

超轻量网络的SAR图像舰船目标在轨提取

李宗凌^{1,2}, 汪路元², 蒋帅², 吴雨航², 张庆君²

1. 北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081;

2. 中国空间技术研究院 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

摘要: 为了解决遥感卫星信息获取实效性差, 严重依赖数据传输通信带宽, 难以满足卫星在轨实时提取感兴趣目标需求等问题, 本文设计了一种以全局统计为基础的高效舰船目标检测算法和超轻量化疑似目标真伪鉴别网络, 实现舰船目标快速提取。采用传统图像处理方法快速检测目标, 获取疑似目标切片, 大幅降低数据量, 采用自主设计改进的基于深度学习的超轻量鉴别网络实现疑似目标二次筛查, 进一步提升目标提取精度。在算法模型实时实现过程中, 合理优化算法流程和计算方法, 建立计算精度误差分析模型, 使得算法实时处理的精度、速度、硬件规模以及热耗等方面达到良好平衡。利用GF-3卫星数据对算法进行测试, 试验表明该方法对复杂海洋背景环境、斑点噪声高、信噪比低的SAR遥感图像, 舰船目标提取的准确性提升20%, 达到98%, 计算量降低90%, 实时性提升50%。该方法兼顾了算法的有效性及在轨实时处理的可行性, 可以在当前的星载嵌入式电路中实现并将在某新体制雷达试验卫星上在轨应用, 具有良好的应用前景。

关键词: GF-3卫星, 超轻量网络, SAR图像, 目标检测, 目标鉴别, 在轨实时处理

引用格式: 李宗凌, 汪路元, 蒋帅, 吴雨航, 张庆君. 2021. 超轻量网络的SAR图像舰船目标在轨提取. 遥感学报, 25(3): 765-775

Li Z L, Wang L Y, Jiang S, Wu Y H and Zhang Q J. 2021. On orbit extraction method of ship target in SAR images based on ultra-lightweight network. National Remote Sensing Bulletin, 25 (3) : 765-775 [DOI: 10.11834/jrs.20210160]

1 引言

在大范围的海洋监视中, 较SAR而言, 光学成像的缺点是高分辨率的成像系统观测条带很窄而且受光照和天气影响很大, 并不适合大范围监视, 但对特定的海洋监视区域, 例如港口、海峡等海区是比较适合的。因此SAR成像可以作为光学成像的信息先导(张庆君等, 2017)。在实际的应用中, 用于舰船目标检测的SAR图像一般具有较宽的测绘带, 数据量巨大, 信息提取较困难, 实时性较差。星上在轨SAR实时成像及感兴趣目标提取技术能够有效地解决这一问题(徐一帆等, 2010; 李宗凌等, 2018)。

近年来, 采用高分辨率SAR对地成像技术获取的SAR遥感图像包含有丰富特征, 为舰船等感兴趣目标实时提取奠定了坚实基础(陈文婷等, 2014)。当前, 对基于SAR图像的舰船目标本身的

检测主要有最优恒虚警(CFAR)检测算子(Novak等, 1997)、双参数CFAR方法(房明星等, 2017)、多极化检测算法(宋文青等, 2016)、多分辨率目标检测(周阳等, 2020)、基于卷积神经网络的检测方法(李健伟等, 2018)、基于匹配滤波的检测方法(崔斌等, 2020)、阈值检测法(翟亮等, 2017)、基于模糊对策的检测方法以及基于分割的模拟退火的检测方法等。这些检测方法依赖于具体的海洋环境和SAR图像, 单一参数的SAR图像目标检测器在杂波边缘、方位向模糊、干扰目标杂波环境中检测性能下降, 出现检测率下降或虚警率上升的情况(Cumming和Wong, 2012), 基于深层卷积神经网络的目标检测算法通常难以有效应对大幅影像的目标搜索和弱小目标检测问题(李健伟等, 2019)。遥感卫星载荷数据量大, 峰值传输速率高, 而SAR图像目标提取算法复杂, 对平台的计算能力要求极高, 而星载计

收稿日期: 2020-05-06; 预印本: 2020-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 61472260, 91438102)

第一作者简介: 李宗凌, 1985年生, 男, 高级工程师, 研究方向为遥感图像目标检测识别。E-mail: leezl0519@163.com

通信作者简介: 张庆君, 1969年生, 男, 研究员, 研究方向为航天器系统与总体技术、航天遥感。E-mail: ztzhangqj@163.com

算平台硬件不同于地面或其他平台,具备鲜明的高可靠、高效能、抗辐照、强容/纠错能力等特点(李宗凌等,2020)。因此,星载实时处理性能优劣与算法模型是否优化息息相关。

针对上述情况,本文对面向SAR遥感图像的舰船目标在轨实时提取技术进行了研究,设计了一种以全局统计为基础的高效舰船目标检测算法和超轻量化疑似目标真伪鉴别网络,实现舰船目标快速提取,解决了遥感卫星信息获取实效性差,严重依赖数据传输系统带宽等瓶颈问题。根据当前的星载处理平台架构,对OTSU阈值求取、连通域标注以及卷积神经网络等高密度计算算法模块做了优化,在保证算法整体性能的基础上,有效减少了算法的计算量,大幅降低了算法实时实现对硬件平台性能的依赖,使得该星载实时信息处理模块在计算精度、速度、硬件规模以及热耗等方面达到良好平衡。

2 舰船目标提取算法设计

2.1 算法流程设计

针对SAR遥感图像感兴趣舰船目标稀疏性的特点,提出了一种面向SAR遥感图像的舰船目标在轨实时提取算法。如图1所示,设计一种基于传统图像处理方法实现目标检测以及基于超轻量卷积神经网络实现目标鉴别。首先,采用基于二维模板滤波的图像去噪、顶帽变换的目标增强以及以全局统计为基础的目标分割技术获取疑似目标;然后,采用自主设计的超轻量卷积神经网络对疑似目标做真伪性鉴别,大幅降低虚警,实现对舰船目标的有效提取。卷积神经网络采用自主设计网络结构、网络量化剪枝、权值共享等手段,减少权重参数,提高计算实时性。该方法兼顾了舰船目标提取的有效性、在轨实时处理的可行性以及在轨维护的便捷性,可在当前的星载处理平台上应用。

