

文章编号 1004-924X(2022)08-0883-11

快照马赛克高光谱图像 CCSDS 压缩器的 FPGA 实现

吕德远¹, 黄浩文², 曾 珉², 曾 旭², 赵志刚^{1,2*}

(1. 深圳技术大学 新材料与新能源学院, 广东 深圳 518118;

2. 深圳大学 物理与光电工程学院, 广东 深圳 518052)

摘要:为解决快照马赛克高光谱图像数据量大、对传输带宽要求高的问题,采用最新的 CCSDS 123.0-B-2 多光谱/高光谱无损和近无损压缩国际标准,实现了基于 FPGA 的快照马赛克高光谱图像无损和近无损压缩。通过改进 BIP(Band-Interleaved Pixels)排序算法,使每个时钟周期能够动态处理一个快照马赛克高光谱样本,数据吞吐率约提高至 11 倍,有效解决了该国际标准在快照马赛克高光谱图像压缩 FPGA 硬件实现时存在的流水线和并行化处理困难、处理速度慢的问题。实验结果表明,所实现的压缩器在 Xilinx XC7Z020CLG-4 平台上布局布线后 FPGA 整体逻辑资源占用率小于 10%,100 MHz 系统时钟下约 22 ms 即可完成一张高光谱图像的压缩,无损压缩性能在 2.66~4.30 bits/samples 之间,近无损压缩性能在 1.01~3.70 bits/samples 之间,能够满足快照马赛克高光谱成像技术在无线手持及无人机载领域的应用需求。

关键词:高光谱图像压缩;快照马赛克高光谱成像;CCSDS 123.0-B-2;FPGA 实现

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20223008.0883

FPGA implementation of CCSDS compressor for snapshot mosaic hyperspectral images

LV Deyuan¹, HUANG Haowen², ZENG Min², ZENG Xu², ZHAO Zhigang^{1,2*}

(1. College of New Materials and New Energies, Shenzhen Technology University,
Shenzhen 518118, China

2. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518052, China)

* Corresponding author, E-mail: zhaozhigang@sztu.edu.cn

Abstract: To solve the problem of large data volume and high transmission bandwidth requirement of snapshot mosaic hyperspectral images, the latest CCSDS 123.0-B-2 multispectral/hyperspectral lossless and near-lossless compression international standard is adopted to realize the FPGA-based lossless and near-lossless compression of snapshot mosaic hyperspectral images. By improving the BIP (Band-Interleaved Pixels) sequencing algorithm, a snapshot mosaic hyperspectral sample can be dynamically processed per clock cycle to 11 times higher of data throughput, and the problems of pipelining and paralleliza-

收稿日期:2021-04-26;修订日期:2021-06-06.

基金项目:横向课题项目(No. 20200202002);校企合作项目(No. 2018010802012);广东省科技创新战略专项资金项目(No. pdjh2020b0526);深圳技术大学校级科研项目(No. 2020028555301020, No. JSZZ2020006);研究生校企合作项目(No. XQHZ202017, No. XQHZ202008, No. XQHZ202102, No. XQHZ202120)

tion difficulties and slow processing speed in the FPGA hardware implementation of snapshot mosaic hyperspectral image compression of this international standard have been effectively solved. The experimental results show that the overall logic resource usage of the implemented compressor is less than 10% after the layout and wiring of the FPGA on Xilinx XC7Z020CLG-4 platform, and the compression of a hyperspectral image can be completed in about 22 ms under 100 MHz system clock, with lossless compression performance between 2.66~4.30 bits/samples and the performance near-lossless compression is between 1.01~3.70 bits/samples, which can meet the application requirements of snapshot mosaic hyperspectral imaging technology in wireless handheld and unmanned airborne fields.

Key words: hyperspectral image compression; snapshot mosaic hyperspectral imaging; CCSDS 123.0-B-2; FPGA implementation

1 引言

高光谱成像技术结合了数字成像和光谱学的优势^[1],可以用更高的精度和细节表征场景中的对象,能够应用于遥感^[2]、工业制造^[3]、医学^[4]等领域。近年来,欧洲微电子研究中心(IMEC)推出的新一代快照马赛克高光谱成像技术,通过在 CMOS 感光面表面沉积不同波段的滤光膜,可同时获取 25 个不同光谱波段的高光谱数据^[5,6],使得高光谱技术在手持设备或小型无人机遥感领域的应用成为了可能^[7]。

由于包含了多通道的光谱数据信息,高光谱图像通常数据量巨大^[8],对数据传输带宽要求非常高。国际空间数据系统咨询委员会(The Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS)于 2012 年 5 月推出了多光谱/高光谱无损压缩标准 CCSDS-123.0-B-1^[9,10],并于 2019 年 2 月升级到 CCSDS 123.0-B-2 标准^[11]。新标准增加了对近无损压缩的支持并向下兼容,拓展了适用范围^[11],在减少数据带宽、减少缓存和存储的需求以及减少数据传输时间等方面进行了优化^[12],适合在卫星、无人机或微型无线高光谱采集设备上应用^[13]。

但是 CCSDS 123.0-B-2 标准新引入的近无损压缩功能会导致算法在 FPGA 硬件实现时无法有效使用流水线化和并行化技术^[14,15],降低了数据吞吐率,限制了其在快照马赛克高光谱图像压缩中的应用。本文通过改进 BIP(Band-Interleaved Pixels)排序算法,尝试在 CCSDS 123.0-B-2 标准近无损压缩的 FPGA 硬件实现中引入流水线化和并行化技术,以提高系统的压缩效率。

2 CCSDS 123.0-B-2 标准分析

CCSDS 123.0-B-2 标准适用于由多光谱和高光谱成像光谱仪采集的三维光谱数据集的无损/近无损压缩,支持从 2 位到 32 位整数样本值 $s_{z,y,x}$ 所构成的三维矩阵 (N_x, N_y, N_z) 数据集。该标准由预测器和编码器两部分组成,原理图如图 1 所示。

