

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 9
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年9月 第17卷 第9期(总第197期)

目次

图像处理和编码

- 自适应阈值 HMRF 模型超分辨率重建 朱虹, 刘薇, 姚杰, 欧阳光振, 刘小乾(1049)
- 亮度补偿变换矩阵的颜色恒常性算法 袁兴生, 王正志(1055)
- 小波变换和稀疏冗余表示的混合图像去噪 李慧斌, 刘峰(1061)
- 基于运动信息自适应的快速运动估计算法 李子印, 杨齐(1069)
- 融合纹理特征的两阶段聚类分割算法 王改华, 李德华(1075)
- 利用纹理和边缘特征的 Criminisi 改进算法 任澍, 唐向宏, 康佳伦(1085)

图像分析和识别

- 激光焊接对接拼缝测量的微景深方法 王平江, 黄雅婷, 齐江飞, 彭芳瑜, 李斌, 唐小琦(1092)
- 基于码本模型和多特征的早期烟雾检测 姜明新, 王洪玉, 蔡兴洋(1102)
- 结合局部特征和全局信息的自适应活动轮廓模型 朱晓舒, 孙权森, 夏德深(1109)
- 高斯颜色模型在瓷片图像分类中的应用 郑霞, 胡浩基, 周明全, 樊亚春(1115)
- 区域生长的轮对图像分割 史倩, 吴开华(1122)
- 图像搜索结果的滑动窗口多标记传播聚类 谷瑞军, 陈圣磊, 陈耿, 汪加才(1128)

图像理解和计算机视觉

- 中介相似性量度的图像匹配 周宁宁, 吕文杰(1135)
- 自适应字典学习的多聚焦图像融合 严春满, 郭宝龙, 易盟(1144)
- 摄像机几何约束及人体定位 陶霖密, 于亚鹏, 邸慧军, 孙洛(1150)

虚拟现实与增强现实

针对层次式累进网格模型的动态评估与调整 王丹华, 卢威, 潘金贵(1158)

医学图像处理

结合形状与纹理特征的椎间盘退化辅助诊断..... 郝世杰, 蒋建国, 郭艳蓉, 詹曙, 李鸿(1168)

改进的核磁共振图像分割与偏移场恢复耦合模型

..... 王顺风, 冀晓娜, 张建伟, 陈允杰, 方林, 詹天明(1175)

遥感图像处理

光学遥感图像低可观测区域舰船检测 周伟, 关键, 何友(1181)

非下采样 Contourlet 变换与脉冲耦合神经网络相结合的 SAR 与多光谱图像融合

..... 金星, 李晖晖, 时丕丽(1188)

“计算机视觉前沿论坛”专栏征文通知 (1196)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996年创刊)

第17卷 第9期

2012年9月16日出版

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院遥感应用研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

北京9718信箱 邮编 100101

电子信箱:jig@irsa.ac.cn

电话:010-64807995 010-82614429

网 址:www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第0346号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司

(中国国际书店)

(北京399信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,

CAS China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational

Mathematics

Chief editor LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board

of Journal of Image and Graphics

(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)

E-mail:jig@irsa.ac.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers

and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation

(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTXFZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 9 September 2012

Contents

Image Processing and Coding

- Adaptive threshold HMRF model for super-resolution reconstruction
..... Zhu Hong, Liu Wei, Yao Jie, Ouyang Guangzhen, Liu Xiaoqian(1049)
- Color constancy algorithms with luminance-compensation transform matrix Yuan Xingsheng, Wang Zhengzhi(1055)
- Hybrid image denosing method based on wavelet transform as well as on a sparse and redundant representations model
..... Li Huibin, Liu Feng(1061)
- Fast motion estimation algorithm based on motion information adaptation Li Ziyin, Yang Qi(1069)
- Texture feature fusion-based two-stage clustering segmentation algorithm Wang Gaihua, Li Dehua(1075)
- Improved Criminisi algorithm with the texture and edge features Ren Shu, Tang Xianghong, Kang Jialun(1085)

Image Analysis and Recognition

- Seam measurement based on micro depth of field lens for laser welding
..... Wang Pingjiang, Huang Yating, Qi Jiangfei, Peng Fangyu, Li Bin, Tang Xiaoqi(1092)
- Early smoke detection based on codebook model and multiple features Jiang Mingxin, Wang Hongyu, Cai Xingyang(1102)
- Adaptive active contour model integrating global and local image fitting energy Zhu Xiaoshu, Sun Quansen, Xia Deshen(1109)
- Porcelain shard images classification based on Gaussian color model Zheng Xia, Hu Haoji, Zhou Mingquan, Fan Yachun(1115)
- Image segmentation for wheel set measurement based on region growing Shi Qian, Wu Kaihua(1122)
- Sliding window multi-label propagation clustering for searched images
..... Gu Ruijun, Chen Shenglei, Chen Geng, Wang Jiakai(1128)

