

# 遥感云图纹理特征提取算法实时加速设计

薄振华<sup>1</sup> 管雪元<sup>1</sup> 马训穷<sup>1</sup> 鲁江涛<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室 南京 210094; 2. 淮海工业集团 长治 046012)

**摘 要:** 为了解决灰度共生矩阵对遥感云图特征提取实时图像处理过程中算法复杂度高, 运算时间长, 数据运算量大等问题, 提出了一种 Vivado HLS 实现卫星遥感云图特征提取算法的硬件加速方法。通过对灰度共生矩阵纹理特征提取算法以及 Vivado HLS 硬件加速设计进行研究, 利用 Vivado HLS 对灰度共生矩阵纹理特征提取进行硬件加速, 并且封装为可调用的 IP 核, 将 PC 端遥感云图处理结果与 Zynq7020 硬件加速后的处理结果进行比较, 实验结果表明, 该方法能够快速解算遥感云图纹理特征, 加快遥感云图处理速度, 同时克服了 FPGA 设计图像算法难度大的缺点。

**关键词:** 遥感云图; 灰度共生矩阵; Vivado HLS; 特征提取; 硬件加速

**中图分类号:** TN911.73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Real-time acceleration design of remote sensing cloud image texture feature extraction algorithm

Bo Zhenhua<sup>1</sup> Guan Xueyuan<sup>1</sup> Ma Xunqiong<sup>1</sup> Lu Jiangtao<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Huaihai Industry Group, Changzhi 046012, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of high algorithm complexity, long operation time and large amount of data calculation in the real-time image processing process of the gray level co-occurrence matrix for remote sensing cloud image feature extraction, a hardware acceleration method of Vivado HLS to realize the satellite remote sensing cloud image feature extraction algorithm is proposed. Studied the gray-level co-occurrence matrix texture feature extraction algorithm and Vivado HLS hardware acceleration design, uses Vivado HLS to hardware-accelerate the gray-level co-occurrence matrix texture special diagnosis extraction, and encapsulates it as a callable IP core to remotely sense cloud images on the PC side. The processing results are compared with the processing results after Zynq7020 hardware acceleration. The experimental results show that this method can quickly resolve the texture characteristics of remote sensing cloud images, speed up the processing speed of remote sensing cloud images, and overcome the disadvantage of FPGA design of image algorithms.

**Keywords:** remote sensing cloud image; gray co-occurrence matrix; Vivado HLS; feature extraction; hardware acceleration

## 0 引 言

目前通过光学遥感设备来获取遥感云图具有高精度高分辨率的优点, 但是由于光学遥感设备本身的设计极易受到云层遮挡等天气因素的影响<sup>[1-2]</sup>, 无法准确采集到云层下的目标信息, 而图像的纹理特征可以为遥感云图检测提供有力的判别依据。图像纹理特征提取的最常用方法是由 Haralick 提出的灰度共生矩阵特征提取算法<sup>[3]</sup>, 该算法是一种研究纹理区域中像素及其领域中灰度一阶到高阶统计

特性的计算密集型算法, 但是在处理像素值较大的图片时会更加耗时<sup>[4]</sup>。在文献[5]中的实验结果表明, 利用奔腾 4 处理器处理像素较大的图像时灰度共生矩阵计算纹理特征值计算时间较长。为了满足对图像处理实时速度的要求, 使用 FPGA 对图像进行加速处理。如文献[6]中基于 FPGA 实现灰度共生矩阵, 可以有效提高纹理特征提取效率, 但是 FPGA 硬件设计过程难, 会导致设计周期延长等缺点<sup>[7]</sup>。采用 Vivado HLS 实现遥感云图纹理特征提取可以加快设计周期, 减少硬件资源消耗, 并且其通用性强。

收稿日期: 2020-11-25

## 1 灰度共生矩阵算法

灰度共生矩阵是由遥感云图中两个不同像素点灰度分布的联合概率密度  $P(i, j, d, \theta)$  构成<sup>[8-9]</sup>。灰度共生矩阵的图形表示如图 1 所示。

