

基于 HLS 的红外遥感图像连通域快速提取方法

成昊天^{1,2}, 丁荣莉^{1,2}, 胡博文^{1,2}, 李杰^{1,2}, 李焱^{1,2}, 欧阳尚荣^{1,2}

(1. 上海航天智能计算技术重点实验室, 上海 201109; 2. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘要: 连通域提取是红外遥感图像目标检测算法中的重要组成部分, 包含在粗检算法中, 能够筛去多数虚警, 提升粗检效果, 减少检测算法的运算量, 降低系统功耗。现有的一些连通域提取算法基于 CPU 处理方式设计, 不适合部署在现场可编程逻辑门阵列(FPGA)硬件端。本文采用高层次综合(HLS)的开发模式, 设计了适合 FPGA 加速的连通域提取方法, 相比传统的硬件描述语言开发方法具有更高的灵活性和效率。通过只扫描一次二值图像, 将面积、范围和连通信息均记录在远小于图像的等价表中, 通过简化标记规则和等价表刷新的方法, 既提高了运算速度又节省了大量缓存, 最终在硬件平台实测 256×256 的 8 bit 图像达到了 797 帧/s 的处理速度。

关键词: 红外图像; 遥感图像; 高层次综合(HLS); 现场可编程逻辑门阵列(FPGA); 连通域

中图分类号: TP 311.1

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.04.019

Fast Extraction Method for Connected Domain of Infrared Remote Sensing Image Based on High Level Synthesis

CHENG Haotian^{1,2}, DING Rongli^{1,2}, HU Bowen^{1,2}, LI Jie^{1,2},

LI Yan^{1,2}, OUYANG Shangrong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Intelligent Computing Technology(SAST), Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Connected domain extraction is an important part of infrared remote sensing image target detection algorithm. It is included in the rough detection algorithm, which can screen out most false alarms, improve the rough detection effect, reduce the calculation amount of the detection algorithm, and decrease the power consumption of the system. Some of the existing connected domain extraction algorithms are designed based on CPU processing, and are not suitable for the deployment in the field programmable gate array (FPGA). In this paper, the high level synthesis (HLS) development mode is adopted to design a connected domain extraction method suitable for FPGA acceleration. Compared with the traditional hardware description language development, the designed method has higher flexibility and efficiency. By scanning the binary image only once, the area, range, and connectivity information is recorded in an equivalence table which is much smaller than the image. By simplifying the marking rules and updating the equivalence table, the computation speed is improved and a lot of caching is saved. Finally, a 256×256 8 bit image is used to measure the algorithm on the hardware platform, and the processing speed reaches 797 frame/s.

Key words: infrared image; remote sensing image; high level synthesis (HLS); field programmable logic gate array (FPGA); connected domain

0 引言

在星载舰船识别技术领域, 目前基于合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 和可见光载

荷的技术已经相对成熟并工程化, 基于红外载荷的舰船识别发展相对滞后。红外传感器受到大气、海洋热辐射以及探测器噪声等因素影响, 使舰船目标

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-05-28

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2016YFB0501004)

作者简介: 成昊天(1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为算法工程化、遥感图像处理。

在红外图像上呈现为低信噪比的小目标,这就要求红外舰船识别技术能在各种复杂的背景环境下,克服各种恶劣因素影响,同时要具有较好的实时性和较高的检测率,这也是红外舰船目标识别技术亟待解决的问题^[1-2]。近年来,目标检测在深度学习的帮助下取得了不错的进展^[3-4],在 SAR 和可见光波段已有一些基于深度学习神经网络检测目标的成果^[5-7]。由于神经网络算法工程化部署较复杂,利用传统现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)开发方法部署于在轨系统难度较大,于是采用高层次综合(High Level Synthesis, HLS)代替了传统 FPGA 开发方法。为了降低在轨系统的功耗,减少神经网络的无用计算,跳过一些明显无目标的图像,需要增加一个计算量较小的粗检模块。

