

## 多特征融合的高分辨率遥感图像海陆分离

刘思彤, 程 红, 孙文邦, 于 光  
(空军航空大学, 长春 130022)

**摘 要:** 为解决目前大多数海陆分离方法仅利用单一特征对图像进行处理, 从而导致误分割或存在大量孤立区域, 造成后续处理工作难度大或无法开展的问题, 提出一种联合灰度、梯度和纹理等多特征的海陆分离方法。针对不同的陆地类型选用不同的特征进行分离, 配合形态学处理, 基本实现海陆分离; 再采用像素标记与纹理聚类策略对结果进行优化, 去除孤立区域, 得到最终的海陆分离结果; 最后利用直方图统计法将陆地屏蔽。此方法的陆地检测率与正确检测率都在99%以上, 计算时间仅为其他方法的一半。实验结果表明, 该方法与常用的海陆分离方法相比能够快速准确地实现海陆分离并将陆地屏蔽, 有利于后续处理的进行。

**关键词:** 图像处理; 多特征融合; 海陆分离; 孤立区域去除; 陆地屏蔽

中图分类号: TP751 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2015)03-0039-06

## A Sea-Land Segmentation Algorithm for High-Resolution Remote Sensing Image Based on Multi-Feature Fusion

LIU Si-tong, CHENG Hong, SUN Wen-bang, YU Guang  
(Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Most sea-land segmentation algorithms may result in wrong segmentations or lots of isolated areas due to the use of single feature for image processing, which makes it difficult for subsequent processing. To solve the problem, an improved algorithm for different kinds of land is proposed, which combines the features of gray level, gradient and texture together. First, suitable features are selected to segment the sea and land generally, which is followed by morphology processes. Then, pixel labeling and texture clustering are used to make the result of sea-land segmentation better by removing the isolated areas. Finally, land is shielded by using histogram statistics method. The algorithm proposed makes the detection rate and accuracy higher than 99%. The time spent is only half of the other algorithms. The results show that this algorithm can segment the sea and land and shield the land exactly and effectively, and can also make it convenience for subsequent processes.

**Key words:** image processing; multi-feature fusion; sea-land segmentation; isolated area removal; land shielding

### 0 引言

海陆分离就是将图像中的陆地区域进行遮蔽或移除, 使得后续工作仅作用于海洋区域而对陆地区域不做任何处理。高效快速的海陆分离有助于从海量遥感数据中快速准确地自动检测和提取舰船目标, 能够为海上情报信息的获取争取时间, 对于保障军事行动

的成功起到重要作用。

现有的海陆分离方法可分为基于先验信息的海陆分离和基于图像特征差异的海陆分离两大类。基于先验信息的海陆分离方法<sup>[1-4]</sup>简单、高效, 但其分割效果受先验信息的准确性和配准的精确度两方面影响较大, 而且会在小的岛屿或者是海岸线附近失效; 基于图像特征差异的海陆分离是最通用的方法, 该方法利用海洋与陆地之间的灰度、纹理或其他特征差异对陆地和海洋进行分割。文献[5]以区域方差作为区域纹理特性进行十字形方差直方图统计来计算分割门限, 增加了局部纹理信息; 文献[1-6]利用灰度统计分布信

收稿日期: 2014-04-23

修回日期: 2014-05-19

基金项目: 全军军事类研究生课题(2013JY514)

作者简介: 刘思彤(1989—)女, 辽宁大连人, 硕士生, 研究方向为数字图像处理、目标检测与识别。

息确定分割阈值实现海陆分离,但计算量较大,效果不理想;文献[7-9]利用 Canny 算子提取梯度信息并辅形态学运算进行海陆分离,但这种算法对于平坦纹理区域效果不佳;文献[10]利用最大类间方差法(Otsu)进行初始分割,这也是目前最常用的方法。以上方法对于海面平静、陆地与海洋特征差异明显并且陆地内部特征分布均匀的情况效果较好,但对于较为复杂的情况,分割后存在大量孤立区域,就需要进行孤立区域的消除。像素标记法<sup>[11]</sup>,是最常用和最简单的方法,但此方法需要借助先验知识设定阈值,不能实现自动化;文献[10]利用区域距离来判定孤立区域的属性,进而实现分割;文献[8]在边缘检测的基础上,利用线密度和面密度判定及擦除孤立区域,但对平坦陆