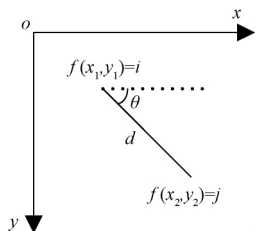


图 1 灰度共生矩阵

其中两个不同像素点  $A_1, A_2$  的灰度值分别用  $g_1, g_2$  表示,  $A_1$  与  $A_2$  像素点间的距离与夹角分别用  $d$  与  $\theta$  表示,  $\theta$  一般取  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  作为灰度共生矩阵计算的主要方向。  $P$  为灰度共生矩阵, 原始图像的灰度级数为 256 级, 为了方便计算灰度共生矩阵, 一般将图像压缩到 16 级<sup>[10]</sup>。灰度共生矩阵中的像素值表示  $A_1, A_2$  两个像素点保持  $d$  距离  $\theta$  夹角出现的次数与所有元素和之比<sup>[11]</sup>。灰度共生矩阵联合概率密度如式(1)所示。

$$P(i, j, d, \theta) = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2) \in B \times B / f(x_1, y_1) = i, f(x_2, y_2) = j; |x_1 - y_1| = 0, |x_2 - y_2| = d; d = \{1, 2, \dots, N\}; \theta = 0^\circ\} \quad (1)$$

其中,

$$B = L_y \times L_x, L_x = \{1, 2, \dots, N_x\}, L_y = \{1, 2, \dots, N_y\} \quad (2)$$

式中:  $N_x$  和  $N_y$  表示  $x$  轴和  $y$  轴方向像素的总数。

灰度共生矩阵的特征值主要有 14 个纹理特征参量, 经过 Baraldi 实验验证, 发现对遥感云图特征提取效果最好的 4 种参量为角二阶矩、对比度、相关和熵<sup>[12]</sup>。

### 1) 角二阶矩(ASM)

$$ASM = \sum_i \sum_j P(i, j)^2 \quad (3)$$

角二阶矩通常用来表示图像灰度纹理粗细程度与分布均匀程度<sup>[13]</sup>。角二阶矩值较小时, 表示灰度共生矩阵中像素值相近或相等, 此时, 遥感云图纹理细致; 反之, 角二阶矩值较大时, 表示像素值相差较大, 遥感云图纹理均匀变化。

### 2) 对比度(CON)

$$CON = \sum_i \sum_j (i - j)^2 P(i, j) \quad (4)$$

对比度主要描述遥感云图的纹理沟纹的深浅程度以及图像的清晰度<sup>[14]</sup>。若对比度大时, 则表示遥感云图图像沟纹较深, 且图像效果清晰。相反, 对比度小, 遥感图像沟纹浅, 效果模糊。

### 3) 相关(COR)

$$COR = \frac{\sum_i \sum_j ((ij) p(i, j)) - \mu_i \mu_j}{\sigma_i \sigma_j} \quad (5)$$

其中,

$$\mu_i = \sum_i \sum_j iP(i, j) \quad (6)$$

$$\mu_j = \sum_i \sum_j jP(i, j) \quad (7)$$

$$\sigma_i^2 = \sum_i \sum_j (i - \mu_i)^2 P(i, j) \quad (8)$$

$$\sigma_j^2 = \sum_i \sum_j (j - \mu_j)^2 P(i, j) \quad (9)$$

相关反映灰度共生矩阵某一行或列所有像素值点的相似程度。相关度越大, 图像中灰度值相似度越高, 反之, 相似度越低。

### 4) 熵(ENT)

$$ENT = - \sum_i \sum_j P(i, j) \log P(i, j) \quad (10)$$

熵表示遥感云图像灰度分布的复杂程度, 灰度共生矩阵像素点分布随机性越大时, 熵值越大, 图像灰度分布复杂程度越高<sup>[15]</sup>。

## 2 Vivado HLS 设计流程

Vivado HLS 主要将 C/C++ 或 System C 的函数封装为 RTL 电路, 然后在 Zynq 芯片中进行综合并实现。使用 Vivado HLS 进行设计的流程如图 2 所示。

