

基于多特征加权的 SAR 影像舰船检测优化方法

赵泉华¹, 王肖¹, 李玉¹, 王光辉²

(1. 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心, 北京 100048)

摘 要: 针对虚警目标较多的复杂场景中, 传统舰船检测算法检测结果精度偏低的问题, 提出了一种基于多特征加权的 SAR 影像舰船检测优化方法。首先, 采用标记分水岭算法对 SAR 幅度影像进行去陆操作; 其次, 利用基于对数正态分布的恒虚警率算法, 得到去陆 SAR 影像的候选目标; 再次, 提取候选目标的长宽比、舰船面积和对比度 3 个特征; 最后, 提出变异系数法对 3 个特征进行权重分配, 并结合候选目标的归一化特征矢量计算其特征置信度, 再确定最佳置信度, 去除候选目标中的虚警目标, 优化舰船检测结果。为了验证所提方法, 选取不同复杂场景的高分三号 SAR 影像进行舰船检测实验。实验结果表明, 所提方法具有可行性和有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 舰船检测; 对数正态分布; 恒虚警率; 权重分配

中图分类号: TP237

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020013

Ship detection optimization method in SAR imagery based on multi-feature weighting

ZHAO Quanhua¹, WANG Xiao¹, LI Yu¹, WANG Guanghui²

1. School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

2. Satellite Surveying and Mapping Application Center, NASG, Beijing 100048, China

Abstract: Aiming at the problem that the accuracy of traditional ship detection algorithms is not satisfying in complex scene with many false alarm targets, a ship detection optimization method in SAR imagery based on multi-feature weighting was proposed. Firstly, the marker-based watershed algorithm was employed to remove land from SAR amplitude image. Then, the CFAR algorithm based on log-normal distribution was used to obtain candidate targets from no land image. Furthermore, the length to width ratio, the ship area and the contrast ratio of the candidate targets were extracted. Finally, a variance coefficient method was proposed to distribute the weight of the three features, and the confidence levels were calculated by combining the normalized feature vectors of the candidate targets with the feature weight. By determining the best confidence level, false alarm targets among the candidate targets were removed to optimize ship detection results. In order to verify the proposed method, experiments were carried on with the GF-3 SAR images of different complex scenes. The experimental results show that the proposed method is feasible and effective.

Key words: synthetic aperture radar, ship detection, log-normal distribution, constant false alarm rate, weight allocation

1 引言

随着人类海洋活动的增加, 舰船作为海上交通工具被频繁使用。实时舰船检测可以为海上救生救援、舰船交通管理、安全航海提供基础信息。遥感

作为非接触、远距离的探测技术, 可以提供大范围的海洋数据, 进而获取舰船信息。特别是合成孔径雷达 (SAR, synthetic aperture radar) 系统, 因其不受云、雾、降雨、降雪等干扰, 可以大面积、长时间、连续地观测海域, 已成为海上舰船检测的重要

收稿日期: 2019-08-19; 修回日期: 2019-12-14

基金项目: 辽宁省教育厅科学技术研究基金资助项目 (No.LJ2019JL001)

Foundation Item: The Project of Science and Technology Research of Education Department of Liaoning Province (No.LJ2019JL001)

技术手段^[1-3]。其中，高分辨率 SAR 影像在为舰船检测提供准确数据的同时，还详细地记录了舰船目标的位置和几何结构等特征。因此，本文利用高分辨率高分三号 SAR 影像进行舰船检测。

由于舰船和海水的雷达信号反射特性不同，在 SAR 影像中舰船表现为亮目标，海水表现为暗背景，导致舰船区域和海水区域的光谱反射有明显差别^[4]。但由于海况变化的复杂性导致舰船目标与海面背景的对比度随之变化，因此要求设计的舰船检测算法具备自适应能力，且能保持恒定的虚警率。典型的 SAR 影像舰船检测算法包括舰船尾迹算法^[5]、极化特征算法^[6]、多分辨率算法^[7]、对比度算法^[8]等。在对比度算法中，基于统计模型的恒虚警率(CFAR, constant false alarm rate)算法^[9-10]由于具有虚警率恒定、自适应阈值、计算简单等特点，在 SAR 影像舰船检测中受到了广泛关注和深入研究。例如，高贵^[11]提出了采用基于全局阈值的 CFAR 检测算法，检测速度比较快，但由于只考虑了背景杂波的全局特性，没有涉及局部特性，因此不能适应背景杂波的变化，导致检测性能降低。Novak 等^[12]提出了双参数 CFAR 检测算法，种劲松等^[13]提出了局部窗口 K 分布 CFAR 算法，该类算法采用滑动窗口实现像素的自适应检测，可以适应局部背景杂波的变化，但由于每个像素都要参与阈值计算，计算效率较低。因此，研究者们提出了结合全局和滑窗的 CFAR 算法实现两级检测，提高检测速度与检测性能。例如，邢相薇等^[14]首先利用基于对数正态分布的 CFAR 算法快速筛选舰船，实现第一级粗检测；然后利用基于 K 分布的局部自适应 CFAR 算法实现第二级精确检测。该方法虽然可以适应局部背景杂波的变化，但对海表漂浮物、小型岛屿和人工目标等产生虚警。在虚警剔除方面，主要通过舰船特征的先验知识对潜在目标进行判断，以剔除虚警目标。例如，高贵等^[15]提取潜在目标的尺寸特征、形状特征和对比度特征进行基于投票机制的目标鉴别。基于投票机制的目标鉴别认为鉴别特征同等重要，而实际上不同特征对目标鉴别的贡献不同，所以其加权值不同。

针对上述算法的不足，在 SAR 影像中，真实舰船目标和虚警目标在长宽比、舰船面积和对比度特征上有明显差异，根据这 3 个特征的特点，利用一种客观分配权重方法——变异系数法对舰船特征进行权重分配，可以更有效地区分舰船目标和虚

警目标。因此，本文在两级检测的框架下，先利用基于对数正态分布的 CFAR 算法检测得到候选目标，再提取候选目标的长宽比、舰船面积和对比度特征，然后借助变异系数法为 3 个特征分配权重，以期优化舰船检测结果，改善复杂环境下的检测性能，使检测方法适用性更强。

2 算法描述

在 SAR 影像舰船检测工作中，陆地区域会产生大量虚警。本文首先采用标记分水岭算法去除 SAR 幅度影像中的陆地部分；其次，在去陆影像基础上，利用基于对数正态分布的 CFAR 算法获取候选目标；再次，确定每个候选目标的最小外接矩形区域，将其作为候选区域，并提取该区域的长宽比、舰船面积和对比度特征；最后，利用变异系数法计算 3 个特征的权向量，再结合候选目标的归一化特征矢量计算其特征置信度，通过最佳置信度对候选目标进行筛选，以剔除虚警目标，得到精确的舰船检测结果。算法的具体流程如图 1 所示，其中，实线框为实现算法的功能，虚线框为实现相应功能的技术手段。