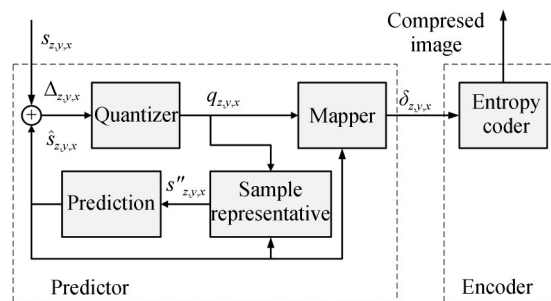


图 1 CCSDS 123.0-B-2 标准的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of CCSDS 123.0-B-2 standard

预测器 (Predictor) 使用 FLEX (Fast Lossless Extended) 算法,通过待测样本的三维邻域获得对应的预测值,计算数据残差以达到减少数据量的目的。预测器典型邻域如图 2 所示,图中 P 为取值范围为 $[0, 15]$ 的用户自定义整数。

预测器的预测过程如下:首先计算同一光谱通道 z 内与样本 $s_{z,y,x}$ 相邻的样本代表值 $s''_{z,y,x}$ 的局部和 $\sigma_{z,y,x}$,然后通过局部和获得当前光谱通道的方向局部差 $d_{z,y,x}^N$ 、 $d_{z,y,x}^W$ 和 $d_{z,y,x}^{NW}$ 及先前光谱通道的 P 个中央局部差 $d_{z,y,x}$ 。上述四种局部差共同组成局部差向量 $U_z(t)$ 的各个分量。局部差向量

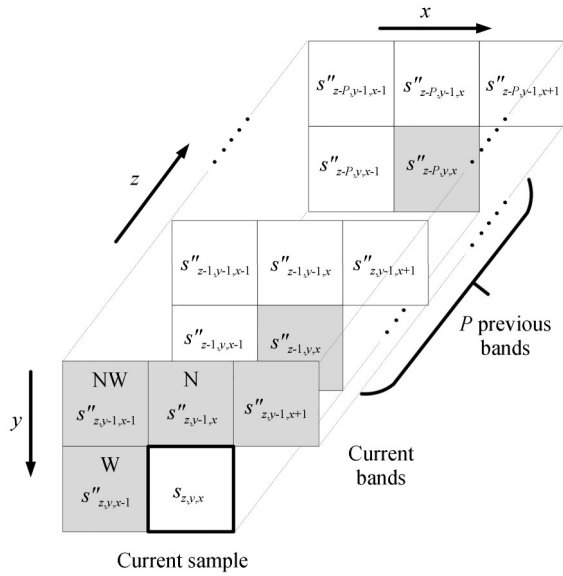


图 2 预测器典型邻域

Fig. 2 Typical neighborhood of the predictor

$U_z(t)$ 使用与其具有相同维度的权重向量 $W_z(t)$ 加权和来计算对应的预测样本值 $\hat{s}_{z,y,x}$, 权重向量会随着高光谱图像的特点自适应更新。预测样本值与实际样本值做差得到的预测残差 $\Delta_z(t)$ 使用步长为 $2m_z(t)+1$ 的均匀量化器进行量化, 计算有符号整数量化器索引 $q_z(t)$, 使得近无损重建高光谱图像时, 可以获得误差不超过 $m_z(t)$ 的样本 $s_z(t)$ 。当 $m_z(t)=0$ 时, 预测器为无损压缩。最后, 有符号量化索引 $q_z(t)$ 被映射为 D 位无符号映射量化索引 $\delta_z(t)$ 作为预测器的输出。

编码器(Encoder)将 $\delta_z(t)$ 编码为一种可变速长二进制比特流文件, 该文件在图像重建时可完整恢复 $\delta_z(t)$ 。文件由可变速长文件头和文件主体组成, 可变速长文件头包含压缩算法和被压缩图像的相关参数, 文件主体则是映射量化索引的编码。

CCSDS 123.0-B-2 标准推荐了三种编码器实现方式^[11], 其中样本自适应编码器的泛用性更强。该编码器是基于指数哥伦布(Golomb-Power-Of-2, GPO2)编码的改进编码算法。编码算法的原理是使用 k 阶长度限制 GPO2 编码对非负整数 $\delta_z(t)$ 进行编码, 可以将 $\delta_z(t)$ 表示为:

$$\delta_z(t) = u \cdot 2^k + r. \quad (1)$$

对 $\delta_z(t)$ 的编码实际上就是对 u 和 r 的计算, 其中 $u = \lfloor \delta/2^k \rfloor$ (向下取整), $r = \delta \bmod 2^k$ (取余)。编码器通过对各光谱通道都设置了单独的累加器 $\Sigma_z(t)$ 和计数器 $\Gamma_z(t)$ 获得 k 值进而实现

对 $\delta_z(t)$ 的编码。

CCSDS 123.0-B-2 标准最重要的优势在于支持近无损压缩, 即一种能够控制重建图像和原始图像之间的最大误差的有损压缩。考虑到新加入的近无损压缩功能会使得图像重建时无法使用原始值恢复高光谱图像, 该标准引入了样本代表值的计算, 在每个样本量化后计算出样本代表值 $s''_{z,y,x}$ 用于下一个样本的预测。但是引入样本代表值后, 在 FPGA 实现的预处理阶段使用推荐的样本输入排序方式时, 会因为反馈回路过长、数据依赖不满足等原因, 导致对快照马赛克高光谱图像的压缩吞吐率降低。本文将在 CCSDS 123.0-B-2 标准的 FPGA 实现中对推荐的样本输入排序算法进行改进, 以克服这一不足。

3 CCSDS 123.0-B-2 标准的 FPGA 实现

3.1 排序预处理的改进

在使用 FPGA 对高光谱图像进行压缩实现前, 首先需要确定各光谱通道数据的样品输入顺序。CCSDS 123.0-B-2 标准推荐了 BI(Band Interleaved) 和 BSQ(Band Sequential) 两种样本输入排序方式, 其中 BI 排序又可分为 BIP(Band-Interleaved Pixels) 排序和 BIL(Band-Interleaved Lines) 排序两类。图 3 为三种推荐样本输入排序方式的原理示意图。