地不适用;文献[9]将共生矩阵与灰度游程信息相结合来提取纹理特征,利用聚类实现不同纹理的分类,但计算量大。综上所述,现有方法大多采用单一特征进行海陆分离,分割效果有限;孤立区域去除方面研究较少且存在一定的局限性,因而本文提出联合多特征的海陆分离方法,针对港口和岛屿分别进行处理,并对分离结果进行优化,消除孤立区域,最后将陆地屏蔽。

## 1 多特征融合的海陆分离

根据陆地区域特点的不同,将其分为港口和岛屿两类。分别针对两类陆地的特点进行海陆分离,包括多特征分割、孤立区域去除和陆地屏蔽三部分,算法流程如图1所示。

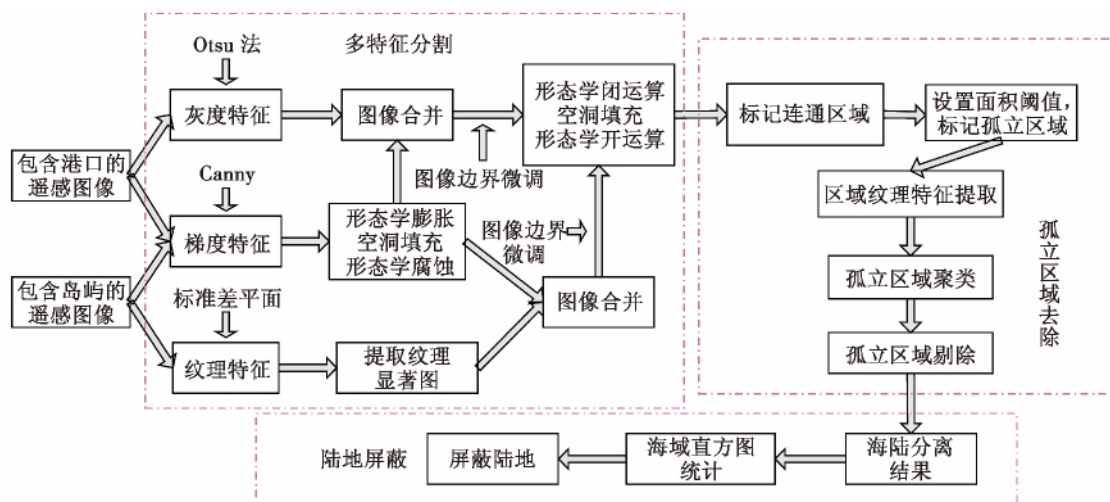
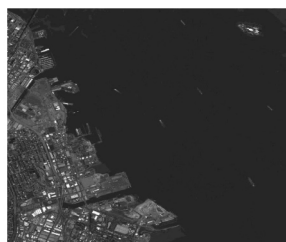


图1 多特征融合的海陆分离方法

Fig. 1 Sea-land segmentation based on multi-feature fusion

### 1.1 多特征分割

在如图2所示的包含港口的遥感图像中港口与海洋的灰度差异较大,且海洋区域灰度分布较均匀,可以利用灰度阈值法进行分割;但港口内部也可能存在与海洋同灰度的区域,仅利用灰度特征进行分割不能达到分割要求,又因为港口内部建筑较多,梯度特征明显,而海面较平静,梯度特征较少,因此本文加入梯度特征,与灰度特征共同完成分割。



a 海陆图像1



b 海陆图像2

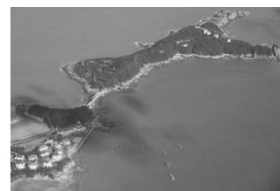
图2 包含港口的海陆图像

Fig. 2 Sea-land image including port

在如图3所示的包含岛屿的遥感图像中,岛屿与海洋的灰度差异也较大,但其周边海域灰度分布不均,用灰度特征会造成误分割。从图中可以看出,岛屿上植被较丰富,因而梯度特征和纹理特征较明显,可以利用这两种特征来实现分割。



a 海陆图像3



b 海陆图像4

图3 包含岛屿的海陆图像

Fig. 3 Sea-land image including island

#### 1.1.1 灰度特征

Otsu 法是由 Otsu 于 1978 年提出的,以其计算简单、稳定有效,一直广为使用,在其基础上又出现了许多改进算法<sup>[12]</sup>。

Otsu 法选取出来的阈值非常理想,但当图像中目标

与背景的大小之比很小时方法失效。虽然它不是最佳的分割,但分割质量具有一定保障,可以说是最稳定的分割,是目前最常用的方法,因此本文采用 Otsu 法提取灰度特征,结果见图 4。从图中可以看出,Otsu 法能将海洋与陆地区分,但陆地内部存在许多灰度值与海洋相近的区域,还需要进一步处理。