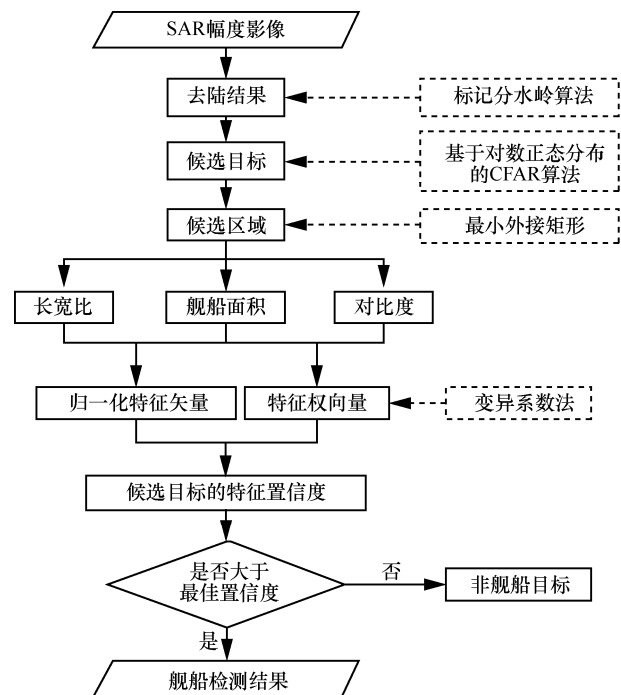


图 1 舰船检测流程

2.1 基于标记分水岭算法的海陆分割

给定 SAR 幅度影像 $w = \{w_i(x_i, y_i); (x_i, y_i) \in D, i \in N\}$ ，其中， D 为影像域， i 为像素索引， (x_i, y_i) 为

像素 i 的格点位置坐标, $N=\{1, \dots, n\}$ 为像素索引集, n 为总像素数, w_i 为像素 i 的光谱反射幅度。

在 SAR 幅度影像中, 海洋和陆地区域均表现为各自强烈同质性, 即各区域内梯度变化较小, 而海陆边界处梯度变化较大, 因此梯度影像能更好地反映原始影像中的海陆边界情况。将标记分水岭算法^[16]用于梯度影像可以减少其伪局部极小值点, 抑制分水岭算法的过分割现象, 实现精确的海陆分割。具体过程介绍如下。

1) 利用 Sobel 算子构建原始影像 w 的梯度影像 $g = \{g_i; i \in N\}$, 其中, g_i 为像素 i 的梯度值。

2) 对原始影像 w 进行形态学开闭重构运算^[17]得到重建后影像 $f = \{f_i; i \in N\}$ 。

3) 提取重建后影像 f 中各像素的局部极大值, 以构建前景标记影像 $d = \{d_i; i \in N\}$, 其中, $d_i = \max\{f_i; i' \in N_i\}$, N_i 是以像素 i 为中心像素的局部区域内像素索引集。

4) 通过自动化阈值将重建后影像 f 二值化, 并进行距离变换, 进而利用分水岭变换, 得到分水岭变换脊线图, 即背景标记影像 $j = \{j_i; i \in N\}$ 。

5) 借助数学形态学中的极小值标定技术^[16], 将影像 d 和影像 j 作为影像 g 的局部极小值, 屏蔽原先的所有局部极小值, 得到修正后的梯度影像。

6) 对修正后的梯度影像进行分水岭分割, 得到海陆分割二值结果 $e = \{e_i; i \in N\}$, 其中, $e_i \in \{0, 1\}$, $e_i = 0$ 表示像素 i 位于海洋区域, $e_i = 1$ 表示像素 i 位于陆地区域。以二值影像 e 为掩膜, 从原始影像 w 中去除陆地部分。去陆影像记为 $z = \{z_j(x_j, y_j); (x_j, y_j) \in I, j \in M\}$, 其中, I 为去陆影像的影像域, j 为像素索引, (x_j, y_j) 为像素 j 的格点位置坐标, $M = \{1, \dots, m\}$ 为像素索引集, m 为总像素数, z_j 为像素 j 的光谱反射幅度。

2.2 基于对数正态分布的 CFAR 算法

在统计学框架下, z 可建模为随机场 $Z = \{Z_j(x_j, y_j); (x_j, y_j) \in I, j \in M\}$ 的实现, 其中, Z_j 为像素 j 幅度的随机变量, z_j 为 Z_j 的实现。

由于受到相干斑噪声的影响, 高分辨率 SAR 幅度影像的直方图具有明显的拖尾现象。对数正态分布^[18]具有分布函数简单的特性, 能有效刻画具有明显拖尾现象的非对称性分布, 适用于建模高分辨率复杂场景的海杂波。

为了验证对数正态分布对 SAR 幅度影像海洋杂波模型的拟合能力, 随机选取大小为 250 像素 × 250 像素的局部影像, 如图 2(a)所示。分别用瑞利分布、高斯分布、韦布尔分布、K 分布和对数正态分布对影像进行直方图拟合, 并利用最大似然方法估计各个模型的参数, 拟合曲线如图 2(b)所示。从图 2(b)中可看出, 影像直方图具有重拖尾现象, 对数正态分布可以较好地对该直方图进行拟合, 而其他几种分布拟合性能较差。采用 K-S 统计量检验^[19]评价拟合结果如图 2(c)所示, 统计量越小代表拟合结果越好。由图 2(c)可知, 对数正态分布的 K-S 统计量最小, 拟合结果最好。因此, 本文利用对数正态分布建模 SAR 幅度影像的海洋杂波模型, 如式(1)所示。

$$p(z_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma z_j} \exp\left(-\frac{(\ln z_j - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

其中, μ 为尺度参数, σ 为形状参数。其累积分布函数为

$$F(z_j) = \int_{-\infty}^{z_j} p(t) dt = \int_{-\infty}^{z_j} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \exp\left(-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt = \Phi\left(\frac{\ln z_j - \mu}{\sigma}\right) \quad (2)$$

