

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209358

# 基于 FPGA 并行计算的多阈值分级海陆分割方法

于希明<sup>1</sup>, 彭宇<sup>1</sup>, 姚博文<sup>1</sup>, 刘梓豪<sup>2</sup>, 刘连胜<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学测控工程系 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨诺信工大测控技术有限公司 哈尔滨 150028)

**摘要:**由于微纳卫星在体积、重量以及功耗等方面的限制,星载宽幅遥感图像海陆分割需要现场可编程门阵列(FPGA)提供高效计算能力。在保证分割精度前提下,利用FPGA有限片上资源实现低复杂度算法的并行计算是关键。因此,本文提出一种基于FPGA并行计算的多阈值分级海陆分割方法。该方法以OTSU法为核心,利用基于多特征联合阈值的子图分类构成分级海陆分割,以抑制海面中干扰点的影响。此外,设计新颖的并行迭代计算结构,在提升OTSU计算效率的同时实现对片上缓存占用的平衡性调整。实验结果表明,本文方法可达到98%以上的整体检测精度。同时,对于一幅8192×2048 pixels的遥感图像,本文方法处理时间仅为0.16 s,较其它基于FPGA的方法的处理时间至少减少了23.81%。

**关键词:** 海陆分割;宽幅遥感图像;FPGA;OTSU;并行计算

**中图分类号:** TP183 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Multi-threshold hierarchical sea-land segmentation based on FPGA parallel computing

Yu Ximing<sup>1</sup>, Peng Yu<sup>1</sup>, Yao Bowen<sup>1</sup>, Liu Zihao<sup>2</sup>, Liu Liansheng<sup>1</sup>

(1. Department of Test and Control Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. Harbin Nosean Test and Control Technology Co., LTD, Harbin 150028, China)

**Abstract:** Due to the limitations of the size, weight and power of micro-nano satellites, the field programmable gate array (FPGA) is required to provide high energy efficiency computing ability for the onboard sea-land segmentation of large filed remote sensing images. Under the premise of ensuring the segmentation accuracy, the key is to utilize the limited on-chip resources of FPGA to realize parallel computing for low computational complexity algorithms. Therefore, a multi-threshold hierarchical sea-land segmentation based on FPGA parallel computing is proposed in this article. The proposed method takes OTSU as the core method, and uses the sub-image classification based on multi-feature joint threshold to construct hierarchical sea-land segmentation. In this way, the influence of interference points in the sea are suppressed. In addition, a novel parallel iterative computing architecture is designed, which can improve the computing efficiency of OTSU, and achieve the balance adjustment of on-chip memory occupancy. Experimental results show that the overall precision of the method proposed can achieve more than 98%. Meanwhile, the processing time of the proposed method is only 0.16 s for the 8192×2048 pixels remote sensing image. Compared with other FPGA-based methods, the processing time is reduced by 23.81% at least.

**Keywords:** sea-land segmentation; large filed remote sensing image; FPGA; OTSU; parallel computing

## 0 引言

由于研发周期和成本等条件的约束,利用小型化、紧凑化及低成本的微纳卫星执行对地观测任务成为遥感技术发展的研究热点。随着星载光学成像仪的发展,对地

观测成像幅宽增长迅速<sup>[1]</sup>。由于覆盖区域广,反映目标细节清晰,宽幅遥感图像被广泛应用在船舶目标检测中。然而,在记录船舶位置信息的同时,遥感图像也记录了陆地、云等噪声区域,导致数据冗余且降低了检测精度<sup>[2]</sup>。为实时剔除图像中冗余的噪声像素,减少下传地面站的数据量,在微纳卫星上进行星载海陆分割成为提升船舶

检测效率的重要途径<sup>[3]</sup>。然而,微纳卫星在体积、重量与功耗等方面的限制,急需高性能计算处理器在单芯片内为遥感图像传输、处理等步骤提供一体化的处理能力,以减少不同处理器间数据传输造成的延时,降低处理器系统对星载计算载荷板卡空间的占用,并实现低功耗且高性能的海陆分割。

随着星载智能遥感图像处理需求的发展,现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)和图形处理器(graphics processing unit, GPU)成为星载高性能计算处理器的首选。与GPU需结合其它处理器对通信接口任务进行处理不同,FPGA具备在单芯片内集成通信接口、海陆分割算法等多种任务的能力。此外,GPU通常在较高工作时钟频率下,针对高位宽浮点数与整数矩阵运算,通过大批量图像占用全部张量核心获取高计算性能<sup>[4-5]</sup>。然而,在空间尺寸及通信接口限制下,星载图像面临低位宽定点数的单张图像高效处理问题。利用FPGA可在较低工作时钟频率下为单张遥感图像的处理构建高并行计算结构,更加适合微纳卫星资源限制下图像处理要求。当前出现了越来越多的基于FPGA的高效星载图像处理的研究工作<sup>[6-9]</sup>。

虽然通过FPGA提供并行计算能力可实现算法的高效处理,但由于其片上资源有限,对部署在其上的海陆分割算法提出更严格的限制。在处理过程中,原始数据需读入到FPGA中计算结构中进行处理,占用了大量片上缓存资源,因此需要尽量减少海陆分割算法参数和中间结果的数据量。此外,并行计算结构的设计需要消耗额外的片上缓存,进一步压缩了算法本身的存储空间。当算法复杂度和参数量过大时,不仅会对片上缓存造成巨大的压力,还会导致额外片外存储器访存操作,降低处理效率。因此,利用FPGA实现在轨海陆分割需要低存储需求算法的支持。

随着任务场景复杂度增大,海陆分割方法从传统采用海岸线数据库等先验信息进行处理的方法<sup>[10]</sup>逐渐过渡到基于计算机视觉的方法。当前海陆分割方法大多数主要面向地面的应用,重点研究对复杂场景实现高精度分割,其中最典型的代表为基于深度学习的方法。此类方法通过在大量数据上进行训练学习,利用多个卷积层提取深度语义特征,可实现较高分割精度以及较强泛化能力,因此在海陆分割中得到广泛的应用<sup>[11-13]</sup>。但是其参数量庞大,计算过程复杂,逐卷积层提取特征过程产生大量中间特征图结果,难以利用有限的FPGA片上缓存部署并发挥并行计算的能力。

与地面应用的海陆分割方法相比,面向在轨应用的海陆分割的研究主要采用基于阈值与边缘等复杂度较低的方法<sup>[14-15]</sup>。此类研究在保证海陆分割精度的基础上,着重关注算法对遥感图像处理效率。由于计算过程简

单,可灵活自适应的调整分割阈值,最大类间方差法,也称为OTSU法<sup>[16]</sup>,被广泛应用于海陆分割中。该方法计算量少,且算法本身无额外参数要求,计算中间结果的数据量远小于输入图像数据量,因此其存储需求低,适合在轨应用。当前,OTSU法常作为船舶检测前端分割处理或海陆分割中的重要步骤<sup>[17-19]</sup>,因此在保证精度下,通过FPGA对OTSU法并行加速计算是实现在轨高效海陆分割的关键。

然而,在FPGA片上缓存条件限制下,利用OTSU法进行高精度海陆分割的同时构建高效并行计算结构,仍是有待解决的问题。由于宽幅遥感图像数据量超出FPGA片上缓存限制,往往需要对其进行子图切片再进行处理。切片的子图缺失了完整图像灰度统计信息,导致OTSU法受到子图海面中存在的高灰度值的云、海杂波以及具有与陆地相似灰度特点的船舶等干扰点影响,降低了分割精度。此外,OTSU法常采用串行逐像素统计的方式获取灰度直方图,计算效率低。当前虽有研究者针对FPGA实现OTSU法并行计算开展研究<sup>[20-21]</sup>,但主要关注算法并行策略,在FPGA片上缓存限制下,设计资源占用与并行度可平衡调整的计算结构,以充分发挥并行计算的优势仍需进一步研究。