由于 CCSDS 123.0-B-2 标准包含了“样本代表值反馈”闭环反馈环路, 在使用 BSQ 排序和 BIL 排序进行硬件实现时, 会有如图 4 所示的时序。从图中可以看到, 只有在完成整个反馈回路得到 Sample1 的样本代表值 $s''_z(t)$ 后, 才能开始 Sample2 的压缩。这就导致吞吐率受限于处理“样本代表值反馈”环路所需时钟周期, 使得平均需要十几个时钟才能完成对一个样本的压缩, 大幅降低了压缩器的吞吐率。

BIP 排序的优势在于硬件实现时不需要等待整个反馈回路完成, 就能开始下一个样本的压缩, 可以克服 BIL 和 BSQ 排序造成的吞吐率低的问题。但是, CCSDS 123.0-B-2 标准对样本 $s_{z,y,x}$ 的预测需要使用如公式(2)所示的局部差向量

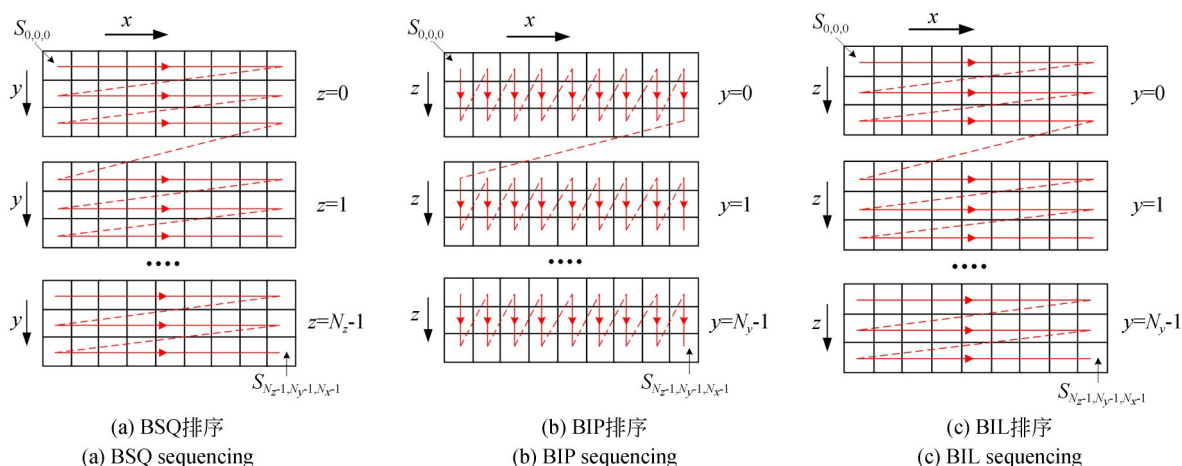


图 3 三种推荐的样本输入排序方式原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of three recommended sample input sequencing methods

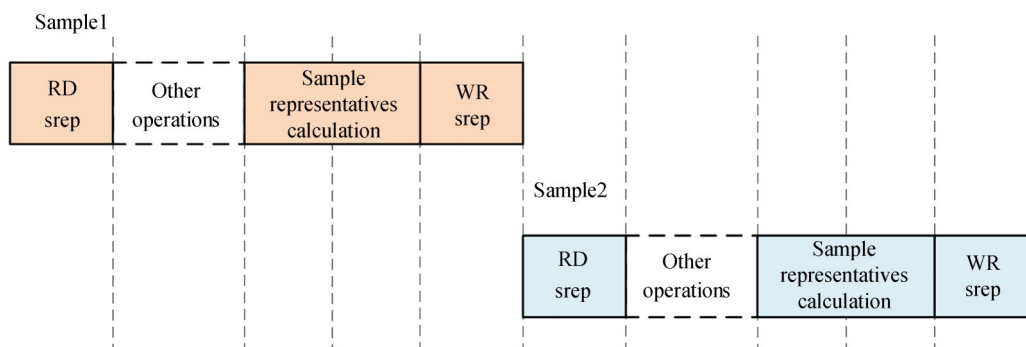


图 4 BSQ 和 BIL 排序的局部时序图

Fig. 4 Partial timing diagram of BSQ and BIL sequencing

$U_z(t)$, 而 $U_z(t)$ 的计算用到了样本 $s_{z-1,y,x}$ 的代表值 $s''_{z-1,y,x}$ 。由于 BIP 排序应用在快照马赛克光谱图像的流水线压缩时, $s_{z-1,y,x}$ 必须在 $s_{z,y,x}$ 前一个时钟的开始时刻计算。如图 5 所示, 这也就意味着在对样本 $s_{z,y,x}$ 预测时, 无法得到样本代表值 $s''_{z-1,y,x}$, 根据数据的因果关系, 将导致无法进行并行化压缩处理。

$$U_z(t) = \begin{bmatrix} d_z^N(t) \\ d_z^W(t) \\ d_z^{NW}(t) \\ d_{z-1}(t) \\ d_{z-2}(t) \\ \vdots \\ d_{z-p}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4s''_{z,y-1,x} - \sigma_{z,y,x} \\ 4s''_{z,y,x-1} - \sigma_{z,y,x} \\ 4s''_{z,y-1,x-1} - \sigma_{z,y,x} \\ 4s''_{z-1,y,x} - \sigma_{z-1,y,x} \\ 4s''_{z-2,y,x} - \sigma_{z-2,y,x} \\ \vdots \\ 4s''_{z-p,y,x} - \sigma_{z-p,y,x} \end{bmatrix} \quad (2)$$

本文通过改进的 BIP 排序方式, 将 BIP 排序在 x 和 z 方向上的扫描方式由顺序扫描改为交错扫描, 可以有效解决上述问题。如图 6 所示, 交错

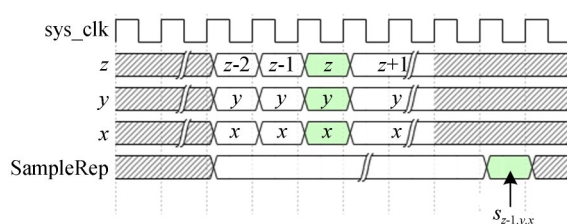


图 5 $s_{z,y,x}$ 在 BIP 排序下的时序示意图

Fig. 5 Timing diagram of $s_{z,y,x}$ under BIP sequencing

扫描方式通过分离各个光谱通道的压缩顺序, 将不同光谱通道相同空间位置样本的处理时间间隔由 1 个时钟周期改为 N_z+1 个时钟周期, 克服了推荐 BIP 排序存在的数据依赖问题, 同时保留了推荐 BIP 排序易于流水线处理、吞吐率高的特点, 使得基于新标准实现的 FPGA 压缩器平均一个时钟可以动态处理一个像素样本。