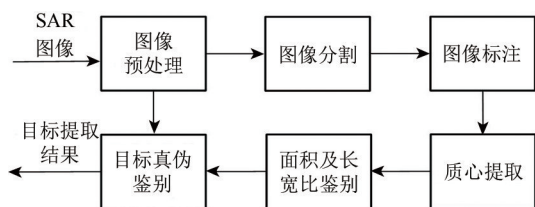


图1 SAR图像目标提取流程

Fig. 1 SAR image target extraction process

2.2 目标检测方法

将图1算法流程进一步细化得到图2的舰船目标检测及鉴别方法。本文设计了一种以统计学理论为基础的目标检测方法MDN。该方法构建多层模板卷积滤波网络,有效抑制相干斑、距离和方位向模糊带来的背景噪声,并实现舰船目标增强,便于对SAR图像进行快速分割和高效提取舰船疑似目标。

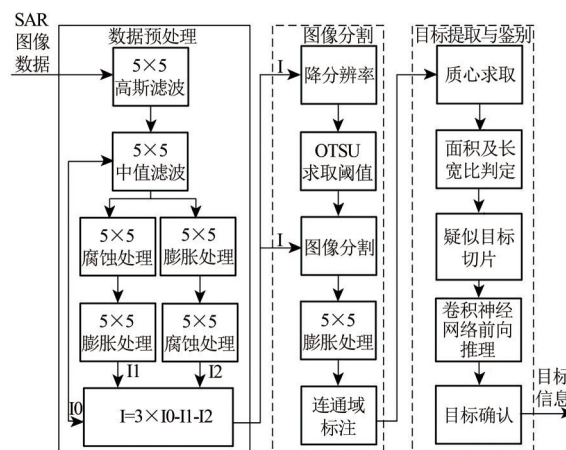


图2 目标检测及鉴别方法

Fig. 2 Target detection and identification method

MDN主要分为3个部分:(1)数据预处理,对原始图像采用高斯滤波、中值滤波去除SAR图像中周期性和随机噪声,采用顶帽变换实现舰船目标增强;(2)图像分割,对预处理完成后的图像进行OTSU自适应迭代分割,得到二值图像后,对其进行形态学膨胀处理以消除目标内部孔洞目标,然后进行连通域标注;(3)疑似目标提取,根据连通域标注结果求取质心,之后进行基于形状特征的目标鉴别,对疑似目标标注结果进行面积及长宽比判定,剔除虚警目标,提取疑似目标切片。

MDN是由二维模板平滑滤波、顶帽变换、基于全局统计的自适应分割、连通域标注等组成的深度计算结构。二维模板滤波处理包括串联层和并联层,串联层层与层之间相互连接实现平滑滤波处理,并联层层内连接主要包括模加减操作实现顶帽变换处理;平滑滤波和顶帽变换处理结果进入自适应分割网络,通过OTSU自适应阈值求取、图像分割、二值图像连通域标注以及面积及长宽比判别等处理输出疑似目标坐标及大小。

MDN 算法实现过程中将膨胀系数、降分辨率系数、目标面积、长宽比等关键阈值实现参数化可配置, 不同图像分辨率通过选取不用参数的方法进行, 因而可以更好的适用于星载处理平台, 特别是在图像预处理后进行了目标分割降维, 有效降低了传统计算过程中 90% 以上的计算和存储量, 极大降低该算法在轨应用对星载硬件资源的需求。

2.3 目标鉴别方法

遥感图像不同于常规高清图像, 具有探测范围广, 数据量大以及分辨率相对较低等特点, 上述特点也造就了其感兴趣目标稀疏性的特点, 对深度学习网络各方面要求较高。传统通用小网络如 MobileNetV2 (Mark 等, 2018) 参数量达到

10 MByte 级别, 受限于小卫星 2 Kbps 级别的遥控上注带宽, 仍然无法适用。经过对比分析以及试验, 综合考虑实现难易、参数量、计算量以及性能等方面内容, 本文根据任务需求通过自主设计基于深度学习的卷积神经网络 YyNet-5 作为本文目标鉴别算法。YyNet-5 是基于 LeCun 在 1998 年提出的 LeNet-5 (LeCun 等, 1998) 基础进行设计更改完成的 (图 3), YyNet-5 共分为 1 个输入层、2 个卷积层, 2 个池化层、1 个全连接层、1 个输出层, 权重参数规模为 5272 个, 采用单精度浮点数据格式进行计算, 参数数据量为 20.6 kByte。输入疑似目标切片大小为 32×32 。综合考虑卫星上注参数规模和智能信息处理模块的计算能力, YyNet-5 设计成只对疑似目标做真假性鉴别, 便于降低鉴别网络的前向推理计算量。