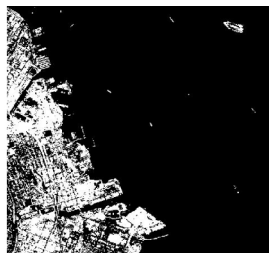


图 4 Otsu 法分割结果

Fig. 4 Result of segmentation based on Otsu

### 1.1.2 纹理特征

在海面背景亮度不均的情况下,直接利用灰度作为分割特征不能对陆地与海洋进行有效区分。图像中海面灰度近似呈高斯分布,灰度分布范围很窄,表现为较小的灰度方差;有岛屿存在的局部区域灰度存在跃变,产生较大的局部灰度方差,因而本文用局部统计方差作为纹理特征来描述这种灰度上的变化,将岛屿陆地与海洋区分开。图像上的每个区域用它的灰度局部统计方差来描述,整个灰度图像用一个由标准差特征点组成的标准差特征平面来表征,见图 5a。设置适当的阈值,即可得到纹理提取结果,见图 5b。

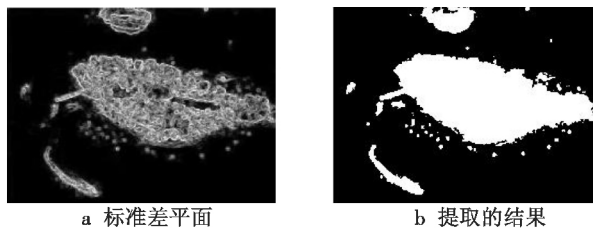


图 5 纹理特征提取

Fig. 5 Texture feature extraction

### 1.1.3 梯度特征

在边缘提取算法中,Canny 提出的边缘检测方法具有很好的边缘检测性能,应用较为广泛。 $\sigma$  是 Canny 算子的尺度因子,在  $0 \sim 1$  之间取值, $\sigma$  值的大小会影响 Canny 边缘提取的结果:当  $\sigma$  取值较小时,边缘定位精度高;反之  $\sigma$  取值较大时,边缘精度不高。可以根据实际分割的需要选取不同的  $\sigma$  值,本文中  $\sigma$  在  $0.1 \sim 0.2$  之间取值。为了得到连通的整体,需要对梯度特征提取后的结果进行形态学膨胀、孔洞填充和腐蚀运算,膨胀与腐蚀采用相同的结构元素,如图 6、图 7 所示。从图中可以看出,经过形态学处理后的图像连通性较好,为后续工作的开展提供了方便。

