

有云层干扰的光学遥感图像舰船检测算法

许成斌, 周伟, 丛瑜, 关键

(海军航空工程学院, 山东烟台 264001)

摘要: 针对海面光学卫星遥感图像舰船检测中云层干扰所产生高虚警率的情况, 提出一种基于串并联混合多维特征融合判决的舰船目标检测算法。首先, 利用高斯灰度阈值分割目标与海面云层背景, 并对分割后的二值图像进行区域标记; 然后, 利用感兴趣区域的几何形态和边缘能量两类特征, 包括中心偏移度、长宽比、面积变化比、曲折度和填充度, 构建了串并联混合多维特征融合判决方法; 最后, 通过对感兴趣区域进行综合鉴别, 有效剔除了云层干扰导致的虚警, 解决了含云层背景检测结果虚警率高的问题。对多幅 SPOT4 光学遥感卫星图像的实验结果表明算法的有效性。

关键词: 光学遥感图像; 舰船检测; 复杂背景

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2014)11-0079-04

An Algorithm for Ship Detection in Optical Remote Sensing Images with Cloud Interference

XU Cheng-bin, ZHOU Wei, CONG Yu, GUAN Jian

(Navy Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: According to problem of high false alarm rate in ship detection produced by clouds in optical remote sensing image, a detection algorithm based on serial-parallel and multi-feature fusion is proposed. First, the segmentation of ships and clouds is realized by Gaussian-gray-threshold, and the regions of binary image are marked. Then, the serial-parallel and multi-feature fusion algorithm is constructed by the geometric morphological and edge-energy characteristics, including center deviation degrees, length-width ratio, area changing ratio, sinuosity and degree of filling. False alarms caused by clouds are effectively eliminated through the comprehensive judgment of region of interesting (ROI), thus the problem of high false alarming rate is solved. The effectiveness of the algorithm is verified by the experiment results with multiple optical remote sensing satellite images of SPOT4.

Key words: optical remote sensing image; ship detection; complex background

0 引言

卫星遥感技术对海上舰船监视具有重要意义, 在世界各海岸地带国家有着重要应用。由于合成孔径雷达(SAR)图像具有全天候的优点, 且不受云层影响, 在海洋舰船监视中得到广泛应用^[1-3]。而光学卫星遥感易受天气影响, 但是光学卫星的分辨率较高且具有数量优势, 在一定条件下可作为星载 SAR 的补充手段。

近年来, 利用光学遥感图像进行海洋舰船监视已经引起许多研究人员的关注。小波理论、视觉显著度模型、分形理论等也在光学遥感图像舰船检测中得到

应用^[4-7]。海上光学遥感图像的背景比较单一, 但仍然存在诸多困难, 如海陆的分离、岛屿的干扰和云层的干扰^[8]。传统的舰船检测算法难以克服云层对舰船检测的干扰, 检测结果中存在大量的虚警。针对这一问题, 本文采用灰度高斯阈值分割法快速检测出潜在目标区域, 设计了一种串并联混合多维特征融合判决方法将船体从图像中检测出来, 并且保持较低的虚警率。

1 算法描述

1.1 感兴趣区域的提取

从典型的海面光学遥感图像灰度分布来看, 图像中除了舰船目标和干扰区域以外灰度值都较低, 可以采用简单的灰度阈值分割将潜在目标区域与背景快速分割出来。海面向上反射光灰度总体分布服从高斯分布^[9],

因此采用遥感图像的整体图像均值($E(I)$)和方差($\text{var}(I)$)来估计灰度阈值,可以达到较好的分割效果。

海面光学遥感图像中,舰船目标一般为狭长形状、长宽比较大,而云层形状不规则,可通过长宽比这一基本几何形态特征剔除明显不是舰船目标的区域。对分割区域进行形态学膨胀和填充,计算每个潜在目标区域的面积 S 及长宽比 k ,定义一个目标面积阈值区间 $[S_1, S_2]$ 和一个较低的长宽比阈值

$$k' = \alpha \cdot E(I) + \beta \cdot \text{var}(I) \quad (1)$$

式中, α 和 β 为调整系数。当 $S \in [S_1, S_2]$,且 $k > k'$ 时,认为该区域为感兴趣区域。图1所示为舰船目标和云层的灰度分割效果示例,从左到右分别为舰船切片和云层的原始切片、二值分割效果、形态学膨胀填充效果。

