文章编号　1004-924X(2017)09-2461-08

基于多尺度多特征视觉显著性的海面舰船检测

丁　鹏[1,2],张　叶[1*],贾　平[1],常旭岭[1]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中科院航空光学成像与测量重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为了精确地检测到舰船目标,提出了一种基于多特征、多尺度视觉显著性的海面舰船目标检测方法。该方法首先利用多尺度自适应的顶帽算法抑制云层、油污的干扰,然后提取双颜色空间特征以及边缘特征构成双四元数图像进行舰船显著性检测。由于充分利用了双四元数图像,故可对多个特征尺度进行处理,并保证不同尺度特征之间关联性。该方法还利用人眼对不同用大小的图像关注目标不同的特点对图像进行上下采样以避免漏检和检测重叠。在得到显著图后利用自适应图像分割(OTSU)算法确定舰船所在的区域,并在原图上标定、提取舰船目标。在多种海面情况下进行了实验分析,结果表明:该算法可以排除多种干扰,精确地检测到舰船目标,真正率达 97.73%,虚警率低至 3.37%,相较于他频域显著性检测算法在舰船检测方面有明显的优势。

关　键　词:目标检测;舰船检测;频域视觉显著性;多尺度形态学;双四元数
中图分类号:TP391.4;U675.79　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3788/OPE.20172509.2461

Ship detection on sea surface based on multi-feature and multi-scale visual attention

DING Peng[1,2], ZHANG Ye[1*], JIA Ping[1], CHANG Xu-ling[1]

(1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: dingpeng14@mails.ucas.ac.cn*

Abstract: To detect ship targets accurately, a new method to detect ship targets on sea surface was proposed based on multi-feature and multi-scale visual saliency. Firstly a scale-adaptive top-hat algorithm was used to suppress the interference of clouds and oil. Then, the double-quaternion images are constructed by using double-color spatial features and edge features to detect the saliency of ships. This method makes full use of the double quaternion images, so it can be operated at the same time in a number of channels, and can save operation time to guarantee the characteristics of different scale characteristics. Furthermore, the method also uses the character that the human eye focused on the different targets for image with different sized in implement of the up-down sampling to avoid the leak overlapping in image detection. When the last saliency map is obtained, the ships were segmented to

收稿日期:2017-01-18;**修订日期**:2017-03-20.
基金项目:吉林省重大科技攻关专项基金资助项目(No. 11ZDGG001);吉林省自然科学基金资助项目(No. 20150101017JC)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

ensure the target location by using the OTSU algorithm, and then the ship target was marked and extracted in the original image. The experiments were analyzed in the several sea conditions. Experimental results show that the algorithm eliminates the interference of cloud, fog and oil pollution and ship targets are detected accurately. With this algorithm, true rate iss 97.73%, and the false alarm rate as low as 3.37%. Compared to other frequency domain saliency detection algorithms in ship detection, this algorithm has obvious advantages.

Key words: target detection; ship detection; visual saliency on frequency domain; multi-scale morphology; double quaternion

1 引 言

舰船检测是军事、民用部门的传统任务。精确检测舰船目标可有效判断敌人的军事动向,为打赢战争,捍卫领海,保证国家和人民安全提供强大的信息支持。随着海洋探索力度以及远洋贸易、运输的加强,舰船的高效检测还进入了打击走私犯罪、提高海上交通效率、实施海上救援等应用领域。目前,由于光学遥感技术的发展,卫星光学遥感图像分辨率有了很大的提高,利用可见光遥感图像进行海面舰船目标检测也得到了迅速发展。其中,利用视觉显著性进行舰船目标检测是较为流行和高效的办法[1]。视觉显著性[2-5]是模拟人眼可快速集中于感兴趣区域而提出的算法模型,因为利用卫星图像进行舰船目标检测,舰船目标相对较小,故利用检测小目标效果较好的频域显著性算法是明智的选择:Ren 利用多尺度光谱残差法(Multi-scale-SR)检测海面舰船目标[6];Yao 利用 Multi-scale-SR 和最大信息环绕法(MSS)相结合检测海面舰船目标[7]。Ren 提出的 Multi-scale-SR 没有考虑各个尺度之间的关联性,且光谱残差(SR)算法需要将原始图像的尺寸转为 64×64 大小,对图像处理不具有普适性;Yao 的 Multi-scale-SR 和 MSS 结合的方法先利用 SR 在不同尺度得到显著图,在此基础上再利用 MSS 算法进一步进行显著性检测得到结果显著图,此算法对 SR 算法依赖性太强且依然没有考虑尺度之间的关联性,另外该方法不适合多个舰船目标的检测。