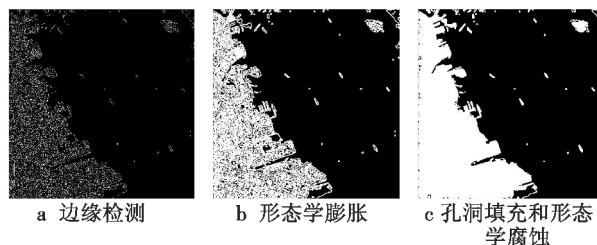


图 6 海陆图像 1 梯度特征提取

Fig. 6 Gradient feature extraction for figure 1

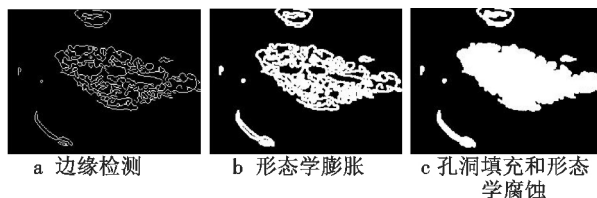


图 7 海陆图像 3 梯度特征提取

Fig. 7 Gradient feature extraction for figure 3

### 1.1.4 图像合并与后续处理

将包含港口的图像用灰度和梯度特征进行处理,将包含岛屿的图像用纹理和梯度特征进行处理,对特征处理结果进行或运算,得到合并结果。受图像边界的影响,陆地图像并不完整,主要表现在港口内部区域,本文对边界进行微调:将边界统计数目大于该边界长度  $1/4$  的边界标记为陆地,再对整幅图像进行形态学闭运算、孔洞填充,填补轮廓上的缝隙,去除小洞;进行形态学开运算,去掉细小的突出,消除狭窄的部分。从图 8a 中可以看出,由于港口内部复杂再加上边界的影响,使得形态学处理无法对合并图像边界产生效果,导致边界有点状区域存在,该区域用蓝色圈标记,影响陆地的整体效果。而经过本文的边界微调后,如图 8b 所示,点状区域消失,陆地连为一体。对于图 8c 中的红色圈做标记区域,由于岛屿边界没达到微调要求,因而不做处理,此区域将作为孤立区域在下一步去除。

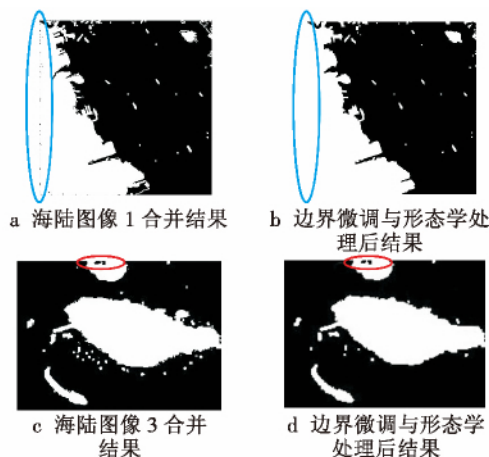


图 8 特征合并与后续处理

Fig. 8 Feature combination and subsequent processes

## 1.2 孤立区域去除

海陆分离是将图像分为海洋和陆地两大部分,经过前面的处理已基本实现了分离。虽然海洋和陆地内部的孤立区域减少很多,但由于海面有船只存在且陆地内部较为复杂,还需要进一步处理才能得到最终的海陆分离结果。对于海面上的船只,由于面积较小,可以通过设定小面积阈值将其剔除,但对于陆地孤立区域和面积较大的海洋孤立区域不适用。像素标记法是最常用也是最简单的去除孤立区域的方法,但由于图像各不相同,阈值设定需根据对象的面积而定,因而适用性不强。本文对其进行如下改进。

1) 面积筛选。根据大多数图像中海洋或陆地区域较大,所占面积也较大这一特点,将面积阈值  $T_{\text{area}}$  设为图像面积的  $1/4$ ,将小于阈值的孤立区域筛选出来,标记为  $L_1$ ,即

$$L_1 = \begin{cases} 0 & a_{\text{isolate}} \geq T_{\text{area}} \\ 1 & a_{\text{isolate}} < T_{\text{area}} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $a_{\text{isolate}}$  为海洋或陆地孤立区域。

2) 特征聚类。按式(2)和式(3)计算主体海洋或陆地以及相应  $L_1$  区域灰度均值  $m$  和三阶矩特征  $\mu_3$  (经过实验选取),分别以主体区域的参数值为中心进行聚类,将不属于该类的孤立区域筛选出来,标记为  $L_2$ ,即

$$m = \sum_{i=0}^{L-1} x_i p(x_i) \quad (2)$$

$$\mu_3 = \sum_{i=0}^{L-1} (x_i - m)^3 p(x_i) \quad (3)$$

式中:  $x_i$  为属于第  $i$  个孤立区域的像素的灰度值;  $p(x_i)$  为该区域的灰度直方图;  $L$  为灰度级数。分别对海洋和陆地的孤立区域进行计算,将满足这两个条件的孤立区域  $L_2$  标记为对立区域进行去除。