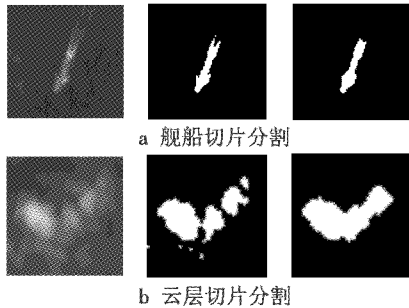


图1 舰船目标和云层的灰度分割效果示例

Fig.1 Segmentation images of ship target and clouds

1.2 目标特征提取

海面光学遥感图像上的云层与舰船目标区域灰度能量差异不大,在图像分辨率不高的情况下,最主要的差异是云层与舰船边缘的几何形态特征和目标图像能量分布特征。本文采用下列5个量描述目标:中心偏移度 l 、面积变化比 s 、长宽比 r 、填充度 f 和曲折度 c 作为判别云层与舰船的基本特征标准。

1) 中心偏移度。

云层边缘灰度变化不均匀,舰船边缘灰度变化较为对称。更改式(1)中的系数 α 和 β 以提高门限 k' ,进行两次阈值分割,分别得到目标的形心 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,进而得到目标区域的中心点偏移距离,即

$$l = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (2)$$

2) 面积变化比。

某些云层边缘灰度变化对称,通过中心偏移距离无法剔除。考虑到大部分云层边缘较为稀薄,提高灰度阈值后的分割结果面积与第一次分割的面积相差较大,将两次分割得到的面积 S_1 、 S_2 做比较得到面积变化比 $s = S_1/S_2$,可以表示两次分割过程中面积的变化程度。

3) 长宽比。

在计算目标区域其他形态特征时,为保证舰船或

云层边缘的完整性,采用较低的灰度阈值 k' 来对目标区域进行分割。通过此次分割,计算目标的最小外接矩形,可以得到目标的长宽比 $r = a/b$ 。其中, a 和 b 分别为最小外接矩形的长和宽。

4) 填充度。

通过对海面舰船切片的分析可以看出,舰船目标的轮廓基本为一个椭圆结构^[10]。可以定义目标的填充度来描述其与舰船的相似程度,即

$$f = \frac{S_{\text{目标}}}{ab} / \frac{S_{\text{椭圆}}}{ab} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_{\text{目标}}}{ab} \quad (3)$$

5) 曲折度。

为了衡量目标区域的似圆程度,通常定义目标的致密性为 $c_1 = 4\pi S_{\text{目标}}/L_1^2$ (L_1 为目标周长)。而针对图2中所示目标区域,两种情况 $S_{\text{目标}} = 17$, $L_1 = 12$,经计算具有相同的紧致性,这明显是错误的。因此用目标的最小外接矩形得到的内接椭圆的周长与面积计算得到其理论的致密性 $c_2 = 4\pi S_{\text{椭圆}}/L_2^2$ (已知椭圆周长的近似公式为 $L_2 \approx \pi[1.5(a+b) - \sqrt{ab}]$)。定义曲折度为 c_1 与 c_2 的差值,即

$$c = c_1 - c_2 \approx \frac{4\pi ab}{L_1^2} - \frac{4\pi \cdot \frac{1}{4}ab}{\frac{\pi^2}{2} \cdot [1.5(a+b) - \sqrt{ab}]^2} = \frac{4\pi ab}{L_1^2} - \frac{16r}{9r^2 - 12r^{3/2} + 22r - 12r^{1/2} + 9} \quad (4)$$

式中, L_1 为目标区域边长像素数目。舰船目标轮廓较为平滑且与椭圆形状相似,云层目标轮廓较为复杂,目标轮廓复杂导致轮廓像素长度变大,其曲折度也变大。

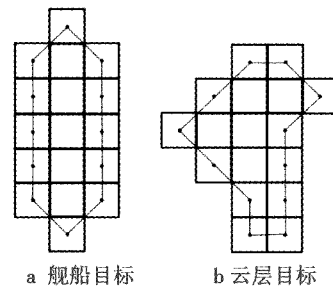


图2 舰船与云层目标示意图

Fig.2 General structure of the ship and cloud

1.3 判决方法

文献[11]采用投票法剔除虚警,有较好的鲁棒性,但这种方法无法有效利用目标的多种特征,因此本文为了充分利用多种特征,将5个特征量进行了如图3所示的组合。

舰船目标长宽比较大,而海面云层几乎没有极为狭长的形状,云层与长宽比较大的舰船目标容易区分。因此可以把长宽比特征分为支持度、不确定区间和反驳

度^[12]。此处定义一个长宽比支持度阈值 M ，当目标长宽比特征属于基于支持的证据时，认为该目标为舰船目标；当目标长宽比特征属于不确定区间时，统计目标的面积变化比、填充度和曲折度，将这 3 种特征组成 1 个三维目标特征矢量 $V(s, c, f)$ 对感兴趣区域进行表达，可以兼顾目标的几何形态特征和边缘能量特征^[13]。

$$V(s, c, f) = k_1 \cdot s + k_2 \cdot c + k_3 \cdot f \quad (5)$$

式中， k_1, k_2, k_3 为加权系数，由大量舰船切片及虚假目标切片通过图 4 所示的支持向量机(SVM)分类器训练得到。如果单独采用并行结构的判决，排除由云层等产生的虚警比较困难，对每个判决准则要求比较高；单独采用串行结构的判决，检测被抑制目标的能力较弱，容易造成漏警。采用如上所述的串并联混合结构，能有效地检测到被抑制的目标并且排斥虚警的产生^[12]。