基于以上问题,本文提出一种基于FPGA并行计算加速的多阈值分级海陆分割方法,实现宽幅遥感图像高精度海陆分割的加速计算处理。该方法以OTSU法为核心,针对其在完整遥感图像切片处理时受海面干扰点影响精度降低的问题,构建多阈值分级海陆分割策略,以提高海陆分割精度。同时,设计一种根据片上缓存资源并行性可调的并行迭代计算结构,对OTSU法进行充分的并行计算优化以提高处理速度。

## 1 多阈值分级海陆分割

### 1.1 海陆分割框架

随着宽幅遥感图像的数据量激增,在分割海陆的过程中对有限的处理器存储资源产生巨大的挑战。对完整宽幅遥感图像切片为子图后再进行处理,是解决遥感图像数据存储需求与处理器片上有限存储资源间严重失衡的有效途径。在此基础上,本文提出多级阈值海陆分割处理,抑制子图海面中存在的干扰点对分割阈值求解的影响。同时,基于FPGA设计并行迭代计算结构,实现子图内多个像素同步统计以提高计算速度,且计算结构可根据有限片上缓存对占用资源进行调节。整体方法框架如图1所示。

图1所示方法框架包括4部分:

1) 宽幅遥感图像切片。该步骤通过将包含大量数据的完整宽幅遥感图像切分成多个具有较小数据量的子

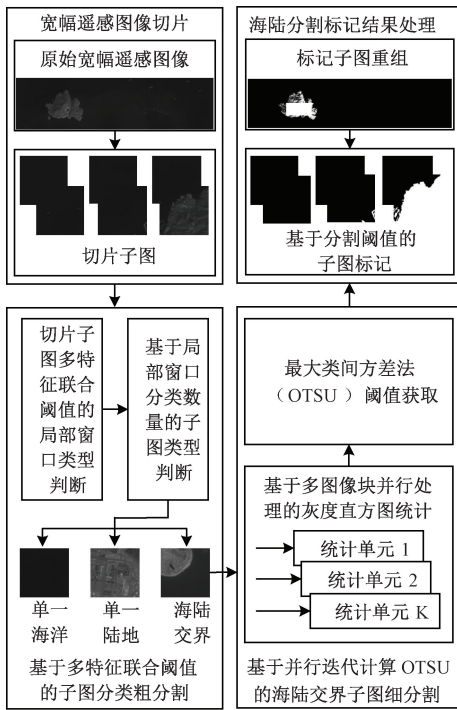


图1 海陆分割整体方法框架

Fig. 1 The overall framework of sea-land segmentation

图,每次只处理一张子图,以减少处理过程对 FPGA 片上缓存资源的需求。设完整宽幅遥感图像的尺寸为  $H \times W$ , 像素位宽为  $width$ , 则存储完整宽幅遥感图像需要缓存为  $H \times W \times 2^{width}$ 。当切分子图数量为  $R$ , 每个子图尺寸为  $H' \times W'$  时,  $H \times W = H' \times W' \times R$ , 则单次处理只需要  $H' \times W' \times 2^{width}$  缓存空间存储子图。

2) 基于多特征联合阈值的子图分类粗分割。完整宽幅遥感图像切片后子图可分为单一海面、单一陆地与海陆交界 3 种类型。其中,由于单一海面与单一陆地子图内像素属于同一种类,无需 OTSU 法求取分割阈值,且子图海面内存在灰度值较高的船舶、云或海杂波等,采用 OTSU 法进行分割易将此类干扰点分类为陆地从而造成误判,因此本文提出一种基于多特征联合阈值的子图分类粗分割,实现 OTSU 法的前级处理。首先,通过从包含子图局部区域信息的局部窗口内提取计算复杂度低的多个局部特征,并联合这些特征的阈值对子图内所有局部窗口类型进行判断。之后,根据子图内所有局部窗口所属类型的数量,进一步判断子图的类型。

3) 基于并行迭代计算 OTSU 的海陆交界子图细分分割。在该过程中,需对前一级子图分类粗分割中判断为海陆交界类型子图进行 OTSU 法求解分割阈值;而对于单一海面或陆地子图则直接输出子图标记结果。由于 OTSU 法中采用串行逐像素统计方式进行灰度直方图统计,需要处理  $H' \times W'$  次才能得到对子图统计的结果,计

算效率较低。因此,本文提出一种 OTSU 并行迭代计算结构以提升计算速度。设子图切分为多个大小相等的图像块,每个图像块大小为  $H'' \times W''$ 。计算结构对  $K$  个图像块执行并行计算,并迭代  $L$  次以获得最终统计结果。由于  $K$  个图像块中的像素同步进行处理,因此统计  $K$  个图像块次数只需要  $H'' \times W''$  次,远小于逐像素统计方式需要的统计次数,从而有效减少了 OTSU 法的整体处理时间。同时,  $K$  个图像块的并行处理需要占用额外片上缓存,通过对参数  $K$  进行调节,可实现占用片上缓存资源的平衡。

4) 海陆分割标记结果处理。此步骤利用前一步骤中获得的海陆分割阈值,对切片子图进行标记。同时,将标记后的切片子图进行重组,得到完整宽幅遥感图像的海陆分割结果。

基于多特征联合阈值的子图分类粗分割和基于并行迭代计算 OTSU 的海陆交界子图细分分割是实现海陆分割的主要环节,因此重点对这两部分内容展开介绍。

### 1.2 基于多特征联合阈值的子图分类粗分割

为了减少子图海面中存在的干扰点对 OTSU 法求解分割阈值产生的不利影响,本文采用基于多特征联合阈值的子图分类粗分割方法实现对子图的预先筛选,再利用 OTSU 法进行处理。该方法以提取子图内局部区域的特征为基础,通过多个特征阈值联合进行子图局部区域的判断,进而实现完整子图类型的判断。切片子图类型判断的过程如图 2 所示。

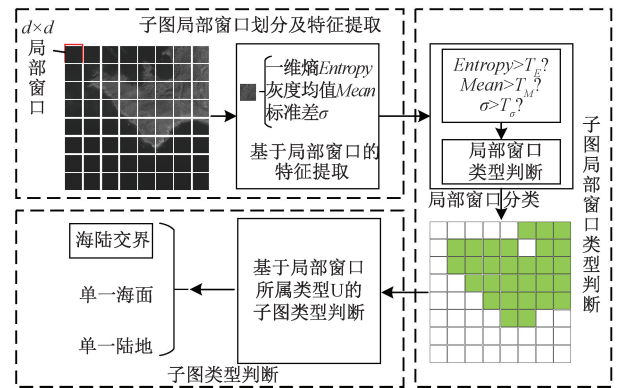


图2 切片子图类型判断

Fig. 2 The type of sub-image judgment

为了避免从子图整体提取的全局特征易受到极值点的影响的问题,在图 2 所示切片子图类型判断的过程中,采用从子图局部区域提取具有良好可分性与稳定性的局部特征作为判断依据。首先将子图进行局部窗口划分,以局部窗口为依据提取多个局部特征;之后,根据局部特征与对应统计阈值的比较结果,判断局部窗口的类型;最后,结合全部的局部窗口类型共同判断切片子图的类型。