本文方法原理简单,在面积筛选的基础上进行纹理聚类,既减少了计算量,又避免了错分,提高了效率,实验结果如图9所示。

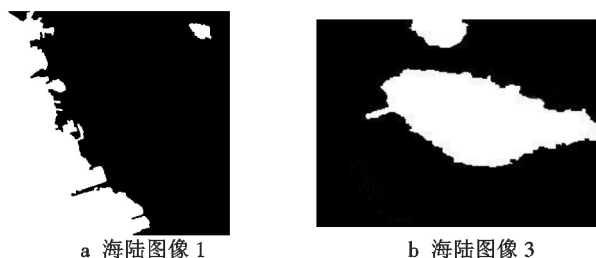


图9 孤立区域去除结果

Fig. 9 Results of isolated area removal

图9a中小舰船目标已被剔除而海中小岛被保留下来;图9b中的小岛与舰船面积相近且都小于阈值,但经过纹理聚类,确定小岛为陆地将其保留,而将舰船

去除。

## 1.3 陆地屏蔽

现有的大多数海陆分离方法只区分了海洋和陆地,将陆地标记为0(灰度图像显示为黑色),并没有考虑后续针对海面上目标检测与识别工作如何开展。大多数的检测算法需要对整幅图像进行处理,将陆地标记为0势必会影响算法效果。因此,本文提出对分离后的海洋区域进行直方图统计,选取统计量最大的灰度值作为陆地区域的屏蔽值,这样既屏蔽了陆地,又不会对后续工作造成影响。但由于岛屿图像灰度不均,无法找到合适的屏蔽值,因此该方法只适用于港口图像。如图10所示,经本文方法屏蔽后的图像基本找不到陆地的痕迹,而且比较自然,有益于检测工作的进行。

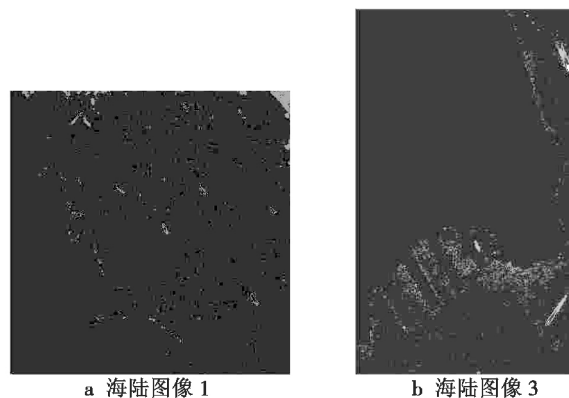


图10 陆地屏蔽结果

Fig. 10 Results of land shielding

## 2 实验结果对比分析

为了验证本文算法的可行性与有效性,在 Inter (R) Core (TM) 2Quard CPU Q9400 2.66 GHz,内存为 4 GB 的计算机,Matlab R2007b 的环境下,将本文方法与常用的海陆分离方法进行对比实验与分析。本文选取从 Google Earth 上得到的两组海陆图像进行实验,第一组为包含港口的海陆图像,第二组为包含岛屿的海陆图像,每一组又包含两幅图像。为了更清晰地比较各方法海陆分离的效果,本文在原图像中将各方法得到的陆地标记为黑色。

### 2.1 包含港口的图像对比实验与分析

从图11中可以看出,文献[10]和文献[8]的方法能基本实现海陆分离,但分离结果不完整,如图11d中红色框区域灰度与海洋相近,因而导致欠分割;图11e中蓝色框区域较为平坦,单纯利用梯度特征无法将其正确分类,而本文方法能够精确地将陆地与海洋分离,且陆地区域保留完整,同时消除了浅海区域对检测的影响,如图11f所示。



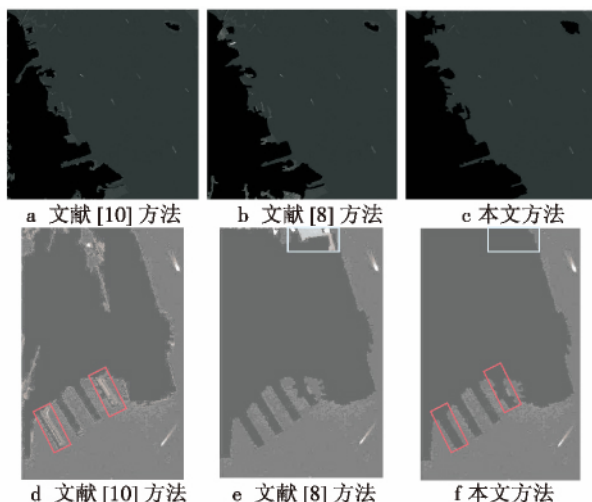


图11 包含港口的海陆分离结果对比

Fig. 11 Segmentation of sea-land images including port

## 2.2 包含岛屿的图像对比实验与分析

利用文献[9]和文献[8]中的方法只能对纹理特征明显的部分有较好的结果,而对岛屿周边的浅海部分不适用;本文方法既能完整地将岛屿分离又能将干扰区域屏蔽,具有很大优势。文献[9](图12d)利用像素标记法将小岛漏判为海洋,文献[8](图12e)虽正确分离出小岛,但也将带有尾迹的舰船错判为岛屿,而本文方法(图12f)能正确地对两者进行区分,避免了错判与漏判。