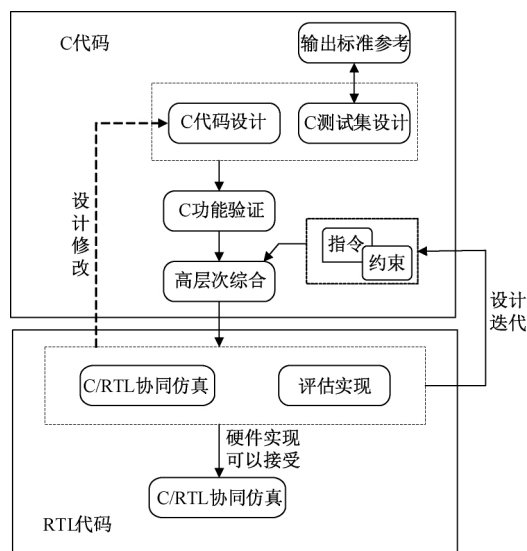


图 2 Vivado HLS 软件设计流程

HLS 设计的主要输入是一个 C/C++/System C 设计, 以及一个基于 C 的测试集 (TestBench)。在对 HLS 设计进行综合之前, 首先对灰度共生矩阵纹理特征提取算法进行 C 仿真, 其目的是验证 HLS 输入的 C 代码的功能是否正确。验证的方式是在 TestBench 中调用 C 设计的函数, 然后将其输出与测试集进行比对, 若对比结果有差异则需要先对 C 设计进行修改调试<sup>[16]</sup>。接下来, 对设计进行高

层次综合,即 HLS 过程本身。此过程需要对 C 语言函数进行分析和处理,同时对函数以及循环进行指令约束和优化,创建 RTL 描述。经过高层次综合后会产生一组以 Verilog 或者 VHDL 语言编写的 RTL 设计文件。

综合过程结束后得到的 RTL 模型,可以在 Vivado HLS 中进行 C/RTL 协同仿真,来进一步验证综合得到的 RTL 设计的正确性。在这个过程中 Vivado HLS 会自动产生一个测试集为 RTL 设计提供输入,然后将其输出与预期的值进行比对,最后将设计的 RTL 电路封装为 IP 核,以便遥感云图特征提取实时处理调用。

### 3 纹理特征提取的 HLS 实现

遥感云图像纹理特征提取软件设计主要是通过自定义函数以及调用 OpenCV 函数实现;硬件加速设计将软件设计的功能函数通过 HLS 转化为 RTL 电路,并将不可综合的函数以及语句使用 HLS 的函数库进行替换,最终将 HLS 生成的 IP 核应用到遥感云图像检测中。遥感云图像纹理特征提取的 HLS 设计流程如图 3 所示。

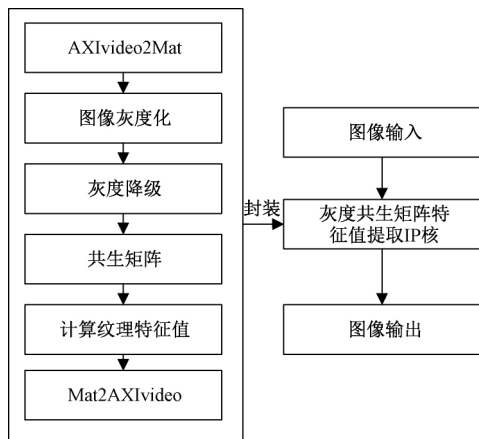


图3 灰度共生矩阵纹理特征提取 HLS 设计流程

通过读取 SD 卡图像作为输入源图像,由于 SD 卡读取图像为 AXI-lite 数据,首先通过 VDMAIP 核将数据进行缓存存入 DDR3 当中,从 DDR3 中读取数据后转化为 AXI-Stream 数据流传入灰度共生矩阵特征值提取 IP 核中进行特征值提取,将处理图像输出至显示屏,并将特征值进行串口显示输出。其中遥感云图像特征提取算法主要由图像灰度化、灰度降级、共生矩阵生成与计算纹理特征值,最后通过 HLS 优化指令对算法进行优化以及加速。