1) 子图局部窗口划分及特征提取。在提取局部特征前,首先将子图划分成多个尺寸为  $d \times d$  的局部窗口,作为特征提取区域。考虑到局部特征提取的复杂度影响海陆分割整体的处理效率,本文采用计算较简单的一维熵、灰度均值和标准差3种局部特征作为子图类型判断依据。此3种特征的提取避免了海陆分割中常用的纹理特征与边缘特征需要计算像素邻域内分布规律而导致复杂度较高的问题。通过对不同类型的切片子图的观察可以发现,海洋区域内平均灰度值较低,灰度变化平缓;而陆地区域内平均灰度值较高,灰度变化比较剧烈,因此采用上述局部特征即可对海面 and 陆地地区进行有效区分。

图像一维熵是一种反映像素变化剧烈程度的特征。在遥感图像中,陆地地区细节复杂、纹理多变,其熵值一般较大。而海面区域纹理相对规则,其熵值一般较小,因此具有良好的可分性。设图像的灰度值范围为  $[0, M-1]$ ,  $M$  为图像中像素的最大灰度值,则图像的一维熵 *Entropy* 的定义如下式所示:

$$Entropy = - \sum_{m=0}^{M-1} P_m \log_2 P_m \quad (1)$$

式中:  $P_m$  表示灰度值为  $m$  的像素点在该局部窗口中出现的概率。

灰度均值表示图像灰度的平均水平,遥感图像中的陆地地区与海洋区域由于其光谱特性不同,整体反映出陆地地区的灰度等级较高,海洋区域较低的特点。灰度标准差则反映了图像中像素值离散程度,在遥感图像中海面区域各点像素值差异较小,而陆地地区各点像素值差异较大。局部窗口的灰度均值 *Mean* 和标准差  $\sigma$  的定义如下两个公式所示。

$$Mean = \frac{1}{d \times d} \sum_{x=0}^{d-1} \sum_{y=0}^{d-1} f(x, y) \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{d \times d} \sum_{x=0}^{d-1} \sum_{y=0}^{d-1} (f(x, y) - Mean)^2} \quad (3)$$

式中:  $d$  表示局部窗口大小,  $x$  和  $y$  代表局部窗口内像素坐标位置,  $f(x, y)$  代表对应位置像素的灰度值。

2) 子图局部窗口类型判断。在获得上述3种局部特征基础上,通过对多个海陆区域的统计,选择能够区分海面与陆地的一维熵阈值  $T_E$ 、灰度均值阈值  $T_M$  与灰度标准差阈值  $T_\sigma$ , 并联合局部窗口提取的特征与这3种阈值的比较结果判断局部窗口类型。当局部窗口提取特征均小于此3种阈值时,判定局部窗口为单一海面,否则为单一陆地。

3) 子图类型判断。在判断完成切片子图中所有局部窗口的类型后,通过局部窗口所属的类型数量判断切片子图的类型。当局部窗口被判断为海面的数量不小于  $U$  时,则判定切片子图为单一海面类型;当局部窗口被判断为陆地的数量不小于  $U$  时,则判定切片子图为单一陆地

类型;否则为海陆交界类型。判断为单一海面或陆地的子图将直接输出标记结果,而判断为海陆交界类型的子图将进入后一级继续处理。

### 1.3 基于并行迭代计算 OTSU 的海陆交界子图细分割

#### 1) 基于 OTSU 法海陆交界子图细分割基本原理

为了对海陆交界类型子图实现精确分割,基于上一节子图分类粗分割结果,采用 OTSU 法进一步设计细分割处理步骤,对海陆交界类型子图求解自适应的分割阈值,以避免设置固定阈值而产生误判。

OTSU 法通过灰度阈值  $T_{OTSU}$  将图像中的像素分为两类:海面区域 A 与陆地地区 B。其中,像素灰度值小于  $T_{OTSU}$  为 A 类,否则为 B 类。通过计算两种区域的类间方差,取方差最大的情况得到最佳分割阈值。该方法需要遍历子图中全部像素,对像素在各灰度值出现的次数形成的灰度直方图进行统计,进而求取子图内灰度值为  $i$  的像素出现的概率  $P(i)$ , 如下式定义:

$$P(i) = \frac{I(i)}{H' \times W'}, i = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (4)$$

式中:  $H' \times W'$  为子图的大小,  $I(i)$  为灰度值等于  $i$  的像素出现次数,遥感图像的灰度值范围为  $[0, M-1]$ 。灰度值范围内所有灰度值对应的像素出现次数的分布形成灰度直方图。

之后,遍历灰度值范围内全部  $M$  个灰度值,每次遍历将其中一个灰度值作为灰度阈值  $T_{OTSU}$  对图像像素进行划分,并利用式(4)求得的  $P(i)$  分别计算 A 类发生的概率  $P_A$  和平均灰度  $\mu_A$ , B 类发生的概率  $P_B$  和平均灰度  $\mu_B$ , 以及整幅图像的平均灰度  $\mu$ , 进而可求得类间方差  $\sigma_B^2$ , 如下式所示:

$$\sigma_B^2 = P_A \cdot (\mu_A - \mu)^2 + P_B \cdot (\mu_B - \mu)^2 \quad (5)$$

当求得类间方差达到最大时,对应的阈值  $T_{OTSU}$  即为可以将陆地和海面区分的最佳阈值,进而利用  $T_{OTSU}$  对子图的全部像素进行判断,得到海陆分割结果。

#### 2) OTSU 并行迭代计算结构

通过上一节的分析可知,OTSU 法包含灰度直方图统计与最大类间方差求解2个处理步骤。其中灰度直方图统计过程需要遍历子图全部像素,最大类间方差求解需要遍历全部灰度值范围。由于子图内全部像素的数量远大于灰度值范围,因此 OTSU 法耗时较长的步骤为像素灰度直方图统计。设基本的 OTSU 法处理总时间为  $t_1$ , 灰度直方图统计时间为  $t_{statistic}$ , 最大类间方差求解阈值计算时间为  $t_{threshold}$ 。由于基本 OTSU 法按照串行逐像素的方式进行灰度直方图统计,当子图大小为  $H' \times W'$ , 子图内单个像素统计时间为  $\Delta t$ , 则:

$$t_1 = t_{statistic} + t_{threshold} = (H' \times W') \times \Delta t + t_{threshold} \quad (6)$$

因此,按照串行逐像素灰度直方图统计时,OTSU 法处理总时间由子图内像素个数直接决定。当子图内像素

点个数固定时,为减小整体的处理时间,需要采用并行计算的方式,改进 OTSU 法的计算效率。

文献[20]针对 OTSU 法计算效率低的问题开展研究,利用 FPGA 构建并行计算结构实现加速。其核心思想是利用多个处理单元对图像中不同位置的多个像素同步处理,而不是一次只处理一个像素,进而在不改变 OTSU 法原理的前提下提升处理速度。然而,利用并行计

算结构虽然可以有效提升处理效率,但会带来额外的计算资源的占用,尤其是占用较多的片上缓存。因此,为了在提升 OTSU 法处理速度的同时减小 FPGA 片上缓存资源使用的压力,本文将通过对计算结构内处理单元并行数与迭代数的调整,控制每次并行处理的像素数量与占用的片上缓存,从而设计一种 OTSU 并行迭代计算结构。该计算结构的整体框架如图 3 所示。