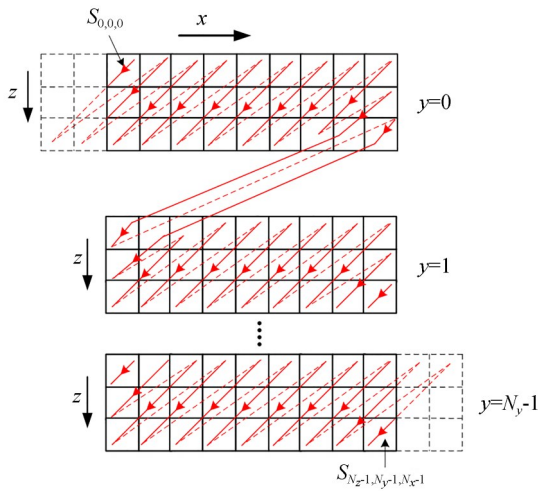


图 6 改进的BIP排序

Fig. 6 Improved BIP sequencing

3.2 压缩器的FPGA实现

CCSDS 123.0-B-2 标准的硬件实现架构如

图 7 所示,架构主要由预测器和编码器两部分组成,使用了多个缓冲器和存储器对数据进行暂存和同步。

在典型的快照马赛克高光谱图像采集系统中,样本会以帧的形式逐个输入到FPGA上部署的压缩器,每个时钟周期都会有一个高光谱图像样本被传输到输入缓存中。预测器按照改进的BIP排序读取样本并开始流水线处理,包含局部和与局部差计算、点乘、预测、量化、映射、权重更新和样本代表计算等一系列操作。预测器还会构建多个存储器,用于储存计算过程中所用到的权重向量、样本代表值和局部差向量等中间数据。编码器则负责样本自适应熵编码。系统的输出缓存将二进制编码重新组织为标准BIP排序,使得通用的解压缩器能够无损或近无损重建原有高光谱图像。图 8 为本文FPGA硬件实现方案对应的流水线时序。

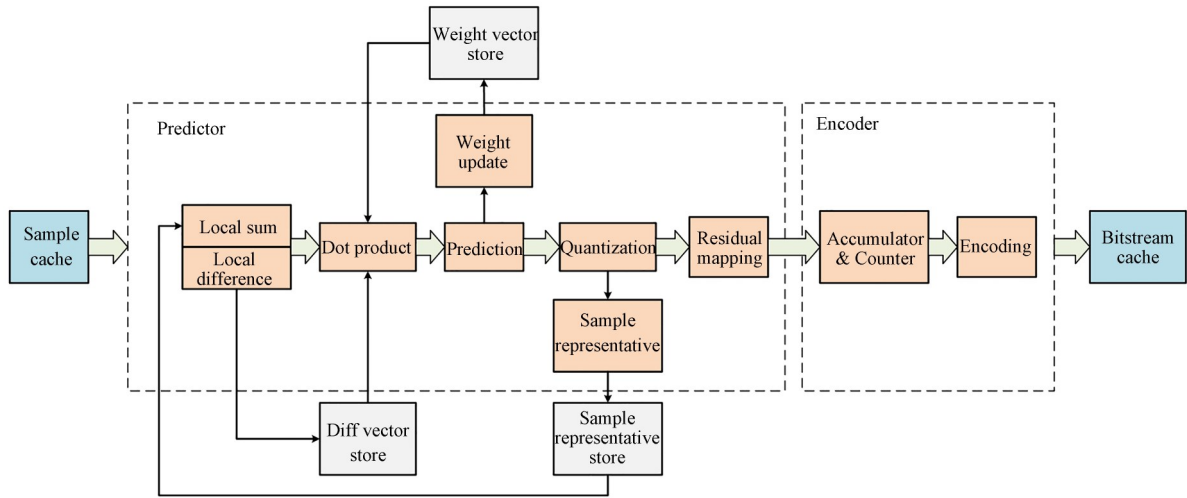


图 7 压缩标准的硬件实现架构

Fig. 7 Hardware implementation framework for compression standards

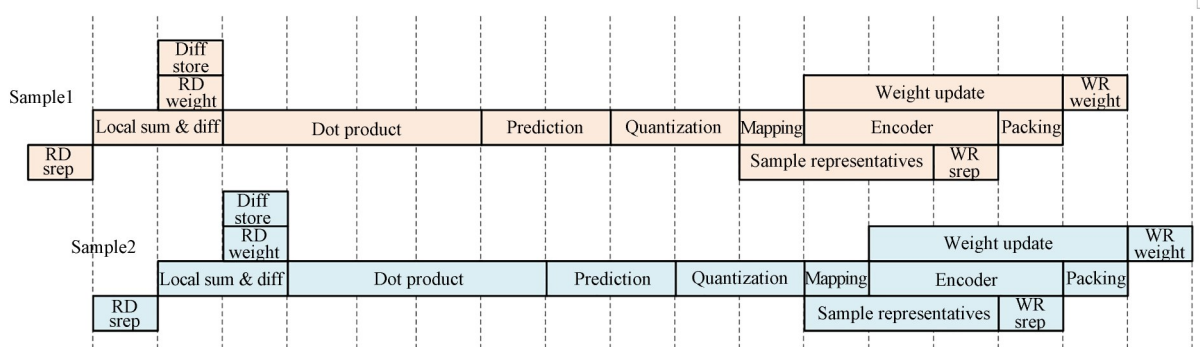


图 8 流水线时序图

Fig. 8 Timing diagram of the pipeline

使用 Verilog 语言将上述压缩器的硬件设计在 Vivado2019.2 集成开发工具中综合实现,使用 Xilinx xc7z020clg400-2 FPGA 实现的压缩器顶层结构如图 9 所示。本设计不依赖外部存储资源,