Image Understanding and Computer Vision

- Image matching based on the medium similarity measure Zhou Ningning, Lv Wenjie(1135)
- Multi-focus image fusion using adaptive dictionary learning method Yan Chunman, Guo Baolong, Yi Meng(1144)
- Geometric constraints of locating cameras and people Tao Linmi, Yu Yapeng, Di Huijun, Sun Luo(1150)

Virtual Reality and Augmented Reality

- Dynamic evaluation and modification methods against aggressive mesh hierarchy models
..... Wang Danhua, Lu Wei, Pan Jingui(1158)

Medical Image Processing

- Computer aided diagnosis on intervertebral disc degeneration with shape and texture features
..... Hao Shijie, Jiang Jianguo, Guo Yanrong, Zhan Shu, Li Hong(1168)
- Improved coupled model for MR images segmentation and bias restoration
..... Wang Shunfeng, Ji Xiaona, Zhang Jianwei, Chen Yunjie, Fang Lin, Zhan Tianming(1175)

Remote Sensing Image Processing

- Ship detection from low observable regions in optical remote sensing imagery Zhou Wei, Guan Jian, He You(1181)
- SAR and multispectral image fusion algorithm based on pulse coupled neural networks and non-subsampled Contourlet transform
..... Jin Xing, Li Huihui, Shi Pili(1188)

中图法分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)09-1181-07

论文引用格式: 周伟, 关键, 何友. 光学遥感图像低可观测区域舰船检测[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(9): 1181-1187.

光学遥感图像低可观测区域舰船检测

周伟, 关键, 何友

海军航空工程学院电子信息工程系, 烟台 264001

摘要: 海洋区域受云雾和气流影响导致其光学遥感图像局部对比度低、能见度差, 给舰船监视带来困难。针对这一问题, 首先利用多尺度相位谱对低可观测图像进行重构生成舰船目标的显著图, 然后采用全局阈值快速提取具有较高显著度的感兴趣区域(ROI)。对各个 ROI, 首先利用其外部环状窗口各区间平均亮度的有序统计量来估计阈值对其进行二值分割, 然后分别提取平均显著度、形状复杂度和空间扩展度特征, 训练最小距离分类器对 ROI 进行鉴别, 得到最终的检测结果。用大量受云雾影响的 SPOT4 全色影像进行实验, 结果表明该算法能够满足应用要求。

关键词: 舰船检测; 显著图; 光学遥感; 特征提取; 最小距离分类器

Ship detection from low observable regions in optical remote sensing imagery

Zhou Wei, Guan Jian, He You

Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, YanTai 264001, China

Abstract: Local cloud and fog can cause low contrast and poor visibility in optical remote sensing images of certain ocean regions, which hinders ship surveillance. To overcome this, a multi-scale phase spectrum is used to reconstruct the low observable image to form a saliency map in the first step. Then, a global threshold is used to extract the regions of interest (ROI), which has higher saliency. The order statistic of mean intensities from the sub regions of a circular window around each ROI is used to estimate the local threshold for target pixel segmentation. The mean saliency, shape complexity, and spatial extent are extracted from the target pixels to form a feature vector. Then a minimum distance classifier on the extracted feature vector is trained to discard the false alarms. Results on many cloudy SPOT-4 panchromatic images show the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: ship detection; saliency map; optical remote sensing; feature extraction; minimum distance classifier

0 引言

利用卫星图像对重点海域和重要港口进行监视, 可大大提高海防预警以及海运监测管理、调度的能力^[1-2]。目前海上舰船监视的主要手段是使

用具有全天时、全天候工作能力的星载合成孔径雷达(SAR)^[2], 国内外针对星载 SAR 图像中船只的检测开展了多项研究, 并取得了许多进展^[3-4]。受海洋气候和气象条件的影响, 局部云雾和气流使得光学遥感图像中出现大量对比度低、能见度差的区域, 对舰船的监视十分不利^[5-6], 因此, 有关

收稿日期: 2011-07-19; 修回日期: 2012-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(60672140, 60802088, 61179017); 航空科学基金项目(20095184004)

第一作者简介: 周伟(1980—), 男, 讲师, 2011年于海军航空工程学院获信息与通信工程专业博士学位, 主要研究方向为侦察图像处理、目标检测与识别。E-mail: yeaweam@gmail.com

光学卫星海洋舰船检测的研究大多集中于应用成像质量较好的高分辨率图像对港口、码头停泊船只的检测^[7]。由于高分辨率图像数据量大,为了提高工作效率,通常也会将高分辨率图像下采样至中等分辨率进行检测,然后提取舰船的高分辨率切片进行识别。

