

The FPGA Prediction Compression Based on Snapshot Mosaic Area Array Hyperspectral Image

Shaoxun Jin^{1,2}, Deyuan Lv^{1,2}, Haowen Huang^{1,2}, Zhigang Zhao^{1,2*}, Jixiao Huang², Cun Fu², Wenqing Liu², Junle Qu²

¹College of New Materials and New Energies, Shenzhen Technology University, Shenzhen Guangdong

²Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong

Email: 461215134@qq.com, zhaozhigang127@163.com

Received: Feb. 15th, 2020; accepted: Mar. 3rd, 2020; published: Mar. 10th, 2020

Abstract

The huge amount of hyperspectral image data makes it difficult to realize real-time wireless transmission of hyperspectral image data. And it will seriously restrict the real-time nature of the hyperspectral image data transmission processing. This article independently develops a Zynq platform Micro-hyperspectrometer. Collecting the specific hyperspectral image data through the snapshot mosaic area array hyperspectral sensor, we can predict and cdcompress the data which is subjected to FPGA. Its compression ratio is between 1.7 and 2, which increases the ability of wireless transmission of hyperspectral image data. And it can greatly expand the application range of the micro-hyperspectrometer.

Keywords

Micro-Hyperspectrometer, Snapshot Mosaic Area Array Hyperspectral Sensor, The FPGA Predictive Compression, Zynq Platform

基于快照马赛克面阵高光谱图像的FPGA预测压缩

金绍勋^{1,2}, 吕德远^{1,2}, 黄浩文^{1,2}, 赵志刚^{1,2*}, 黄继小², 付存², 刘文擎², 屈军乐²

¹深圳技术大学新材料与新能源学院, 广东 深圳

²深圳大学物理与光电工程学院光电子器件与系统教育部广东省重点实验室, 广东 深圳

*通讯作者。

文章引用: 金绍勋, 吕德远, 黄浩文, 赵志刚, 黄继小, 付存, 刘文擎, 屈军乐. 基于快照马赛克面阵高光谱图像的FPGA 预测压缩[J]. 仪器与设备, 2020, 8(1): 21-29. DOI: 10.12677/iae.2020.81003

摘要

高光谱图像数据量庞大, 难以实现实时无线传输, 严重制约了高光谱图像数据传输处理的实时性。本文自主研制Zynq平台微型高光谱仪, 对快照马赛克面阵高光谱传感器采集到的特定高光谱图像数据进行无损预测压缩, 并用FPGA实现。其压缩比为1.7至2之间, 增加了高光谱图像数据无线传输的能力, 扩展了微型高光谱仪的应用范围。

关键词

微型高光谱仪, 快照马赛克面阵高光谱传感器, FPGA预测压缩, Zynq平台

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高光谱仪是一种物质结构和成份分析的测量仪器, 它获取到的高光谱图像数据包含了被测物的图像信息与光谱信息, 在物质分析领域应用十分广泛[1] [2]。随着传感器技术及微电子技术的发展, 高光谱仪逐渐向微型化、便携化的方向发展[1]。微型高光谱仪在食品分析、成分测定以及高光谱遥感成像等领域得到了广泛的应用[1] [2] [3]。而这些应用往往要求快速实时的高光谱图像数据传输与处理。

由于高光谱仪分辨率的增加导致的高光谱图像数据量大, 微型高光谱仪与终端进行数据传输时, 一般采用有线传输方式进行传输, 不能实现远程的实时数据采集与传输, 其便携性大大降低。若通过 WIFI 无线传输高光谱图像数据, 庞大的数据量会给无线传输带来巨大的压力, 特别是搭载无人机的遥感应用中, 对数据的无线实时传输要求更高[3] [4] [5]。为此需要有效的高光谱数据压缩方法来减少大量冗余数据而不降低高光谱图像数据的质量, 实现对高光谱数据的实时采集与传输。

针对上述问题, 本文通过自行设计的微型高光谱仪, 通过快照马赛克面阵高光谱传感器获取到的高光谱图像原始数据, 根据其高光谱图像的特殊性提出了一种无损预测压缩算法, 并用 FPGA 实现。压缩后的高光谱图像数据明显减少, 减缓了高光谱图像数据无线传输的压力。