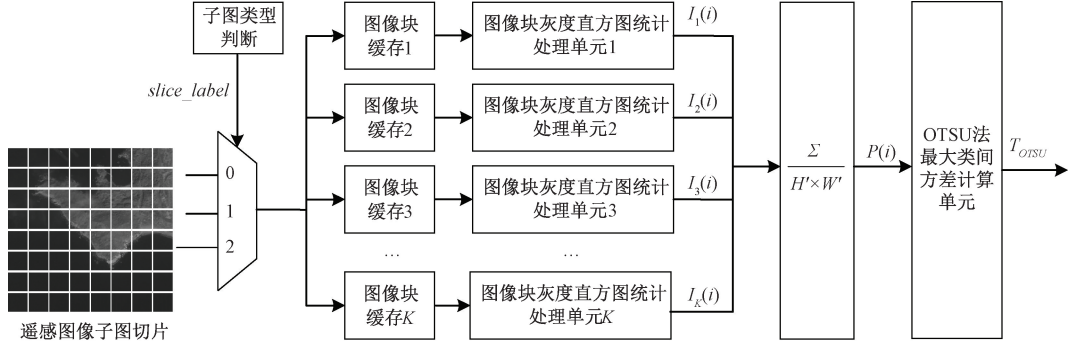


图 3 OTSU 并行迭代计算结构

Fig. 3 Parallel iterative computing architecture for OTSU

遥感图像子图切片通过前一级子图分类单元输出  $slice\_label$  控制进行后续处理。为实现对子图不同区域像素同时处理,本文首先将子图按等间距划分为大小相等的  $S$  个图像块,每个图像块尺寸为  $H' \times W'$ , 因此图像块与子图大小的关系为:

$$H' \times W' = H'' \times W'' \times S \quad (7)$$

之后,在此并行迭代计算结构中设置并行数为  $K$ ,代表一次可以对  $K$  个图像块进行同步处理。并行数的设置通过图 3 中图像块缓存与图像块灰度直方图统计处理单元两部分级联共同实现。图像块缓存用于存储不同图像块数据进行独立处理。按照并行数设置  $K$  个图像块缓存,在子图中选择划分的  $1 \sim K$  图像块按顺序复制到图像块缓存中。每个图像块缓存的数据同步输入到各自对应的图像块灰度直方图统计处理单元中进行处理。一次处理后,再选择  $K+1 \sim 2K$  图像块进行复制,直到全部图像块处理完成。为提高复制数据的速度,采用同一行  $W''$  列数据同时复制,共复制  $H''$  行,每次复制时间与单个像素灰度直方图统计时间  $\Delta t$  相等,则完成全部图像块复制的时间为:

$$t_{buffer} = H'' \times S \times \Delta t \quad (8)$$

利用第  $k$  个图像块缓存中的数据,通过对应灰度直方图统计处理单元进行统计结果为  $I_k(i)$ ,则最终的统计结果  $I(i)$  等于每一个图像块灰度直方图统计处理单元处理结果的加和,即:

$$I(i) = \sum_{k=1}^K I_k(i) \quad (9)$$

图像块灰度直方图统计处理单元的结构如图 4 所示。在其结构中设置迭代数为  $L$ ,令  $S = K \times L$ 。迭代数  $L$  代表了一个灰度直方图统计处理单元在处理过程中执行的次数。

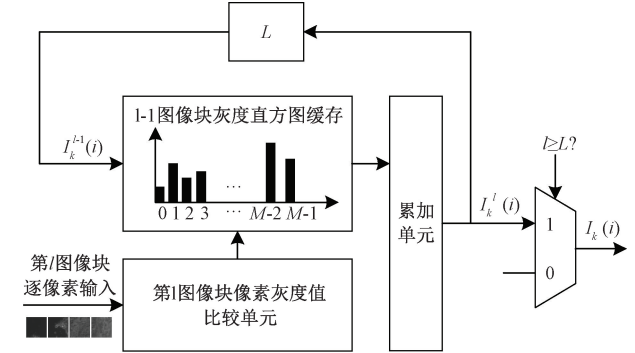


图 4 图像块灰度直方图统计处理单元

Fig. 4 Image block grayscale histogram processing unit

在第  $k$  个图像块灰度直方图统计处理单元中,为统计第  $l$  次灰度直方图  $I_k^l(i)$ ,需要将第  $l-1$  次统计的灰度直方图  $I_k^{l-1}(i)$  与第  $l$  个图像块作为输入,其中  $I_k^{l-1}(i)$  存储在  $l-1$  图像块灰度直方图缓存中。图像块中  $H'' \times W''$  像素按顺序进入第  $l$  图像块像素灰度值比较单元,得到当前像素的灰度值。之后,按照当前像素的灰度值,通过累加单元对  $l-1$  图像块灰度直方图缓存中对应灰度值的像素出现次数加 1。遍历全部像素后得到  $I_k^l(i)$ ,并用于下次迭代中第  $l+1$  次灰度直方图  $I_k^{l+1}(i)$  的统计。在经过迭代

$L$ 次后,可得到第 $k$ 个图像块灰度直方图的最终统计结果,即:

$$I_k(i) = I_k'(i) \quad (10)$$

图4所示图像块灰度直方图统计处理单元在处理过程中,需要迭代执行 $L$ 次,每次处理 $H'' \times W''$ 个像素的统计。由于本文所提计算结构采用 $K$ 个图像块灰度直方图统计处理单元构成并行计算结构处理全部图像块,其处理时间与1个处理单元处理时间相同。则完成全部图像块灰度直方图统计时间为:

$$t_{process} = L \times H'' \times W'' \times \Delta t = L \times \frac{H' \times W'}{S} \times \Delta t = \frac{H' \times W'}{K} \times \Delta t \quad (11)$$

最后,全部图像块灰度直方图统计处理单元的结果求和后可得到子图灰度直方图统计结果。将式(9)代入式(4)中,即可通过多个图像块灰度直方图统计结果得到子图内像素出现概率,如下式所示:

$$P(i) = \frac{I(i)}{H' \times W'} = \frac{\sum_{k=1}^K I_k(i)}{H' \times W'}, i = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (12)$$

对多个值进行求和计算常通过设计加法树<sup>[22]</sup>结构进行求解。由于图像中像素涵盖 $M$ 个灰度值范围,在每个灰度值下都需要对 $K$ 个图像块灰度直方图统计处理单元的结果进行求和,因此共需要执行 $M$ 次 $K$ 输入加法树处理。则求和所需时间为:

$$t_{sum} = (M \times \log_2 K) \times \Delta t \quad (13)$$

通过以上步骤,即可实现OTSU法中灰度直方图统计的并行计算,提高OTSU阈值分割的处理速度。完成整幅子图切片的统计之后,可将最终得到的结果 $P(i)$ 输入OTSU最大类间方差计算单元,遍历灰度值范围内全部灰度值求解最大类间方差阈值,进而求得对应的最佳分割阈值 $T_{OTSU}$ 。该过程处理时间等于 $t_{threshold}$ 。则利用OTSU并行迭代计算结构求解分割阈值的时间 $t_2$ 与灰度直方图计算时间 $t'_{statistic}$ 和 $t_{threshold}$ 的关系为

$$t_2 = t'_{statistic} + t_{threshold} = t_{buffer} + t_{process} + t_{sum} + t_{threshold} = \left( H'' \times S + \frac{H' \times W'}{K} + M \times \log_2 K \right) \times \Delta t + t_{threshold} \quad (14)$$