共使用了 6 731 个六输入 LUT, 2 711 个触发器, 9.5 个 4 KB BRAM, 以及 11 个 DSP48, 占用 xz7020 逻辑资源少于 10%, 总的逻辑资源使用情况如表 1 所示。

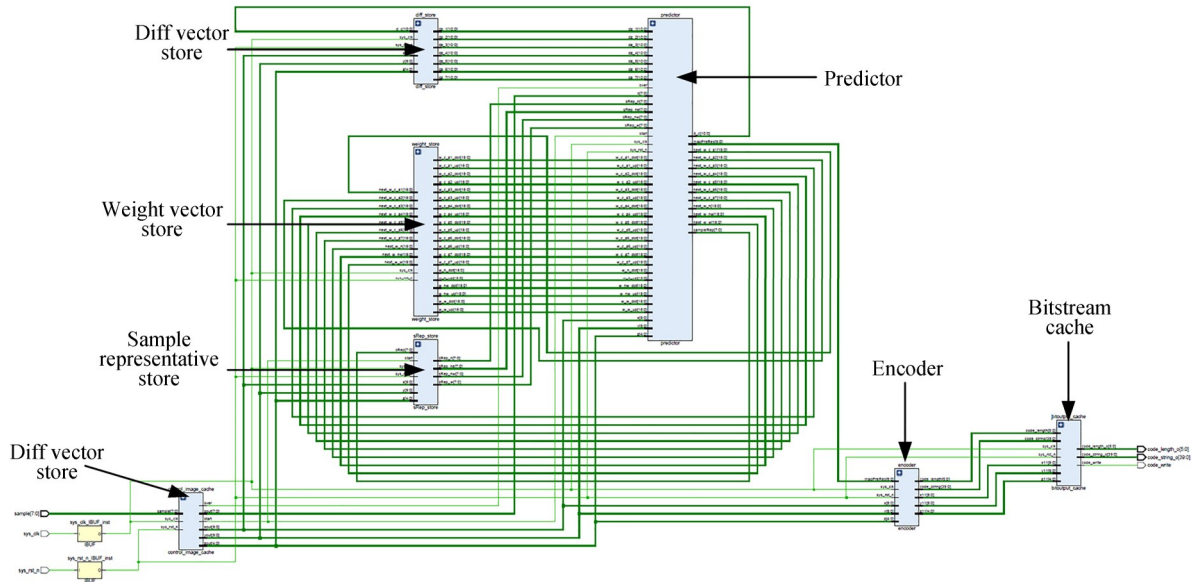


图 9 压缩器的顶层结构图

Fig. 9 Top-level structure diagram of compressor

表 1 硬件设计的资源利用率

Tab. 1 Resource utilization for hardware design

Resource	Utilization	Available	Utilization
LUT	6 731	53 200	12.65%
LUTRAM	518	17 400	2.98%
FF	2 731	106 400	2.57%
BRAM	9.50	140	6.79%
DSP	11	220	5.0%
BUFG	1	32	3.13%

3.3 快照马赛克高光谱图像输入缓存模块的设计

快照马赛克高光谱图像由欧洲微电子研究中心(IMEC)推出的新一代的快照马赛克高光谱传感器采集,它通过在 CMOS 感光面表面沉积不同的滤光片实现快照马赛克高光谱图像的获取。如图 10 所示,由相邻的 25 个像素构成一个“成像单元”,可同时获取到 25 个不同光谱波段的 8 位光谱数据,传感器像素尺寸为 1 088×2 048。

受限于上述独特的“成像单元”,针对普通光

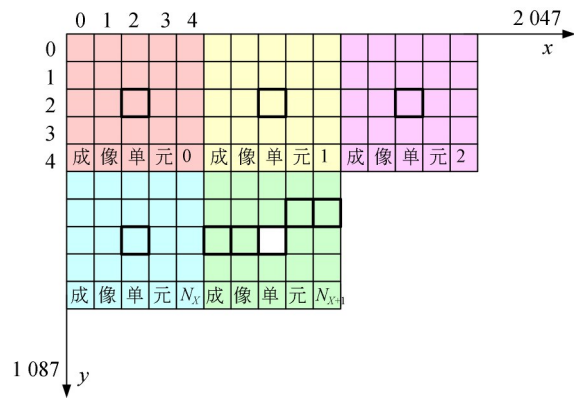


图 10 快照马赛克高光谱图像特点

Fig. 10 Characteristics of snapshot mosaic hyperspectral image

谱数据立方体提出的 CCSDS 123.0-B-2 标准应用于快照马赛克高光谱图像的压缩时有一定限制。因此本文不再使用快照马赛克高光谱图像内相邻像素作为上下文邻域计算局部和与局部差,而是利用“成像单元”每 5 个像素规律排布的特点的调整邻域,改进邻域后的局部和和局部差计算方式如式(3)所示:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{z,y,x} &= s''_{z,y,x-5} + s''_{z,y-5,x-5} + s''_{z,y-5,x} + s''_{z,y-5,x+5} \\
 d_{z,y,x} &= 4s''_{z,y,x} + s''_{z,y-5,x} + s''_{z,y-5,x+5} \\
 d_{z,y,x}^N &= 4s''_{z,y-5,x} - \sigma_{z,y,x} \\
 d_{z,y,x}^W &= 4s''_{z,y,x-5} - \sigma_{z,y,x} \\
 d_{z,y,x}^{NW} &= 4s''_{z,y-5,x-5} - \sigma_{z,y,x}
 \end{aligned} \quad (3)$$

为了计算改进后的局部和与局部差,CCSDS 123.0-B-2标准在FPGA实现过程时使用输入缓存模块获取改进后的上下文邻域。如图11所示,该模块使用BRAM开辟了一个深度为 $2 \times N_z \times N_x$ 的双端口RAM对样本代表值进行暂存和读出,当压缩开始时,写数据写地址先使能,当写入数据量达到 $N_z \times N_x$ 时,读数据和读地址开始使能。从RAM读出的样本代表值经过FIFO0缓存后得到 $s''_{z,y,x-5}$, $s''_{z,y,x-5}$ 被传入深度为 $N_z \times (N_x - 2)$ 的FIFO1得到 $s''_{z,y-5,x+5}$;同理使用 N_z 的FIFO2、FIFO3依次获得 $s''_{z,y-5,x}$ 和 $s''_{z,y-5,x-5}$ 。