粗检模块包含多个小算法,用来粗略提取特征,其中,连通域的提取在工程化阶段属于一个难点^[8],常用的算法是基于 CPU 运算而设计,具有较大的随机性,而 FPGA 优势更多的在于流水线式数据处理的加速,更偏向于顺序性。目前,有关 FPGA 端部署的方法均采用了传统的设计方法,算法原理方面主要有基于像素扫描^[8-14]和基于游程扫描^[15-19]的方法。基于游程的方法由于每行的游程数不确定,导致游程间关联的循环次数不定,在通过 HLS 进行设计开发时容易导致时延增大,算法稳定性不高;而基于像素扫描的方法通常都会结合等价标记模式,其中多数方法采用了 4 连通规则,虽然更简单但是对于目标分辨率较低的红外图像来说容易出现连通断开的情况,相对 8 连通规则能够更全面地提取连通情况^[19]。因此,本文针对基于像素扫描的 8 连通域,结合等价表方法,通过分析简化连通标记情况,采用 HLS 开发环境完成连通域算法的快速设计输入,并在 Xilinx 开发板 ZCU102 上进行部署测试。

1 连通域算法框架和原理

1.1 算法应用框架

本文提出的连通域快速提取方法是红外遥感图像目标检测算法中的 1 个子模块,该模块的功能是对二值图像提取出所有连通域,通过筛选连通域面积对图像中的目标进行粗筛,完成图像的粗检功

能。对存在疑似目标的图像,粗检模块将发送检测指令给精检模块,采用深度学习神经网络对图像目标进行精确检测。对于不存在疑似目标的图像,则发送指令给精检模块跳过该图像的检测,降低整体功耗和计算量。整体算法的框架图如图 1 所示,其中突出显示的即为本文的连通域算法。

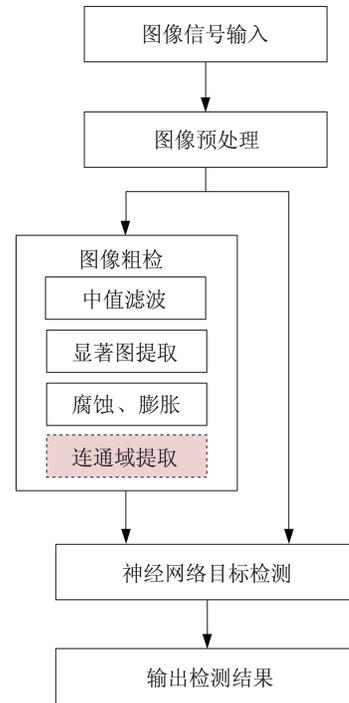


图 1 红外遥感图像目标检测算法框图

Fig.1 Block diagram of the infrared remote sensing image target detection algorithm

载图像原始数据包含各种干扰成分,通常不能直接作为输入图像,经过预处理后消除了部分干扰成为常见的遥感灰度图像。将遥感灰度图像输入粗检模块,经过中值滤波去噪和基于均值滤波的显著图提取方法后生成一张显著图的二值图。再经过腐蚀和膨胀操作去除部分杂点,生成的新二值图作为连通域模块的输入。在模块内完成连通域的标记统计,生成连通域个数和对应的面积,经过对面积筛选,留下满足条件的疑似目标个数。若疑似目标数大于 0,则向神经网络模块输出检测当前图像的指令;若小于 0 则输出跳过指令。

整个粗检模块在移植至硬件的过程中,发现基于 CPU 计算逻辑设计的算法不能满足 FPGA 硬件平台流水线式的处理过程。特别是采用种子填充法^[20]的连通域提取原算法,由于嵌套循环过多且循

环数量不定,不适合部署在硬件端,难以达到利用硬件加速的目的。因此,本文针对FPGA重新设计了一种基于像素扫描的连通域快速提取方法。

1.2 算法开发平台

FPGA以其高度并行化的优点在数字信号处理领域得到了广泛应用。常规的FPGA开发需要使用硬件描述语言如VHDL/Verilog来完成功能模块的设计,但是需要较长的开发时间。HLS开发工具

的出现,使得广大设计人员能够采用更高级的语言(C/C++等)完成设计输入,大大提高了FPGA的开发效率^[21]。

开发人员通过如图2所示的HLS开发流程即可将采用C/C++语言设计的算法实现为RTL级代码。通过用户定义约束文件优化设计的性能与速度,HLS会根据约束文件的要求自动生成相应RTL代码,极大地节省了FPGA的开发时间,使得开发具有高灵活性和高效性。