其中, $t_{process}$ 的大小远超过 $t_{buffer}$ 、 $t_{sum}$ 和 $t_{threshold}$ ,因此 $t_2$ 由 $t_{process}$ 决定。由于 $t_{process}$ 仅为 $t'_{statistic}$ 的 $1/K$ ,因此OTSU法通过并行迭代计算结构处理速度可以得到明显提升,且提升的幅度与设置的并行数 $K$ 直接相关。当 $K$ 越大时,处理速度越快,处理时间越短。

上述方法虽然可以提升OTSU法的处理速度,但同时也会带来额外的片上缓存的占用。这些额外的片上缓存主要包括两方面:(1)在并行处理之前对子图内划分

的 $K$ 个图像块进行缓存;(2)在图像块灰度直方图统计处理单元的每次迭代中缓存前一次灰度直方图统计结果。额外的片上缓存资源 $buffer\_size$ 为:

$$buffer\_size = K \times H'' \times W'' \times 2^{width} + K \times M \times 2^{width} \quad (15)$$

可见,计算结构占用的额外片上缓存资源与并行数 $K$ 成正比,当 $K$ 越大时,占用的额外的片上缓存资源越多,反之占用额外的片上缓存资源越少。

通过上述可知,本文设计的OTSU并行迭代计算结构在有效提升了OTSU法处理速度的同时,可通过改变并行数与迭代数实现对片上缓存资源的占用率进行平衡性调整。因此,在目标器件的片上缓存限制下,利用该计算结构可达到高效并行计算的目的。

## 2 实验验证与评估

### 2.1 实验目的

为测试本文所提海陆分割方法的精度与速度性能,从两方面开展相关的实验验证。

针对海陆分割精度方面,设计以下4项实验。

1)针对本文所提方法中子图分类粗分割过程,开展局部特征阈值选取实验;

2)针对本文所提方法中子图分类粗分割过程,开展局部窗口所属类型数量阈值选取实验;

3)为测试本文所提方法在缺失完整图像信息下具备对海陆区域精确分割的能力,开展不同阈值法海陆分割性能对比实验;

4)为测试本文方法加入子图分类处理对海陆分割精度提升的能力,开展子图分类粗分割消融实验。

针对海陆分割速度方面,设计以下2项实验。

1)为测试本文所提方法在提供并行计算能力的前提下,对所占用资源与处理速度可进行平衡性调整的能力,开展OTSU并行迭代计算结构参数调整实验;

2)为验证本文所提计算结构具有高效性,与同样基于FPGA实现海陆分割方法的文献[23]和文献[24]的研究结果进行对比实验。

### 2.2 实验条件

#### 1) 实验数据

本文采用的实验数据为5幅来自高分一号(GF-1)的宽幅全色遥感图像,幅宽尺寸为 $8192 \times 2048$  pixels,像素位宽为8 bit,单幅遥感图像数据量为128 Mbit。本文选择海陆灰度值差异较大的遥感图像进行实验,且海面区域中包含有较高灰度值的船舶、云及海杂波作为干扰。另外,本文设置子图切片大小为 $512 \times 512$  pixels,单次处理所需FPGA片上缓存降为2 Mbit。



## 2) 实验硬件平台

为实现并测试本文提出的海陆分割方法,采用 Zynq 异构 SoC XC7Z100-2FFG900 为核心的硬件平台开展实验。其内部集成有双核 Cortex-A9 ARM 处理器与 Kintex-7 FPGA。实验硬件平台功能单元如图 5 所示。

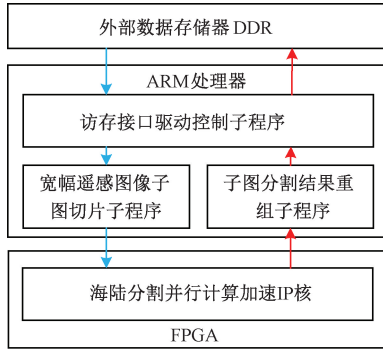


图 5 实验硬件平台功能单元

Fig. 5 Functional unit of experimental hardware platform

其中包含 3 部分功能单元,分别为数据存储器 DDR、ARM 处理器和 FPGA。原宽幅遥感图像存储于 DDR 中,通过在 ARM 处理器中运行的访存接口驱动控制子程序读取遥感图像,并对其进行子图切片处理。切片后的子图将传输到 FPGA 中进行多阈值分级海陆分割方法的加速计算。本文利用 Vivado HLS 软件工具对 1.3 节 2) 中提出的并行迭代计算结构进行开发。完成子图内海陆区域标记后,通过 ARM 处理器中子图分割结果重组子程序实现对完整遥感图像的海陆区域标记,并将分割结果再传输到外部存储器中。

## 3) 实验评价指标

由于本文所提方法重点关注海面的检测,因此本文主要采用海面检测精度  $SP$ 、海面检测召回率  $SR$ 、以及整体检测精度  $OP$  对所提方法进行分割精度方面的定量分析与比较。上述评价指标的定义为:

$$SP = \frac{TP_{sea}}{TP_{sea} + FP_{sea}} \quad (16)$$

$$SR = \frac{TP_{sea}}{TP_{sea} + FN_{sea}} \quad (17)$$

$$OP = \frac{TP_{sea} + TP_{land}}{TP_{sea} + FP_{sea} + TP_{land} + FP_{land}} \quad (18)$$

其中,  $TP_{sea}$  为真实值为海面,检测值也为海面的像素数量;  $FP_{sea}$  为真实值为陆地,检测值为海面的像素数量;  $FN_{sea}$  为真实值为海面,检测值为陆地的像素数量;  $TP_{land}$  为真实值为陆地,检测值为陆地的像素数量;  $FP_{land}$  为真实值为海面,检测值为陆地的像素数量。

为分析本文提出的基于 FPGA 的并行计算结构性能,通过宽幅遥感图像海陆分割处理时间以及 FPGA 内资源占用率作为综合的评价。

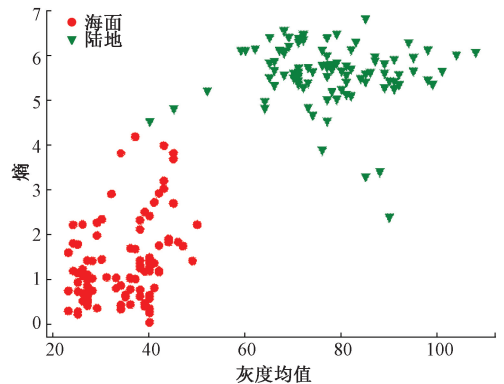
## 2.3 实验结果与分析

### 1) 海陆分割精度实验结果

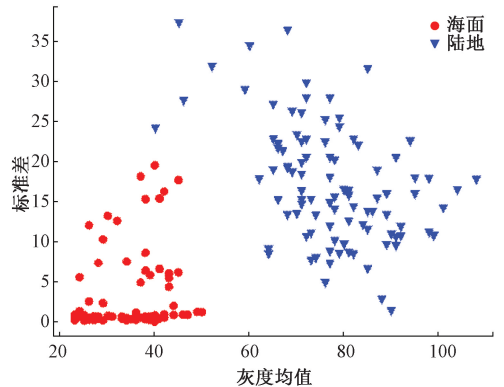
#### (1) 局部特征阈值选取

本文提出的子图分类粗分割处理通过子图内提取的局部特征的阈值比较实现,因此选取适当的局部特征阈值是保证子图分类准确性的关键。通过统计分析海陆类型局部窗口在不同局部特征上的分布特点,从而选取能够有效区分海面与陆地的局部特征阈值。