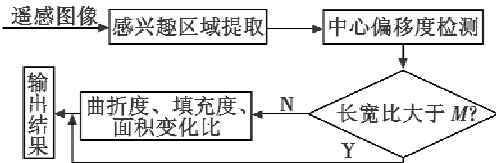


图 3 串并联混合多维特征融合判决结构

Fig. 3 Serial-parallel and multi-feature fusion algorithm

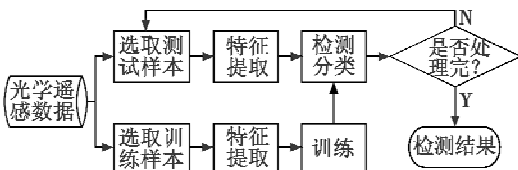


图 4 加权 SVM 分类器训练及检测流程

Fig. 4 Flow chart of detection and training of weighted SVM classifier

2 实验结果分析

为了验证算法的有效性，本文从 10 m 分辨率的 SPOT4 卫星遥感图像中选取了 4 幅具有典型代表作用的海面舰船遥感图像作为实验数据。图 5 为本文算法针对 4 幅遥感图像的感兴趣区域提取效果图，图 6 为舰船检测效果。

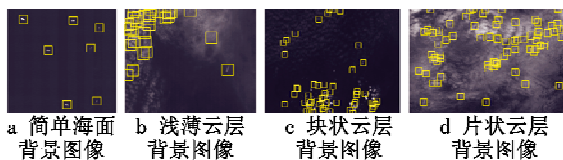


图 5 感兴趣区域提取结果

Fig. 5 Region of interest

本文算法和文献[11]算法的检测数据结果如表 1 所示。从表 1 中数据可以看出，针对简单海面背景、含浅薄云层背景和含片状云层背景的海面光学遥感图像，本文算法和文献[11]算法均有良好的检测效果；

检测结果含 8 个虚警目标，本文算法含 1 个虚警目标。检测结果说明本文算法能适应多种云层干扰，虚警率保持在较低水平。

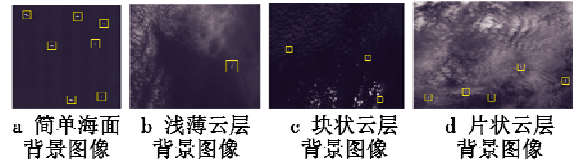


图 6 舰船检测效果图

Fig. 6 Results of the ship detection

表 1 算法检测结果对比

Table 1 Detection performance comparison of the two algorithms

实际场景	目标数	本文算法检出数	文献[11]算法检出数	本文算法虚警数	文献[11]算法虚警数
简单海面背景	7	7	7	0	0
浅薄云层背景	1	1	1	0	0
块状云层背景	2	3	10	1	8
片状云层背景	5	5	5	0	0

为了验证算法对于多种目标切片的有效性，以图 5c 中部分舰船或云层切片为实验目标，对 5 种特征值和特征向量 $V(s, c, f)$ 进行了统计，如表 2 所示。

表 2 部分切片特征数据

Table 2 Features of the ship and cloud pieces

切片	二值图像									
长宽比	8.22	5.73	3.69	2.16	2.88	1.58	2.07	2.31	2.20	1.98
面积变化比	0.12	0.05	0.25	0.18	0.10	0.14	0.24	0.29	0.19	0.33
填充度	0.49	1.25	0.73	0.71	1.67	0.89	3.15	1.46	2.67	1.24
曲折度	0.18	0.64	1.01	1.25	2.59	3.12	3.51	3.64	3.88	4.42
$V(s, c, f)$	0.36	0.82	1.33	1.50	2.86	3.34	3.97	4.08	4.33	4.87

表 2 中左侧两个切片为舰船切片，其余为云层切片。从表 2 中数据可以看出，舰船目标的长宽比通常较大，由于舰船边缘清晰，其面积变化比较小，舰船目标由于边缘几何形态特征与椭圆相似，其填充度和曲折度通常较小。观察切片的特征向量 $V(s, c, f)$ 得到的长度值可以发现，切片中目标边缘越模糊、边缘形态与舰船越不相似，其值越大。因此，通过串并联混合多维特征融合判决可以对舰船和云层目标进行判别。