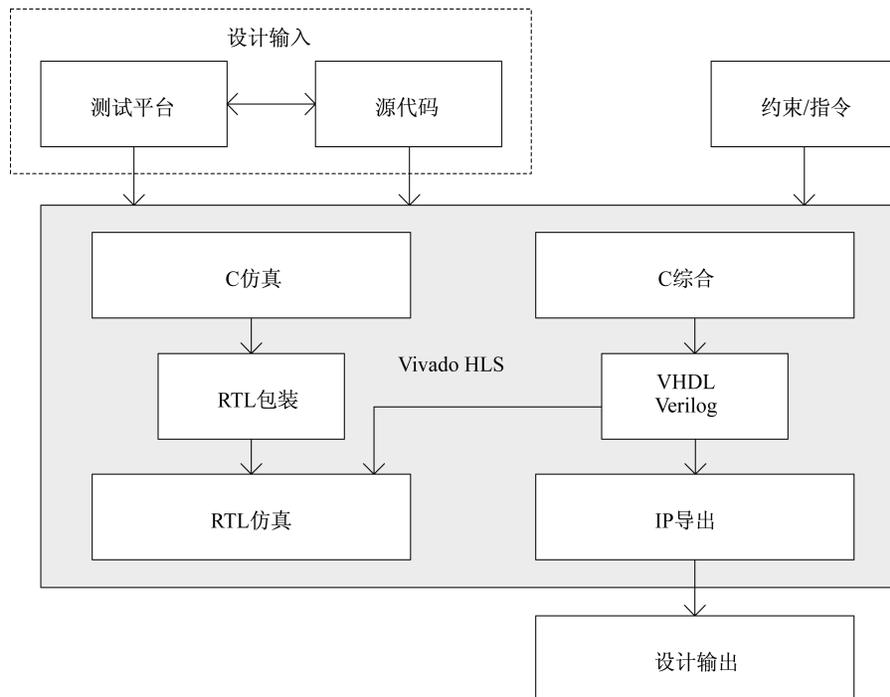


图2 HLS的设计流程

Fig.2 Design process of the HLS

整个粗检模块作为一个独立的知识产权(Intellectual Property, IP)核,与其他IP核共同组成整个检测系统,由于其中涉及多种复杂算法,适合采用更灵活高效的HLS进行开发。各个内部子模块能够更好地配合优化,利用dataflow形成函数级流水,进一步提高整体算法的执行效率。

1.3 算法原理

连通域类型主要包含4连通和8连通,基于不同的需求可以采用不同的连通类型,而本文所用遥感图像分辨率较小,舰船目标又是细长形,其宽度较小,在经过腐蚀膨胀后容易出现对角形式的连通情况如图3所示。

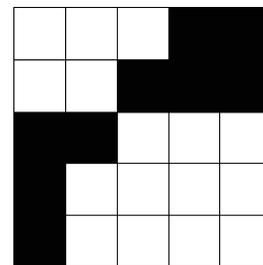


图3 对角式连通情况

Fig.3 Connectivity in diagonal form

8邻域连通的关联范围更为广泛全面,更适用于该种情况。采用逐行扫描像素的方式记录提取连通域信息,如图4所示,连通域提取的流程主要包含像素标记、等价表记录和真连通域统计3个部分。