四元数傅里叶变换(Phase Spectrum of Quaternion Fourier Transform,PQFT)算法是在 SR 算法的基础上改进和发展而来的。PQFT 算法和 SR 算法同样属于频域显著性算法,且 PQFT 算法可以处理更多的特征并保证之间的关联性。原始 PQFT 算法[8-10]通过提取运动特征,2 个颜色特征,以及强度特征构成四元数图像[11]来计算目标的显著图。本文先利用多尺度自适应顶帽算法抑制干扰,其次利用双四元数图像可以同时处理更多特征尺度并保证各尺度特征间关联性的特点进行目标显著性提取。该方法针对静态图像的特点,提取相应的特征进行目标显著性检测,并利用人眼对不同大小图像所关注显著性对象不同的特点进行尺度上下采样以避免部分目标漏检和检测重叠。将本文提出的显著性检测算法配合提出的自适应多尺度形态学顶帽算法、自适应图像分割(OTSU)算法[12-14]以及连通区域标记算法用于卫星光学遥感图像中的舰船目标检测。实验表明本文提出的算法模型可以精确地检测到海面舰船目标。

2 相关原理以及分析

2.1 PQFT 算法

PQFT 算法是郭提出的一种频域显著性算法[8-10]:该算法将原图转为包含颜色尺度、强度尺度以及运动尺度的四元数图像[15],再对四元数图像进行处理以计算目标的显著图。具体流程如下:四元数图像可表示为:

$$q(x,y)=M(x,y)+RG(x,y)\mu_1+BY(x,y)\mu_2+I(x,y)\mu_3, \tag{1}$$

其中:$\mu_i^2=1, i=1,2,3$,且 $\mu_1\mu_2=\mu_3$,$\mu_1\perp\mu_2$,$\mu_1\perp\mu_3$,$\mu_2\perp\mu_3$;$RG(x,y)$和 $BY(x,y)$分别为人脑正

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

常观测物体的颜色尺度，$I(x,y)$ 为强度尺度，$M(x,y)$ 为运动尺度。

对其进行化简得到表达式如下：

$$q(x,y)=f_1(x,y)+f_2(x,y)\mu_2, \tag{2}$$

$$f_1(x,y)=M(x,y)+RG(x,y)\mu_1, \tag{3}$$

$$f_2(x,y)=BY(x,y)+I(x,y)\mu_2. \tag{4}$$

PQFT 以及逆变换分别表示为：

$$F_i(u,v)=\frac{1}{\sqrt{MN}}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}\mathrm{e}^{-\mu_1 2\pi((xv/M)+(yu/N))}f_i(x,y), \tag{5}$$

$$f_i(x,y)=\frac{1}{\sqrt{MN}}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}\mathrm{e}^{\mu_1 2\pi*xv/M)+(yu/N))}F_i(u,v),\quad i=1,2. \tag{6}$$