中等分辨率光学卫星覆盖范围大且易于解译,具备对大范围海域实施连续监视的潜力,可引导高分辨率卫星对局部海域的可疑目标实施详查,可作为星载 SAR 的补充手段^[8-10]。例如 SPOT4 卫星^[11]可同时获取同一区域的 10 m 全色图像和 20 m 多光谱图像,幅宽 60 km,相机可 31.06° 侧摆,具备对较大范围海域中的大中型船只进行监视的能力。中国 HJ-1A 和 HJ-1B 星上搭载的两台 CCD 相机以星下点对称放置^[12],平分视场,并行观测,联合完成对地幅宽 700 km、地面分辨率 30 m、4 个谱段的推扫成像,两星协同可实现至少两天一次对同一地区进行重复观测。由此可见,研究中等分辨率光学遥感图像低可观测区域舰船检测具有重要意义。

在晴好天气获取的光学遥感图像中,海洋背景的灰度通常呈现较暗且变化缓慢的特点,而舰船目标的灰度则普遍较高,因而在海洋背景中检测船只目标的主流思想就是利用其二者之间的灰度差异对图像进行分割^[3],其实质是一个二元检测问题,关键在于选取合适的阈值。但是实际上要获得一景完全不受云雾影响的光学遥感图像十分困难,云雾在图像中通常表现为高亮的区域,亮度甚至比舰船还高,特别是局部云雾区域,舰船与背景对比度较差,检测难度很大^[9]。尽管有许多统计模型可用于对背景和杂波进行建模,但是简单模型往往缺乏足够的稳健性,而复杂模型的计算复杂度通常比较高,面对因云雾导致图像亮度区域性的剧烈变化,很难找到一个适用的模型。采用滑窗检测的方法,尽管可以克服局部的剧烈变化,但是在大范围图像上进行舰船检测,逐点排查效率很低^[13],而且窗口的大小对检测结果影响也很大。

本文首先利用相位谱对图像进行重构,形成舰船目标的显著图^[13-14],在此基础上,采用全局阈值快速提取具有较大显著度的感兴趣区域(ROI),然后根据其大小,设置合适的环状滑窗,借鉴 OS-CFAR 检测器^[15]的思想,对来自不同方向区间的滑窗单元的平均亮度进行有序统计,形成局部阈值,对 ROI 进行目标分割,然后分别提取对舰船目标有较

好鉴别力的平均显著度、形状复杂度和空间扩展度 3 个特征,设计最小距离分类器完成各个 ROI 的鉴别,得到最终的舰船检测结果。完整的算法流程如图 1 所示。

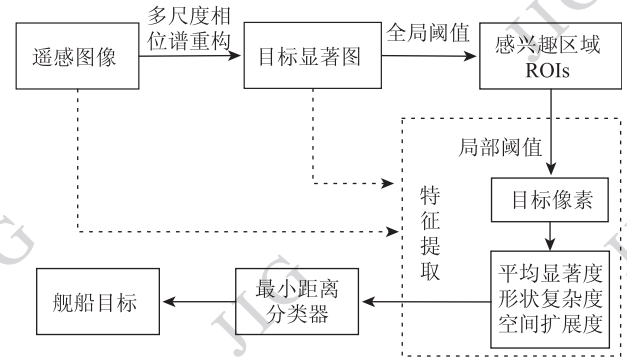


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of proposed algorithm

1 基于相位谱重构的目标显著图

通常情况下海洋和云雾背景的灰度变化均较缓慢,若有舰船出现,则会引起局部的亮度和相位变化。通常的阈值分割方法主要基于亮度差异,但在大范围海洋监视中,局部的云雾、海风等均会引起背景亮度的剧烈变化,这使得均匀海洋背景的假设难以满足,从而导致较多的虚警。本文对多个尺度上的相位谱重建图像加权组合,得到遥感图像的显著图^[13,16],可有效抑制海洋和云雾,增强舰船目标。记 I 为待处理遥感图像,基于相位谱的显著性表示过程如下:

1) 对 I 进行多尺度平滑采样,得到 n 个不同尺度的图像 I_i ,其中, $i=1, 2, \dots, n$ 。

2) 对不同尺度图像 I_i 进行 2 维傅里叶变换

$$\Phi_i = F[I_i] \quad (1)$$

3) 求取相应的相位谱

$$\theta_i = \text{Phase}[\Phi_i] \quad (2)$$

4) 对相位谱进行傅里叶反变换,并将其幅值与大小为 $u \times v$ 高斯滤波器 g 卷积得到不同尺度图像的显著图

$$SM_i = g * |F^{-1}[e^{j\theta_i}]| \quad (3)$$

5) 将不同尺度的显著图插值至原图像尺度后加权组合得到最终的显著图

$$SM = \sum_{i=1}^n a_i \cdot SM_i \quad (4)$$

式中, $Phase[\]$ 表示复数取相位运算, 多尺度采样总数 n 取决于图像分辨率和待检测舰船目标的尺寸, 通常, 为有效检测 10 m 分辨率遥感图像中的大中型舰船, n 取 3 或 4 比较合适。