2. 微型高光谱仪

自主设计的微型高光谱仪包括微型高光谱仪外壳、硬件电路 PCB 板、镜头等。主控芯片采用 Xilinx 公司的 Zynq-7020 芯片, 由 PL (Programmable Logic) 和 PS (Processing System) 两部分组成。PL 部分为 FPGA, 主要负责驱动高光谱传感器采集待测物的高光谱数据, 并将采集到的原始数据进行传输等; PS 部分为 2 个 ARM Cortex-A9 核, 主要负责控制高光谱数据的传输与处理。

微型高光谱仪在 Zynq 处理器的 PS 部分搭载了嵌入式 Linux 操作系统平台, 为高光谱数据传输与处理提供了开发环境。同时, 搭建了 Socket 服务器, 终端通过 Socket 服务器对微型高光谱仪发送采集控制等各类指令, 从而实现了微型高光谱仪与终端数据的无线交互。

自主设计的微型高光谱仪使用 IMEC(比利时微电子研究中心)新型快照马赛克面阵高光谱传感器芯片作为其高光谱图像传感器[6] [7]。该传感器在 CMOS 图像传感器晶圆上进行了处理,将感光面镀上不同波段周期性排列的滤光膜,其滤光膜以 5×5 (25 个光谱波段)或 4×4 (16 个光谱波段)的方式排列,传感器尺寸(高 \times 宽)为 1088×2048 像素。与现有的高光谱图像线扫描传感器相比,其扩展的光谱范围具有独特的优势。快照马赛克面阵高光谱传感器芯片获取到的高光谱图像示意图如图 1 所示:

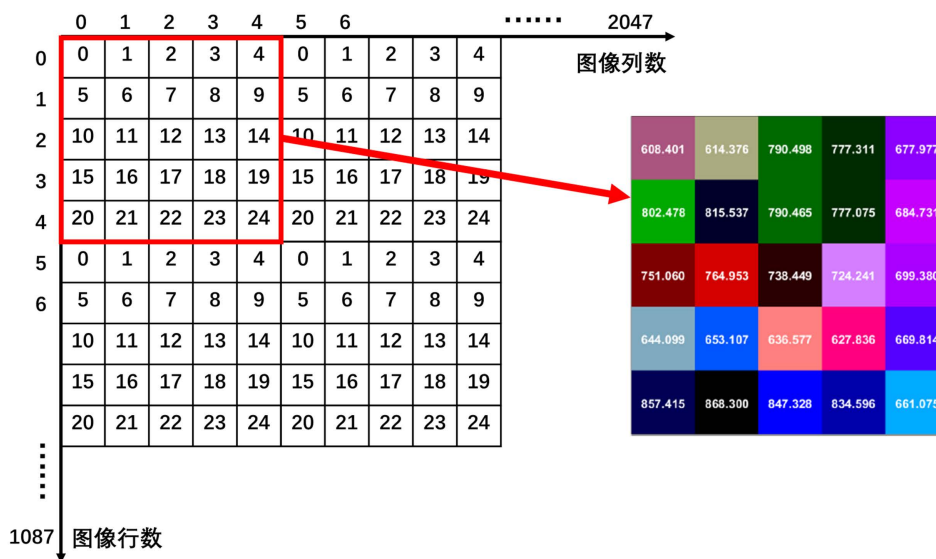


Figure 1. Snapshot mosaic area array hyperspectral image (5×5 arrangement)

图 1. 快照马赛克面阵高光谱图像(5×5 排列方式)示意图

在 5×5 排列方式下,将产生 25 个不同光谱波段,大小为 216×409 像素的单波段图像。其光谱分辨率为 12 nm ,成像速度可达 340 帧/秒,可满足高速实时高光谱数据采集的要求。每一帧高光谱图像数据大小约为 2.2 MB,为降低传输带宽,加快图像传输速度,需对获取到的快照马赛克面阵高光谱图像数据进行压缩。

3. 基于快照马赛克面阵高光谱图像压缩方法

目前主要的高光谱图像压缩编码方法可以分为三类:基于矢量量化的压缩编码技术、基于变换的压缩编码技术和基于预测的压缩编码技术[8] [9]。基于矢量量化可获得较大的压缩比,但是其复杂性较高,多用在有损压缩。基于变换的方法的主要原理是通过变换重新组织图像数据,在完整的高光谱图像数据三维立方体中进行变换。基于预测的方法利用图像中各像素间的相关性,使用当前已知像素灰度值对其相邻像素进行预测。