其中, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

去陆影像 z 可近似看作海洋杂波像素集合, 通

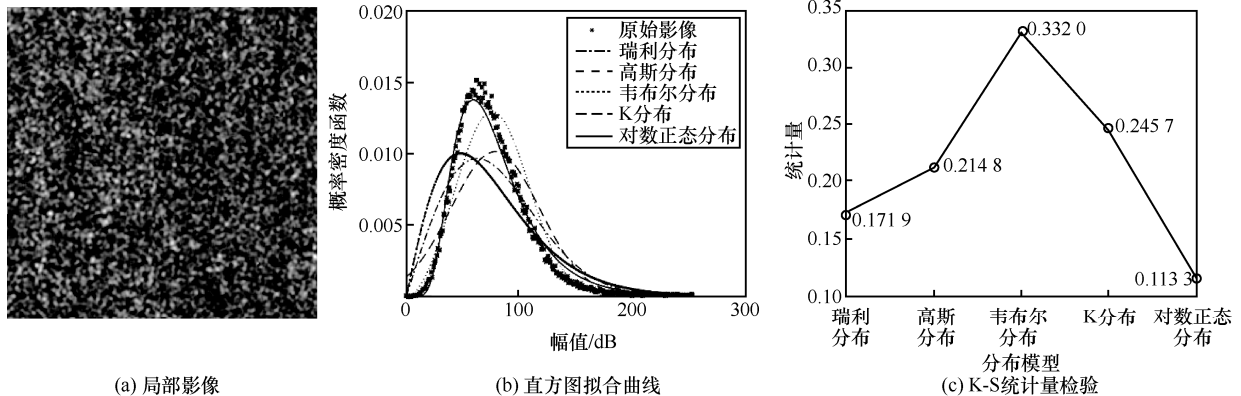


图 2 拟合结果

过最大似然估计求出 μ 和 σ 的估计值, 即

$$\hat{\mu} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \ln z_j \quad (3)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\ln z_j - \hat{\mu})^2} \quad (4)$$

设检测阈值为 T , 像素灰度值为 g , 则虚警率 P_{fa} 为

$$P_{fa} = \sum_{g=T}^{255} p(g) = 1 - \Phi\left(\frac{T - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right) \quad (5)$$

求解式(5), 可得检测阈值 T 为

$$T = \hat{\sigma} \Phi^{-1}(1 - P_{fa}) + \hat{\mu} \quad (6)$$

利用检测阈值 T 遍历去陆影像 z , 得到对数正态分布的 CFAR 检测结果 $L = \{L_j(x_j, y_j); (x_j, y_j) \in I; j \in M\}$, 若 $z_i \geq T$, 则判为拟似舰船像素, 设 $L_j = 1$; 否则为拟似背景像素, 设 $L_j = 0$ 。最后, 将满足八邻域连通性的一组像素标记为一个候选目标, 使其等于八邻域连通数, 并根据最终舰船判定结果相应地改变 L 中像素的标记值, 使 $L_j = 1$ 对应候选目标像素, 而 $L_j = 0$ 对应候选背景像素。设 L 中 $L_j = 1$ 像素构成 c 个连通区域, 每个区域看作候选目标, 区域内像素格点集合记为 $L_p, p \in \{1, \dots, c\}$ 。由此可得 L_p 内的像素数 $m_p = \sum_{(x_j, y_j) \in L_p} L_j$ 。

2.3 候选目标的特征提取

SAR 影像中的海表波浪、礁石等高亮目标容易被检测成虚警目标, 影响对数正态分布的 CFAR 检测结果。经大量实验验证, 长宽比、舰船面积和对比度 3 个特征对于舰船和虚警具有较好的可分性。因此, 在选定候选目标的最小外接矩形区域为候选区域的基础上, 分别提取各候选区域的长宽比、舰船面积和对比度特征作为候选目标的特征。

候选目标的最小外接矩形实质上是其最小面积外接矩形^[20]。任一候选目标的最小外接矩形和其凸壳的最小外接矩形是等价的, 且凸多边形的最小外接矩形至少有一条边经过该凸多边形的一边^[21]。因此, 提取任一候选目标的最小外接矩形的算法步骤如下。

1) 计算候选目标的最小凸包。

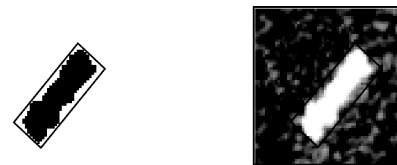
2) 选取所得凸包中一条边作为起始边, 对该凸包以选中边的左端点为中心旋转, 使该边平行于坐标横轴, 计算并保存其最小绑定矩形的坐标、该边

编号和旋转角度。

3) 顺序选择其他边, 并按照步骤 2) 计算并保存其最小绑定矩形的坐标、该边编号和旋转角度。

4) 比较所得最小绑定矩形的面积, 面积最小者按其记录的旋转角度以该边的左端点为中心逆向旋转即为所求的最小外接矩形。

图 3(a) 中黑框为候选目标的最小外接矩形, 图 3(b) 为最小外接矩形叠加到原始影像上。从图 3 可以看出, 最小外接矩形紧紧贴近候选目标, 可近似将其长宽比看作候选目标的长宽比, 并计算其内的候选目标像素数来代替舰船面积, 再利用候选目标像素和候选背景像素计算对比度。所以, 在最小外接矩形的基础上, 可以更准确地计算候选目标的长宽比、舰船面积和对比度特征。



(a) 最小外接矩形 (b) 最小外接矩形叠加到原始影像上

图 3 候选目标的最小外接矩形

在 L 基础上构建 $S = \{S_j; j \in M\}$, 其中, $S_j \in \{0, 1\}$, $S_j = 1$ 对应 L_p 最小外接矩形内像素。由此, 得到对应 L_p 的最小外接矩形 S_p , 称其为候选区域。对于给定的影像空间分辨率, S_p 的舰船面积正比于舰船像素数 m_p , 为方便起见, 本文用 m_p 代替舰船面积。设 S_p 的长和宽分别为 l_p 和 w_p , 则其长宽比 $r_p = \frac{l_p}{w_p}$ 。

1) 长宽比。在高分辨率 SAR 影像中, 舰船一般表现为细长型, 其长宽比较大; 而岛屿、礁石和高亮噪声等虚警则为非细长型, 其长宽比较小, 因此利用长宽比可以将此类虚警剔除。在真实舰船目标中, 除了小型渔船外, 舰船长度一般约为 100~400 m, 宽度约为 15~70 m, 长宽比约为 2.5~7.5。

2) 舰船面积。舰船面积一般用舰船像素数量乘以影像分辨率来表示。对于给定遥感影像其分辨率是确定值, 因此可直接用舰船像素数代表舰船面积。这样, 可以通过设置舰船像素数阈值滤除像素数过多或过少的虚警目标。舰船面积一般在 1 500~20 000 m², 如 SAR 影像分辨率为 2.81 m, 则舰船像素数为 190~2 500 像素。

3) 对比度。对比度为目标均值与背景均值的灰

度差再除以背景均值。在高分辨率 SAR 影像中，舰船表现为高亮目标，周围区域表现为暗背景，其对比度较大；海面剧烈运动造成的海表波浪较亮，但其亮度明显低于舰船目标，由于较明显的海表波浪与周围区域的对比度相对较小，因此可以利用对比度剔除此类虚警目标。由于环境、舰船、海洋等因素的影响，目标与背景的对比度 σ_p 一般约为 0.6~1.8。