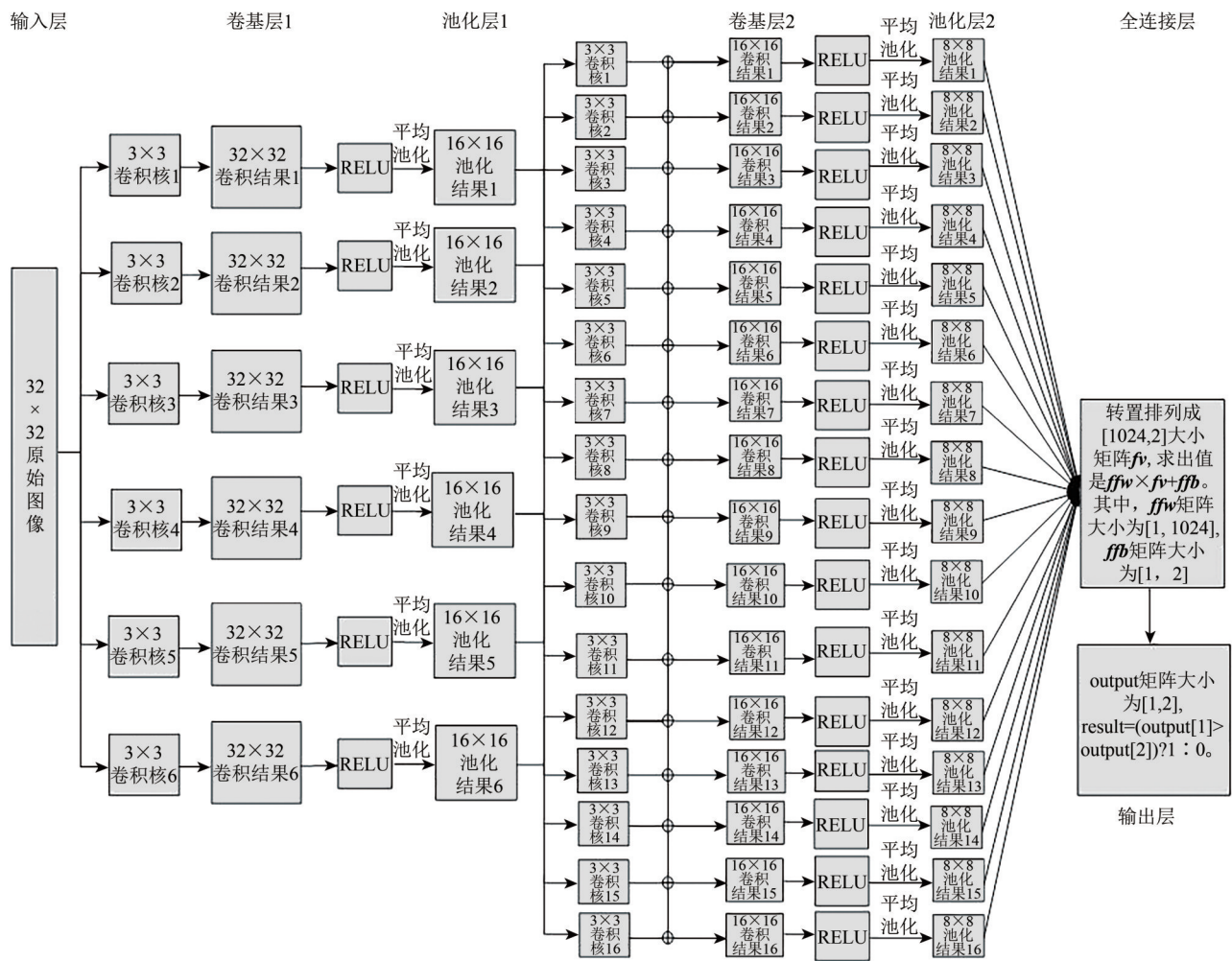


Fig. 3 Yynet-5 target identification network flow chart

本文设计的鉴别器在标准 LeNet-5 模型基础上修改, 根据需要, 可完成疑似目标真假鉴别。将

相应目标切片进行人工标定, 并完成训练, 得到模型参数。样本切片图取自 GF-3 SAR 遥感卫星

图, 切片样本如图4所示。数据集中包含舰船目标切片包含 15220 个, 岛屿、海堤/人工建筑目标等目标切片为 9593 个, 随机选取其中 20400 个样本作为训练集, 约占数据集的 82.21%, 余下 4413 个目标切片作为测试集。网络模型输入切片大小为 32×32 , 若超出可通过降采样的方式保证。

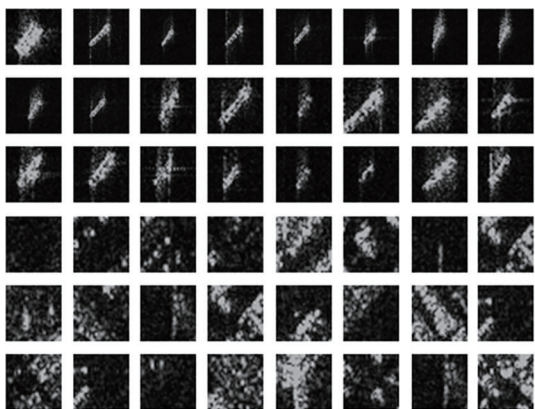


图4 样本库切片图像

Fig. 4 Slice image of sample library

3 算法优化

算法在星上在轨实时实现过程中, 受限于空间辐照环境、能源、体积、热防护等因素, 星载处理平台的硬件资源有限, 因此, 必须对算法进行优化设计, 提升能效比, 才能满足实际在轨实时处理任务需求。本文主要从算法流程中对计算能力要求高的模块进行入手, 优化和简化算法流程, 主要包含图像分割中的阈值求取、二值图像连通域标注以及目标鉴别3个算法模块。

3.1 阈值求取

图像分割就是把图像分成若干个特定的、具有独特性质的区域。它是由图像处理到图像分析的关键步骤。OTSU法因有模式识别的相关理论为基础且图像分割性能良好, 而逐渐成为一种最为流行的阈值分割技术。OTSU图像分割法因其计算量大, 数据动态范围与处理图像大小成正相关, 给通过OTSU法求取阈值的实时实现带来较大挑战。

目前OTSU计算和优化的方法较多, 何志勇等(何志勇等, 2013)提出了一个新算法以快速计算OTSU阈值, 通过搜寻两类类内均值的平均值整数部分相等的阈值, 从中确定一个符合OTSU准则的

阈值, 减少了计算量, 获得了良好的计算实时性能。陈峥等(2012)在对OTSU法进行分析的基础上, 提出了一种改进的OTSU图像阈值分割算法。首先, 采用整幅图像的平均灰度值作为初始阈值对图像进行分割; 然后, 推导出OTSU共4个参数的递推公式; 最后, 在缩小的灰度级范围内用递推的OTSU法来计算最终的分割阈值, 取得了较好的图像分割效果和时间效率。当前实现方法主要存在以下问题: (1) 嵌入式平台实现过程中, 无论单纯采用整型或单/双精度浮点数据格式, 计算精度高时, 计算过程需要占用大量资源, 开销极高, 系统实时性大打折扣。(2) 应用场合没有考虑遥感图像大幅宽, 低分辨率, 感兴趣目标稀疏的特点。因此, 无法直接应用于遥感图像在轨实时处理中。

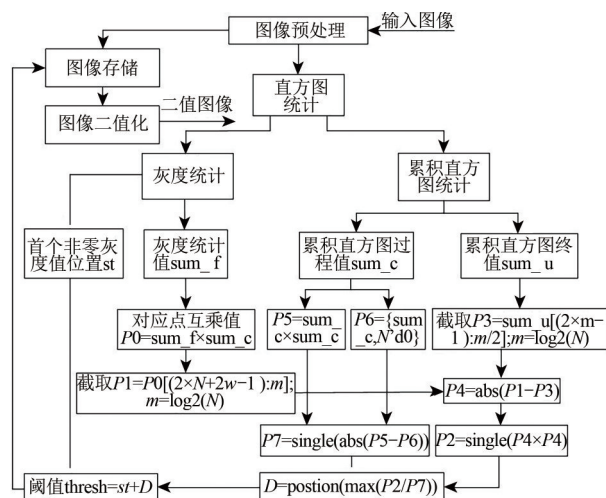


图5 OTSU算法优化实现流程

Fig. 5 OTSU algorithm optimization implementation process

针对以上问题, 本研究提出了一种图像分割算法的可编程逻辑电路实现方法, 解决图像分割算法实时实现高精度时处理速度慢和硬件开销大问题, 同时消除利用FPGA实现时, 处理速度提升和硬件开销降低后, 处理精度低的问题。算法优化实现流程如图5所示, 本研究采用可编程逻辑电路设计了一种并行流水处理架构, 实现了图像分割算法。将阈值求取图像处理成 $N \times N$ 大小的方阵, 便于后续通过移位、截位、与非逻辑运算等手段, 避免大量乘除运算, 大大降低阈值求取算法的计算量, 有效优化处理流程。