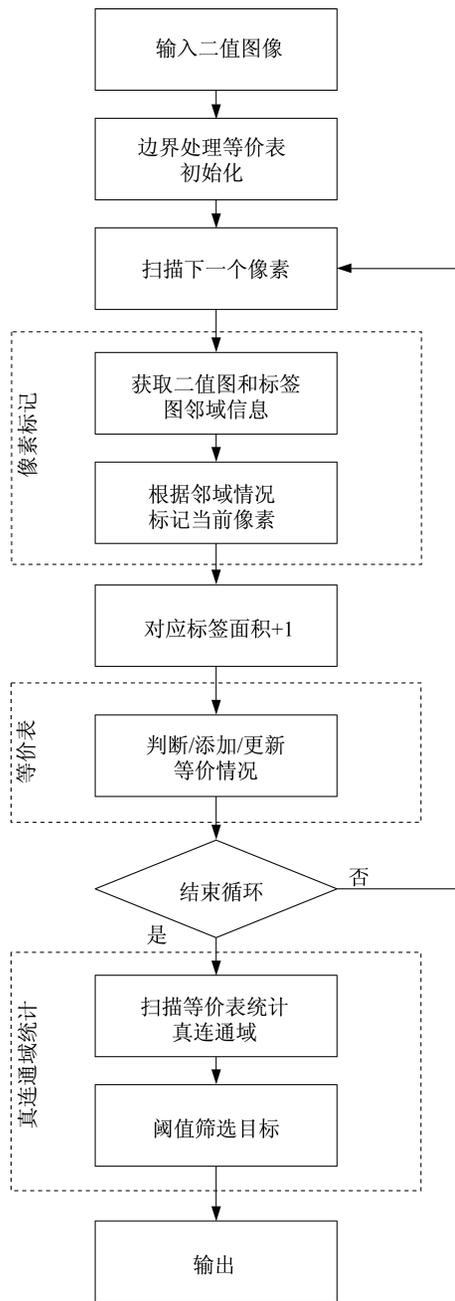


图 4 连通域提取流程

Fig.4 Extraction process of the connected domain

算法接收来自上个模块的二值图像,逐个扫描像素,对每个像素获取二值图和临时标签图中,如图 5(h)所示的 2×3 邻域范围内的像素值 $P_1 \sim P_4$ 和标签值 $L_1 \sim L_4$ 。根据邻域信息,对当前点 X 进行连通域标签标记,同时对对应标签面积记录 +1,对应标签行列最大最小值更新。接着对满足新增等价条件的情况进行等价关系更新。待全部像素扫描完毕后扫描一次等价表统计真实连通域数量、面积和行列范围,经过阈值筛选去掉非目标区域,输出最

终的检测/跳过信号。由于该算法不需要记录最终的标签图像,因此,只需要扫描一遍图像,达到获取连通域信息的同时避免不必要的资源、时间和功耗的浪费。

1) 像素标记部分。对于图像中间的某一点,本文选取了如图 5 所示的 2×3 的窗口,其中需标记点为 X 点,由于是逐像素扫描,因此, X 点的标签值只与其之前的 4 个点有关,即图中的 1、2、3、4。这 4 个点共分 16 种情况,如图 5 所示。

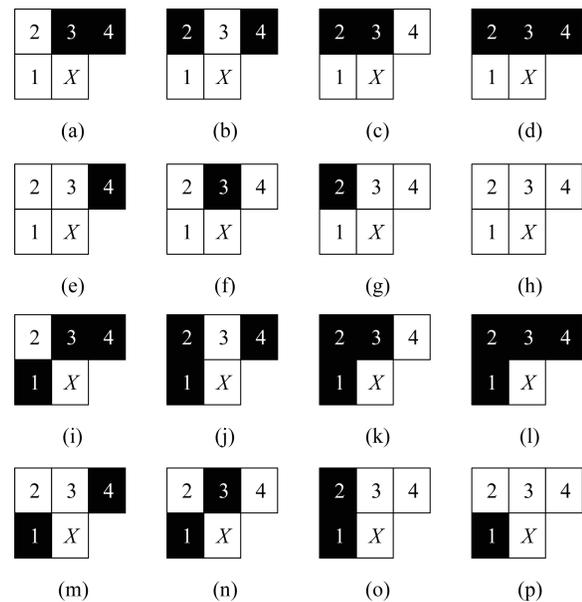


图 5 标记点窗口所有情况(点 X 不为 0 时)

Fig.5 All cases for the mark point window (when point X is not 0)

图 5 列出了 2×3 窗口的所有情况,其中右下角像素不考虑,黑色为像素值为 0 的背景像素,白色为像素值为 1 的前景像素。设定 P 为二值图像素点, L 为其标签值,本文采取的像素标记方法只需满足一个原则即先行后列,对于不为 0 的点 X 来说:

(1) 同行前一像素 $P_1 > 0$ 时,无论上一行的 $P_2 \sim P_4$ 为何值,点 X 的标签都直接与 P_1 相关联(当前行优先);

(2) 当 $P_1 = 0$ 时,再对上一行的 3 个点逐列依次判断,从 P_2 到 P_4 ,将第一个不为 0 的点与点 X 相关联;

(3) 当 P_1, P_2, P_3, P_4 全为 0 时,表示 X 点为一个可能的新连通域的起始,此时为点 X 分配一个新标签值。

在设置点 X 标签的时候,并不采用直接复制标

签值的方法,而是以标签值为索引获取其等价表中关联的连通域标签值,将该值作为标签赋值给点 X 。过程示例如图6所示。这样的好处是当出现多个连通域互联时任意一个新关联的像素点都能直接标记为统一的最小标签号。