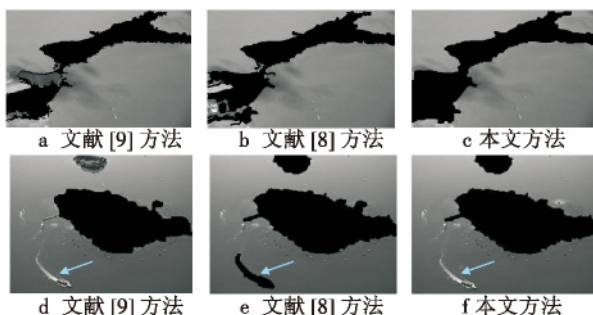


图12 包含岛屿的海陆分离结果对比

Fig. 12 Segmentation of sea-land images including island

## 2.3 参数定量对比

以上从视觉角度对实验结果进行了对比和评价,为了更客观地比较算法性能,定义如下参数来定量地说明本文方法的优势(从陆地角度)。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{陆地检测率} = \frac{N(\text{检测到的陆地} \cap \text{真实陆地})}{N(\text{真实陆地})} \\ \text{陆地错误检测率} = \frac{N(\text{检测到的陆地}) - N(\text{检测到的陆地} \cap \text{真实陆地})}{N(\text{真实陆地})} \quad (4) \\ \text{陆地检测正确率} = \frac{N(\text{检测到的陆地} \cap \text{真实陆地})}{N(\text{检测到的陆地})} \end{array} \right.$$

式中:  $N(\cdot)$  表示区域面积,即图像中非零像素的个数;真实陆地面积可以通过人工标识得到。

取两类图像中各实验结果的平均参数进行比较与分析,如表1所示。本文方法的陆地检测率和正确检测率均高于其他方法,较准确地实现了海洋与陆地的分离,精确地将陆地区域分割出来,达到了海陆分离的目的和要求;虽然本文方法的错检率相对其他方法偏高,但基本发生在陆地内部,不影响海面目标的检测,反而能将不必要的虚警去除,为后续舰船目标的检测提供了方便。最后对各方法的计算时间进行比较,从表2中可以看出,本文方法虽然需要计算多个特征,在时间上没有太大优势,但产生更少的孤立区域且对其去除节省了时间,因此总时间比其他方法快将近1倍。综上所述,本文方法在主观视觉和客观参数统计上都更具有优势。

表1 海陆分离效果参数对比

Table 1 Parameter comparison of sea-land segmentation

图像类型	方法	陆地检测率	陆地错误检测率	陆地正确检测率
包含港口的海陆分离	文献[10]方法	98.3	1.2	98.7
	文献[8]方法	98.6	1.4	98.8
	本文方法	100	1.8	99.2
包含岛屿的海陆分离	文献[9]方法	97.3	0.9	98.5
	文献[8]方法	96.7	1.1	97.2
	本文方法	99.9	1.4	99.5

表2 海陆分离时间对比

Table 2 Time comparison of sea-land segmentation

图像类型	方法	特征提取	孤立区域去除	总时间
包含港口的海陆分离	文献[10]方法	0.29	0.51	0.8
	文献[8]方法	0.35	0.76	1.11
	本文方法	0.46	0.13	0.59
包含岛屿的海陆分离	文献[9]方法	0.57	1.5	2.07
	文献[8]方法	0.33	0.72	1.05
	本文方法	0.50	0.18	0.68

## 3 结论

本文针对现有海陆分离方法存在的问题,提出一种联合多特征提取与分离结果优化的海陆分离方法,并借助直方图统计法将陆地屏蔽。该方法能在保留海洋信息的前提下,准确有效地将海洋与陆地分离,具有较高的分割效率和较好的分割效果,同时,为后续舰船检测工作的开展提供了方便。实验结果及参数分析均显示,本文方法比常用的海陆分离方法更具可行性、有效性和较大优势。

## 参考文献

- [1] 李文武. 中低分辨率光学遥感图像舰船目标检测算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. (LI W W. Detection of ship in optical remote sensing image of medi-