令 $z_p = \{z_j; j \in S_p\}$ 为 S_p 内像素集合，则 S_p 内像素幅度的对比度 σ_p 为

$$\sigma_p = \left| \frac{\frac{1}{m_p} \sum_{j \in L_p} z_j - \frac{1}{b_p - m_p} \sum_{j \in L_p^c} z_j}{\frac{1}{b_p - m_p} \sum_{j \in L_p^c} z_j} \right| \quad (7)$$

其中， $b_p = \#z_p$ ， $\#$ 为计算集合内元素数操作符， L_p^c 为 L_p 在 S_p 中的补集，即背景像素集合。

2.4 多特征加权的舰船优化检测

变异系数法^[22]直接利用各特征本身所包含的信息获取特征的权重，无人为因素干扰，定量、客观、具有可靠性。长宽比、舰船面积和对比度 3 个特征在权重决策中重要程度不同，本节利用变异系数法对 3 个特征进行权重分配，以达到区分真实舰船和虚警目标的目的。各项特征的变异系数为

$$\lambda_q = \frac{\sigma'_q}{\mu'_q} \quad (8)$$

其中， $q = 1, 2, 3$ 为特征索引，分别表示长宽比、舰船面积和对比度特征， λ_q 为第 q 项特征的变异系数， σ'_q 和 μ'_q 分别为所有候选目标的第 q 项特征的标准差和均值。若 λ_q 较大，则第 q 项特征对舰船鉴别的贡献较大，应赋予较大权重；否则，应赋予较小权重。

各项特征的权重为

$$\omega_q = \frac{\lambda_q}{\sum_{q=1}^3 \lambda_q} \quad (9)$$

其中， ω_q 为第 q 项特征的权重。根据各项特征的权重 ω_1 、 ω_2 和 ω_3 ，计算特征权向量 \mathbf{k} 为

$$\mathbf{k} = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]^T \quad (10)$$

设所有候选目标中典型舰船的最大和最小长宽比分别为 r_{\max} 和 r_{\min} ，最大和最小舰船像素数分别为 m_{\max} 和 m_{\min} ，最大和最小对比度分别为 σ_{\max}

和 σ_{\min} ，则候选目标的归一化特征矢量 \mathbf{v}_p 为

$$\mathbf{v}_p = [r'_p, m'_p, \sigma'_p] = \left[\frac{r_p - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}}, \frac{m_p - m_{\min}}{m_{\max} - m_{\min}}, \frac{\sigma_p - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}} \right] \quad (11)$$

其中，若 $r_p \notin [r_{\min}, r_{\max}]$ ，则 $r'_p = 0$ ；若 $m_p \notin [m_{\min}, m_{\max}]$ ，则 $m'_p = 0$ ；若 $\sigma_p \notin [\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$ ，则 $\sigma'_p = 0$ 。

利用特征权向量 \mathbf{k} 和归一化特征矢量 \mathbf{v}_p ，得到候选目标的特征置信度 u_p 为

$$u_p = \mathbf{v}_p \mathbf{k} \quad (12)$$

选取最佳置信度对所有候选目标进行判断，若候选目标的特征置信度大于最佳置信度，即为真实舰船目标；否则为虚假目标。设最佳置信度为 u' ，舰船优化检测结果为 $\mathbf{h} = \{h_j = 0, j \in \mathbf{M}\}$ ，若 $u_p \geq u'$ ， $p = 1, \dots, c$ ，则 $h_j = 1$ ， $(x_j, y_j) \in L_p$ 。

3 实验结果及讨论

为验证舰船检测算法的可行性和有效性，选取高分三号单视幅度 VH 极化影像进行实验，具体参数如表 1 所示。为了方便处理，首先对两幅影像进行 En-Frost 滤波、斜地矩转换和地理编码等预处理，再采用两幅高分三号影像中的 3 幅子影像进行舰船检测实验，其中实验影像 1 从影像 1 中截取，尺度为 1 505 像素×1 947 像素；实验影像 2 和实验影像 3 从影像 2 中截取，尺度分别为 5 700 像素×8 688 像素和 10 877 像素×7 733 像素。3 幅实验影像的场景复杂程度不同，参考对应区域的光学影像，排除陆地、港口、岛屿、礁石等易混淆目标，判断实验影像中的真实舰船以白色矩形框标记，如图 4 所示，其中图 4(a)~图 4(c)的实际舰船数分别为 55、17 和 147。

表 1 高分三号数据参数

影像	成像模式	分辨率/m	入射角
影像 1	FS1	2.81	40.6°
影像 2	FS1	2.81	42.8°

图 5(a)~图 5(c)给出实验影像陆地掩膜后的海域影像。由图 5 可见，标记分水岭算法对陆地的分割效果较好，但却无法剔除小面积岛屿。在后续舰船检测过程中，可以利用多特征加权的舰船优化检测，有效地抑制这类小面积岛屿导致的虚警目标。