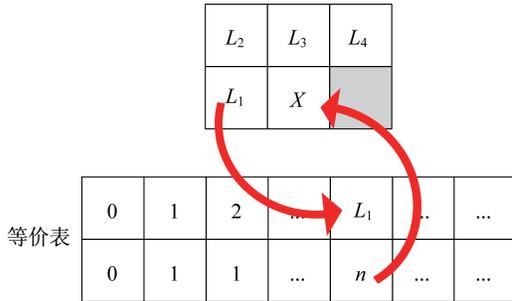


图6 利用等价表的标记过程

Fig.6 Labeling process with the equivalence table

2) 等价表部分。等价表主要用来记录连通域的关联状态,操作主要分为3部分:一是像素扫描时的新增标签号;二是新增等价关系时将相关联的两个标签统一设置为两者中的最小值,这样可以确保多个标签互相关联时都直接对应至其中的最小值,同时扫描像素进行标记时也能够直接赋值该最小值;三是等价表刷新,由于新增等价操作局限于两个标签号,而多标签连通的情况下容易导致等价关系丢失,因此,需要确保等价表中只存在一层映射关系,即等价关系变更后所有相关的等价映射都更新至最小标签号,即使用 $E(L)=E(E(L))$ 遍历一次等价表。

对于新增等价关系的情况,由于 P_1, P_2, P_3 点的等价关系已经由 P_1 完成,因此,当前点 X 只需要考虑与 P_4 点的等价情况。当除 P_4 外没有其他点 >0 时, X 直接与 P_4 关联,无需建立新等价关系;当 $P_3 > 0, P_4 > 0$ 时,无论 P_1 是否为0,都不存在需要新建等价关系的情况,因此,只有当 $P_3 < 0, P_4 > 0$ 且 $P_1 + P_2 > 0$ 时,才需要新建等价关系,3种情况如图7所示。

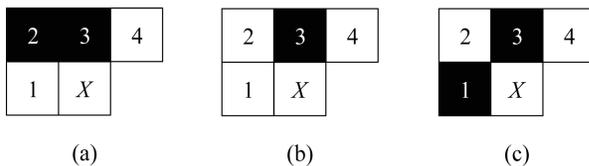


图7 需要新增等价关系的3种情况

Fig.7 Three cases where new equivalence relations are required

3) 真连通域统计部分。将整张图像扫描完成后,需要统计真连通域个数、面积和行列范围,只需要扫描一次等价表,对 $E(L)=L$ 的标签给一个新的真连通域标号 C_1 (以自然数顺序),而 $E(L)=M$ 的情况则将标签 L 累计的面积加至标签 M 对应的真连通域标号 C_m 的面积统计值中。统计完毕后获得真实连通域个数、面积和行列范围,经过阈值筛选后根据目标情况向后续模块输出对应信号。

2 算法部署与测试

2.1 算法部署

本文算法采用 256×256 大小的图像作为输入数据进行设计,算法在HLS开发环境中完成设计输入后,分别进行C仿真、C综合和RTL联合仿真,通过后即可导出IP核。在Vivado中建立工程,添加各种功能IP模块完成布局布线,这一步是完成可编程逻辑(Programmable Logic, PL)端中算法功能和与处理系统(Processing System, PS)端的交互功能设计,确保整个系统能正确运作,该工程最终生成PL端使用的比特流文件。接下来从Vivado中启动软件开发工具包(Software Development Kit, SDK),完成PS端嵌入式控制程序的编写,之后便可以连接开发板将包含PL和PS的整个工程导入开发板进行测试。

2.2 测试结果

本文算法测试所采用的红外遥感例图,如图8(a)所示。经过算法提取出的二值显著图,如图8(b)所示。再经过腐蚀和膨胀去除杂点,即可获得用于提取连通域的二值图,如图8(c)所示。由于本文连通域算法属于整个检测算法中的一部分,测试性能时需要单独将模块独立出来,于是直接采用图8(c)作为输入图像分别测试连通域提取正确性和部署至硬件后的运行效率。连通域提取算法将标记完的图像保存为二进制文件,在Matlab中读取文件数据后得到的连通域标记图,如图8(d)所示,参考标签数值可见算法标记出的连通域正确无误。经过对比与采用种子填充法的PC版原程序得到了一致的结果。