这三种方法大多处理的高光谱图像数据为一个三维立方体,它在普通的二维图像上增加了一层光谱维,表示图像的各个波段[8] [9] [10] [11]。这些方法都有效地利用了高光谱图像的空间冗余与谱间冗余,但是常规的高光谱图像压缩方法都是基于上述高光谱图像数据立方体而提出的。对于快照马赛克高光谱传感器的特定结构,以及处理采集的图像的方式都有一定的限制。这是由于快照马赛克面阵高光谱图像的每个像素都包含单个波长信息,而相同的波长在垂直方向和水平方向每 5 个像素会重复出现。这导致同一波段中的相邻像素不对应于实际场景中的相邻像素,所以目前提出的方法不适用在快照马赛克面阵高光谱图像数据的情况。因此根据快照马赛克面阵高光谱图像的波段分布情况,提出了一种基于预测的无损压缩算法。其原理如图 2 所示。

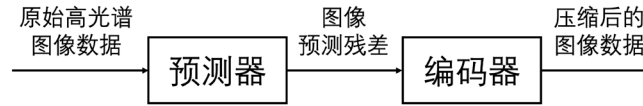


Figure 2. Schematic of prediction-based lossless compression algorithm
图 2. 基于预测的无损压缩算法原理图

该压缩算法包含两个功能模块：预测器与编码器。预测器的功能是为了消除高光谱图像数据间的冗余，编码器用来对消除冗余后的高光谱数据进行编码。

3.1. 预测器

根据微型高光谱仪马赛克面阵传感器获取到的高光谱数据的特点，可知图像的各个像素间存在空间冗余，通常可认为相邻像素之间满足一阶马尔科夫过程，所以可以利用同一波段的前一个像素来预测当前像素，并将真实值与预测值作差，得到预测残差。

以 5×5 的高光谱图像数据为例，将图像相邻的 25 个像素视为一个独立的“成像单元”。该“成像单元”完整包含了 25 个波段中各个波段的采样值，因此在压缩编码过程中，将其作为不可再分割最小单元。将图像分割为区域 1、区域 2、区域 3、区域 4 的四个区域。具体区域划分如图 3 所示。

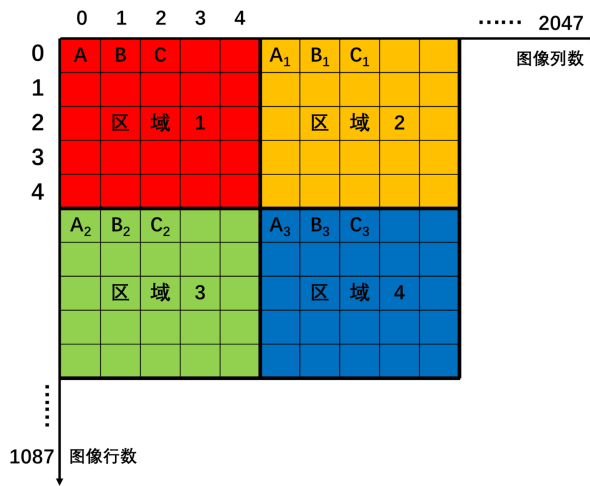


Figure 3. Hyperspectral image region division
图 3. 高光谱图像区域划分

区域 1 代表图像的左上角 5×5 方块，该区域为图像各个波段成像的第一个像素，因此无法预测，只能对原始值进行编码；区域 2 为除去区域 1 以外的上边缘部分，该部分的像素可根据同一波段内的左侧相邻像素来预测；区域 3 代表图像中除去区域 1 以外的左边缘部分，该部分的像素可根据同一波段内的右侧相邻像素来预测；区域 4 代表图像除上边缘、左边缘以外的所有区域，该部分图像的像素由左侧相邻像素和右侧相邻像素同时预测。其余像素以此类推，各区域像素的部分预测值与预测残差如表 1 所示。