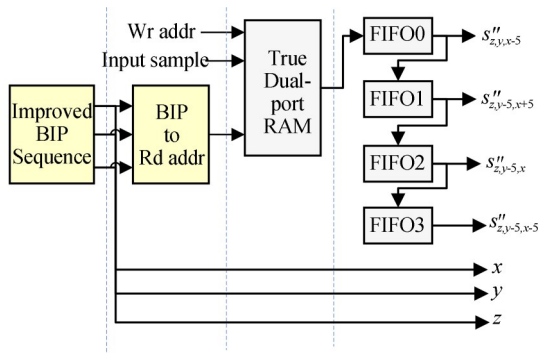


图 11 输入缓存模块结构

Fig. 11 Structure diagram of Input cache module

输入缓存模块通过四级流水线提高处理带宽,第一级流水线用来生成改进的BIP排序的 (z,y,x) 序列,它会随着每个时钟更新;第二级流水线通过计数器生成双端口RAM的写地址,将 (z,y,x) 坐标映射为对应位置样本在双端口RAM内的地址;第三级流水线用来对RAM进行写入和读取数据;第四级流水线结合马赛克面阵高光谱图像的特点,获得 (z,y,x) 处样本的上下文邻域,输出给局部和与局部差计算模块。

4 压缩器FPGA实现的测试结果

目前快照马赛克高光谱图像没有类似

AVIRIS、AIRS等的国际通用高光谱遥感图像测试数据集,因此本文使用课题组自行研制的快照马赛克微型高光谱仪进行了测试数据的采集。图12为四种不同场景下所采集的快照马赛克高光谱图像。

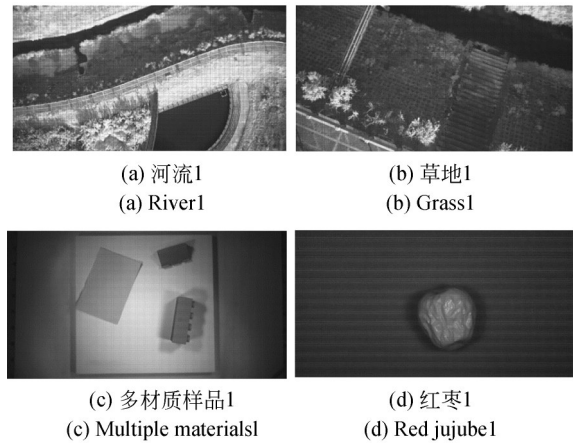


图 12 四种场景下的快照马赛克高光谱图像

Fig. 12 Snapshot mosaic hyperspectral images in four scenarios

4.1 时序仿真结果

使用Vivado集成的仿真工具Simulator对FPGA设计进行功能仿真和时序仿真,图13为激励模块设计。

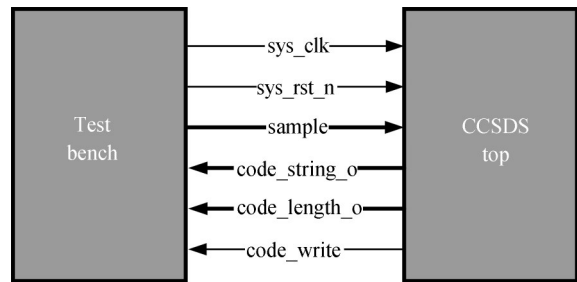


图 13 激励模块设计

Fig. 13 Design of testbench module

其中 sys_clk 和 sys_rst_n 为系统时钟信号和系统复位信号。复位信号拉高后,Testbench在每个时钟的上升沿都会向压缩器发送一个高光谱样本值。当压缩器获得第一个样本的压缩编码后,二进制编码写入信号 $code_write$ 会拉高,通过 $code_string_o$ 信号和 $code_length_o$ 信号将编码值写入压缩码流文件,所有编码完成后, $code_write$ 将拉低以停止码流写入。