2 基于全局阈值的 ROI 提取

经过多尺度相位谱重构, 得到舰船目标的显著性图, 目标对比度显著提高。高亮的云雾区域得到了较好的抑制, 显著度较低。因此可利用全局阈值从生成的显著图中快速提取 ROI, 其基本原则是在确保较高检测概率的同时尽可能减少虚警。针对不同的图像阈值应有一定的自适应能力, 一种方法是取最大显著度的 k_0 倍, 另一种方法是利用显著图的均值和方差来估计阈值, 取两种方法中最大者为阈值。记显著图的最大值为 SM_{max} , 均值和标准差分别为 μ_{SM} 和 σ_{SM} , 则阈值为

$$T_0 = \max(k_0 SM_{max}, \mu_{SM} + k_1 \sigma_{SM}) \quad (5)$$

式中, k_1 为调节因子, 通常应不小于 5, k_0 通常取 0.2。超过该阈值 T_0 的像素即可判决为潜在目标像素。为了提高 ROI 提取的稳健性, 需要对检测到的目标像素进行形态学膨胀运算, 并剔除孤立的像素点, 将各个连通区域作为 ROI 提取出来, 并估计各个 ROI 的中心位置和最大长度。考虑到实际舰船目标可能的尺寸范围, 对面积较大的 ROI, 可直接予以剔除。

3 ROI 特征提取与鉴别

在显著图上利用全局阈值进行 ROI 提取没有充分考虑局部图像剧烈变化的影响, 不可避免地会出现一定数量的虚警, 因此还需要对提取的 ROI 进行鉴别, 排除虚警。首先利用局部阈值从 ROI 区域完整分割出目标像素, 然后分别提取对舰船目标有较好鉴别力的平均显著度、形状复杂度和空间扩展度 3 个特征, 设计最小距离分类器完成 ROI 的鉴别。

3.1 利用局部阈值对 ROI 进行分割

为了能够对 ROI 进行目标特征的测量, 首先必须根据 ROI 周围一定范围的背景确定局部阈值完整分割出目标像素, 算法原理如图 2 所示。具体做法是定位原图像中的 ROI 区域, 分别以当前 ROI 的最大长度 l 为内径, $1.2l$ 为外径构建环状滑窗, 提取

以 ROI 中心的参考单元, 并将其划分为 8 个方向区间。分别估计各个区间的均值, 记为 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_8$ 。借鉴 OS-CFAR 检测器^[15]的思想, 首先将均值序列进行排序, 得到 $\mu'_1 \leq \mu'_2 \leq \dots \leq \mu'_8$, 然后将排序后第 i 个方位区间的均值 μ'_i 作为局部分割阈值。为了有效克服高亮度碎云的干扰和局部海洋背景急剧变化的影响, 通常 i 取值为 5~7。

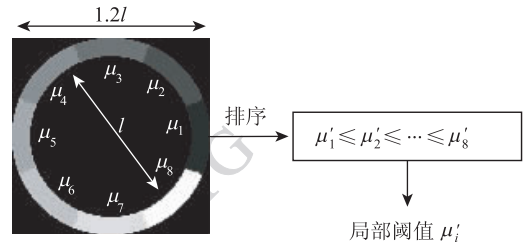


图2 估计局部阈值的算法流程
Fig. 2 Flowchart for local threshold estimation

3.2 目标切片特征提取

1) 平均显著度

对任一待鉴别 ROI, 记利用局部阈值分割出的 N 个目标像素集为 $\{(x_t, y_t), t = 1, \dots, N\}$, 则目标平均显著度定义为

$$T_{sal} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{SM(x_t, y_t)}{SM_{max}} \quad (6)$$

2) 形状复杂度

舰船目标在图像上表现为一个近似米粒的规则形状, 而自然杂波的形状复杂多变且不规则, 计算用 2×2 的窗口全部覆盖目标像素的最小窗口数目 N_2 , 则利用 Hausdorff 维数定义形状复杂度为

$$T_{shap} = \log_2 N - \log_2 N_2 \quad (7)$$

3) 空间扩展度

舰船目标沿船艏线对称通常比较细长, 运动舰船引起的尾迹也与船艏线基本一致, 而云雾及背景杂波通常没有明显的对称结构, 设 ROI 主轴的直线方程为 $L: Ax + By + C = 0$, 则目标像素 (x_t, y_t) 到其主轴的距离为

$$D((x_t, y_t), L) = \frac{|Ax_t + By_t + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (8)$$