#### 3.1 遥感云图灰度化

将遥感云图像获取到后,多通道的 RGB 图像通过 `hls::CvtColor<HLS_RGB2_GRAY, HLS8UC3, HLS_8UC1>` 转化为灰度图像,并提取各个通道的灰度值。由于纹理特征是一种结构特征,在各个颜色通道上具有相同的表现形式,因此可以选择任意通道作为识别依据,选择 B 通道作为主要研究对象。

#### 3.2 灰度降级

遥感云图像灰度化后图像灰度级为 256 级。当计算灰度共生矩阵时,需要生成一个  $256 \times 256$  的存储空间,导致灰度共生矩阵计算量增大,因此要对遥感云灰度图像进行降级<sup>[17-18]</sup>。当对灰度图像分为 16 个灰度级时,对灰度图像的像素点直接除以 16 取整,会降低图像的清晰度,使用 `hls::EqualizeHist<HLS_8UC1, HLS_8UC1, MAX_HEIGHT, MAX_WIDTH>` 对遥感云图灰度图像进行直方图均衡化处理实现灰度降级。

#### 3.3 灰度共生矩阵特征值提取

利用 `hls::Widow` 函数创建一个  $16 \times 16$  滑动窗口矩阵, `hls::LineBuff` 创建一个  $1 \times 256$  的 glcm 行缓冲用来保存灰度共生矩阵,为了方便计算,选择  $d=1$ ,即选择中心像素值与相邻像素值直接作比较。计算  $\theta$  为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  4 个方向的分布像素值,最后将 4 个方向的平均值作为灰度共生矩阵某一点的纹理特征值。如图 4 所示描述了一个大小为  $4 \times 4$  的灰度图像,当  $GLCM_g=5, d=1$ ,方向为 0 的灰度共生矩阵生成的过程。

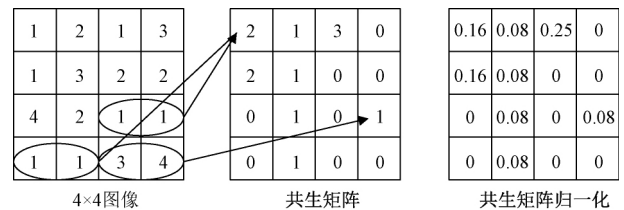


图4 共生矩阵生成方法

其中  $d=1$ ,方向为 0 的灰度共生矩阵 C 语言代码如下所示。

```
loop_height: for(int i=0;i<rows;i++){
loop_width: for(int j=0;j<cols;j++){
//优化指令
#pragma HLS PIPELINE
#pragma HLS LOOP_FLATTEN OFF
#pragma HLS DEPENDENCE array inter false
glcm.val[core.val[j][i]][core.val[j+1][i]]++;
}
```

根据获取到的灰度共生矩阵对遥感云图像提取能量、对比度、相关度、熵 4 个特征参量。特征值通过结构体实现,最终将特征值输出到串口当中进行查看。

#### 3.4 顶层函数优化

硬件加速主要有两种方法可以来调整 HLS 过程的行为,使得高层次综合可以达到理想的加速。第 1 种通过对设计的某些指标加以限制。可以指定最低的时钟周期,以确保实现结果能够满足所集成系统的要求。可以选择约束资源的利用情况或其他指标,从而优化应用的设计。第 2 种是通过指令对 RTL 的实现参数施加更具体的影响。

有各种类型的指令,分别映射在代码的某些特征上,指定 HLS 引擎处理 C 代码中识别出来的循环或数组,或是某个特定运算的延迟。这也能导致 RTL 输出的巨大改变。因此,通过指令可以对灰度共生矩阵进行硬件加速。