与此同时, 本文在实现过程中将算法作了进一步优化, 对原始图像进行降采样处理, 可大幅

减少运算量。通过处理分析 100 幅图像大小为 4096×4096 的量化精度为 8 bit 的 SAR 图像数据, 将本文方法处理得到的阈值结果与原始实现方法采用 Matlab 双精度浮点数据格式的结果进行对比分析: 图 6 为两种方法处理得到的阈值对比图, 图 7 两种方法处理得到的阈值差值图。分析可知, 本文涉及的优化方法在计算量降低 16 倍的情况下, 阈值求取误差可以控制在 5 以为, 对图像分割精度影响可以忽略, 证明方法的有效性。本文通过建立计算精度误差模型, 合理选择处理数据类型, 自主调度定/浮点计算, 在有效降低硬件资源使用的同时, 保障了图像分割算法的实时性和精度。

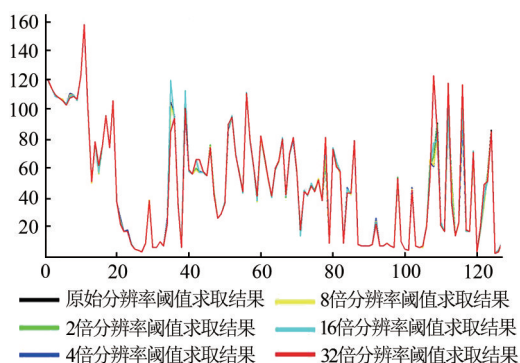


图 6 直接降采样求取阈值图

Fig. 6 Obtaining threshold graph by direct down sampling

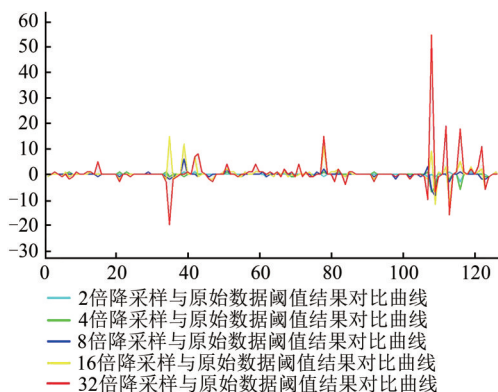


图 7 直接降采样求取阈值差值图

Fig. 7 Direct down sampling to obtain threshold difference

3.2 连通域标注

二值连通域标记是数字图像处理的基本方法, 它是目标分割、目标识别、图像语义理解等应用的重要基础, 是一种经典的计算机视觉处理方法。目前数字图像的二值连通域标记方法主要分为两种 (谢宜壮等, 2012; 张国和等, 2018): 一种是标号传播方法, 如轮廓追迹法、混合对象标记

法; 另一种是标号等价对处理方法, 如优化连通算法、游程优化算法、块决策树算法等。

标号等价对处理方法的主要过程为: 将二值图像输入后, 按照从左到右、从上到下的顺序, 对图像进行逐个像素的扫描, 获取游程的起始、结束位置以及等价对。在对等价对处理过程中, 本文提出了一种深度优先遍历等价对处理方法, 首先, 对等价对进行排序操作, 第 1 行数据 $equivalence_1$ 代表每个等价对第一个元素, 第 2 行数据 $equivalence_2$ 代表每个等价对第二个元素, 用第 2 行数据减去第 1 行数据, 得到每个等价对所对应的跨度 $step$, 为第 3 行数据; 对第 1 行数据 $equivalence_1$ 中相同元素所对应的所有跨度 $step$ 数据进行求取最大值工作, 所得到的最大值, 记为该元素对应的最大搜索阈值, 记录在第 4 行 $threshold$ 数据中。如图 8 所示, 矩阵表示了深度优先遍历所要搜索的范围, 矩阵的元素个数代表了深度优先遍历搜索的次数; 采用最大搜索阈值对等价链表搜索范围重新限定后, 只需对矩阵中灰色背景的元素区域进行搜索, 对稀疏目标分割图像可大大减少搜索次数。

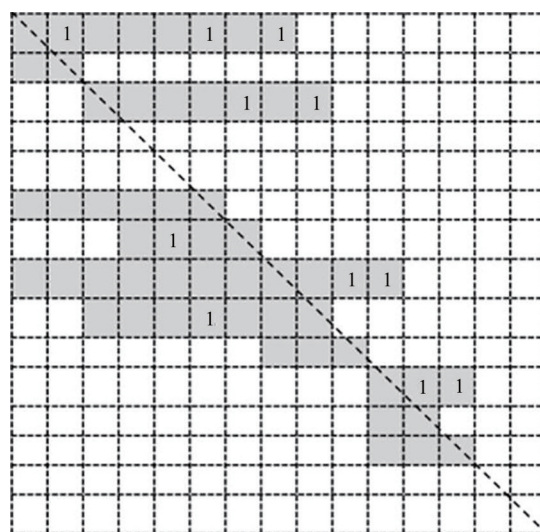


图 8 深度优先遍历示意图

Fig. 8 Schematic diagram of deep first traversal

本文设计了一种基于标号等价对处理方法, 将深度优先遍历方法进行改进, 实现了图像二值连通域快速标记算法, 并应用到 FPGA 等可编程逻辑电路器件中。传统的二值连通域标记算法采用全局深度优先遍历方法, 当图片的幅宽较大时, 会导致算法无效搜索过多, 严重降低了算法的实

时性。本文通过对等价对的排序、搜索阈值的提取和保存等预处理,将深度优先遍历的循环搜索次数优化,摒弃了无效搜索操作,提高了算法的实时性。同时该算法对图像进行全并行流水处理,可以部署在FPGA等可编程逻辑电路器件中,在资源有限的集成器件上快速实现图像二值连通域标记的应用。特别是在图片幅宽较大,目标稀疏时,该算法性能表现优异,比现有技术效率提高近百倍。