计算所有目标像素到主轴的平均距离并用主轴长度 l 归一化, 得到目标的空间扩展度为

$$T_{ext} = \sum_{t=1}^N \frac{D[(x_t, y_t), L]}{l} \quad (9)$$

显然, T_{ext} 越大, 则目标能量越分散, 是舰船的可能性越小。

3.3 最小距离分类器

设 $f_{m_i} = [T_{\text{Sal}}(m_i) \quad T_{\text{Shap}}(m_i) \quad T_{\text{ext}}(m_i)]$ 为第 m_i 个 ROI 样本的特征向量, $i=0, 1$ 分别表示虚警和目标。设虚警样本和目标样本数目分别为 M_0 和 M_1 , 则虚警和目标的特征均值向量分别为

$$f_0 = \frac{1}{M_0} \sum_{m_0=1}^{M_0} f_{m_0} \quad (10)$$

$$f_1 = \frac{1}{M_1} \sum_{m_1=1}^{M_1} f_{m_1} \quad (11)$$

记全部样本数 $M = M_0 + M_1$, 则所有样本的特征均值向量为

$$f = \frac{M_0 f_0 + M_1 f_1}{M} \quad (12)$$

特征向量的类内离散度矩阵 S_w 和类间离散度矩阵 S_b 分别为

$$S_w = \sum_{i=0}^1 \frac{1}{M} \left[\sum_{m_i=1}^{M_i} (f_{m_i} - f)^T (f_{m_i} - f) \right] \quad (13)$$

$$S_b = \sum_{i=0}^1 \frac{1}{M} \left[(f_i - f)^T (f_i - f) \right] \quad (14)$$

显然, 为了可靠地鉴别虚警和真实目标, 期望类内离散度尽可能小, 而类间离散度尽可能大, 需要对特征向量加权。

设权重向量为 W , 定义准则函数

$$J(W) = \arg\max_W \frac{W^T S_b W}{W^T S_w W} \quad (15)$$

通过对训练样本进行训练, 求解式(15)即可得到最优权重向量 W^* , 在进行 ROI 鉴别时, 应用最优权重分别计算待判别样本特征向量 f_{Test} 到虚警和目标样本均值向量的距离, 构建最小距离分类器为

$$\Lambda = \frac{(W^*)^T (f_{\text{Test}} - f_1)^T (f_{\text{Test}} - f_1) W^*}{(W^*)^T (f_{\text{Test}} - f_0)^T (f_{\text{Test}} - f_0) W^*} \quad (16)$$

若 $\Lambda < 1$ 则判别为目标, 否则判别为虚警。

4 实验结果与分析

为了验证本文方法, 从多景不同时间获取的 SPOT4 全色图像(分辨率 10 m)中裁切出 15 块大小为 1000×1000 的子图像作为实验区域, 其共同特点是受云雾干扰比较大, 目标分布比较稀疏, 对比度较差。其中 5 幅子图像用于训练, 其余 10 幅用于测试。由于缺乏舰船的同步信息, 将经审核的人工判读结果作为舰船检测正确与否的评判依据。

训练阶段, 根据人工判读结果从 5 幅训练图像中提取若干目标切片作为目标训练样本, 生成显著度图, 并在非目标区提取显著度较大的若干区域作为虚警训练样本。通常两类训练样本数量不能太少, 实验中两类样本均只取了 10 个。计算得到目标和虚警样本的特征均值向量分别为 $[0.23, 1.36, 0.09]$ 和 $[0.12, 1.53, 0.20]$, 在此基础上, 训练得到的最小距离分类器最优权重为 $[0.38, 0.12, 0.26]$ 。

设在全部测试图像中正确检测目标总数为 N_d , 虚警总数为 N_f , 人工判读的目标数为 N_T , 分别定义检测率 P_d 和品质因子 P_i 来衡量算法性能。