- an-low resolution [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. )
- [2] GUAN J, CHEN X L, HUANG Y, et al. Adaptive fractional fourier transform-based detection algorithm for moving target in heavy sea clutter [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2012, 6( 5) : 389-401.
- [3] 隆刚, 陈学佳. 高分辨率遥感图像港内舰船的自动检测方法[J]. 计算机仿真, 2007, 24( 5) : 198-201. ( LONG G, CHEN X Q. A method for automatic detection of ships in harbor area in high-resolution remote sensing image [J]. Computer Simulation, 2007, 24( 5) : 198-201. )
- [4] 张振. 高分辨率可见光遥感图像港口及港内目标识别方法研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2005. ( ZHANG Z. A study on harbor target recognition in high resolution optical remote sensing image [D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2005. )
- [5] 周静, 田金文. 基于海岸线背景的海面小目标检测方法[J]. 红外与激光工程, 2005, 34( 4) : 486-489. ( ZHOU J, TIAN J W. Method of detecting small target in port-sea background [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34( 4) : 486-489. )
- [6] 沈叶健, 徐守时. 一种有效的可见光图像中水坝目标的识别方法[J]. 计算机应用, 2006, 26( 8) : 1972-1974. ( SHEN Y J, XU S S. Effective method for dam recognition from visible images [J]. Computer Applications, 2006, 26( 8) : 1972-1974. )
- [7] 荆浩, 陈学佳, 顾志伟. 一种基于边缘特征的海岸线检测方法[J]. 计算机仿真, 2006, 23( 8) : 89-93. ( JING H, CHEN X Q, GU Z W. A method for coastline extraction based on edges [J]. Computer Simulation, 2006, 23( 8) : 89-93. )
- [8] 李琨, 郑庆晖, 廖冬学. 基于梯度特征的图像自动分割方法[J]. 宇航学报, 2006, 27( 6) : 1288-1292. ( LI K, ZHENG Q H, LIAO D X. An automatic image segmentation approach based gradient [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27( 6) : 1288-1292. )
- [9] 蔡姝, 吴宏明. 基于海陆分割的舰船目标变化检测研究[J]. 电视技术, 2010, 34( 5) : 109-112. ( CAI S, WU H M. Study on change detection of ship target based on sea-land segmentation [J]. Video Engineering, 2010, 34( 5) : 109-112. )
- [10] 瞿继双, 王超, 王正志. 一种基于多阈值的形态学提取遥感图象海岸线特征方法[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8( 7) : 87-91. ( QU J S, WANG C, WANG Z Z. A multi-threshold based morphological approach for extracting coastal line feature from remote sensed images [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8( 7) : 87-91. )
- [11] 肖利平, 曹炬, 高晓颖. 复杂海地背景下的舰船目标检测[J]. 光电工程, 2007, 34( 6) : 6-10. ( XIAO L P, CAO J, GAO X Y. Detection for ship targets in complicated background of sea and land [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34( 6) : 6-10. )
- [12] CARRETERO-MOYA J, GISMERO-MENOYO J, ASENSIO-LOPEZ A, et al. A small-target detection in high-resolution heterogeneous sea clutter: An empirical analysis [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47( 3) : 1880-1898.
- ( 上接第 38 页)
- 螺随机序列平稳化处理[J]. 传感技术学报, 2011, 24( 10) : 1440-1444. ( ZHANG Q Z, ZHANG S B, HOU D Y. FOG random sequence pretreatment using empirical mode decomposition [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24( 10) : 1440-1444. )
- [8] 杨位钦, 顾岚. 时间序列分析与动态数据建模[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988. ( YANG W Q, GU L. Time series analysis and dynamic data modeling [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. )
- [9] 首招勇, 杨媛媛. 时间序列问题的建模方法和过程[J]. 数学理论与运用, 2012, 32( 1) : 112-120. ( SHOU Z Y, YANG Y Y. On the modeling of time series [J]. Mathematical Theory and Applications, 2012, 32( 1) : 112-120. )
- [10] 李潇. 灰色最小二乘支持向量机在滑坡变形预测中的应用[J]. 测绘通报, 2010, 6: 44-46. ( LI X. Application of grey least square support vector machine in landslides deformation prediction [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2010, 6: 44-46. )

本刊国内邮发代号为 36 - 693 欢迎订阅