Table 1. Partial predictions and prediction residuals
表 1. 部分预测值与预测残差值

像素编号	预测值	预测残差
A1	A	A1 - A
B1	B	B1 - B

Continued

C1	C	$C1 - C$
A2	A	$A2 - A$
B2	B	$B2 - B$
C2	C	$C2 - C$
A3	$(A1 + A2)/2$	$A3 - (A1 + A2)/2$
B3	$(B1 + B2)/2$	$B3 - (B1 + B2)/2$
C3	$(C1 + C2)/2$	$C3 - (C1 + C2)/2$

3.2. 编码器

根据高光谱图像的预测残差的分布特性, 本文采用了一种改进的 k 阶有符号指数哥伦布编码。指数哥伦布编码是一种可变长前缀编码, 其硬件实现简单并能快速产生码字, 可达到很高的编码效率[12][13]。改进的 k 阶有符号指数哥伦布编码流程如图 4 所示。

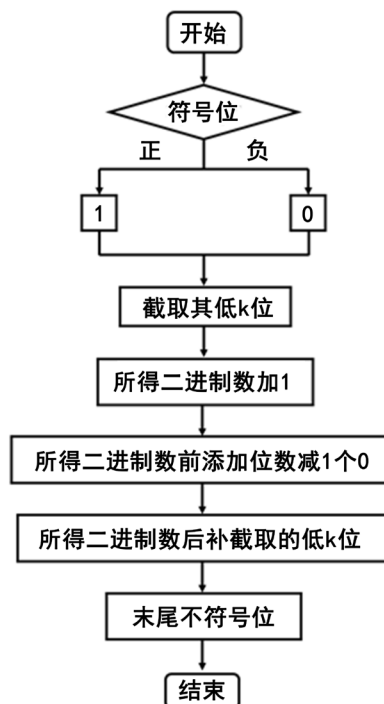


Figure 4. Improved k -order signed Exp-Columbus coding flowchart
图 4. 改进的 k 阶有符号指数哥伦布编码流程图

对于一个有符号数 A , 用 1 bit 来记录其正负号, 1 表示负, 0 表示正; 然后将 A 的绝对值写成二进制形式, 截去其低 k 位, 得到二进制数 M ; 将 $M + 1$, 得到二进制数 N ; 接着得到 N 的位数 n , 在 N 前添加 $n - 1$ 个 0; 最后在 N 后补上被截取的低 k 位, 末尾补上符号位, 至此完成一次编码。

4. 基于快照马赛克面阵高光谱图像预测压缩 FPGA 实现

结合快照马赛克面阵高光谱图像预测压缩原理, 把算法根据模块进行划分, 分别对各个模块进行 FPGA 实现。

4.1. 预测器的 FPGA 实现

由于快照马赛克面阵高光传感器“成像单元”的排列方式，用 Verilog 语言实现是较复杂的。为提高开发效率，优化 RTL 的资源消耗和数据吞吐速率，将预测器采用 C++语言进行编写。C++语言部分描述代码如图 5 所示。

```

//LOOP_1:
for(sub_blk_cnt = 0; sub_blk_cnt < 2; sub_blk_cnt++)
{
    if( (height_cnt <SUB_BLK) && (sub_blk_cnt == 0)) //左上角，直接编码不用预测
    {
        //LOOP_2:
        for(int i=0 ; i<SUB_BLK; i++)
        {
            output[i+ front_pix_num ] = input[i + front_pix_num];
        }
    }
    else if( (height_cnt <SUB_BLK) && (sub_blk_cnt ==1)) //上边缘
    {
        //LOOP_3:
        for(int i=SUB_BLK ; i<MAX_WIDTH; i++)
        {
            pre_value = input[i-SUB_BLK + front_pix_num];
            new_value = input[i + front_pix_num ];
            if(new_value > pre_value)
            {
                output[i+ front_pix_num ] = new_value - pre_value;
            }
            else
            {
                output[i + front_pix_num ] = pre_value - new_value +256;
            }
        }
    }
    else if( (height_cnt >=SUB_BLK) && (sub_blk_cnt ==0) ) //左边缘
    {
        //LOOP_4:
        for(int i=0 ; i<SUB_BLK; i++)
        {
            pre_value = input[i + (height_cnt- SUB_BLK) *MAX_WIDTH ];
            new_value = input[i + front_pix_num ];

            if(new_value > pre_value)
            {
                output[i+ front_pix_num ] = new_value - pre_value;
            }
            else
            {
                output[i+ front_pix_num ] = pre_value - new_value +256;
            }
        }
    }
}