由于舰船不同部位对SAR回波信号散射特征不同,会出现强弱不均,导致处理获取的SAR图像会有孔洞、断点等现象(王超等,2014)。如图9所示,二值化后的SAR图像在连通域标注过程中会大幅增加标注时间,影响处理实时性。针对上述问题,通过对SAR图像进行预处理,将SAR图像的孔洞和断点填平,有效提升了连通域的标注效率。本文选用先顶帽变换,然后二值化,最后再做5×5膨胀处理的方式将图像中的孔洞和断点处理,图10为采用本文设计的方法获取的二值化图像,图11为图10的连通域标注结果,孔洞和断点现象明显得到改善,图12为图11的目标检测结果,具体分析如表1所示。本文设计的方法6大幅减少了团、等价对以及连通域的个数,相对方法1计算效率提升超过100倍。6种方法中,方法4的实时性最佳,相对膨胀处理过程中占用存储资源为方法6的 N 倍,其中, N 为原始图像的分辨率,一般为8—14。综上,本文设计的方法在占用硬件资源和处理效率方面做了更好的平衡。

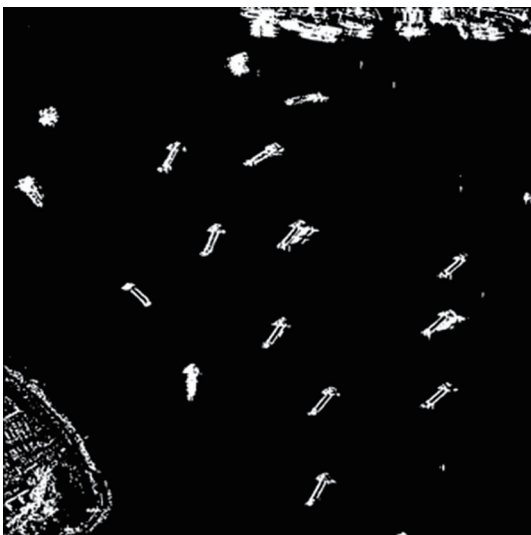


图9 二值图像
Fig. 9 Binary image



图10 预处理后的二值图像
Fig. 10 Image preprocessing

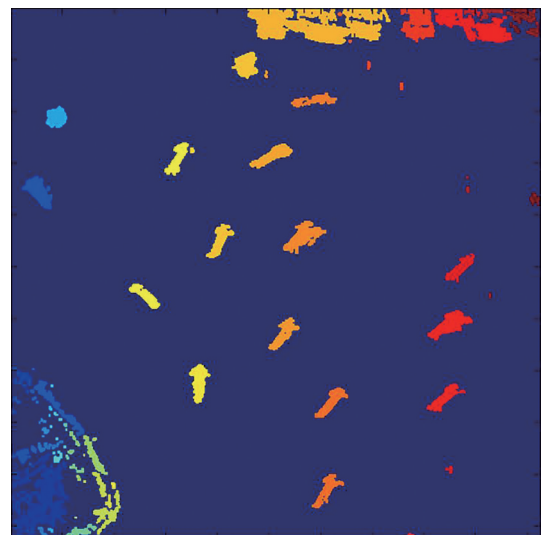


图11 连通域标注结果
Fig. 11 Labeling results

3.3 目标鉴别

目标鉴别算法YyNet-5采用在LeNet-5经典算法模型基础上根据需求进行自主设计的方法完成。YyNet-5主要包含358个卷积核大小为3×3的卷积运算以及2048次乘加法运算,全部运算量为425984次乘加运算,最终输出结果为疑似目标的真假值。

相对于LeNet-5算法模型,本研究通过分析SAR图像舰船目标的特征,将5×5的卷积核更改为3×3,在不影响目标特征提取能力的基础上,将卷积核参数量降低为原来的36%。LeNet-5算法模型可实现0—9共10种数字的识别分类,本研究将该

网络定义为疑似目标真假鉴别网络, 即只需要完成 2 分类, 全连接层的参数量降低为原来的 20%。为了实现模型训练快速收敛, 本研究将 LeNet-5 算法模型中的 sigmoid 激活函数设计成当前主流的 Relu 方式, 大大简化了实现方法。与此同时, 将输入图像数据大小由 28×28 扩展至 32×32, 并将卷积方式由 ‘valid’ 模式更改为主流的 ‘same’ 模式, 输入图像数据目标如果大于 32×32 通过均值降采样的方法约束到输入图像切片大小内。

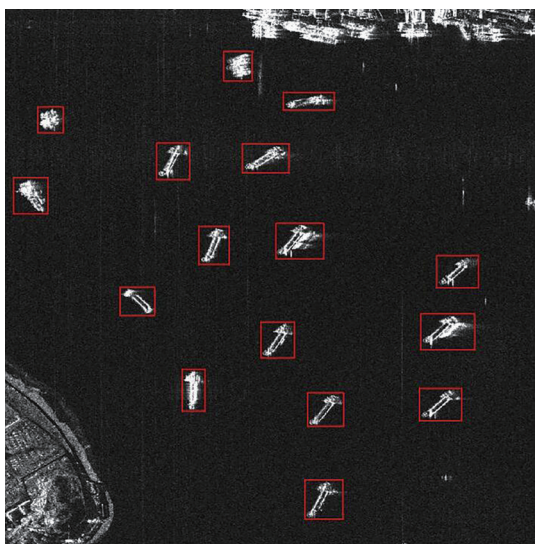


图 12 目标检测结果

Fig. 12 Target detection results

4 实现及性能分析

4.1 在轨实时实现

(1) 实时实现。SAR 图像处理需要强大的处

理能力, 所用处理器性能的好坏直接影响处理性能, 需重点考虑。当前能够在空间环境使用且自身具备抗辐照特性的器件硬件资源和速度均不能满足要求。因此, 本文选用普通工业级高性能器件作为主处理器, 通过系统设计保障模块适应空间特殊工作环境, 实现目标提取功能。考虑系统成本、可靠性以及处理性能等多方面因素, 采用模块关键等级差别设计思想, 将该系统分为控制和处理两大部分, 其中, 控制部分作为关键模块, 采用高可靠、抗辐照宇航级器件; 处理部分作为执行模块, 采用高性能、大容量常规器件, 设计多种重构保障机制, 保证在轨维护能力, 有效降低成本、提升处理性能和可靠性。采用 CPCI 总线标准, 6U 标准板卡结构, 支持多模块协同处理机制。系统的通用性、可靠性及扩展性强。

该智能信息处理模块具有强大的处理能力, 主处理器 DSP 峰值计算能力达到 8000 MIPS, 处理 FPGA 逻辑门数达到 3250 万门。输入图像大小为 32768×32768, 舰船目标提取时间小于 10 s; 可实现在轨全时工作, 整板功耗小于 13 W, 待机功耗小于 1.5 W; 具备主处理器程序和卷积神经网络参数数据重构能力, 程序重构时间小于 5 s, 权重参数重构时间小于 1 s。