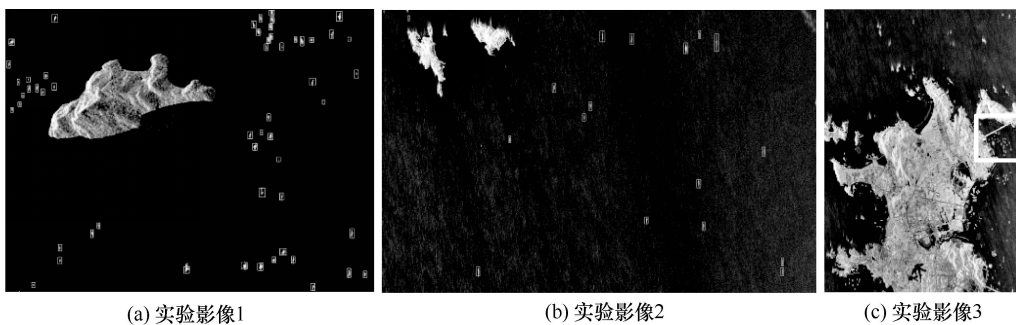


图 4 实验影像舰船标记

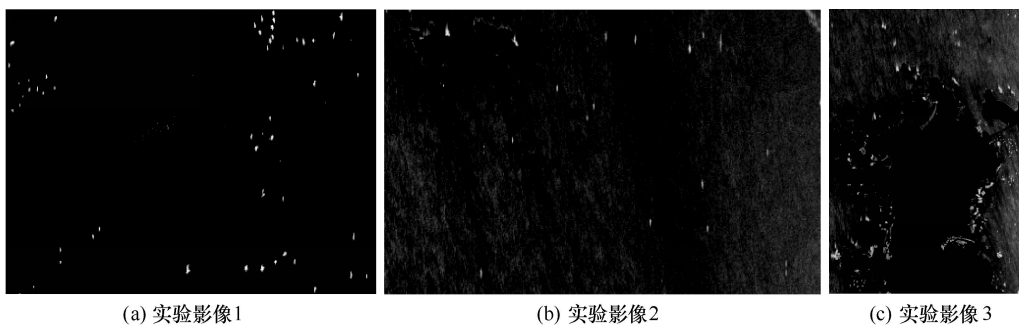


图 5 陆地掩膜后的海域影像

以实验影像 3 为例，计算得到各项特征的权重 ω_1 、 ω_2 和 ω_3 分别为 0.33、0.44 和 0.23，其中舰船面积所占权重最大，长宽比次之，对比度所占权重最小。在 SAR 影像中，首先，真实舰船和虚警目标的面积差异最明显，相较于长宽比和对比度，舰船面积更为直观，更易区分舰船和虚警；其次，真实舰船和虚警目标的形状不同，真实舰船为细长型，虚警目标为非细长型，长宽比差异较大，相较于对比度，其表现较明显；最后，对比度反映目标与背景的灰度差异，真实舰船比虚警目标相对于周围背景更亮，但对比度差异不大，不如舰船面积和长宽比表现明显。该权重符合各项特征对舰船鉴别的贡献，长宽比、舰船面积和对比度在该权重下对舰船具有更好的可分性。实验影像 3 内舰船和虚警目标较多，包括实验影像 1 和实验影像 2 内的舰船类型和虚警目标。虽然 3 幅实验影像的场景复杂程度不同，但计算的特征权向量变化较小，所以本文统一将特征权向量 \mathbf{k} 设置为实验影像 3 计算的 [0.33, 0.44, 0.23]。实验结果表明，该特征权向量适用于 3 幅实验影像，且舰船检测结果较好。

图 6 为对数正态分布 CFAR 检测结果中部分候选目标及其实验影像内对应区域。图 6(a)~图 6(d) 为航行方向不同的舰船目标；图 6(e)~图 6(h) 为虚

警目标，其中，图 6(e) 为较明显的海表波浪，图 6(f) 为人工目标，图 6(g) 和图 6(h) 均为小岛屿。经统计，对于实验影像内候选目标， $r_{\max} = 5.5$ ， $r_{\min} = 2.5$ ， $m_{\max} = 600$ ， $m_{\min} = 200$ ， $\sigma_{\max} = 1.8$ ， $\sigma_{\min} = 0.8$ ，再结合特征权向量 \mathbf{k} ，计算各候选目标的长宽比、舰船面积、对比度、归一化特征矢量和特征置信度如表 2 所示。从表 2 可以看到，真实舰船 $a_1 \sim a_4$ 具有高于 29% 的中高置信度，虚警目标 $b_1 \sim b_4$ 具有低于 15% 的低置信度。经多次实验，确定当最佳置信度为 16% 时，检测结果可以最大程度地区分真实舰船和虚警目标，达到最好的舰船检测效果。如果真实舰船目标的各项特征计算偏低，则特征置信度会偏低，但一般情况下，真实舰船目标的特征置信度都高于 29%，所以，虽然各项特征计算偏低会导致特征置信度偏低，但其仍然会高于最佳置信度 16%，从而真实舰船目标会被检测为舰船；如果真实舰船目标的各项特征计算偏高，则特征置信度会偏高，从而更易被检测为舰船。虚警目标的特征置信度一般在 15% 以下，当虚警目标的各项特征计算偏高时，特征置信度也会低于最佳置信度，从而被检测为虚警；当虚警目标的各项特征计算偏低时，特征置信度会更低于最佳置信度，从而更易被检测为虚警。所以，在无法准确计算各项特征的情况下，可以保证较高的舰船检测精度。

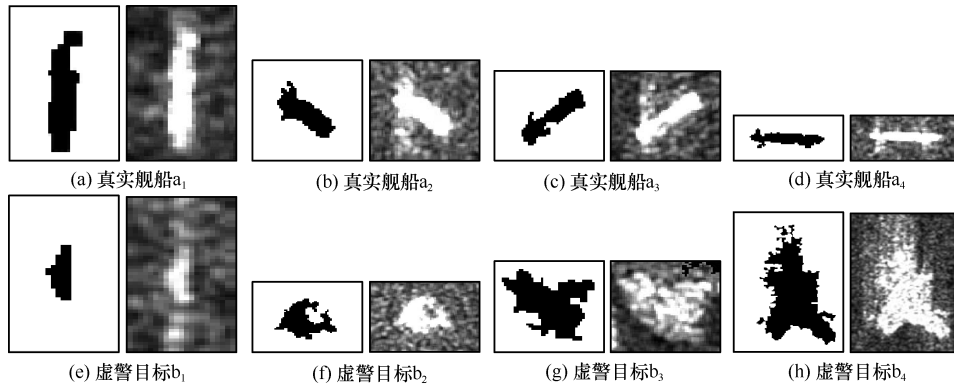


图 6 部分候选目标及其实验影像内对应区域

表 2 部分候选目标特征分析

序号	长宽比	舰船面积/像素	对比度	归一化特征矢量	置信度
a ₁	4.47	234	0.98	[0.66, 0.09, 0.18]	29.88%
a ₂	2.12	570	1.24	[0, 0.93, 0.44]	51.04%
a ₃	3.57	523	1.53	[0.36, 0.81, 0.73]	64.31%
a ₄	4.97	469	1.10	[0.82, 0.67, 0.30]	63.44%
b ₁	2.29	56	0.78	[0, 0, 0]	0
b ₂	1.10	620	1.33	[0, 0, 0.53]	12.19%
b ₃	1.28	649	1.12	[0, 0, 0.32]	7.36%
b ₄	1.89	6396	1.45	[0, 0, 0.65]	14.95%

为了研究多特征加权对舰船检测结果的影响，选取实验影像 3 内典型区域作为实验区域，即图 4(c) 中白色大矩形框所示区域。图 7(a) 是该实验区域的真实情况，尺寸为 1 640 像素×1 854 像素，共有 30 个真实舰船目标，利用白色矩形框标记真实舰船。图 7(b) 是本文算法的检测结果，利用黑色矩形框标记真实舰船目标，黑色椭圆框标记漏检目标，黑色三

角框标记虚警目标，可以看出，检测结果出现一次漏检和 2 次虚警。图 7(c) 是不同特征权向量下的品质因子三维图，其中， X 轴为舰船面积权重， Y 轴为长宽比权重， Z 轴为品质因子，品质因子越高，检测结果越好，则对比度权重为 $1-X-Y$ ，特征权向量 k 为 $[Y, X, 1-X-Y]$ 。由图 7(c) 可知，不同特征权向量可能对应相同的检测结果，当特征权向量 k 为 $[0.28, 0.48, 0.24]$ ， $[0.28, 0.49, 0.23]$ ， $[0.29, 0.48, 0.23]$ ， $[0.29, 0.49, 0.22]$ ， $[0.30, 0.47, 0.23]$ ， $[0.30, 0.48, 0.22]$ ， $[0.31, 0.46, 0.23]$ ， $[0.31, 0.47, 0.22]$ ， $[0.32, 0.45, 0.23]$ ， $[0.32, 0.46, 0.22]$ 和 $[0.33, 0.44, 0.23]$ 时，品质因子最大为 0.878 8，检测结果最优，并都得到如图 7(b) 所示的检测结果。本文计算的特征权向量 $[0.33, 0.44, 0.23]$ 为得到最优检测结果的特征权向量之一，因而运用变异系数法计算的特征权向量进行舰船检测可以得到最优的检测结果。