对四元数图像进行傅里叶变换得到：

$$Q(u,v)=F_1(u,v)+F_2(u,v)\mu_2. \tag{7}$$

用指数形式表示如下：

$$Q(u,v)=\|Q(u,v)\|\mathrm{e}^{\mu\Phi}, \tag{8}$$

令 $\|Q(u,v)\|=1$；并作傅里叶逆变换得到：

$$q_2=a+b\mu_1+c\mu_2+d\mu_3, \tag{9}$$

$$S(x,y)=g(x,y)*|q_2(x,y)|^2, \tag{10}$$

其中 $S(x,y)$ 为得到的特征显著图。PQFT 算法充分利用了四元数图像可以在多个通道上同时进行操作，可节省操作时间，并保证不同尺度特征之间关联性的特点。

相较于其他显著性算法，利用 PQFT 算法进行海面舰船目标检测存在很多优点和不足。为解决原始 PQFT 算法的不足，作者曾利用更加符合人眼观测的 CIE-Lab 颜色尺度空间并结合 gabor 滤波提取方向特征进行舰船显著性检测，但是在抑制云层、油污等干扰方面采用固定尺度的顶帽算法，另外仅仅采用了单一尺度的颜色空间，且没有考虑黑白极性共存的问题。为进一步提高检测的精度，本文提出以下算法。

3　本文提出的算法

为进一步提高海面舰船目标检测的精度，本文先利用黑白极性转换和提出的多尺度自适应顶帽算法抑制云层、油污的干扰，其次提取利用双颜色空间特征以及边缘特征构成的双四元数图像进行舰船显著性检测并利用上下采样降低漏检，最后进行分割和标定。本文算法的具体改进以及实现步骤如下。

步骤 1：当黑白极性舰船同时存在时候，白极性舰船目标的显著性往往高于黑极性舰船的显著性，容易造成黑极性舰船的漏检，尤其本文采用顶帽算法抑制云层以及背景的干扰，当黑白极性舰船同时存在时，图像经过顶帽算法处理后会造成黑极性舰船的显著性进一步降低，容易造成漏检，所以本文对原图进行黑白极性转换，对原图和黑白极性转换图同时进行后续处理。

步骤 2：形态学处理。形态学处理在抑制背景减弱干扰方面有着十分重要的应用。研究发现利用顶帽算法[16]进行图像背景抑制有利于降低云层、油污等干扰，有利于后续提取目标的显著性。顶帽算法表示为：

$$g-g\circ B=g-((g\Theta B)\oplus B), \tag{11}$$

其中：$\circ$ 表示开操作，$\oplus$ 以及 Θ 分别代表膨胀和腐蚀操作。如 A 被 B 膨胀，定义为：

$$A\oplus B=\{z|(\hat{B})_z\cap A\neq\varnothing\}. \tag{12}$$

如 A 被 B 腐蚀，则定义为：

$$A\Theta B=\{z|(B)_z\subseteq A\}, \tag{13}$$

其中：$\varnothing$ 表示空集，$\hat{B}$ 表示 B 的反射，$(B)_z$ 表示点 z 对集合 B 的平移；B 表示为结构元，g 是原图。不同尺度的结构元对图片处理的效果不一样，据此本文提出一种多尺度自适应的顶帽算法以较好地抑制干扰对目标检测的影响，提高算法的可移植性和自适应性。尺度过大的形态学结构元很难起实际的作用，故初始结构元半径大小选择为图片短边的 $\frac{1}{16}$，本文提出的尺度自适应的形态学处理具体表达式如下：

$$[m,n]=size(g), \tag{14}$$

式中取 m,n 中较小的值为 c。则设置最大尺度因子为：

$k_{\max}=floor(\log_2(c))$；$floor(\cdot)$ 表示四舍五入。

由此本文提出的多尺度自适应顶帽算法表达如下：

$$H_{k-3}=floor\left(\frac{c}{2^k}\right),k=4,5,\cdots,k_{\max}, \tag{15}$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$B_{k-3}=strel('disk',H_{k-3}),k=4,5,\cdots,k_{\max},\tag{16}$$