主要通过对 for 循环进行展开的 unroll 进行优化,将某些变量指定为内部运算宏单元,使用 inline 对计算特征值能量中的 powf() 函数进行优化,数组替换,增加流水线。最终将函数进行整合,形成顶层函数,对顶层函数进行并行优化,通过面积来换时间策略,从而实现硬件加速。其资源使用情况如表 1 所示,由表 1 中占用资源情况看,本文设计的逻辑资源占用的非常少。

表 1 灰度共生矩阵资源使用情况

名称	BRAM	DSP48E	FF	LUT
AXIvideo2Mat	0	0	391	217
Block_Mat_exit	0	0	3	31
CvtColor	0	3	309	182
GrayDeg	6	8	2 347	4 535
GrayMatrix_Extra	17	25	4 528	6 317
Mat2AXIvideo	0	0	281	223
DiagnosisAXILite	0	0	106	168
占用资源	23	36	7 965	11 673
资源总数	280	220	106 400	53 200
资源占用率/%	8.2	16.3	7.5	21.9

#### 4 实验验证

本次设计以领航者 Zynq7020 开发板作为硬件平台对算法进行验证,通过 Zynq PS 端将图像数据流传入灰度共生矩阵特征值提取 IP 核进行处理,将结果输出到 RGB 屏进行显示,同时将特征值输出到串口。其中输入的原图像如图 5 所示。

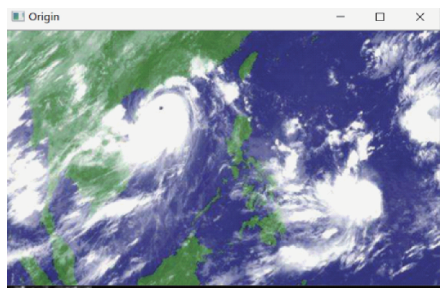


图 5 输入原始图像

如图 6 所示为使用主频为 2.2 GHz PC 端处理后的结果,其中 PC 端对整幅图像处理使用时间为 13 842.8 ms。

图 7 所示为通过 Zynq7020 硬件加速实现的结果显示,其中 RGB 显示屏中分别为对比度、能量、相关度与熵特征图像,其中通过 Zynq 硬件开发板处理时间为 158.7 ms。

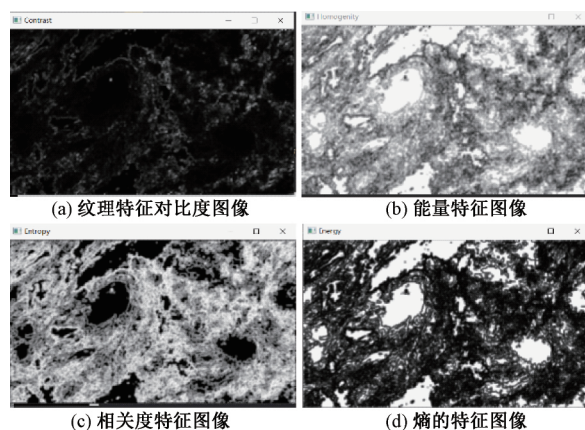


图 6 PC 处理结果

对比发现通过硬件加速后的纹理特征提取时间提高了 87.226 倍,Zynq7020 开发板图像处理结果中可以看出其处理的特征结果比在 PC 端处理的边缘更加的明显,对云图像能够进行有效的纹理特征提取,并且实现了硬件加速设计。

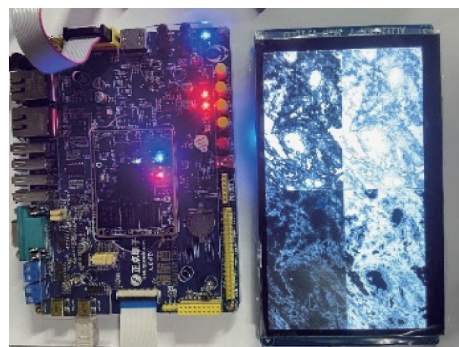


图 7 Zynq 处理结果

如表 2 所示为 PC 与硬件加速计算所得的特征值结果。通过硬件加速后的计算与 PC 计算有一定的偏差,此偏差主要是由于 FPGA 定点计算误差引起的,但是结果仍然跟 PC 处理结果相近,不会影响到最终的纹理特征提取。