以 River1 的测试结果为例,图 14 是使用 CCSDS 123.0-B-2 标准推荐的 BSQ 排序压缩

器的时序,图 15 是使用改进 BIP 排序压缩器的时序。

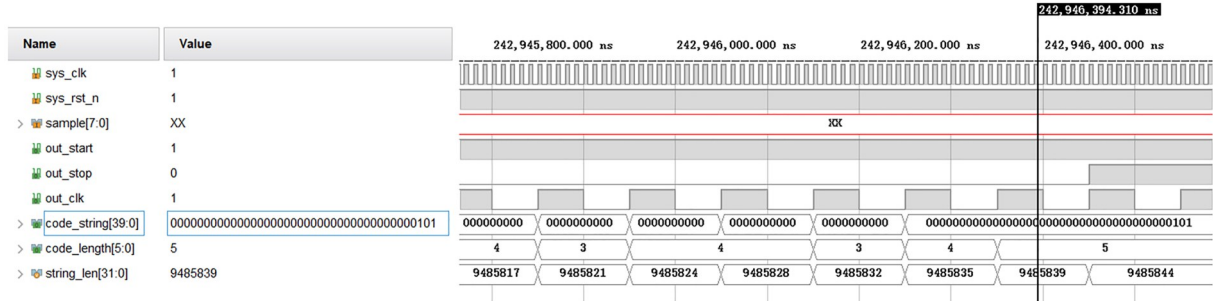


图 14 基于 BSQ 排序压缩器的时序图

Fig. 14 Timing diagram based on BSQ sequencing compressor

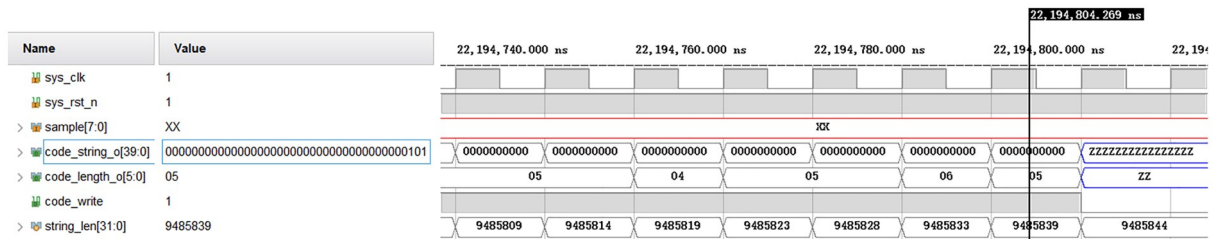


图 15 基于改进 BIP 排序压缩器的时序图

Fig. 15 Timing diagram based on improved BIP sequencing compressor

从时序图可以看到,基于改进 BIP 排序的压缩器平均一个时钟周期就可以完成一个样本的压缩编码,这是改进排序算法易于流水线和并行化处理的特点所带来的好处。表 2 列出了两种排序方式下压缩器在 100 MHz 时钟下的性能对比。结果表明,虽然这种改进的排序方式不会改善压缩性能,但是会大大提高压缩吞吐率,压缩一张快照马赛克高光谱图像所需时间仅为 22.2 ms,远小于原 BSQ 排序压缩器所需的 242.9 ms,数据吞吐率约提高至 11 倍。

压缩性能通过 bits/sample 定义,即压缩后二进制码流长度除以原始图像中的样本数 $N_x \cdot N_y \cdot N_z$,其数值越小表明压缩效果越好。实验结果显示,最终的压缩性能在 2.66~4.30 bits/sample 之间,优于原 CCSDS 123.0-B-1 标准下 2.68~4.32 bits/sample 的压缩性能。

表 2 压缩器性能对比

Tab. 2 Compressor performance comparison

排序方式	编码时间/ms	压缩编码长度/bits
改进 BIP 排序	22.2	9 485 844
BSQ 排序	242.9	9 485 844

4.2 无损压缩性能

表 3 列出了本文所实现的压缩器对四种场景下的快照马赛克高光谱图像无损压缩性能。

表 3 无损压缩性能

Tab. 3 Lossless compression performance (bits/sample)

标准	River1	Grass1	Multiple material1	Red jube1
CCSDS 123.0-B-1	4.319 6	3.767 4	3.322 2	2.684 4
CCSDS 123.0-B-2	4.295 0	3.744 1	3.283 2	2.661 5

4.3 近无损压缩性能结果分析

近无损压缩是一种能够控制重建图像和原始图像之间的最大误差的有损压缩。接下来将介绍压缩器近无损压缩性能,峰值信噪比 (PSNR) 和光谱角 (SA) 测试结果。

4.3.1 近无损压缩性能

表 4 为当绝对误差极限 $a_z=16$, 各场景下快照马赛克高光谱图像的近无损压缩性能。

表 4 当 $a_z=16$ 时, 压缩器的近无损压缩性能

Tab. 4 When $a_z=16$, the near-lossless compression performance of the compressor (bits/sample)

reError	River1	Grass1	Multiple material1	Red jujube1
2	3.696 9	3.608	2.870 8	2.639 5
4	2.724 3	2.878 6	2.117 1	2.047
8	1.828	1.820 7	1.387 4	1.438 2
16	1.361 6	1.340 9	1.089 7	1.084 4
32	1.176 3	1.128 9	1.020 3	1.019 1
64	1.144 8	1.013 5	1.013 5	1.009 6
127	1.143 8	1.012 9	1.012 9	1.008 1

从表中可以看出压缩器的近无损压缩性能约在 1~3.70 bits/sample 之间, 远高于无损压缩性能。但是, 近无损压缩性能的提高是以牺牲图像的保真度而获得的。图 16 显示了不同压缩设置下图像细节的损失。

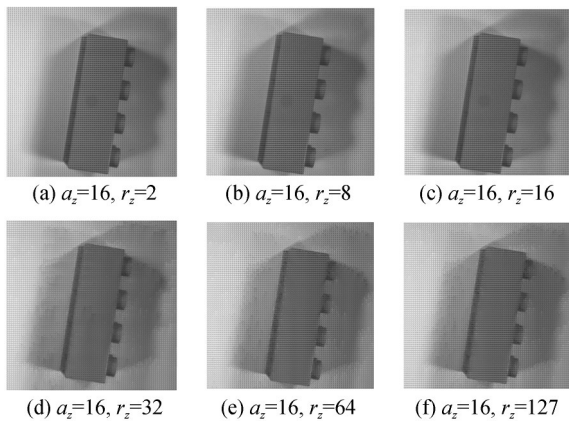


图 16 不同设置下细节的损失

Fig. 16 Loss of detail under different settings

4.3.2 PSNR 测试

PSNR 是衡量有损压缩图像失真程度的最常用指标, 通常来讲 PSNR 值越小压缩后的图像质量越差。它的计算方式如公式(4)所示, 其中 MSE 为均方误差, L 为量化等级。

$$PSNR = 10 \lg \frac{L^2}{MSE}. \quad (4)$$

表 5 给出了 3 幅快照马赛克高光谱图像在不同的相对误差极限 r_z 下压缩处理后的 PSNR 值。随着相对误差极限 r_z 的增加, PSNR 值逐渐减小, 表明 CCSDS 123.0-B-2 标准近无损压缩性能的提高是以图像失真为代价。

表 5 当 $a_z=16$ 时, 不同压缩设置下的 PSNR 值

Tab. 5 When $a_z=16$, PSNR under different compression settings

reError	River1	Grass1	Multiple material1
2	21.535 5	26.255 3	28.864 7
6	21.542 5	26.241 7	28.810 0
8	21.544 0	26.227 0	28.802 0
12	21.545 9	26.194 2	28.790 6
16	21.544 8	26.154 3	28.753 4
24	21.500 0	26.056 5	28.785 8
32	21.470 2	25.958 3	28.640 2
48	21.426 2	25.901 0	28.577 8
64	21.407 1	25.901 5	28.515 2
80	21.378 5	25.829 3	28.501 2
96	21.376 9	25.764 1	28.363 2
112	21.374 0	25.745 1	28.399 0
128	21.363 4	25.731 0	28.420 6