$$g_{k-3}=g-g\circ B_{k-3},k=4,5,\cdots,k_{\max}.\tag{17}$$

对不同尺度得到的处理结果，本文利用熵值作为权重判断条件：

$$w_{k-3}=entropy(g_{k-3}),k=4,5,\cdots,k_{\max},\tag{18}$$

其中 $entropy$ 表示求熵的函数，最后得到的图片表示为：

$$g=\sum_{i=1}^{k\max-3}w_i g_i.\tag{19}$$

步骤3：人眼对不同大小图像所关注的显著性对象不同，所以本文进一步对形态学处理后的图像进行上下采样，然后同时对各尺度图像进行显著性检测。

步骤4：对形态学处理后的图像进行特征提取构成双四元数图像，并进行显著性检测。原始PQFT算法在人眼观测物体颜色空间进行显著性检测，但是对不同的目标，有的颜色空间效果好，有的颜色空间效果差，所以本文不仅选择更加符合人眼观察模型的CIE-Lab颜色空间，还选择常用的CIE-RGB颜色空间进行目标显著性检测，充分利用双四元数图像相较于四元数图像可以处理更多特征尺度并保证这些特征尺度关联性的优点。除了选取双颜色空间特征尺度之外，本文还利用离散余弦变换代替傅里叶变换以获得更好的频域操作结果。原始PQFT算法选取强度尺度、2个颜色尺度和运动尺度作为算法的特征尺度，本文处理静态图像，没有运动特征尺度，所以选取边缘尺度作为计算特征之一。对图像进行显著图计算的算法流程表示如下：

$$e(x,y)=edge(I(x,y)),\tag{20}$$

$$\begin{aligned}q_1(x,y)=&e(x,y)+L(x,y)\mu_1+\\&a(x,y)\mu_2+b(x,y)\mu_3+\\&i*(R(x,y)\mu_1+G(x,y)\mu_2+B(x,y)\mu_3),\end{aligned}\tag{21}$$

$$Q(u,v)=DCT(q_1(x,y))=\|Q(u,v)\|e^{\mu\Phi},\tag{22}$$

式中：I 表示经过形态学处理后的图像，$e(x,y)$ 表示边缘特征尺度，DCT表示离散余弦变换。

令 $\|Q(u,v)\|=1$，并对式(22)做离散余弦逆变换：

$$q_2(x,y)=DCT^{-1}(Q(u,v)),\tag{23}$$

$$S(x,y)=g(x,y)*||q_2(x,y)||^2,\tag{24}$$

式中：$g(x,y)$ 表示二维高斯滤波，DCT^{-1} 表示离散余弦逆变换，$S(x,y)$ 表示最终得到的显著图。当对视频进行处理时候，可以将运动特征加入公式(21)中。

得到不同尺度图片的显著图后，对其进行简单归一化相加后进行显著性融合，最后得到结果显著图。

步骤5：在得到舰船显著图后，采用OTSU算法自动求取阈值进行分割，得到舰船所在的位置。但是有时分割结果不能较好地得到目标的全部信息，所以在得到分割结果后再在原图对应位置上使用连通区域标记算法提取舰船目标。

本文设计的舰船目标检测算法的整体流程图如图1所示。

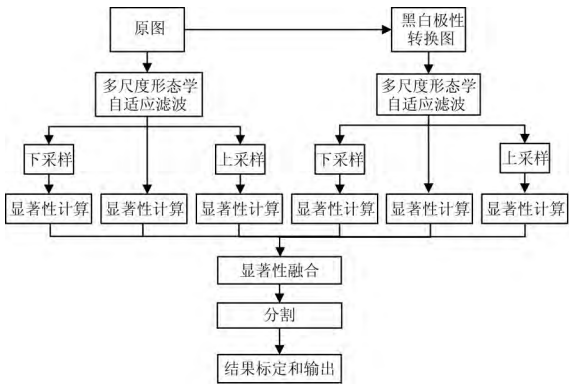

图1 本文设计算法流程图

Fig. 1 Flow chart of designed algorithm

4 实验结果与分析

实验首先证明了提出的基于熵值的多尺度顶帽算法的有效性；其次，实验对多种海面状况下的舰船进行检测并与原始PQFT算法以及SR算法对比，以检验设计算法的正确性和优越性。实验中图像均取自Google earth。实验所用编程软件有Matlab2014a。电脑CPUi7，8GRAM，频率2.5 GHz。本文将设计的算法与原始PQFT算法以及同样是频域常用算法的SR算法进行比较。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4.1　多尺度自适应顶帽算法处理结果分析