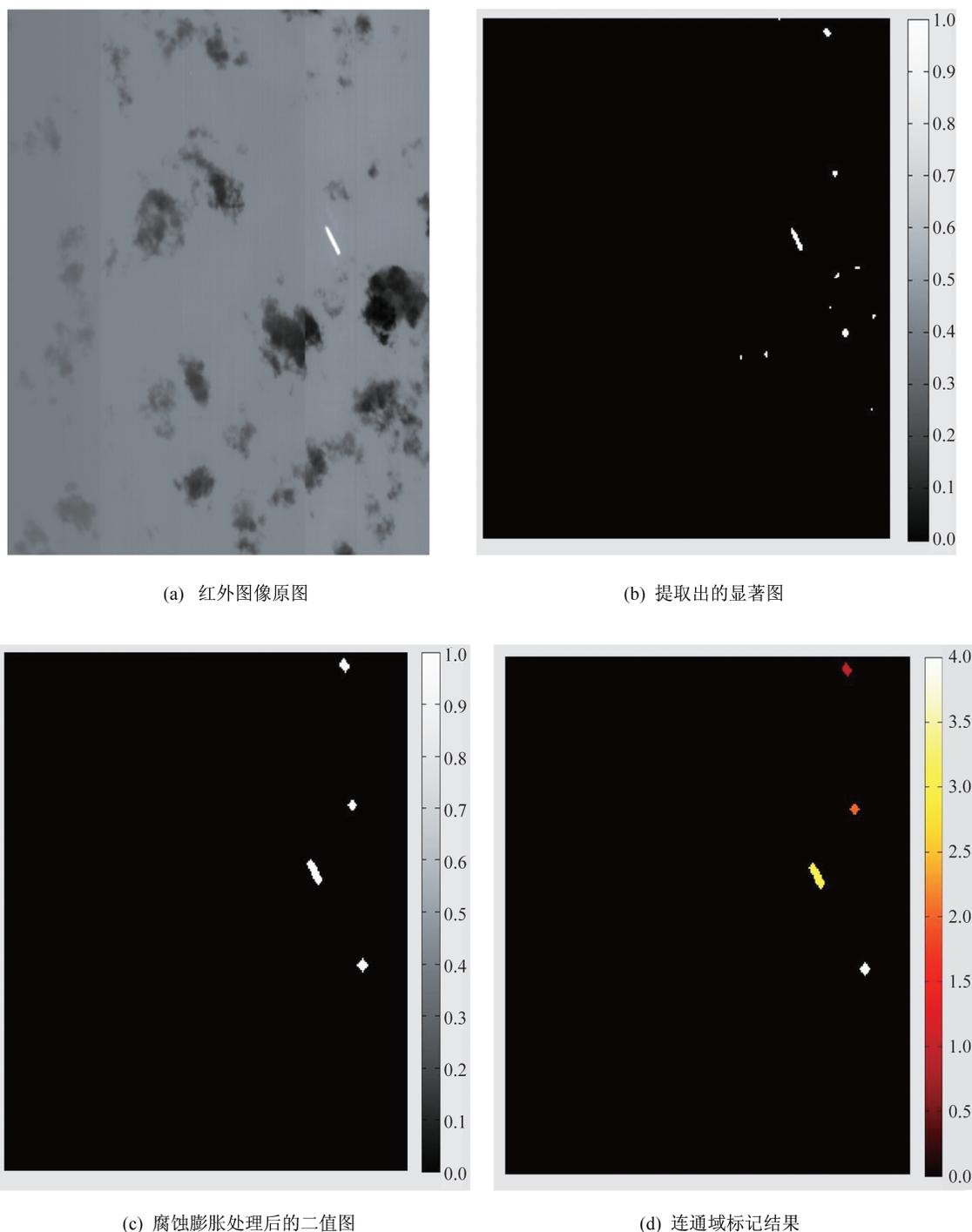


图 8 粗检算法过程

Fig.8 Process of the coarse screening algorithm

将本文的连通域算法在 HLS 开发环境中完成各种“#pragma”优化设置后进行综合,待综合完成后会出具综合报告,内含总时延和资源消耗量。原版 PC 算法种子填充法由于循环条件多变, HLS 无法确定总时延,对其进行适当改写将循环数量固定后,综合报告才给出分析结果,但时延变动范围很