除本文引言部分提到的双参数 CFAR 算法^[12]外，最佳熵双阈值算法^[23]也经常用于 SAR 影像舰

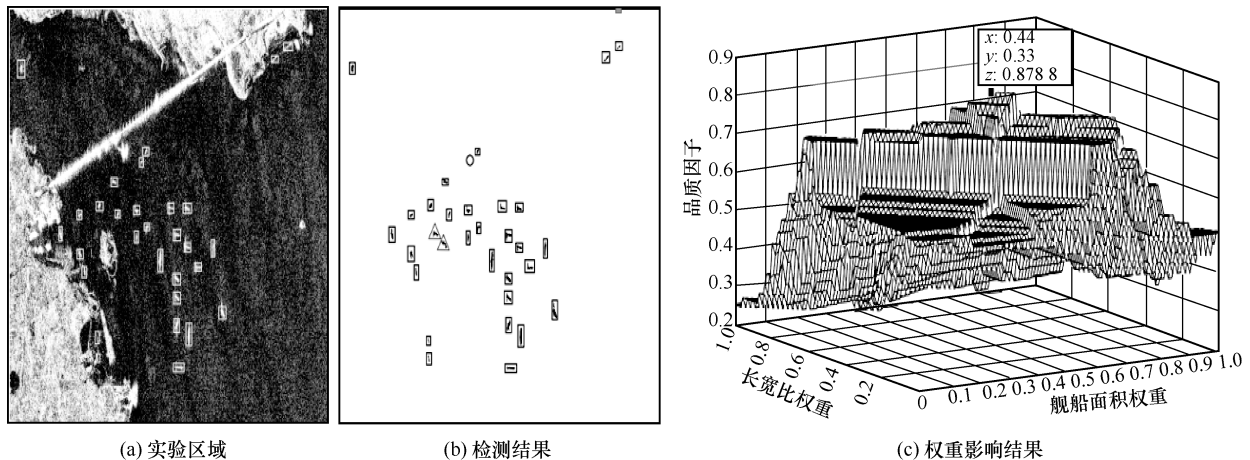


图 7 多特征加权对舰船检测结果的影响

船检测。因此，为了验证本文算法的有效性，本文选取双参数 CFAR 算法和最佳熵双阈值算法作为对比算法与本文算法进行比较。为了公平起见，保证检测流程中的去陆操作一致。针对实验影像进行实验，实验过程中双参数 CFAR 算法的虚警率设定为 10^{-6} ，基于对数正态分布的 CFAR 算法的虚警率设定为 10^{-4} ，在此情况下，各算法均能取得较好性能；且双参数 CFAR 算法检测过程中涉及背景窗口、保护窗口和目标窗口的设定，其大小变化直接影响检测结果的优劣，经多次检测比较，本文选择最优检测结果作为实验结果。

实验选取图 7(a)研究 3 种算法的时间性能，运行时间如表 3 所示。最佳熵双阈值算法基于全局阈值进行舰船检测，与双参数 CFAR 算法和本文算法相比，算法复杂程度最低，时间性能最好；双参数 CFAR 算法和本文算法的运行时间相差不大，但双

参数 CFAR 算法基于滑动窗口进行检测，本文算法需要提取每个候选目标的最小外接矩形，再计算各项特征，此过程比滑动窗口较复杂，因此计算时间略长。

算法	时间/s
最佳熵双阈值算法	0.47
双参数 CFAR 算法	232.03
本文算法	256.98

图 8 所示为 3 种算法的舰船检测结果，并利用黑色矩形框标记检测结果中的真实舰船目标，黑色椭圆框标记漏检目标，黑色三角框标记虚警目标。图 8 可见，在本文算法的检测结果中，黑色矩形框较多，黑色椭圆框和黑色三角框明显少于 2 种对比