顶帽算法在减弱云层、油污等干扰方面存在较大的应用，然而使用不同尺度的结构元进行图像处理的效果不一样。据此本文提出了一种基于熵值的多尺度自适应形态学顶帽算法，该算法可以得到较好的处理结果，如图 2 所示：

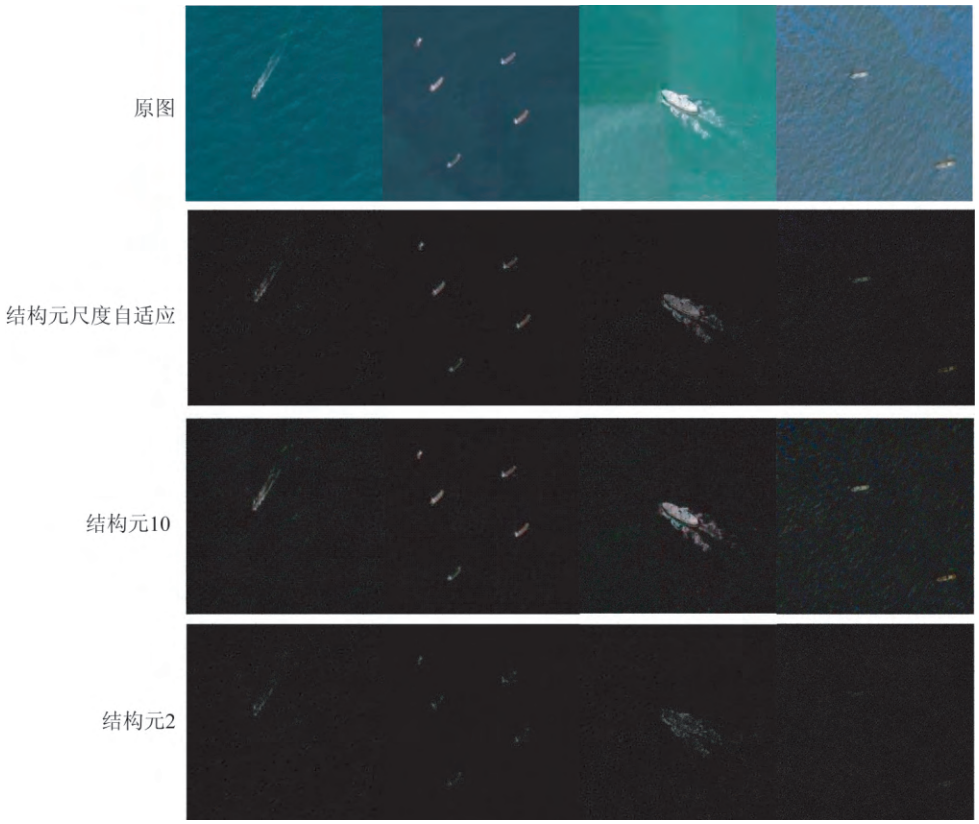

图 2　不同尺度顶帽算法对比

Fig. 2　Comparison of top hat algorithms at different scales

从上述的实验可以看出：对不同的目标，有时较大尺度的结构元取得较好结果，有时较小尺度的结构元取得较好结果，而本文提出的基于熵值的多尺度自适应顶帽算法能够很好地减弱背景等影响，取得了较好的处理结果。

4.2　视觉显著性检测结果分析

本文在多种情况下考证本文算法的精确性。在不同环境下，显著性算法得到的结果显著图如图 3 所示。

对各显著性算法得到的显著图进行分割并在原图上进行标记的结果如图 4 所示。

本文列举了黑极性情况，黑白极性共存的情况，多目标情况，云层干扰较为严重的情况，纹理相对复杂的情况。从显著图以及最后的区域标记结果可以看出：SR 算法以及 PQFT 算法得到的结果中云层干扰严重，且二者均容易检出干扰项，SR 在多目标时容易造成混检；纹理相对复杂时，PQFT 算法难以有效，而本文设计的算法可以较为高效地检出多种情况下的目标。