$$P_d = N_d / N_T \quad (17)$$

$$P_i = N_d / (N_d + N_f) \quad (18)$$

表 1 给出了在不同处理阶段, 本文算法在 10 幅测试图像上的总体结果。由于缺少同步的舰船真实信息, 以人工判读的结果作为检验依据。人工判读时仅考虑 5 个像素以上的舰船, ROI 提取时对小于 5 个像素的 ROI 区域均直接剔除, 测试图像中共有舰船目标 93 个。利用全局阈值从显著图上快速提取出 ROI, 这一阶段的虚警率为 $0.082/\text{km}^2$, 考虑到云雾干扰的复杂海洋环境, 少量的漏检也是可以接受的, 通过与人工判读结果的进一步比对发现, 漏检的船只均为对比度较差且尺寸较小的船只。显然要进一步提高检测率, 必须根据图像的实际情况适当降低全局阈值, 但这样会导致虚警率的增高, 品质因子减小。在分类器鉴别阶段, 大量的虚警可以得到有效的鉴别, 但同时又有两个舰船目标被判定为虚警, 但总体性能还是在可接受的范围之内。为进一步提高鉴别算法的性能, 有必要进一步增加训练样本的数量, 还可以考虑提取其他鉴别特征或采用其他类型的分类器。

表 1 不同处理阶段得到的实验结果

Table 1 Experiment results in different stages

处理阶段	N_d	N_f	P_d	P_i
ROI 提取结果	90	82	0.967 7	0.523 3
分类鉴别结果	88	6	0.946 2	0.936 2

为了更加直观地说明本文算法的实际效果, 本文从测试图像中裁切了两块比较典型的场景作为示例, 如图 3 所示。

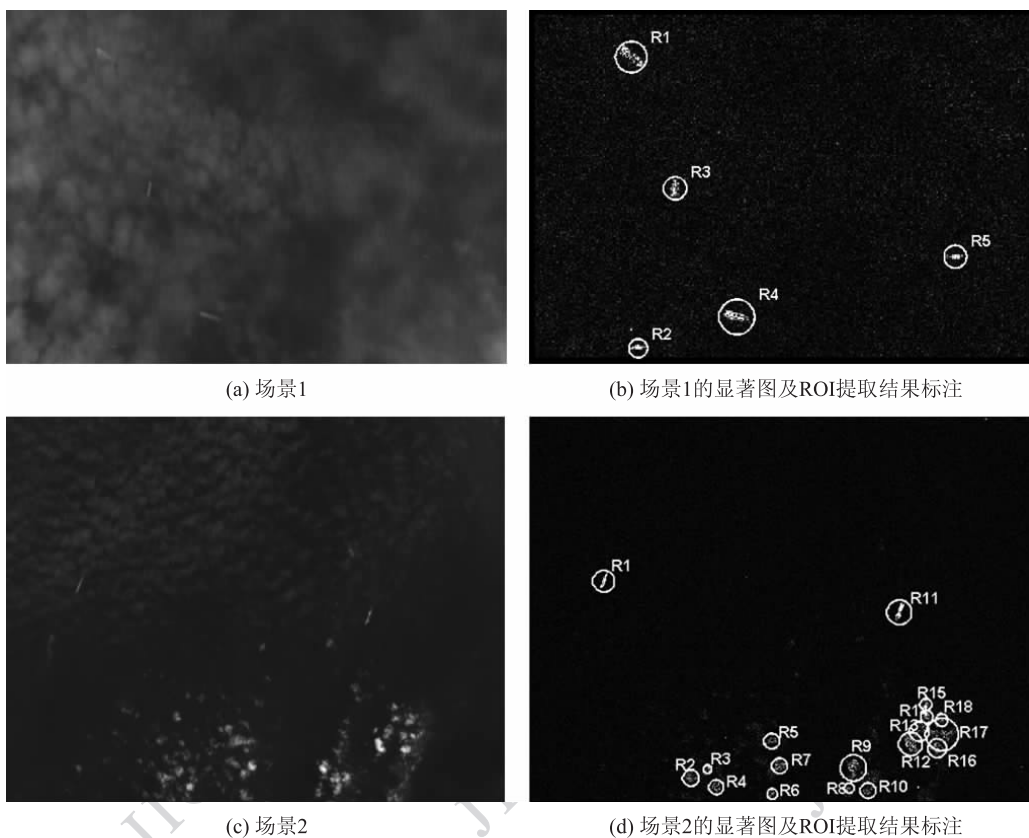


图3 不同场景 SPOT4 图像的显著图及 ROI 提取结果

Fig. 3 Saliency maps of SPOT4 images and extracted ROIs

图3(a)给出的场景1中实际有5艘舰船,但受到云雾的严重干扰,经过多尺度相位谱重构得到的显著图如图3(b)所示,可以看到目标得到明显增强,而其背景得到了较好的抑制;图3(c)给出的场景2中实际有两艘舰船,其显著图如图3(d)所示,虽然目标得到了显著增强,但是部分碎云也表现出很强的显著性。应用式(5),令 $k_1 = 5, k_0 = 0.2$,得到全局阈值在显著性图上进行 ROI 提取,