3 结论

针对含云层干扰的海面背景情况，本文提出了串并联混合多维特征融合判决的舰船目标检测算法，并通过实验给出了多种含云层背景情况的检测结果和部分切片中目标的 5 个特征量，验证了算法的可行性。

能够快速分割感兴趣区域并判别云层与舰船目标,可以有效地排除多种云层干扰。

参 考 文 献

- [1] OTSU N. A threshold selection method form gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1):62-66.
- [2] LCUNG H, DUBASH N, XIE N. Detection of small objects in clutter using a GA-RBF neural network [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems(AES), 2002, 38(1):98-118.
- [3] ARII M, VAN ZYL J J, KIM Y. Adaptive model-based decomposition of polarimetric SAR covariance matrices[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(3):1104-1113.
- [4] 李晓玮,种劲松.基于小波分解的 K-分布 SAR 图像舰船检测[J].测试技术学报,2007,21(4):350-354.
LI X W, CHONG J S. A ship detection method of SAR images based on wavelets and K-distribution [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2007, 21(4):350-354.
- [5] 丁正虎.基于选择性视觉注意机制的遥感图像舰船目标检测与识别[D].上海:复旦大学,2011.
DING Z H. Visual attention-based ship detection and recognition in remote sensing images [D]. Shanghai: Fudan University, 2011.
- [6] 周伟,何东亮,关键,等.基于视觉显著性的雷达视频舰船检测[J].雷达科学与技术,2012,10(1):54-58.
ZHOU W, HE D L, GUAN J, et al. Ship detection in radar video based on visual saliency [J]. Radar Science and Technology, 2012, 10(1):54-58.
- [7] 唐沐恩,林挺强,文贡坚.遥感图像中舰船检测方法综述[J].计算机应用研究,2011,28(1):29-35.
TANG M E, LIN T Q, WEN G J. Overview of ship detection methods in remote sensing image [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(1):29-35.
- [8] 王彦情,马雷,田原.光学遥感图像舰船目标检测与识别综述[J].自动化学报,2011,37(9):1029-1039.
WANG Y Q, MA L, TIAN Y. State of the art of ship detection and recognition in optical remotely sensed imagery [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(9):1029-1039.
- [9] 储昭亮,王庆华,陈海林,等.基于极小误差阈值分割的舰船自动检测方法[J].计算机工程,2007,33(11):239-241.
CHU Z L, WANG Q H, CHEN H L, et al. Ship auto detection method based on minimum error threshold segmentation [J]. Computer Engineering, 2007, 33(11):239-241.
- [10] 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 Application and Project, 2010, 34(5):109-112.
- [11] 高立宁,毕福昆,龙腾,等.一种光学遥感图像海面舰船检测算法[J].清华大学学报:自然科学版,2011,51(1):105-110.
GAO L N, BI F K, LONG T, et al. Ship detection algorithm for optical remote sensing images [J]. Tsinghua Univ:Sci & Tech, 2011, 51(1):105-110.
- [12] KIEIN L A. 多传感器数据融合理论及应用[M].戴亚平,译.北京:北京理工大学出版社,2004.
KLEIN L A. Sensor and data fusion concepts and applications [M]. Translated by DAI Y P. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [13] 王保云,张荣,袁圆,等.可见光遥感图像中舰船目标检测的多阶阈值分割方法[J].中国科学技术大学学报,2011,41(4):293-298.
WNAG B Y, ZHANG R, YUAN Y, et al. A new multi-level threshold segmentation method for ship targets detection in optical remote sensing images [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2011, 41(4):293-298.
- (上接第 32 页)
- LIU F, WANG X M, LI A J, et al. Improved multi-sensor management based on linear Programming [J]. Computer Measurement & Control, 2005, 13(10):1158-1160.
- [7] 杨秀珍,鞠传文,何友.基于效能函数的传感器管理系统仿真[J].系统仿真学报,2003,15(2):251-253.
YANG X Z, JU C W, HE Y. Simulation management of multi-sensor system based on the effectiveness funcion [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(2):251-253.
- [8] 申章,王俊峰.基于蚁群算法的多传感器目标分配模型[J].计算机应用,2009,29(s1):131-133.
SHEN Z, WANG J F. Model of multi-sensor targets based on antcolony algorithm [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(s1):131-133.
- [9] 陈升来.机载传感器管理中的目标优先级评估方法研究[J].计算机测量与控制,2012,20(12):3292-3294, 3298.
CHEN S L. Study on target priority evaluation method in airborne sensor management [J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(12):3292-3294, 3298.