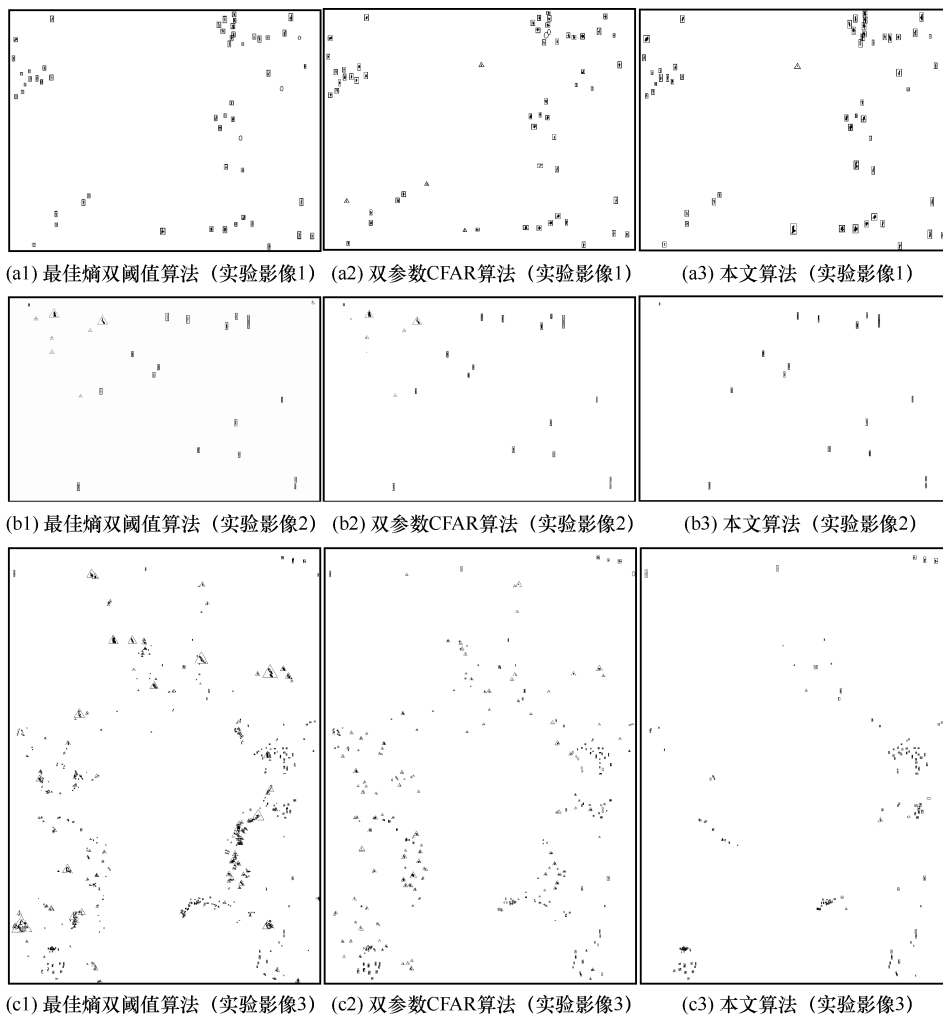


图 8 3 种算法的舰船检测取反结果对比

算法，说明本文算法正确检测的数量较多，发生的漏检和虚警较少，可以有效区分舰船和非舰船，检测效果优于 2 种对比算法。

3 种算法的舰船检测结果中漏检主要包括复杂海杂波中的舰船、相距很近的舰船、停靠在一起的舰船、尺寸过大或过小的舰船等。由于复杂海杂波的影响，少部分舰船在复杂海杂波中表现不明显，舰船与海杂波的对比较低，使最佳熵双阈值对此类舰船目标发生漏检；双参数 CFAR 算法基于局部窗口实现舰船检测，可以适应背景杂波的复杂变化；复杂海杂波中的舰船可以表现出舰船特征，本文算法能够检测得到此类舰船目标。相距很近的舰船会出现在双参数 CFAR 算法的背景窗口内，使真实舰船不满足鉴别准则，从而造成漏检，但最佳熵双阈值和本文算法不会受到相距很近舰船的影响。停靠在一起的舰船同样会出现在双参数 CFAR 算法的背景窗口内，造成漏检，且由于停靠在一起的舰船在影像中表现为一个目标，所以最佳熵双阈值只检测到一次，而停靠在一起的舰船不表现舰船特征，所以本文算法会对其发生漏检。双参数 CFAR 算法的检测结果受滑动窗口尺寸的影响，对尺寸过大、过小的舰船造成漏检，其他 2 种算法不会受到舰船尺寸的影响。少部分舰船目标的长宽比、舰船面积和对比度特征都不明显，特征置信度低于最佳置信度，使本文算法发生漏检，而 2 种对比算法基于阈值实现舰船检测，能够检测得到此类舰船目标。

虚警主要包括高亮的海表波浪、人工目标、礁石和未剔除的岛屿等。由于海面波浪的剧烈运动，造成高亮的海表波浪，最佳熵双阈值和双参数 CFAR 算法对其发生虚警，而高亮的海表波浪并不表现出类似舰船的特征，因此本文算法将其剔除；

人工目标、礁石和未剔除的岛屿在 SAR 影像中均表现为亮度接近舰船的高亮目标，导致最佳熵双阈值和双参数 CFAR 算法发生虚警，而此类目标的长宽比、舰船面积和对比度特征与真实舰船有显著差异，因此本文算法中的多特征加权的优化检测可以剔除此类虚警目标，但少部分人工目标与真实舰船目标的特征相似，从而造成虚警。

为了定量评价 3 种算法的检测性能，本文引入检测率和品质因子来评估算法。

$$\text{检测率} = \frac{\text{正确检测数}}{\text{真实舰船数}}$$

$$\text{品质因子} = \frac{\text{正确检测数}}{\text{真实舰船数} + \text{错检数}}$$

$$\text{错检数} = \text{漏检数} + \text{虚警数}$$

检测率越高，说明检测算法搜寻真实舰船的能力越强；品质因子越高，说明检测算法对舰船和非舰船的辨别越灵敏，且只有当检测到全部真实舰船目标且无任何虚警和漏检时，其值才为 1。

从表 4 可以看出，在虚警目标较少的简单场景（实验影像 1）下，3 种算法的检测率均在 90% 以上，品质因子均在 85% 以上，都能得到较好的舰船检测结果。但随着虚警目标增多导致场景复杂度增加（实验影像 2 和实验影像 3），最佳熵双阈值和双参数 CFAR 算法的错检数量也随之增加，虽然 2 种算法的检测率在一定范围之内，但品质因子分别从 65.4% 和 70.8% 降为 23.1% 和 23.3%，已经无法满足实际精度要求，而本文算法错检数量最少，检测率最高，且品质因子从 100% 降到 86.4%，仍然保持较高的精度。对比发现，本文算法正确检测舰船目标最多，虚警和漏检都最少，说明该算法搜寻真实舰船的能力更强，对舰船和非舰船的辨别更灵敏。

表 4 3 种算法的检测结果对比

影像	检测算法	真实舰船数量	正确检测数	漏检数	虚警数	错检数	检测率	品质因子
实验影像 1	最佳熵双阈值算法		52	3	0	3	94.5%	89.7%
	双参数 CFAR 算法	55	53	2	4	6	96.4%	86.9%
	本文算法		55	0	1	1	100.0%	98.2%
实验影像 2	最佳熵双阈值算法		17	0	9	9	100.0%	65.4%
	双参数 CFAR 算法	17	17	0	7	7	100.0%	70.8%
	本文算法		17	0	0	0	100.0%	100.0%
实验影像 3	最佳熵双阈值算法		136	11	431	442	92.5%	23.1%
	双参数 CFAR 算法	147	87	60	167	227	59.2%	23.3%
	本文算法		140	7	8	15	95.2%	86.4%

总体来说,最佳熵双阈值和双参数 CFAR 算法在简单场景下,可以较好地舰船检测,但在虚警目标较多的复杂场景下,2 种对比算法的检测效果较差;本文算法受虚警目标的影响较小,虽然运行时间较长,但在不同复杂场景下有较好的检测效果,适用性更好。

4 结束语

利用本文算法对高分三号 SAR 影像进行舰船检测实验,并对其结果进行定量和定性分析,以评价舰船检测精度,主要结论概括如下。

1) 真实 SAR 影像的场景复杂程度不同,实验结果表明,基于多特征加权的 SAR 影像舰船检测优化方法能够改善虚警目标较多的复杂环境下的检测性能,适用性更强。

2) 由于岛屿、人工目标和复杂海杂波等影响,传统舰船检测算法会发生漏检和虚警;对数正态分布能够较好地拟合高分辨率 SAR 影像的海杂波分布,利用基于对数正态分布的 CFAR 算法检测得到所有的候选目标,再采用多特征加权的舰船优化检测将虚警目标剔除,优化舰船检测结果。由于舰船与非舰船的长宽比、舰船面积和对比度特征有显著差异,因此多特征加权的舰船优化检测可以有效地区分舰船与非舰船,得到精确的舰船检测结果。

3) 在提取的舰船长宽比、舰船面积和对比度特征基础上,可以进一步刻画舰船的速度、材质、装载信息等特征,为进一步的舰船检测提供充分的依据,因此本文算法具有重要的理论意义和实用价值。