```

Figure 5. C++ code diagram of Predictor part

图 5. 预测器部分 C++代码图

首先对每一列像素进行检测，判断其位置为左上角、上边缘、左边缘或右下角。若为左上角则不需要预测直接输出，否则对该像素进行相应的预测；然后将上边缘、左边缘或右下角像素根据像素所处区域对其预测值进行赋值；最后将此三个区域的真实值与预测值相减所得预测残差的绝对值进行输出。

完成 C++编写的预测器后，通过 Vivado-HLS 软件建立 HLS 工程，将所编写好的 C++代码添加进工程中，加入 testbench 的测试代码并选择相对应的 FPGA 芯片配置。将 C++源代码进行验证、高层次综合与 RTL 验证后最终将 RTL 逻辑打包成 HDL 的 IP 核。这样就完成了预测器 IP 核的 FPGA 实现。

4.2. 编码器的 FPGA 实现

编码器的 FPGA 实现部分代码如图 6 所示。

```

always@(posedge clk or negedge rst_n) //encode
if(~rst_n) begin code <=16'b0;length <= 0; end
else if(code_valid_r || code_valid_r2)
begin
if(Main)
begin
if(Main[7]==1)
begin code <- {{7{1'b0}},Main[7:0],L[K-1:0],sig_r}; M = 8; end
else if((Main[6]==1) & (Main[7]==0))
begin code <- {{6{1'b0}},Main[6:0],L[K-1:0],sig_r}; M = 7; end
else if((Main[5]==1) & (Main[6]==0) & (Main[7]==0))
begin code <- {{5{1'b0}},Main[5:0],L[K-1:0],sig_r};M = 6; end
else if((Main[4]==1) & (Main[5]==0) & (Main[6]== 0) & (Main[7]==0))
begin code <- {{4{1'b0}},Main[4:0],L[K-1:0],sig_r}; M = 5; end
else if((Main[3]==1) & (Main[4]==0) & (Main[5]==0) & (Main[6]==0) & (Main[7]==0))
begin code <- {{3{1'b0}},Main[3:0],L[K-1:0],sig_r}; M = 4; end
else if((Main[2]==1) & (Main[3]==0) & (Main[4]==0) & (Main[5]==0) & (Main[6]==0) & (Main[7]==0))
begin code <- {{2{1'b0}},Main[2:0],L[K-1:0],sig_r}; M = 3; end
else if((Main[1]==1) & (Main[2]==0) & (Main[3]==0) & (Main[4]==0) & (Main[5]==0) & (Main[6]==0) & (Main[7]==0))
begin code <- {{1{1'b0}},Main[1:0],L[K-1:0],sig_r}; M = 2; end
else if((Main[0]==1) & (Main[1]==0) & (Main[2]==0) & (Main[3]==0) & (Main[4]==0) & (Main[5]==0) & (Main[6]==0) & (Main[7]==0))
begin code <- (Main[0],L[K-1:0],sig_r); M = 1; end
length = M+M+K;
end
end
end
    
```

Figure 6. Verilog code diagram of encoder part
图 6. 编码器部分 Verilog 代码图

在编码时，设置指数哥伦布编码阶数 k 设为 1。将二进制数的符号位放置在寄存器 sig_r 中，截取的低 k 位放置寄存器 L 中，剩下的数放置在寄存器 Main 中。将 Main 中数据加 1 后从高位到低位判断为 1 的最高位数，同时计算此数据位数 M。最终得到的编码数据如图 7 所示。