利用本文算法在更多的情况下如：油污，薄云等环境下的检测结果如图 5 所示。

4.3　定量分析

本文进一步分析真正率和虚警率来证明本文算法的优势。TPR(真正率)，FA(虚警率) 定义为：

$$TPR=\frac{TP}{TP+FN}=\frac{TP}{NT}, \tag{25}$$

$$FA=\frac{FP}{FP+TP}=\frac{FP}{NC}, \tag{26}$$

其中：NT 为目标总数，NC 为检出的目标数，TP 为检出的正确目标数，FN 为虚假目标被检为虚假目标的个数，FP 为检出的虚假目标数。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

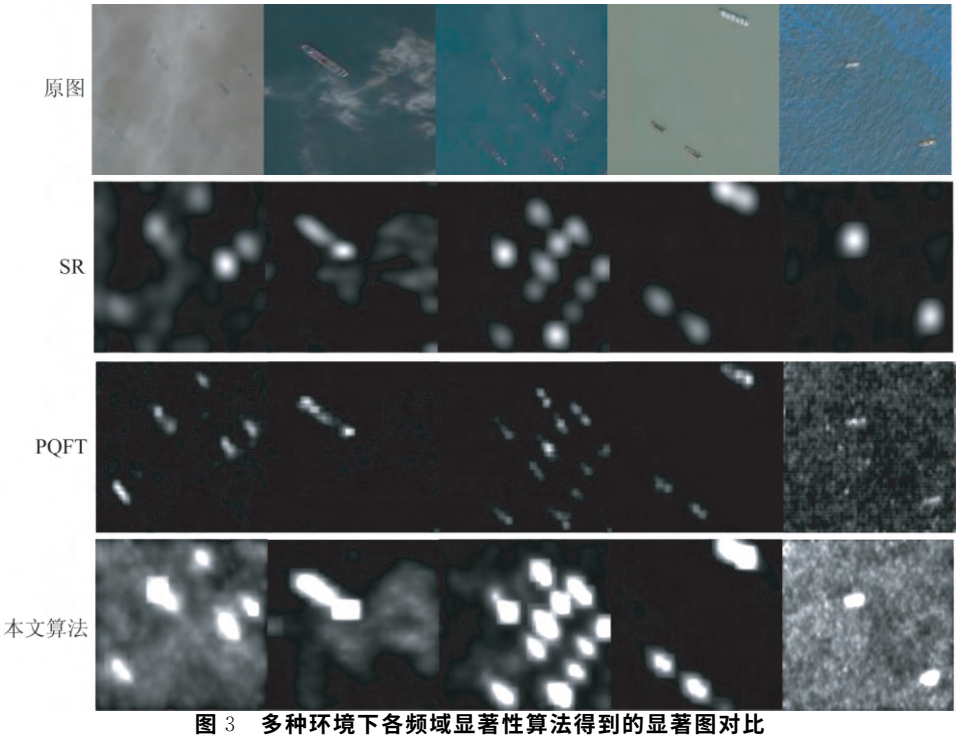

图 3 多种环境下各频域显著性算法得到的显著图对比

Fig. 3 Comparison of frequency domain saliency algorithms in a variety of environments