大。通过 RTL 级仿真后将 IP 核导出,在 Vivado 中完成 PL 端设计并生成比特流文件,此处 Vivado 会再次对资源进行优化分配,给出算法最终资源消耗。两种算法的比特流文件通过软件开发工具 SDK 编程至芯片上,针对相同输入进行了运算性能测试。以上对比结果见表 1。

表 1 算法测试结果对比

Tab.1 Results of algorithm testing

对比数据名称		本文算法	种子填充法
HLS时延(时钟周期)	最小时延/cycles	263 190	1 442 070
	最大时延/cycles	263 190	1 284 505 878
HLS资源报告(使用量/总量)	BRAM_18K	36/1 824(1%)	100/1 824(5%)
	DSP48E	0/2 520(0%)	7/2 520(0%)
	FF	3 052/548 160(0%)	6 051/548 160(1%)
	LUT	21 911/274 080(7%)	7 287/274 080(2%)
Vivado实际资源(使用量/总量)	LUT	2 494/274 080(0.91%)	4 328/274 080(1.58%)
	LUTRAM	203/144 000(0.14%)	305/144 000(0.21%)
	FF	2 811/548 160(0.51%)	4 190/548 160(0.76%)
	BRAM	0(0%)	50/912(5.48%)
	DSP	0(0%)	7/2 520(0.28%)
硬件部署实测	时钟频率/MHz	214	214
	图像大小/bit	256×256×8	256×256×8
	运行次数	20 000	10 000
	平均时间/s	25.076	68.895
	帧率/(帧·s ⁻¹)	797.58	145.15

从结果中可以发现:1) 本文算法最大最小时延完全一致,非常稳定,对比算法时延浮动巨大,稳定性差,且最小时延远大于本文算法;2) 本文算法实际资源使用量明显小于对比算法;3) 本文实测运行速率远大于对比算法,效率极高。

种子填充法的总时延很不稳定,会导致实际单次运行的时间波动,在整个粗检模块中是影响运行效率与稳定性的最大隐患,更重要的是粗检模块需要采用流式数据输入来减小缓存的使用量,而种子填充法的处理逻辑存在非连续访问,并不适合流式数据输入的方式。再从资源消耗量上看,本文算法的逻辑资源消耗量在HLS的资源报告中除查找表(Look-Up Table, LUT)资源略高于对比算法外其他均更低,而Vivado实际资源使用量更是均低于对比算法。此外,在开发板实测部分,同样时钟频率和输入下,本文算法达到了797帧/s的速度,约是对比算法的5.5倍,在处理速度方面提升很大,更能满足在大数据量的情况下对计算速度的需求。

3 结束语

连通域提取是红外遥感图像目标粗检模块的重要组成部分,粗检算法所提取的信息经过连通域提取后能够筛去多数假目标,降低精检模块运算压力的同时也能减少系统的功耗。本文所提出的

适合FPGA平台的连通域快速提取方法结合HLS的开发模式,简化了开发流程,提高了算法开发验证的效率,使得软件设计人员也能够进行算法的FPGA硬件端部署实现。本文算法通过只扫描一次二值图像,将面积和等价信息均记录在比图像更小的等价表中,提高了运算速度又节省了大量缓存。通过分析归并标记窗口的所有情况,简化了标记规则和新增等价关系的判别,同时结合等价表刷新方法,将等价表内部保持为仅有一层映射关系,防止多重映射导致的关联信息丢失。本文所采用的连通域提取方法不仅可应用在红外遥感图像的处理中,也适用于大部分FPGA端二值图像连通域的提取。

参考文献

- [1] XIE B, ZHANG Y, FENG S Y, et al. Research of the infrared ship target recognition technology based on the complex background [C]// 2018 IEEE/ACIS 17th International Conference on Computer and Information Science (ICIS). Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 850-854.
- [2] 王文秀. 红外遥感图像舰船目标在线检测关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2019.
- [3] 孙梓超, 谭喜成, 洪泽华, 等. 基于深度卷积神经网络的遥感影像目标检测[J]. 上海航天, 2018, 35(5): 18-24.
- [4] 方青云, 王兆魁. 基于改进YOLOv3网络的遥感目标