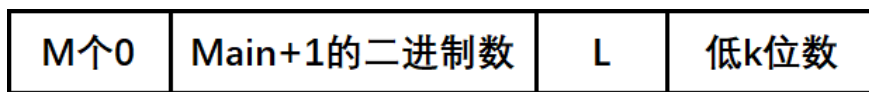


Figure 7. Schematic diagram of encoded data
图 7. 编码后数据示意图

5. 测试与分析

基于快照马赛克面阵高光图像 FPGA 预测压缩运用 Vivado2018.3 软件平台最终进行实现，其顶层模块原理图如图 8 所示。

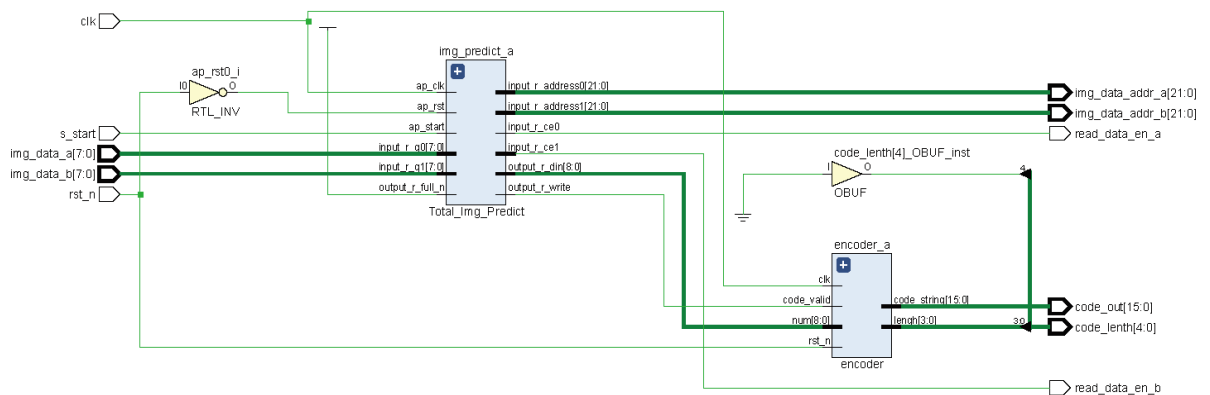


Figure 8. Top module schematic
图 8. 顶层模块原理图

采用 Vivado2018.3 自带的仿真软件进行仿真。其仿真波形窗口如图 9 所示。

其中 string_len 信号为图像编码后的所有码字长度之和，该值在编码过程中不断增加，直到编码结束。编码结束时，使能信号置低，其上方显示为预测编码所耗费的时间为 17.404 ms。