(2) 处理结果。如图 13 所示, 在某新体制雷达试验卫星星载信息处理平台上完成了本文设计的 SAR 图像舰船目标实时提取算法的工程实现, 结合 PC 机以及专用测试底板, 形成可演示实时信息处理系统。采用 GF-3 号遥感卫星的 SAR 图像, 验证了目标检测算法的有效性和实时实现的可行性。

表 1 连通域标注分析

Table 1 Annotation analysis of connected domain

方法	1	2	3	4	5	6
参数指标	原始图像直接二值化	顶帽变换后二值化	原始图像 5×5 膨胀处理后二值化	顶帽变换+5×5 膨胀处理后二值化	原始图像直接二值化后再 5×5 膨胀处理	顶帽变换后二值化再 5×5 膨胀处理
团个数	8285	5827	4152	3703	3999	3746
等价对个数	676	254	148	103	154	112
连通域个数	1460	430	115	85	84	64
标注周期	170058338	13331704	2709175	1608248	2815805	1634031
时间 200 MHz	850.3 ms	66.7 ms	13.6 ms	8.04 ms	14.08 ms	8.17 ms

处理结果如图 14 和图 15 所示, 其中, 图 14 为本文设计的基于形态学匹配的目标检测算法处理

得到疑似目标结果, 数量为 42 个, 图 15 为本文设计的基于卷积神经网络的目标真伪鉴别算法处理

结果, 经过二次筛查, 处理结果数量为 34 个。对处理结果进行分析可知, 本文设计的目标提取方法, 可从 SAR 图像中检测出舰船目标, 并对虚警目标进行有效剔除, 效果显著。

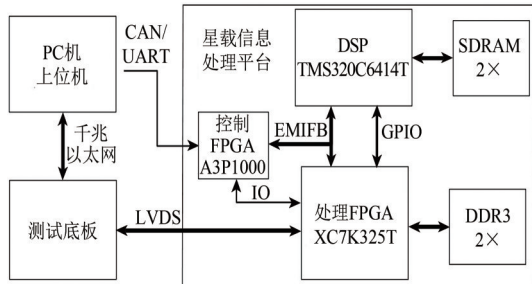


图 13 目标提取算法验证框图

Fig. 13 Verification diagram of target extraction algorithm

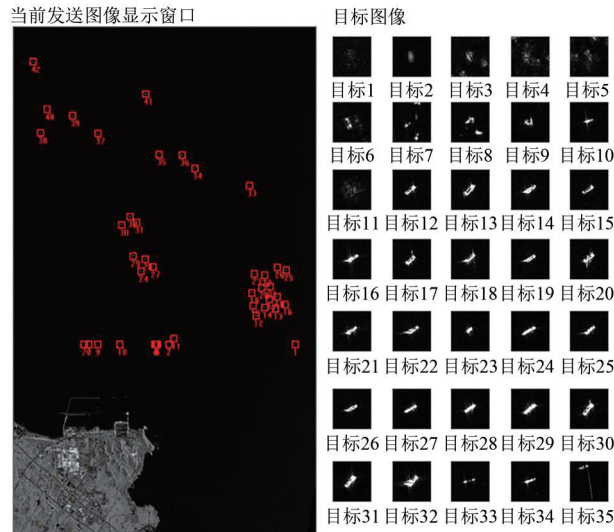


图 14 疑似目标检测结果(红框中心为疑似目标坐标)

Fig. 14 Detection results of suspected targets

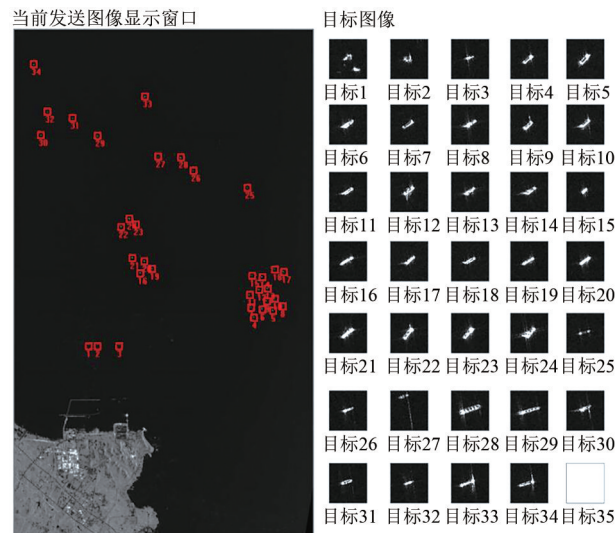


图 15 疑似目标二次筛查结果(红框中心为目标坐标)

Fig. 15 Second screening results of suspected targets

4.2 性能分析

(1) 实时性。系统实时性指标获取方法为: 待处理数据输入完成时为起始时刻, 最后的识别结果输出完成时为结束时刻, 最后统计该段时间内检测出的目标个数进行处理实时性计算。统计 4 景图像的处理时间及检测识别出的目标个数, 最后通过计算 1 s 时间能够检测识别的目标个数衡量系统实时性。

由于检测过程中会对虚警目标进行鉴别, 而每幅图像基于形态学匹配检测的时间不定, 检测到的目标个数也不定, 导致目标鉴别消耗的时间不同, 因此, 不同场景的图像处理时间会有差异。由表 2 可知, 每个目标的提取时间为 9 ms 左右, 该系统目标提取能力为 110 个目标/s, 具有优异的实时性性能。

表 2 系统处理实时性测试结果

Table 2 The real-time results of the system processes

序号	目标个数	总时间/ms	单个目标时间/ms	平均 1 s 提取目标个数
1	119	1079.21	9.07	110.3
2	98	899.62	9.18	108.93
3	67	493.79	7.37	135.69
4	52	502.91	9.67	103.40
总计	336	2975.53	8.86	114.57

(2) 正确率。为了验证算法的检测性能, 毕福坤等 (毕福坤等, 2011) 在文中提出的两个评价指标对算法进行定量评价: 1) 查全率 (Recall): 衡量检测的完整程度, 如式 (1) 所示; 2) 查准率 (Precision): 衡量准确查找任务目标的能力, 如式 (2) 所示。

$$\text{Recall} = \frac{N_{\text{dt}}}{N_{\text{num}}} \quad (1)$$

$$\text{Precision} = \frac{N_{\text{dt}}}{N_{\text{dt}} + N_{\text{df}}} \quad (2)$$