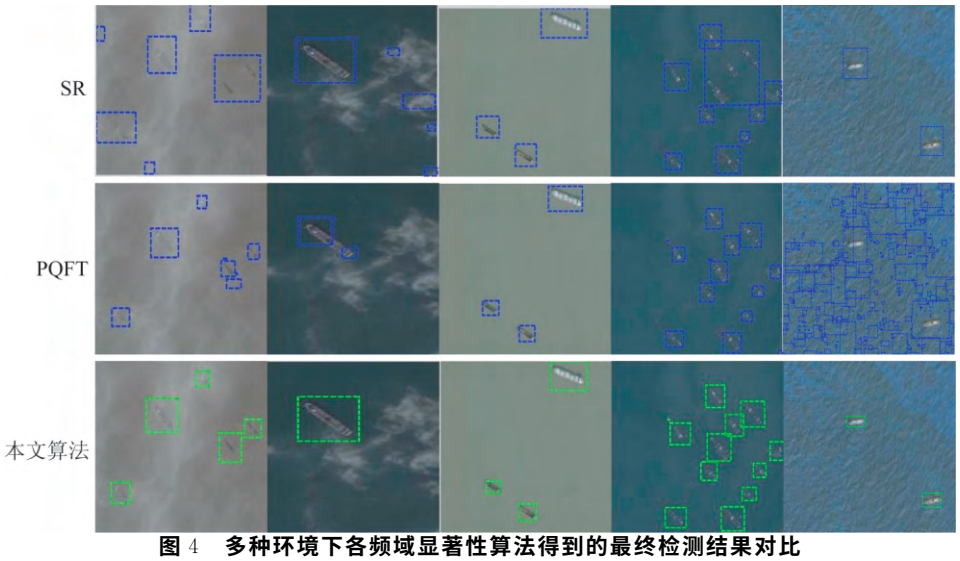

图 4 多种环境下各频域显著性算法得到的最终检测结果对比

Fig. 4 Comparison of final test results obtained by different frequency domain saliency algorithms in a variety of environments

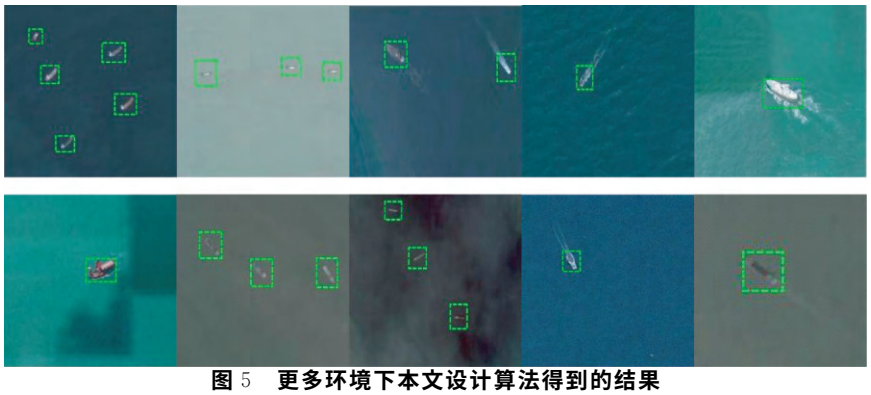

图 5 更多环境下本文设计算法得到的结果

Fig. 5 Results of designed algorithm in more environments

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　不同算法的真正率和虚警率

Tab.1　True rates and false alarm rates for different algorithms

Algorithm	SR	PQFT	Ours
NT	176	176	176
NC	185	186	178
TP	153	157	172
FP	32	29	6
TPR/%	86.93	89.20	97.73
FA/%	17.30	15.59	3.37

实验中选取 120 幅图像，共 176 个目标，实验结果如表 1 所示。

5　结　论

为精确检测到海面上的舰船目标，本文提出利用以熵为判断依据的多尺度自适应顶帽算法来初步处理图像。为避免顶帽算法带来的弊端，对图像进行黑白极性转换，再利用改进的视觉显著性算法求取目标显著图，并对结果进行分割、标记，得到最后的结果。研究发现本文设计的算法在简单海面、薄雾、薄云、油污、存在黑极性舰船、黑白极性共存等多种海面情况下均能够较为理想地检测出目标，真正率达 97.73%，虚警率为 3.37%。结果证明了本文算法的正确性及优越性。

参考文献：

[1] SONG Z N, SUI H G, WANG Y J. Automatic ship detection for optical satellite images based on visual attention model and LBP [C]. 2014 *IEEE Workshop on Electronics, Computer and Applications*, *IEEE*, 2014:722-725.