设置局部窗口大小为  $64 \times 64$  pixels,采用海面类型局部窗口图像与陆地类型局部窗口图像各 100 张进行统计,对其在灰度均值、熵和灰度均值-标准差上的分布分别进行统计,结果如图 6 所示。



(a) 局部窗口熵及灰度均值对比  
(a) Comparison of local window entropy and gray mean value



(b) 局部窗口标准差及灰度均值对比  
(b) Comparison of local window gray mean value and standard deviation

图 6 局部特征统计结果

Fig. 6 Local features statistics

由图 6 可知,海面区域的一维熵、灰度均值和标准差集中在左下角,具有较低的值,而陆地区域的局部特征分布在数值较高的位置。通过对图 6 的分析,选取一维熵的阈值  $T_e = 4.2$ ,灰度均值的阈值  $T_m = 50$ ,灰度标准差阈值  $T_\sigma = 20$ ,同时满足小于这 3 个阈值条件的局部窗口判断为海洋类型,否则为陆地类型。

(2) 局部窗口所属类型数量阈值选取

由于局部窗口所属类型数量阈值  $U$  的选择直接决定了子图分类结果,因此需要通过实验选择合适的  $U$  值,实现较高的海陆分割精度。本文设置的子图中共包含有 64 个局部窗口,因此对  $U$  从 1~64 进行取值,获得海面检测精度、召回率与整体检测精度随  $U$  值变化而变化的曲线如图 7 所示。

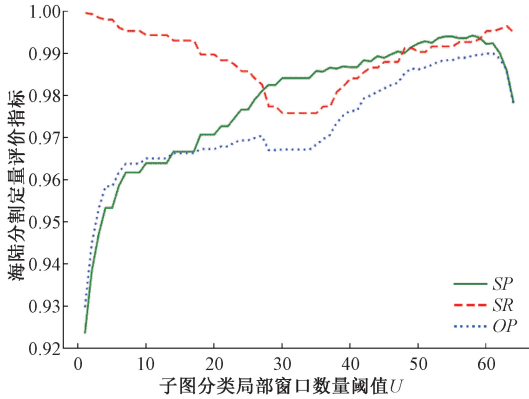


图 7 海陆分割定量评价指标随  $U$  值变化曲线

Fig. 7 Variation curve of quantitative evaluation index of sea-land segmentation with  $U$

通过对图 7 的分析可以发现,当  $U$  取值较小时,易满足单一海面的判断条件,此时遥感图像几乎全部都判定为海面,SR 较高。然而,大量陆地区域被误判成海面,因此 SP 与 OP 较低。随着  $U$  取值增大,更多子图被判定为单一陆地,导致 SR 下降。当  $U$  取值增大到一定范围,子图将被判定为海陆交界类型,将利用 OTSU 法进行处理,SR、SP 以及 OP 都得到提升。但是,若  $U$  取值过大,由于单一陆地子图内较亮与较暗的陆地共存,易将较暗的陆地分类为海,导致 SP 与 OP 再次降低。同时,海面中存在的船舶等干扰点易被误判为陆地,造成 SR 的降低。基于以上分析,本文选择  $U$  值为 58,可以在 3 种指标中都获得较高的结果。

(3) 不同阈值法海陆分割性能对比

为验证本文所提方法在缺失完整图像信息的前提下,仍能获得较好的分割精度,在此实验步骤中采用海陆分割中常用的迭代阈值、最大熵阈值以及 OTSU 阈值法对整幅宽幅遥感图像直接处理作为对比。利用其中一幅图像进行可视化实验结果对比如图 8 所示。

如图 8 所示,陆地被标记为白色,海面被标记为黑色。椭圆框位置为海面上的薄云,方形框内的高亮点为海面上的船舶。这两种干扰点应被分类为海面。本文所提方法虽然基于子图切片进行处理,缺失完整图像信息,但由于加入了子图分类前处理,可以实现与其它利用整幅遥感图像信息的阈值法对海面上薄云相同的判断。同

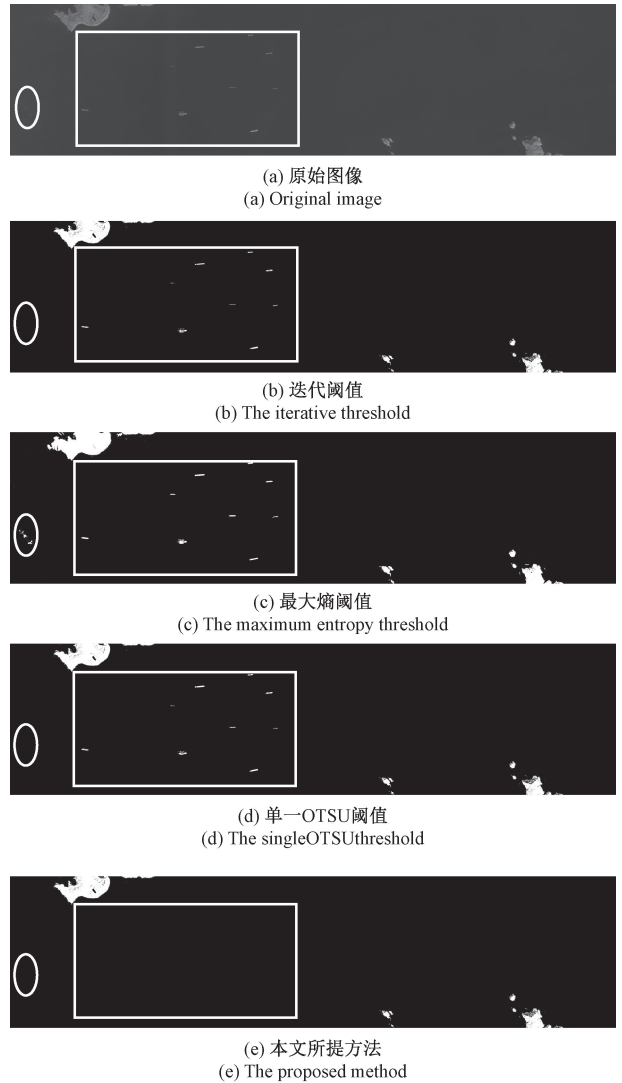


图 8 不同海陆分割方法结果

Fig. 8 Results of different sea-land segmentation methods

时,本文方法对于子图区域进行独立判断,抑制了高亮干扰点的影响,对海面具有更好的检测能力。不同海陆分割方法定量对比结果如表 1 所示。

表 1 不同海陆分割方法定量比较

Table 1 Quantitative comparison of different sea and land segmentation methods

精度指标	SP	SR	OP
最大熵阈值法	88.62	99.94	88.62
迭代阈值法	96.74	99.93	97.20
OTSU 阈值法	97.43	99.90	97.78
本文所提方法	<b>99.20</b>	<b>99.25</b>	<b>98.74</b>

由表 1 可知,由于采用的宽幅遥感图像海面灰度值



与陆地有较大差异,基于不同灰度阈值的海陆分割方法的  $SR$ 、 $SP$  及  $OP$  都比较高,可以达到 88% 以上。相比于对比实验,本文所提方法利用局部特征进行预先的子图分类,对整幅遥感图像的不同区域独立处理,抑制了可能存在的高灰度值干扰点造成的误检,从而海面检测精度可以达到 99.20%,召回率可以达到 99.25%,整体海陆检测精度可以达到 98.74%。