并剔除面积超过 500 的区域,结果在图3(b)(d)用白色圆圈标注,其中,场景1提取到5个ROI,场景2提取到18个ROI。显然这些ROI中包含了若干虚警,因此需要利用第3节的方法对提取的ROI加以鉴别。

在ROI鉴别阶段,首先应用3.1节给出的方法估计局部阈值在原图像上对ROI进行分割,令 $i = 6$,结果如图4所示。在此基础上,分别提取对舰船

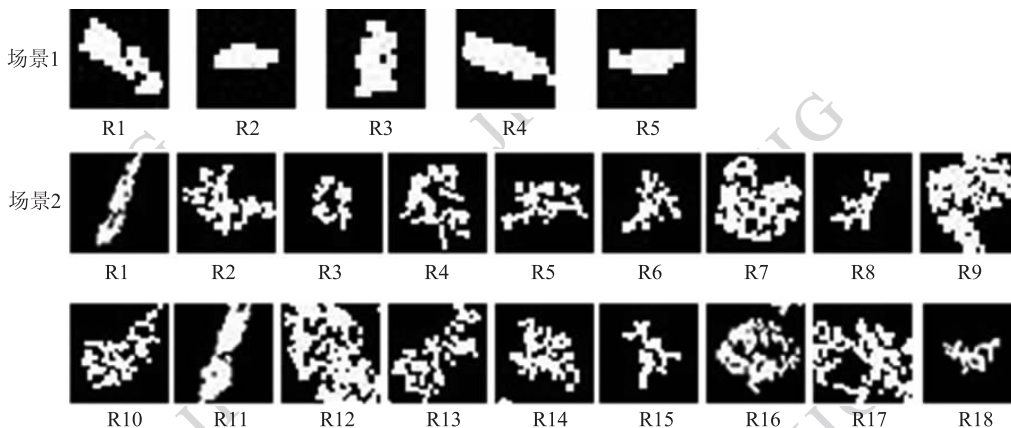


图4 利用局部阈值对 ROI 进行分割的结果

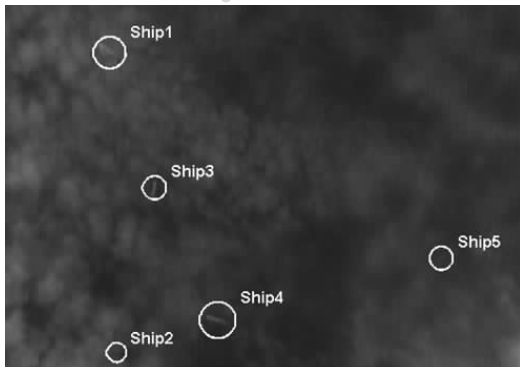
Fig. 4 Segmented binary images on ROIs using local threshold

目标有较好鉴别力的平均显著度、形状复杂度和空间扩展度 3 个特征,利用式(16)给出的最小距离分类器完成 ROI 的鉴别。表 2 给出了部分 ROI 的特征向量及其鉴别结果。最终的结果如图 5 所示,场景 1 中的 5 个 ROI 经鉴别均为舰船目标,场景 2 中, R1 和 R11 为舰船目标,其他均为虚警。

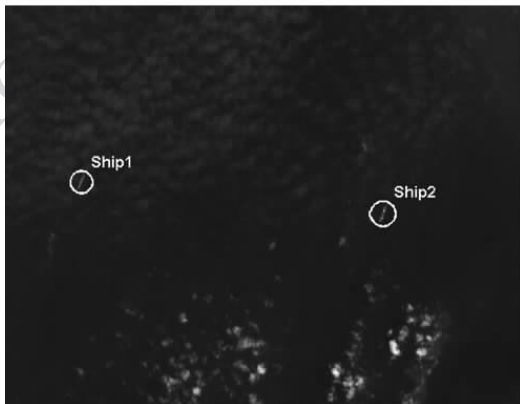
表 2 部分 ROI 的特征鉴别结果

Table 2 Feature discrimination result on several ROIs

ROI 序号	特征向量	Λ	鉴别结果
R1	[0.21 1.41 0.12]	0.085 4	舰船
R2	[0.29 1.30 0.11]	0.109 2	舰船
R3	[0.25 1.45 0.15]	0.154 6	舰船
R1	[0.28 1.22 0.08]	0.107 4	舰船
R2	[0.12 1.43 0.15]	6.585 2	虚警
R3	[0.08 1.52 0.25]	13.321 2	虚警
R4	[0.06 1.45 0.18]	7.569 7	虚警
R9	[0.19 1.47 0.26]	2.352 4	虚警
R11	[0.30 1.30 0.09]	0.121 3	舰船