式中, N_{dt} 为检出的正确舰船数; N_{df} 为检出的虚警数目; N_{num} 为人工确认的舰船数。

根据上述评价指标对 3 组测试库中的检测结果进行记录和指标计算, 结果如表 3—表 4 所示。

由表 3 可以看到, 基于传统图像处理方法的疑似目标检测算法在测试过程中查准率均未超过 80%, 虚警率较高; 舰船目标的查全率较高, 超过 95%, 证明当前的舰船目标检测方法漏检率指标优异; 由表 4 结果可见, 基于超轻量目标鉴别网络可

以显著提升目标提取结果的查准率, 平均提升 20% 以上; 此外, 由于基于超轻量网络的目标鉴别网络在对目标做二次筛查时会有误检, 造成查全率会降低 2% 左右。上述结果表明: 本文设计的算法效果良好, 牺牲少量准确率指标, 可大幅降低虚警, 适用 SAR 图像舰船目标提取。

表 3 舰船疑似目标检测性能测试结果

Table 3 Ship suspected target detection performance test results

序号	人工标记 目表 N_{num}	本文方法 鉴别结果 $N_{dt}+N_{df}$	正确 结果 N_{dt}	虚警 目标 N_{df}	查全率 Recall/%	查准率 Precision/%
1	207	276	205	71	99.03	74.27
2	129	174	128	46	99.22	73.56
3	365	465	361	104	98.90	77.63

表 4 舰船目标二次筛查性能测试结果

Table 4 Performance test results of ship target secondary screening

序号	人工标记 目表 N_{num}	本文方法 鉴别结果 $N_{dt}+N_{df}$	正确 结果 N_{dt}	虚警 目标 N_{df}	查全率 Recall/%	查准率 Precision/%
1	207	205	201	4	97.10	98.04
2	129	128	126	2	97.67	98.43
3	365	361	354	7	96.98	98.06

5 结 论

本文对基于全局统计的舰船目标检测和超轻量化网络的目标鉴别算法以及算法在星载硬件平台实时实现等高速信息处理技术进行了较为全面的研究, 并根据星载智能信息处理模块有限的计算资源, 合理优化算法流程和处理方法, 对 OTSU 阈值求取、连通域标注等传统图像处理方法的实时实现做了大量简化工作, 根据 SAR 遥感图像感兴趣目标稀疏性的特点自主设计改进的超轻量疑似目标真伪鉴别网络模型, 在当前低功耗的星载嵌入式电路中实现, 整个计算电路功耗小于 13 W, 待机功耗小于 1.5 W, 可满足在轨全时工作的需求。

在地面利用 GF-3 遥感卫星数据验证了本文设计方法和在轨实时实现的有效性和可行性。试验表明, 本文设计的 SAR 图像舰船目标在轨实时提取方法对输入量化精度为 8 bit 幅宽为 32768×32768 的图像, 舰船目标提取时间小于 10 s; 具备主处理器程序和卷积神经网络参数数据重构能力, 程序

重构时间小于 5 s, 权重参数重构时间小于 1 s; 可有效提升系统能效比和目标提取性能, 具有良好的应用效果。取得上述成果的同时, 也存在不足: 本文设计的目标鉴别网络较简单, 无法满足多种目标精细分类的需求, 后续可通过研究改进多分类网络实现。

参考文献 (References)

- Bi F K, Gao L N, Long T and Yang J. 2011. Remote sensing target detection based on visual saliency guidance and classifier fusion. *Infrared and Laser Engineering*, 40(10): 2058-2064 (毕福坤, 高立宁, 龙腾, 杨健. 2011. 结合视觉显著性引导与分类器融合的遥感目标检测. *红外与激光工程*, 40(10): 2058-2064) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2011.10.045]
- Chen W T, Xing X W and Ji K F. 2012. A survey of ship target recognition in SAR images. *Modern Radar*, 34(11): 53-58 (陈文婷, 邢相薇, 计科峰. 2012. SAR 图像舰船目标识别综述. *现代雷达*, 34(11): 53-58) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-7859.2012.11.013]
- Chen Z, Shi Y P and Ji S P. 2012. Improved image threshold segmentation algorithm based on OTSU method. *Laser and Infrared*, 42(5): 584-588 (陈峥, 石勇鹏, 吉书鹏. 2012. 一种改进的 Otsu 图像阈值分割算法. *激光与红外*, 42(5): 584-588) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.05.023]
- Cumming I G and Wong F H. 2012. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*. Hong W and Hu D H, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry: 1-13 (Cumming I G, Wong F H. 2012. 合成孔径雷达成像: 算法与实现. 洪文, 胡东辉, 译. 北京: 电子工业出版社: 1-13)
- Cui B, Zhang Y H, Yan L and Wei J J. 2020. Dual-thresholds change detection in GF-3 SAR images. *Journal of Remote Sensing*, 24(1): 1-10 (崔斌, 张永红, 闫利, 魏钜杰. 2020. 高分三号 SAR 影像双阈值变化检测. *遥感学报*, 24(1): 1-10) [DOI: 10.11834/jrs.20208179]
- Fang M X, Bi D P, Shen A G and Liu Q. 2017. Jamming technique of multiple false targets against CFAR detection in SAR images. *Journal of Electronics and Information Technology*, 39(4): 973-980 (房明星, 毕大平, 沈爱国, 刘乾. 2017. 对 SAR 图像恒虚警检测的多假目标干扰研究. *电子与信息学报*, 39(4): 973-980) [DOI: 10.11999/JEIT160633]
- He Z Y, Sun L N and Chen L G. 2013. Fast computation of threshold based on Otsu criterion. *Acta Electronica Sinica*, 41(2): 267-272 (何志勇, 孙立宁, 陈立国. 2013. Otsu 准则下分割阈值的快速计算. *电子学报*, 41(2): 267-272) [DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.02.010]
- LeCun Y, Bottou L, Bengio Y and Haffner P. 1998. Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11): 2278-2324 [DOI: 10.1109/5.726791]