#### (4) 子图分类粗分割消融实验

为进一步分析本文所提方法中加入的子图分类处理对提升海陆分割精度的有效性,与直接对每个子图进行 OTSU 法处理的方式进行对比。结果如图 9 所示。

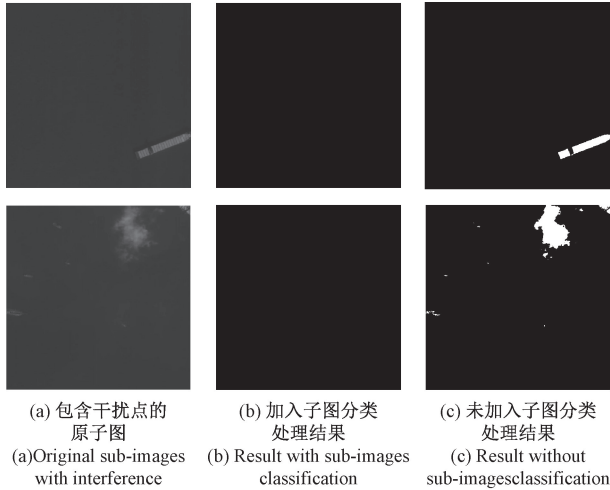


图 9 子图分类前级处理影响

Fig. 9 The impact of sub-images classification pre-processing

图 9(a) 所示为包含干扰点的原子图。其中上面的子图在海面上带有船舶作为干扰,下面的子图在海面上带有薄云作为干扰。带有子图分类前级处理和未带有子图分类处理,直接通过 OTSU 法处理子图的对比结果如图 9(b) 和 (c) 所示。通过图 9 可知,带有子图分类前级处理的海陆分割方法可以抑制高灰度值的船舶或薄云带来的不利影响,实现对单一海面类型子图更准确的判断。而不带有子图分类处理,直接通过 OTSU 法处理子图的方法,在船舶或薄云的干扰下,易将船舶和薄云误判为陆地,从而降低了对子图分类的精度。对比是否加入子图分类前级处理的海陆分割精度指标如表 2 所示。

表 2 是否加入子图分类前级处理海陆分割定量比较

Table 2 Quantitative comparison of sea-land segmentation with or without sub-images classification pre-processing %

精度指标	$SP$	$SR$	$OP$
加入子图分类	99.20	99.25	98.74
未加入子图分类	90.42	52.70	52.57

由表 2 可知,由于所采用的遥感图像海面与陆地灰度值差异较大,因此无论是否带有子图分类前级处理,利用 OTSU 法都能够达到 90% 以上的海面检测精度  $SP$ 。但是,由于海面中存在大量的高亮干扰点,在未加入子图分类前级处理时,这些高亮干扰点将被误判为陆地,造成大量海面区域的漏检,因此海面检测召回率  $SR$  与整体海陆检测精度  $OP$  较低,不足 55%。而加入子图分类前级处理后,可以更准确的判断单一海面类型子图,从而达到 99.25% 的海面检测召回率与 98.74% 的整体海陆检测精度。

#### 2) 基于 FPGA 计算结构处理速度实验结果

##### (1) OTSU 并行迭代计算结构参数调整实验

由于 OTSU 并行迭代计算结构需要将子图划分为  $S$  个大小相等的图像块,在本文中设置  $S$  为常数 64,则并行迭代结构中的并行数  $K$  和迭代数  $L$  的关系是  $K \times L = 64$ 。因此,并行数  $K$  和迭代数  $L$  成反比关系。为了测试本文所提计算结构在对 OTSU 法提供并行计算能力的同时,可以调整片上资源的占用,以平衡资源占用率与处理速度,并且分析不同的并行数  $K$  和迭代数  $L$  的选择对于海陆分割算法处理速度以及 FPGA 内资源占用率的影响,本文设置 3 组并行数  $K$  和迭代数  $L$  进行比较,如表 3 所示。

表 3 不同参数设置下并行迭代计算结构比较

Table 3 Comparison of parallel iterative computing architecture with different parameter settings

并行数 $K$	迭代数 $L$	资源占用率			处理时间/s
		BRAM/%	LUT/%	DSP/%	
16	4	80.99	48.39	66.58	0.16
8	8	60.86	27.61	33.71	0.20
4	16	53.18	18.22	17.28	0.25

如表 3 所示,本文所提计算结构在 BRAM 资源占用率最高,因此片上缓存是限制计算结构性能的主要因素。当并行数  $K$  和迭代数  $L$  改变时,BRAM 等计算资源占用率也相应发生改变,表明本文所提计算结构可对片上缓存等资源的占用进行平衡性调整。随着并行数的增加,迭代数减小,OTSU 法同一时间内处理的像素数增多,处理延时减小,进而导致海陆分割方法整体处理时间也随之减少。当设置并行数  $K=16$ ,迭代数  $L=4$  时,本文所提出的并行迭代计算结构处理一幅  $8192 \times 2048$  pixels 的遥感图像仅需要 0.16 s。

##### (2) 不同基于 FPGA 海陆分割方法对比实验

为了进一步测试验证本文所提计算结构对于海陆分割处理的高效性,与文献[23]和[24]中的方法比较。其中,文献[23]利用预存的全球海岸线数据进行海陆分

割,并结合FPGA设计两级海陆数据索引框架,减少海陆分割索引数据的存储并提升处理速度。文献[24]在遥感图像中提取多个统计特征,根据统计特征设计距离公式判断海陆边界的存在,并设计多维并行的FPGA计算结构实现加速。由于不同方法采用的遥感图像尺寸不一致,为了在同等条件下进行对比,将不同方法的结果等价到8192×2048 pixels尺寸的图像上。不同基于FPGA海陆分割方法处理时间如表4所示。

表4 不同基于FPGA海陆分割方法处理时间比较

Table 4 Comparison of processing time of different FPGA-based sea-land segmentation methods

对比方法	文献[23]	文献[24]	本文所提方法
时钟频率/MHz	-	133	133
处理时间/s	3.54	0.21	0.16

由表4可见,本文所提方法在对相同大小的遥感图像处理时,可获得更短的处理时间,处理时间较文献[23]中所提方法减少了95.48%,较文献[24]中所提方法减少了23.81%。这是由于本文方法进行了两方面的优化。一是采用低计算复杂度的OTSU法作为分级海陆分割方法的核心,处理步骤较简单;二是利用FPGA构建了高效的并行迭代计算结构,有效发挥了OTSU法的并行处理潜力。对比结果表明了本文所提方法能够有效利用FPGA中逻辑与存储单元构建并行计算结构,对宽幅遥感图像海陆分割实现了高速处理,为星载海陆分割方法的部署提供了高效的解决方案。

### 3 结 论

针对微纳卫星星上海陆分割的迫切需求,本文提出了一种基于FPGA并行计算的多阈值分级海陆分割方法,解决了由于片上缓存资源有限,难以提供高精度与高效率的星上宽幅遥感图像海陆分割的问题。以OTSU法为核心,通过加入计算简单的多特征联合阈值的子图分类实现分级海陆分割,抑制了由于遥感图像切片对OTSU法在高亮干扰点产生的误判影响。同时,设计了新颖的并行迭代计算结构,在FPGA片上缓存限制下对OTSU法进行计算加速,且计算并行度可根据资源占用调整,从而实现处理速度与资源占用率的平衡。

实验结果表明,本文提出的方法可以达到98%以上的海陆分割精度。同时,在对有限片上缓存资源占用的平衡性调整下,利用所提计算结构对8192×2048 pixels

的遥感图像处理最少仅需要0.16 s,低于对比实验方法。因此,本文提出的方法为实现星载宽幅遥感图像高精度、高效海陆分割提供了有效解决途径。然而,本文研究方法对于复杂场景下的高效海陆分割处理具有较大的局限性,还需进一步研究。