(a) 场景1的最终检测结果



(b) 场景2的最终检测结果

图 5 不同场景 SPOT4 图像舰船检测的最终结果

Fig. 5 Final results of ship detection on SPOT4 images

5 结 论

本文算法首先利用相位谱对图像进行重构形成舰船目标的显著图,在抑制了云雾的同时增强了目标对比度,然后利用全局阈值高效地提取 ROI。为剔除虚假的 ROI,设计了基于平均显著度、形状复杂度和空间扩展度 3 种特征的最小距离分类器。利用 SPOT4 全色图像进行的实验结果表明,本文算法对于中低分辨率光学遥感图像中的舰船检测是十分有效的。为进一步提高复杂条件下舰船检测算法的性能,后续还将考虑包括目标光谱在内的其他特征,并对分类鉴别器作进一步改进或优化。

参考文献(References)

- [1] Greidanus H, Kourti N. Findings of the DECLIMS project-detection and classification of marine traffic from space [C] //Proceedings of SEASAR 2006. The Netherlands: ESA Publications Division, 2006: S5-12.
- [2] Zhang F L, Zhang L, Wu B F. Progress of ship detection technology and system based on remote sensing technology in European Union [J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(4): 552-562. [张风丽, 张磊, 吴炳方. 欧盟船舶遥感探测技术与系统研究的进展[J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 552-562.]
- [3] Tang M E, Lin T Q, Wen G J. Overview of ship detection methods in remote sensing image [J]. Application Research of Computer, 2011, 28(1): 29-36. [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): 29-36.]
- [4] Liao M S, Wang C C, Wang Y, et al. Using SAR images to detect ships from sea clutter [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(2): 194-198.
- [5] Christina C, Fabrice M, Michel P. Using SPOT-5 HRG data in panchromatic mode for operational detection of small ships in tropical area [J]. Sensors, 2008, 8(5): 2959-2973.
- [6] Chen H L, Lei L, Zhou S L. A method of anti-disturbance by ragged clouds for detecting ships on the sea. Computer Engineering & Science, 2010, 32(12): 46-49. [陈海亮, 雷琳, 周石琳. 一种抗碎云干扰的海上舰船目标检测方法[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(12): 46-49.]
- [7] Zhao Y H, Wu X Q, Wen L Y, et al. Ship target detection scheme for optical remote sensing images [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(8): 102-106. [赵英海, 吴秀清, 闻凌云, 等. 可见光遥感图像中舰船目标检测方法[J]. 光电工程, 2008, 35(8): 102-106.]
- [8] Tian M H, Wan S H, Yue L H. Ship detection in remote sensing

- images with complex sea surface background [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2008, 29(11): 2162-2166. [田明辉, 万寿红, 岳丽华. 遥感图像中复杂海面背景下的海上舰船检测[J]. 小型微型计算机系统, 2008, 29(11): 2162-2166.]
- [9] Zhou H, Guo J, Zhu C R, et al. Ship detection from optical remote sensing images based on PLSA model [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(4): 663-680. [周晖, 郭军, 朱长仁, 等. 引入 PLSA 模型的光学遥感图像舰船检测[J]. 遥感学报, 2010, 14(4): 663-680.]
- [10] Gao L N, Bi F K, Long T, et al. Ship detection algorithm for optical remote sensing images [J]. *Journal of Tsinghua University: Sci & Tech*, 2011, 51(1): 105-110. [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.]
- [11] Mei A X, Peng W L, Qin Q M, et al. *Introduction to Remote Sensing* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 294. [梅安新, 彭望路, 秦其明, 等. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 294.]
- [12] Bai Z G, Shen Z, Wang Z N. HJ-1A/1B Satellites technology [J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 18(6): 1-11. [白照广, 沈中, 王肇宁. 环境减灾-1A、1B 卫星技术[J]. 航天器工程, 2009, 18(6): 1-11.]
- [13] Ding Z H, Yu Y, Wang B, et al. Visual attention-based ship detection in multispectral imagery [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2011, 23(3): 419-425. [丁正虎, 余映, 王斌, 等. 选择性视觉注意机制下的多光谱图像舰船检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(3): 419-425.]
- [14] Hou X D, Zhang L Q. Saliency detection: a spectral residual approach [C] // *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2007: 128.
- [15] He Y, Guan J, Meng X W. *Radar Target Detection and CFAR Processing* [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 6-8, 54-60. [何友, 关键, 孟祥伟. 雷达目标检测与恒虚警处理[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2011: 6-8, 54-60.]
- [16] Zhou W, Guan J, Zhang G H. A detection scheme for targets of interest in high resolution remote sensing imagery [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(2): 115-121. [周伟, 关键, 张国华. 高分辨率遥感图像中感兴趣目标的提取算法[J]. 光电工程, 2011, 38(2): 115-121.]