- 快速检测方法[J].上海航天,2019,36(5):21-27,34.
- [5] 赵保军,李珍珍,赵博雅,等.基于低复杂度卷积神经网络的星载 SAR 舰船检测[J].北京交通大学学报,2017,41(6):1-7.
- [6] 黄洁,姜志国,张浩鹏,等.基于卷积神经网络的遥感图像舰船目标检测[J].北京航空航天大学学报,2017,43(9):1841-1848.
- [7] 王玺坤,姜宏旭,林珂玉.基于改进型 YOLO 算法的遥感图像舰船检测[J].北京航空航天大学学报,2020,46(6):1184-1191.
- [8] 刘小宇.基于 FPGA 的图像连通域处理的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [9] 汪滴珠,安涛,何培龙.基于 FPGA 的二值图像连通域快速标记[J].现代电子技术,2011,34(8):115-117.
- [10] 谭许彬,谢宜壮,陈禾,等.基于 FPGA 的连通域标记设计与实现[J].信号处理,2011,27(11):1729-1733.
- [11] 赵菲,张路,张志勇,等.基于硬件加速的实时二值图像连通域标记算法[J].电子与信息学报,2011,33(5):1069-1075.
- [12] 谢宜壮,谭许彬,陈禾,等.一种新的连通域标记算法[J].北京理工大学学报,2012,32(12):1273-1278.
- [13] 于潇宇,郭玉波,陈刚,等.基于点目标连通域标记的实时特征提取及其分布式运算[J].光学学报,2015,35(2):104-114.
- [14] 常诚.图像连通域并行标记与特征值统计 IP 设计与验证[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [15] 戴华东,胡谋法,卢焕章,等.基于连通域标记的目标检测算法设计与实现[J].现代电子技术,2015,38(20):71-74.
- [16] 牛连强,彭敏,孙忠礼,等.利用游程集合的标号传播实现快速连通域标记[J].计算机辅助设计与图形学学报,2015,27(1):128-135,156.
- [17] 王凯,施隆照.基于 FPGA 的快速连通区域标记算法的设计与实现[J].计算机工程与应用,2016,52(18):192-198.
- [18] 张国和,徐快,段国栋,等.一种适于硬件实现的快速连通域标记算法[J].西安交通大学学报,2018,52(8):95-101.
- [19] 王凡,周国清,张荣庭,等.面向 FPGA 的连通域快速标记方法[J].计算机工程与应用,2020,56(22):230-235.
- [20] 马江林,赵忠明,孟瑜,等.海量遥感分类图连通域标记方法[J].计算机工程,2008,34(1):262-264.
- [21] 齐乐,张小刚,姚航.基于 HLS 的实时图像去雾实现[J].计算机工程,2016,42(5):224-229.

(上接第 143 页)

- [6] 张宁,赵睿,白郁,等.基于集成学习约束能量最小化的高光谱目标检测算法研究[J].上海航天,2018,35(1):23-29.
- [7] 王琰,刘丽芹,沈霞宏,等.基于空谱融合特征主动学习的高光谱图像分类[J].上海航天,2019,36(5):50-56.
- [8] PAN B, SHI Z W, XU X. Hierarchical guidance filtering-based ensemble classification for hyperspectral images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(7): 4177-4189.
- [9] CHEN Y S, JIANG H L, LI C Y, et al. Deep feature extraction and classification of hyperspectral images based on convolutional neural networks [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 54(10): 6232-6251.
- [10] LI M Y, ZHANG N, PAN B, et al. Hyperspectral image classification based on spectral-spatial cooperative feature and deep forest [C]// 9th International Conference on Image and Graphics. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 325-336.
- [11] HERAS D B, ARGÜELLO F, QUESADABARRI-USO P. Exploring ELM-based spatial-spectral classification of hyperspectral images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(2): 401-423.
- [12] SUN Z Y, CHI M M. Superpixel-based active learning for the classification of hyperspectral images [C]// Workshop on Hyperspectral Image & Signal Processing: Evolution in Remote Sensing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 1-4.
- [13] 赵春晖,姚浙峰.基于局部核 RX 算法的高光谱实时检测[J].红外与毫米波学报,2016,35(6):708-714.
- [14] ZOU Z X, SHI Z W. Hierarchical suppression method for hyperspectral target detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(1): 330-342.
- [15] 张宁,陈嘉杰,伍伟,等.基于增量学习的高光谱图像目标检测[J].上海航天,2019,36(5):44-49.