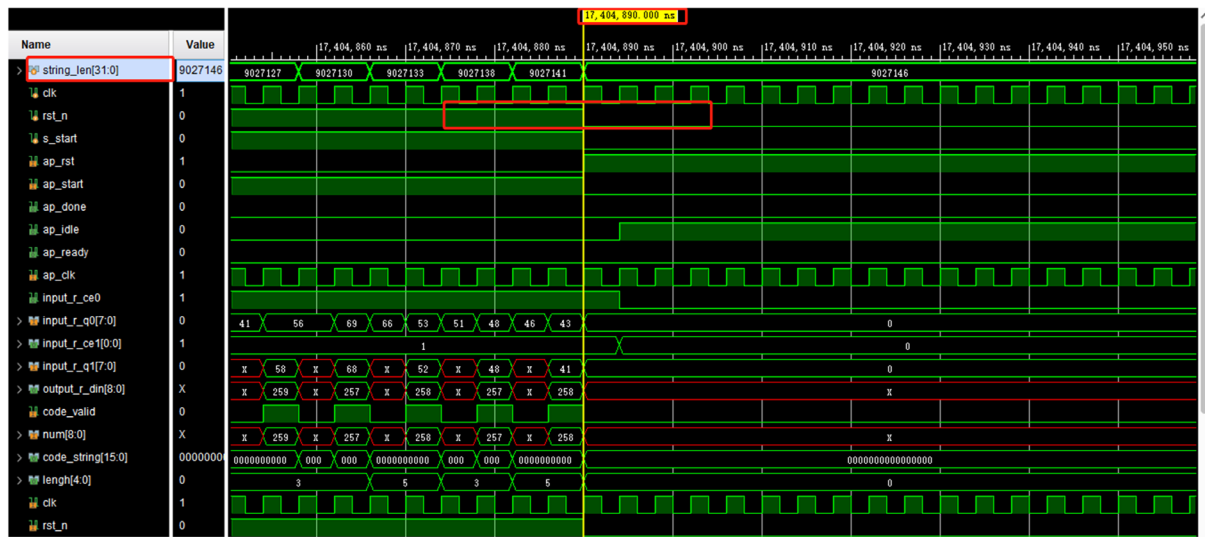


Figure 9. Predictive compression FPGA simulation graph

图 9. 预测压缩 FPGA 仿真图

将微型高光谱仪通过快照马赛克高光谱传感器采集到的五张用于测试的高光谱图像进行该方法进行压缩，得到压缩比如表 2 所示。

Table 2. Test image compression

表 2. 测试图像压缩效果

图像编号	总大小/bit	压缩比
SSM5x5_a	9,027,146	1.933
SSM5x5_b	9,490,996	1.839
SSM5x5_c	9,130,614	1.911
SSM5x5_d	8,715,688	2.002
SSM5x5_e	9,958,690	1.752

由上表测试数据可知，该 FPGA 高光谱图像压缩算法所获得的压缩比在 1.7 至 2 之间，适用于对快照马赛克面阵高光谱传感器图像数据的实时处理。

6. 结论

通过自主研发的微型高光谱仪，对由快照马赛克面阵高光谱传感器所采集到的高光谱图像数据进行 FPGA 高光谱图像预测编码压缩，压缩比在 1.7 至 2 之间，达到了实时压缩处理的目的。该压缩算法可缓解高光谱图像数据无线传输的压力，提升高光谱图像数据的实时分析与处理能力，扩展微型高光谱仪的应用范围。

基金项目

深圳技术大学校企合作项目(2018010802012)；深圳技术大学校级科研项目(BSH201902286)；深圳技术大学研究生校企合作研究基金项目(XQHZZ01902)；国家自然科学基金重点国际(地区)合作与交流项目(61620106016)。

参考文献

- [1] 谢淼. 近红外微型光谱仪关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [2] 粘永健, 辛勤, 汤毅. 基于多波段预测的高光谱图像分布式无损压缩[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 906-912.
- [3] 李江波, 饶秀勤, 应义斌. 农产品外部品质无损检测中高光谱成像技术的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2021-2026.
- [4] Guanter, L., Kaufmann, H., Segl, K., *et al.* (2015) The EnMAP Spaceborne Imaging Spectroscopy Mission for Earth Observation. *Remote Sensing*, **7**, 8830. <https://doi.org/10.3390/rs70708830>
- [5] Lorente, D., Aleixos, N., Gómez-Sanchis, J., *et al.* (2012) Recent Advances and Applications of Hyperspectral Imaging for Fruit and Vegetable Quality Assessment. *Food and Bioprocess Technology*, **5**, 1121-1142. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0725-1>
- [6] Geelen, B., Tack, N. and Lambrechts, A. (2014) A Compact Snapshot Multispectral Imager with a Monolithically Integrated Per-Pixel Filter Mosaic. <https://doi.org/10.1117/12.2037607>
- [7] Geelen, B., Blanch, C., Gonzalez, P., *et al.* (2015) A Tiny, VIS-NIR Snapshot Multispectral Camera. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 9374. <https://doi.org/10.1117/12.2077583>
- [8] 苏令华. 高光谱图像压缩技术研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [9] 万建伟, 粘永健, 苏令华, 辛勤. 高光谱图像压缩技术研究进展[J]. 信号处理, 2010, 26(9): 1397-1407.
- [10] Tzagkarakis, G., Charle, W. and Tsakalides, P. (2016) Data Compression for Snapshot Mosaic Hyperspectral Image Sensors. 2016 *24th European Signal Processing Conference*, Budapest, Hungary 29 August-2 September 2016, 1558-1562. <https://doi.org/10.1109/EUSIPCO.2016.7760510>
- [11] Lin, X., Liu, Y., Wu, J., *et al.* (2014) Spatial-Spectral Encoded Compressive Hyperspectral Imaging. *ACM Transactions on Graphics*, **33**, 1-11. <https://doi.org/10.1145/2661229.2661262>
- [12] Ding, J.J., Chen, H.H. and Wei, W.Y. (2013) Adaptive Golomb Code for Joint Geometrically Distributed Data and Its Application in Image Coding. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, **23**, 661-670. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2012.2211952>
- [13] 孙健, 任国强, 吴钦章. 基于自适应指数哥伦布编码的图像压缩算法[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2973-2979.