教授. 研究方向为 IP 核设计与标准化及集成电路抗辐射可靠性设计.

E-mail: xiaoly@hit. edu. cn.

(上接第 37 页)

[14] 邓凌煊. 基于 CCSDS-IDC 的星载图像压缩算法的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2015.

作者简介:

周文敬 女, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为计算机应用.

E-mail: friend2011_10@163. com.

张学全 男, (1979-), 博士. 研究方向为空间综合电子信息系统.

安军社 男, (1969-), 研究员. 研究方向为航天计算机.

王鸣哲 男, (1992-), 硕士研究生. 研究方向为 FPGA、数字图像处理与应用.