表 2 特征值提取结果

名称	PC	Zynq7020
ASM	56 205.9	56 197
CON	152 633.0	152 645
COR	117 188.0	117 093
ENT	96 243.7	96 165

#### 5 结 论

通过 Vivado HLS 实现遥感云图灰度共生矩阵特征提取算法硬件加速设计,缩短了硬件描述语言的开发周期,避免了 FPGA 开发难度大的缺点,可以实现算法的加速,此

方法的实现,对于更为复杂的算法进行硬件加速具有重要的指导意义。经过仿真和 FPGA 验证,通过 HLS 生成的灰度共生矩阵纹理特征提取 IP 核,可以应用到遥感云图像实时检测中。

#### 参考文献

- [1] 周雪珺. 基于 FPGA 的遥感图像云检测算法研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [2] 李学亮, 王维. 基于 CNN 和 SIFT 特征的遥感图像变化检测[J]. 电子测量技术, 2019, 42(21): 87-91.
- [3] HARALICK R M, SHANMUGAM K, DINSTEN I. Textural features for image classification[J]. Studies in Media and Communication, 1973, 3(6): 610-621.
- [4] 王延年, 程燕杰. 基于对比度增强与最大熵的工件表面图像分割算法[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(12): 37-40.
- [5] SHABAHRAMI A, PHAM T A, BERTELS K. Parallel implementation of gray level co-occurrence matrices and Haralick texture features on cell architecture [J]. The Journal of Supercomputing, 2012, 59(3): 1455-1477.
- [6] 段咏龙, 胡坚, 贺文静, 等. 基于 FPGA 的遥感图像纹理特征提取算法实现技术[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(13): 3635-3641.
- [7] 谭检成, 吴定祥, 李明鑫, 等. 基于 Vivado HLS 的 Canny 算法实时加速设计[J]. 电子技术应用, 2018, 44(9): 65-68, 72.
- [8] 刘舒, 姜琦刚, 邵永社, 等. 应用灰度共生矩阵的纹理特征描述的研究[J]. 科学技术与工程, 2012(33): 8909-8914.
- [9] 曹家梓, 宋爱国. 基于马尔科夫随机场的纹理图像分割方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 35(4): 776-786.
- [10] 骆小飞, 徐军, 陈佳梅. 基于逐像素点深度卷积网络分割模型的上皮和间质组织分割[J]. 自动化学报, 2017, 43(11): 2003-2013.
- [11] 景军锋, 邓淇英, 李鹏飞, 等. LBP 和 GLCM 融合的织物组织结构分类[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1406-1413.
- [12] 徐天伟. 基于灰度共生矩阵的医学 PET 图像纹理分析研究[J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(5): 219-220.
- [13] LIAN M J, HUANG CH L. Texture feature extraction of gray-level co-occurrence matrix for metastatic cancer cells using scanned laser pico-projection images [J]. Lasers in Medical Science, 2019, 34(7): 1503-1508.
- [14] 陈强, 田杰, 黄海宁, 等. 基于统计和纹理特征的 SAS 图像 SVM 分割研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 33(6): 1413-1420.
- [15] 王超, 张强. 基于 LBP 和 GLCM 的煤岩图像特征提取与识别方法[J]. 煤矿安全, 2020, 51(4): 129-132.
- [16] 陈瑞. 基于 Vivado HLS 的时域有限差分方法硬件加速研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [17] 郭玥, 于希明, 王少军, 等. 遥感图像云检测的多尺度融合分割网络方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 31-38.
- [18] 姬晓飞, 石宇辰, 王昱, 等. D-S 理论多分类器融合的光学遥感图像多目标识别[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 127-132.

#### 作者简介

薄振华, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理算法硬件加速设计。

E-mail: 309234310@qq.com