4.3.3 SA 测试

SA 用来表征两个高光谱数据之间光谱的相似性, 两光谱向量间的夹角越小, 两光谱越相似。定义如公式(5)所示。

$$SA = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N y_i^2}}. \quad (5)$$

图 17 给出了快照马赛克高光谱图像 SA 的变化。由图 17 可知, 随着相对误差极限 r_z 的增大, SA 增大, 压缩图像与原始图像的光谱相似程度越差, 表明近无损压缩会破坏快照马赛克高光谱图像包含的光谱信息, 并且随着压缩性能的提升, 这种破坏效果愈加显著。

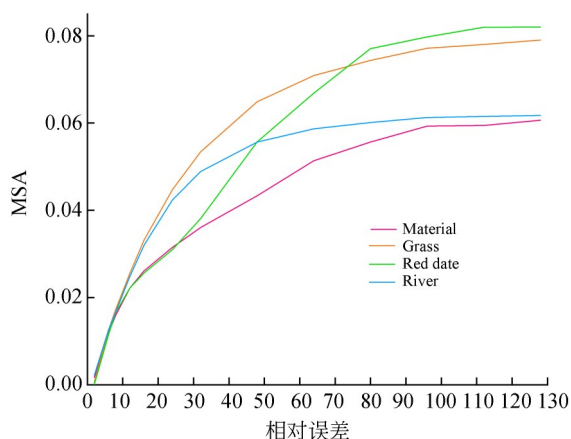


图 17 光谱角测试结果

Fig. 17 Test results of spectral angle

参考文献:

- [1] 高恒振. 高光谱遥感图像分类技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
GAO H Z. *Research on Classification Technique for Hyperspectral Remote Sensing Imagery* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] ESA Earth Observation Portal. PRISMA (Hyperspectral Precursor and Application Mission) [EB/OL]. [2021-01-16] <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/prisma-hyperspectral>.
- [3] SUN D W. *Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control* [M]. London UK: Academic Press, 2010
- [4] LU G L, FEI B W. Medical hyperspectral imaging: a review [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19: 010901.
- [5] SHOEIBY M, PETERSSON L, ARMIN M A, et al. Super-resolved chromatic mapping of snapshot mosaic image sensors via a texture sensitive residual network[C]. 2020 *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision. March 1-5, 2020, Snowmass, CO, USA. IEEE*, 2020: 2793-2802.
- [6] YUAN C, ZHOU M, SUN L, et al. A multi-dimensional hyperspectral image mosaic method and its acquisition system [C]. 2018 *11th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI). October 13-15, 2018, Beijing, China. IEEE*, 2018: 1-6.
- [7] HAGEN N A, KUDENOV M W. Review of snapshot spectral imaging technologies[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52: 090901.
- [8] DUA Y M, KUMAR V, SINGH R S. Comprehensive review of hyperspectral image compression algorithms [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59: 090902.
- [9] Consultative Committee for Space Data Systems. Lossless Multispectral and Hyperspectral Image Compression-CCSDS 120.2-G-1 [S]. Washington DC, USA: In Green Book, 2015.
- [10] Consultative Committee for Space Data Systems. LOSSLESS MULTISPECTRAL & HYPERSPECTRAL IMAGE COMPRESSION CCSDS 123.0-B-1 [S]. Washington DC, USA: In Blue Book, 2012.
- [11] Consultative Committee for Space Data Systems. Low-Complexity Lossless and Near-Lossless Multispectral and Hyperspectral Image Compression-CCSDS 123.0-B-2 [S]. Washington DC, USA: In Blue Book, 2019.
- [12] BLANES I, KIELY A, HERNÁNDEZ-CABRONERO M, et al. Performance impact of parameter tuning on the CCSDS-123.0-B-2 low-complexity lossless and near-lossless multispectral and hyperspectral image compression standard [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1390.
- [13] 张宁, 冯书谊, 濮建福, 等. 多光谱遥感图像 CCSDS 动态码率控制近无损压缩[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1783-1790.
ZHANG N, FENG S Y, PU J F, et al. Dynamic

5 结 论

基于多光谱/高光谱无损和近无损压缩标准 CCSDS 123.0-B-2, 对马赛克高光谱数据的压缩进行了 FPGA 硬件实现。通过对该标准推荐的 BIP 排序方式的改进, 大幅提高了压缩器的吞吐率, 100 MHz 的时钟下约 22 ms 即可完成一帧快照马赛克高光谱图像的压缩。所实现的压缩器的无损压缩性能在 2.66~4.30 bits/samples 之间, 近无损压缩性能可达 1.01~3.70 bits/samples, 能够满足快照马赛克高光谱成像技术在无线手持及无人机载领域的应用需求。

- rate control for CCSDS nearly lossless compression of multispectral remote image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1783-1790. (in Chinese)
- [14] HERNÁNDEZ-CABRONERO M, KIELY A B, KLIMESH M, *et al.* The CCSDS 123.0-B-2 “Low-Complexity Lossless and Near-Lossless Multispectral and Hyperspectral Image Compression” Standard: a comprehensive review [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2021, 9(4): 102-119.
- [15] KIELY A B, KLIMESH M, BLANES I, *et al.* The new CCSDS Standard for Low-Complexity Lossless and Near-Lossless Multispectral and Hyperspectral Image Compression [C]. International Workshop on On-Board Payload Data Compression. 2018(GSFC-E-DAA-TN61202).

作者简介:

吕德远(1995—),男,山东聊城人,硕士研究生,2018年于长春理工大学获得学士学位,现为深圳大学物理与光电工程学院硕士研究生,主要从事嵌入式系统、高光谱图像处理等方面的研究。E-mail:lvdeyuan@outlook.com

通讯作者:

赵志刚(1977—),男,湖北黄冈人,博士、副教授、硕士生导师,1999年、2005年于军械工程学院(现陆军工程大学)分别获得学士、硕士学位,2010年于华中科技大学获得博士学位,现为深圳技术大学新材料与新能源学院副教授,主要从事微型高光谱成像、实时高光谱物质分类等方面的研究。E-mail: zhaozhigang@sztu.edu.cn