[2] BORJI A, CHENG M M, JIANG H Z, et al.. Salient object detection: a benchmark[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(12):5706-5722.

[3] CHENG M M, MITRA N J, HUANG X L, et al.. Global contrast based salient region detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37(3):569-582.

[4] KOSMIDOU V E, ADAM A, PAPADANIIL C D, et al.. Gender effect in human brain responses to bottom-up and top-down attention using the EEG 3D-vector field tomography [C]. 2015 37*th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (*EMBC*), *IEEE*, 2015:7574-7577.

[5] BUSO V, GONZALEZ-DÍAZ I, BENOIS-PINEAU J. Object recognition with top-down visual attention modeling for behavioral studies [C]. 2015 *IEEE International Conference on Image Processing* (*ICIP*), *IEEE*, 2015:4431-4435.

[6] REN L, SHI C J, RAN X. Salient target detection method under sea surface environment based on multi-scale phase spectrum [C]. 2011 *Seventh International Conference on Natural Computation* (*ICNC*), *IEEE*, 2011:977-981.

[7] YAO Z J. Small target detection under the sea using multi-scale spectral residual and maximum symmetric surround [C]. 2013 10*th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery* (*FSKD*), *IEEE*, 2013:241-245.

[8] BIAN P, ZHANG L M. *Biological Plausibility of Spectral Domain Approach for Spatiotemporal Visual Saliency* [M]. KÖPPEN M, KASABOV N, COGHILL G. Advances in Neuro-Information Processing. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009:251-258.

[9] GUO C L, MA Q, ZHANG L M. Spatio-temporal saliency detection using phase spectrum of quaternion fourier transform [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, *IEEE*, 2008:1-8.

[10] GUO C L, ZHANG L M. A novel multiresolution spatiotemporal saliency detection model and its applications in image and video compression [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(1):185-198.

[11] SAID S, LE BIHAN N, SANGWINE S J. Fast complexified quaternion fourier transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(4):1522-1531.

[12] BAHADARKHAN K, KHALIQ A A, SHAHID M. A morphological hessian based approach for retinal blood vessels segmentation and denoising u-

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

sing region based otsu thresholding [J]. *PLoS One*, 2016, 11(7): e0158996.

[13] SHA C S, HOU J, CUI H X, et al.. Gray level-median histogram based 2D otsu's method [C]. 2015 *International Conference on Industrial Informatics-Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII)*, *IEEE*, 2015: 30-33.

[14] BAHADARKHAN K, KHALIQ A A, SHAHID M. A morphological hessian based approach for retinal blood vessels segmentation and denoising using region based otsu thresholding [J]. *PLoS One*, 2016, 11(7): e0158996.

[15] ELL T A, SANGWINE S J. Hypercomplex fourier transforms of color images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(1): 22-35.

[16] 姜春雪, 郭海涛, 喻金桃, 等. 假高帽变换的高分影像居民地信息提取[J]. 测绘科学, 2016, 41(3): 104-108, 53.
JIANGC X, GUO H T, YU J T, et al.. Residential area extraction of high resolution RS imagery based on multiple contour structuring elements with pseudo top-hat transformation [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(3): 104-108, 53. (in Chinese)

作者简介:

丁 鹏(1992—),**男,江苏扬州人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事图像处理、深度卷积神经网络,目标检测的研究。**E-mail: dingpeng14@mails.ucas.ac.cn

导师简介:

贾 平(1964—),**男,吉林延吉人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,主要从事图像处理、智能系统处理,红外成像与光电测量的研究。**E-mail: jiap@ciomp.ac.cn

通讯作者:

张 叶(1981—),**女,吉林长春人.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员.主要从事计算机视觉和机器学习等方面的研究。**E-mail: y.zhang@ciomp.ac.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net