### 参考文献

- [1] LI D, WANG M, JIANG J. China's high-resolution optical remote sensing satellites and their mapping applications[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2021, 24(1): 85-94.
- [2] 陈彦彤, 李雨阳, 陈伟楠, 等. 基于深度语义分割的遥感图像海面舰船检测研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(1): 233-240.  
CHEN Y T, LI Y Y, CHEN W N, et al. Sea surface ship detection based on deep semantic segmentation using remote sensing image[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(1): 233-240.
- [3] LIN X, XU Q, HAN C. Shoreline data based sea-land segmentation method for on-orbit ship detection from panchromatic images [C]. 2018 Fifth International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSAA), IEEE, 2018: 1-5.
- [4] NGUYEN T, MACLEAN C, SIRACUSA M, et al. FPGA-based HPC accelerators: An evaluation on performance and energy efficiency[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2021: e6570.
- [5] BOUTROS A, NURVITADHI E, MA R, et al. Beyond peak performance: Comparing the real performance of AI-optimized FPGAs and GPUs [C]. 2020 International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT), IEEE, 2020: 10-19.
- [6] 彭宇, 姬森展, 于希明, 等. 语义分割网络的FPGA加速计算方法综述[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(9): 1-12.  
PENG Y, JI S ZH, YU X M, et al. A review of FPGA-accelerated computing methods for semantic segmentation network[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(9): 1-12.
- [7] YAO B W, LIU SH J, PENG Y, et al. An efficient embedded processing system for remote sensing image compression based on heterogeneous programmable MPSoC [C]. 2021 International Conference on Sensing,

- Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD), IEEE, 2021: 1-6.
- [ 8 ] 李宗凌, 汪路元, 蒋帅, 等. 超轻量网络的 SAR 图像舰船目标在轨提取 [J]. 遥感学报, 2021, 25(3): 765-775.
- LI Z L, WANG L Y, JIANG SH, et al. On orbit extraction method of ship target in SAR images based on ultra-lightweight network [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(3): 765-775.
- [ 9 ] 王征, 何云丰, 孙兴国, 等. 天问一号高分辨率相机图像存储及处理系统设计 [J]. 光学精密工程, 2022, 30(2): 127-136.
- WANG ZH, HE Y F, SUN X G, et al. Design of image storage and processing system for Tianwen-1 high-resolution camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(2): 127-136.
- [ 10 ] 戴牧宸, 冷祥光, 熊博莅, 等. 基于改进双边网络的 SAR 图像海陆分割方法 [J]. 雷达学报, 2020, 9(5): 886-897.
- DAI M CH, LENG X G, XIONG B L, et al. Sea-land segmentation method for SAR images based on improved BiSeNet [J]. Journal of Radars, 2020, 9(5): 886-897.
- [ 11 ] ZHOU Y, ZHENG G, YANG J, et al. Sea-land segmentation of synthetic aperture radar imagery using deep neural network models [C]. 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), IEEE, 2021: 2006-2010.
- [ 12 ] JING W, CUI B, LU Y, et al. BS-Net: Using joint-learning boundary and segmentation network for coastline extraction from remote sensing images [J]. Remote Sensing Letters, 2021, 12(12): 1260-1268.
- [ 13 ] 高慧, 郭海涛, 卢俊, 等. 融合语义流场的编解码网络港口影像海陆分割 [J]. 测绘科学技术学报, 2021, 38(6): 618-623.
- GAO H, GUO H T, LU J, et al. Sea-land segmentation method of harbor image based on encoding-decoding network combined with semantic flow field [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2021, 38(6): 618-623.
- [ 14 ] ZHENG J, XU Q, CHEN J, et al. The on-orbit noncloud-covered water region extraction for ship detection based on relative spectral reflectance [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(6): 818-822.
- [ 15 ] ZHANG C, JIANG H, PAN R, et al. High-throughput, resource-efficient multi-dimensional parallel architecture for space-borne sea-land segmentation [J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2021, 30(2): 2150027.
- [ 16 ] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [ 17 ] MA L, SOOMRO N Q, SHEN J, et al. Hierarchical sea-land segmentation for panchromatic remote sensing imagery [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017.
- [ 18 ] HOU X, AO W, XU F. End-to-end automatic ship detection and recognition in high-resolution Gaofen-3 spaceborne SAR images [C]. IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2019: 9486-9489.
- [ 19 ] WANG Z, CHEN S, XU X, et al. Icelandic coastline extraction based on water index using Landsat-8 image [C]. International Conference on Environmental Remote Sensing and Big Data (ERSBD 2021), 2021, 12129: 129-137.
- [ 20 ] BARROS W K P, DIAS L A, FERNANDES M A C. Fully parallel implementation of Otsu automatic image thresholding algorithm on FPGA [J]. Sensors, 2021, 21(12): 4151.
- [ 21 ] PANDEY J G, KARMAKAR A. Unsupervised image thresholding: Hardware architecture and its usage for FPGA-SoC platform [J]. International Journal of Electronics, 2019, 106(3): 455-476.
- [ 22 ] MOHANTY B K. Efficient fixed-width adder-tree design [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 66(2): 292-296.
- [ 23 ] LIN X, XU Q, HAN C. Shoreline data based sea-land segmentation method for on-orbit ship detection from panchromatic images [C]. 2018 Fifth International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA), IEEE, 2018: 1-5.
- [ 24 ] ZHANG C, JIANG H, PAN R, et al. High-throughput, resource-efficient multi-dimensional parallel architecture



for space-borne sea-land segmentation [J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2021, 30 (2): 2150027.

## 作者简介



**于希明**, 2016年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 现为哈尔滨工业大学博士生, 主要研究方向为遥感图像处理与深度学习模型计算加速等。

E-mail: yuximing@hit.edu.cn

**Yu Ximing** received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2016. He is currently a Ph. D. candidate at Harbin Institute of Technology. His main research interests include remote sensing image processing and computing acceleration for deep learning model, etc.



**彭宇**, 2004年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为虚拟仪器和自动测试、故障预测与健康管理等。

E-mail: pengyu@hit.edu.cn

**Peng Yu** received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2004. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Harbin Institute of Technology. His main research interests include virtual instruments and automatic test technologies, prognostics and system health management, and reconfigurable computing, etc.



**刘梓豪**, 2018年和2020年于吉林大学、哈尔滨工业大学分别获得学士和硕士学位, 现为哈尔滨诺信工大测控技术有限公司研发部工程师, 主要研究方向为模数混合电路系统、大规模可编程逻辑系统以及星载高效计算系统等。

E-mail: liuzihao@hit-mc.com

**Liu Zihao** received his B. Sc. degree from Jilin University in 2018, and received his M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2020, respectively. He is currently an engineer in the R&D department at Harbin Nosean Test and Control Technology Co., Ltd. His main research interests include analog-digital hybrid circuit system, large-scale programmable logic system, and onboard high-efficiency computing system, etc.



**刘连胜**(通信作者), 2006年、2008年和2017年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位, 现为哈尔滨工业大学副教授, 主要研究方向为信息物理系统、基于FPGA的高能效计算技术、故障预测与健康管理等。

E-mail: lianshengliu@hit.edu.cn

**Liu Liansheng** (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Harbin Institute of Technology in 2006, 2008, and 2017, respectively. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at Harbin Institute of Technology. His main research interests include cyber physical system, FPGA-based energy-efficient computing technology, fault prognostics and health management, etc.