参考文献:

- [1] 蒋李兵,王壮,雷琳,等.基于模型迭代匹配的单幅高分辨 SAR 图像遮挡建筑物高度估计方法[J].通信学报,2013,34(3):68-75.
JIANG L B, WANG Z, LEI L, et al. Occluded building height estimation from single HR SAR image based on an iterative model matching technique[J]. Journal on Communications, 2013, 34(3): 68-75.
- [2] ARMANDO M, MARIA S F, IRENA H, et al. Ship detection with spectral analysis of synthetic aperture radar: a comparison of new and well-known algorithms[J]. Remote Sensing, 2015, 7(5): 5416-5439.
- [3] MOREIRA A, PRATS-IRAOLA P, YOUNIS M, et al. A tutorial on synthetic aperture radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, 1(1): 6-43.
- [4] LENG X G, JI K F, YANG K, et al. A bilateral CFAR algorithm for ship detection in SAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(7): 1536-1540.
- [5] 杨国铮,禹晶,肖创柏,等.基于形态字典学习的复杂背景 SAR 图像舰船尾迹检测[J].自动化学报,2017,43(10):1713-1725.
YANG G Z, YU J, XIAO C B, et al. Ship wake detection in SAR images with complex background using morphological dictionary learning[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(10): 1713-1725.
- [6] 魏钜杰,李平湘,杨杰,等.利用全极化 SAR 数据去方位向模糊的舰船目标检测方法[J].测绘学报,2013,42(4):530-539.
WEI J J, LI P X, YANG J, et al. Removing the effects of azimuth ambiguities on ships detection based on polarimetric SAR data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(4): 530-539.
- [7] 陈德元,涂国防.一种基于小波变换的 SAR 图像舰船检测的新算法[J].电子与信息学报,2007,29(4):855-858.
CHEN D Y, TU G F. A new algorithm of ship targets detection in SAR images using wavelet transform[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(4): 855-858.
- [8] HOU B, CHEN X Z, JIAO L C. Multilayer CFAR detection of ship targets in very high resolution SAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(4): 811-815.
- [9] WANG Y H, LIU H W. A hierarchical ship detection scheme for high-resolution SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(10), 4173-4184.
- [10] 赵明波,何峻,付强. SAR 图像 CFAR 检测的快速算法综述[J].自动化学报,2012,38(12):1885-1895.
ZHAO M B, HE J, FU Q. Survey on fast CFAR detection algorithms for SAR image targets[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(12): 1885-1895.
- [11] 高贵. SAR 图像目标 ROI 自动获取技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2007.
GAO G. The research on automatic acquirement of target's ROI from SAR imagery[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [12] NOVAK L M, HALVERSEN S D, OWIRKA G, et al. Effects of polarization and resolution on SAR ATR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(1):102-116.
- [13] 种劲松,朱敏慧. SAR 图像局部窗口 K-分布目标检测算法[J].电子与信息学报,2003(9):1276-1280.
ZHONG J S, ZHU M H. K-distribution target detection in local window of SAR image[J]. Journal of Electronics and information Technology, 2003(9): 1276-1280.
- [14] 邢相薇,陈振林,邹焕新,等.一种基于两级 CFAR 的 SAR 图像舰船目标快速检测算法[J].信号处理,2009,25(8):256-259.
XING X W, CHEN Z L, ZOU H X, et al. A fast algorithm based on two-stage CFAR for detecting ships in SAR images[J]. Journal of Signal Processing, 2009, 25(8): 256-259.
- [15] 高贵,蒋咏梅,张琦,等.基于多特征联合的高分辨率 SAR 图像机动目标快速获取[J].电子学报,2006(9):1663-1667.
GAO G, JIANG Y M, ZHANG Q, et al. Fast acquirement of vehicle targets from high-resolution SAR images based on combining multi-feature[J]. Acta Electronica Sinica, 2006(9): 1663-1667.
- [16] 杨高波,张兆杨,余圣发,等.一种基于小波分解和分水岭变换的视频对象自动分割算法[J].通信学报,2005,26(3):7-13.

YANG G B, ZHANG Z Y, YU S F, et al. Automatic video object extraction algorithm based on wavelet and watershed[J]. Journal on Communications, 2005, 26(3):7-13.

- [17] 郭昱杉, 刘庆生, 刘高焕, 等. 基于标记控制分水岭分割方法的高分辨率遥感影像单木树冠提取[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(9): 1259-1266.

GUO Y S, LIU Q S, LIU G H, et al. Individual tree crown extraction of high resolution image based on marker-controlled watershed segmentation method[J]. Journal of Geo-Information Science, 2016, 18(9): 1259-1266.

- [18] AI J Q, QI X Y, YU W D, et al. A new CFAR ship detection algorithm based on 2-D joint log-normal distribution in SAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(4): 806-810.

- [19] COVER T M, THOMAS J A. Elements of information theory[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 1991.

- [20] 甄勇, 刘伟, 陈建宏, 等. 高分辨率 SAR 图像舰船目标几何结构特征提取[J]. 信号处理, 2016, 32(4): 424-429.

ZHEN Y, LIU W, CHEN J H, et al. Geometric structure feature extraction of ship target in high-resolution SAR image[J]. Journal of Signal Processing, 2016, 32(4): 424-429.

- [21] 程鹏飞, 闫浩文, 韩振辉. 一个求解多边形最小面积外接矩形的算法[J]. 工程图学学报, 2008, 29(1): 122-126.

CHENG P F, YAN H W, HAN Z H. An algorithm for computing the minimum area bounding rectangle of an arbitrary polygon[J]. Journal of Engineering Graphics, 2008, 29(1): 122-126.

- [22] 赵微, 林健, 王树芳, 等. 变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1277-1283.

ZHAO W, LIN J, WANG S F, et al. Influence of human activities on groundwater environment based on coefficient variation method[J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1277-1283.

- [23] 种劲松. 合成孔径图像舰船目标检测方法与应用研究[D]. 长沙: 中国科学院研究生院, 2002.

ZHONG J S. A study on the algorithm of ship target detection in SAR imagery and its applications[D]. Changsha: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2002.

[作者简介]



赵泉华(1978-), 女, 河北承德人, 博士, 辽宁工程技术大学教授、博士生导师, 主要研究方向为随机几何、空间统计学、模糊集理论等在遥感图像建模、解译及海洋环境遥感中的应用。



王肖(1996-), 女, 辽宁阜新人, 辽宁工程技术大学硕士生, 主要研究方向为遥感图像处理。



李玉(1963-), 男, 吉林长春人, 博士, 辽宁工程技术大学教授、博士生导师, 主要研究方向为遥感图像处理。



王光辉(1982-), 男, 河南商丘人, 国家测绘地理信息局高级工程师, 主要研究方向为遥感图像处理。