- Li J W, Qu C W, Peng S J and Deng B. 2018. Ship detection in SAR images based on convolutional neural network. *Systems Engineering and Electronics*, 40(9): 1953-1959 (李健伟, 曲长文, 彭书娟, 邓兵. 2018. 基于卷积神经网络的SAR图像舰船目标检测. *系统工程与电子技术*, 40(9): 1953-1959) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2018.09.09]
- Li J W, Qu C W, Peng S J and Jiang Y. 2019. Ship detection in SAR images based on generative adversarial network and online hard examples mining. *Journal of Electronics and Information Technology*, 41(1): 143-149 (李健伟, 曲长文, 彭书娟, 江源. 2019. 基于生成对抗网络和线上难例挖掘的SAR图像舰船目标检测. *电子与信息学报*, 41(1): 143-149) [DOI: 10.11999/JEIT180050]
- Li Z L, Wang L Y, Yu J Y, Cheng B W and Hao L. 2020. Remote sensing ship target detection and recognition method. *Remote Sensing Information*, 35(1): 64-72 (李宗凌, 汪路元, 禹霁阳, 程博文, 郝梁. 2020. 遥感舰船目标检测识别方法. *遥感信息*, 35(1): 64-72) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2020.01.008]
- Li Z L, Wang L Y, Yu J Y, Hao L and Cheng B W. 2018. Space-borne SAR on-orbit imaging and ship target detection method. *Spacecraft Engineering*, 27(6): 41-47 (李宗凌, 汪路元, 禹霁阳, 郝梁, 程博文. 2018. 星载SAR在轨成像及舰船目标检测方法. *航天器工程*, 27(6): 41-47) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2018.06.006]
- Mark S, Andrew H, Zhu M L, Andrey Z and Chen L C. 2018. Mobile-NetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks, *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Proceedings, 4510-4520 [DOI:10.1109/CVPR.2018.00474]
- Novak L M, Owirka G J, Brower W S and Weaver A L. 1997. The automatic target-recognition system in SAIP. *The Lincoln Laboratory Journal*, 10(2): 187-202
- Song W Q, Wang Y H and Liu H W. 2016. An automatic block-to-block censoring target detector for high resolution SAR image. *Journal of Electronics and Information Technology*, 38(5): 1017-1025 (宋文青, 王英华, 刘宏伟. 2016. 高分辨SAR图像自动区域筛选目标检测算法. *电子与信息学报*, 38(5): 1017-1025) [DOI: 10.11999/JEIT150808]
- Wang C, Zhang H, Wu F and Zhang B. 2013. Ship Target Detection and Classification in High Resolution SAR Images. Beijing: Science Press: 14-15 (王超, 张红, 吴樊, 张波. 2013. 高分辨率SAR图像船舶目标检测与分类. 北京: 科学出版社: 14-15)
- Xie Y Z, Tan X B and Chen H. 2012. A new algorithm for connected components labeling. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 32(12): 1273-1278 (谢宜壮, 谭许彬, 陈禾. 2012. 一种新的连通域标记算法. *北京理工大学学报*, 32(12): 1273-1278) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2012.12.013]
- Xu Y F, Tan Y J, He R J and Li J F. 2010. System analysis and research overview of space-based maritime surveillance. *Journal of Astronautics*, 31(3): 628-640 (徐一帆, 谭跃进, 贺仁杰, 李菊芳. 2010. 天基海洋目标监视的系统分析及相关研究综述. *宇航学报*, 31(3): 628-640) [DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.03.002]
- Zhai L, Li Y and Su Y. 2017. A method for ship detection in SAR images based on anomaly detection and two-layer censoring mechanism. *Computer Engineering*, 43(4): 244-250 (翟亮, 李禹, 粟毅. 2017. 基于异常检测与双层筛选机制的SAR图像舰船检测方法. *计算机工程*, 43(4): 244-250) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.04.042]
- Zhou Y, Shen A L and Bi D P. 2020. A fast detection algorithm of vibration targets for Dual-Channel SAR. *Journal of Remote Sensing*, 24(9): 1143-1156 (周阳, 沈爱国, 毕大平. 2020. 双通道SAR振动目标快速检测. *遥感学报*, 24(9): 1143-1156) [DOI: 10.11834/jrs.20209004]
- Zhang G H, Xu K, Duan G D, Zhao C and Liang F. 2018. A fast labeling algorithm of connected components applicable for hardware implementation. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 52(8): 95-101 (张国和, 徐快, 段国栋, 赵晨, 梁峰. 2018. 一种适于硬件实现的快速连通域标记算法. *西安交通大学学报*, 52(8): 95-101) [DOI: 10.7652/xjtub201808015]
- Zhang Q J, Han X L and Liu J. 2017. Technology progress and development trend of spaceborne synthetic aperture radar remote sensing. *Spacecraft Engineering*, 26(6): 1-8 (张庆君, 韩晓磊, 刘杰. 2017. 星载合成孔径雷达遥感技术进展及发展趋势. *航天器工程*, 26(6): 1-8) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2017.06.001]

On orbit extraction method of ship target in SAR images based on ultra-lightweight network

LI Zongling^{1,2}, WANG Luyuan², JIANG Shuai², WU Yuhang², ZHANG Qingjun²

1. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Abstract: The low efficiency of orbit data processing and poor effectiveness of remote sensing satellite information acquisition are problems requiring great attention. Meeting the requirements of satellites in orbit in real time and efficient extraction of the targets of interest

are challenging endeavors because of their heavy dependence on data transmission and communication bandwidth.

In this paper, an efficient ship target detection algorithm based on global statistics and an ultra-lightweight suspected target identification network is designed to achieve the rapid extraction of ship targets. The traditional image processing method is used to detect the target quickly, obtain the suspected target slice, and reduce the amount of data significantly. A self-designed and improved ultra-lightweight identification network based on deep learning is then used to realize a second cycle of suspected target screening and improve the accuracy of target extraction. Much work has been done to simplify the real-time implementation of image-processing methods, such as OTSU threshold calculation, connected domain labeling, and target identification network based on deep learning. The real-time processing accuracy, speed, hardware scale, and heat consumption of the proposed method are well balanced by reasonable optimization of the algorithm flow and calculation method and establishment of an appropriate error analysis model. The calculation cost of the algorithm is low, and the dependence of the real-time implementation of the algorithm on the performance of the hardware platform is reduced greatly, thereby ensuring the excellent overall performance of the algorithm. In particular, network pruning, weight parameter sharing, and quantization are used to reduce the network weight parameter and forward reasoning calculation storage requirements, thus improving the design of the target identification network.

GF-3 satellite data were used to test the algorithm, and experimental results showed that the accuracy of ship target extraction could be improved by 20%—98%, the computational complexity could be reduced by 90%, and the real-time performance could be improved by 50%. When the ship target extraction algorithm model was implemented in a low-power embedded circuit, the power consumption of the whole calculation circuit was less than 13 W, and the standby power consumption was less than 1.5 W; these values meet the requirements of full-time operations in orbit.

The proposed method takes into account the effectiveness of the algorithm and feasibility of in-orbit real-time processing to improve the energy efficiency ratio and target extraction performance of the system effectively. The proposed algorithm was implemented in the current satellite embedded circuit and the orbit of a new radar test satellite, and the results obtained reflect good application prospects.

Key words: ultra-lightweight network, SAR image, target detection, target identify, real time processing on orbit

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61472260, 91438102)