

doi:10.3788/gzxb20184701.0110001

高分辨率合成孔径雷达图像舰船目标几何特征提取方法

熊伟,徐永力,崔亚奇,李岳峰

(海军航空大学 信息融合研究所, 山东 烟台 264001)

摘 要:针对高分辨率合成孔径雷达图像设计了一种舰船目标几何特征提取算法.通过视觉注意机制检测目标区域的算法,通过频谱残差视觉显著计算模型求取显著图,完成显著区域的检测以实现舰船目标的初步定位,基于获得的视觉显著图采用最大熵算法完成阈值分割筛选出舰船区域.在提取的舰船切片的基础上,采用针对几何特征的提取算法,经图像预处理、方位角估计、旋转获取最佳表征舰船目标几何轮廓的外接矩形,相对有效准确地提取几何特征;最后,采用典型的 TerraSAR-X 数据进行仿真实验.结果表明,与传统方法相比,本文提出的频谱残差视觉模型完成合成孔径雷达图像舰船切片的区域分割能够有效降低虚警率,舰船目标的检测速度提高了 25%~50%.该方法能够快速稳定地提取舰船目标的几何特征,也更加符合实际高分辨率图像舰船目标检测的应用需求.

关键词:合成孔径雷达;几何特征提取;舰船目标检测;视觉注意机制;频谱残差计算;方位角估计;最小外接矩形

中图分类号:TP751

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)01-0110001-10

Geometric Feature Extraction of Ship in High-resolution Synthetic Aperture Radar Images

XIONG Wei, XU Yong-li, CUI Ya-qi, LI Yue-feng

(*Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China*)

Abstract: A new method for geometric features extraction of ship target in high-resolution Synthetic Aperture Radar (SAR) image was proposed. After detecting and locating ship targets from high-resolution SAR images. The algorithm continues to acquire target slices to construct the process of the ship target geometric feature extraction. Firstly, the algorithm obtained a saliency map, completed the detection and positioning of ship targets, and obtained the ship target slices. Secondly, the algorithm extracted the geometric features based on the resulting ship slices. The slices was estimated by the azimuth to obtain the exact minimum bounding rectangle, then effective and accurate extraction of geometric features can be completed. Finally, the algorithm applied to SAR image target detection, which is efficient proved by experimental results. The experiments on TerraSAR-X and a large number of satellite data demonstrate that the proposed algorithm can extract the geometric features with high accuracy and good stability. Unlike traditional methods, the use of improved spectral residual visual significant computational models to locate and segment ship targets can effectively reduce the false alarm rates, and the detection speed increased by 25% to 50%. And it is suitable for practical requirements of

基金项目:国家自然科学基金(No.42511133N)资助

第一作者:熊伟(1977-),男,教授,博士,主要研究方向为信息融合、雷达情报处理.Email:xuylhhu@163.com

通讯作者:徐永力(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为 SAR 图像检测识别.Email:xuylhjhy@126.com

收稿日期:2017-07-15;录用日期:2017-09-15

<http://www.photon.ac.cn>

ship target detection in high-resolution images.

Key words: Synthetic aperture radar; Feature extraction; Target detection; Visual saliency; Spectral residual; Azimuth estimation; Minimum bounding rectangle

OCIS Codes: 100.2000; 100.3005; 100.3008; 110.2970

0 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种先进的主动式微波传感器,具有全天时、全天候、多极化、多波段的探测优势,能够满足不同需求下舰船目标的监视要求,基于 SAR 的海上目标监测已经发展为一种通用的遥感探测技术^[1].随着 TerraSAR-X、Cosmo-SkyMed 和高分三号等新一代星载高分辨率 SAR 卫星的发射运行,图像中更丰富的特征为舰船识别提供了可能,进一步提高了海洋监测能力.

SAR 图像包含几何特征、灰度特征及变换域特征等特征.其中几何特征基于区域分割形成的二值图像上提取的特征,是 SAR 图像目标较为直观的物理特征^[2].几何特征能准确地反映 SAR 图像中目标的形状轮廓、长宽尺寸及目标像素的分布等特点,在目标检测和识别过程中具有重要应用.高分辨率 SAR 图像中,舰船目标相对于海洋背景区域噪声具有更规则的几何特征,如边缘轮廓和长宽比例等,因此采用几何特征能有有效的描述和表征高分辨率 SAR 图像中舰船目标^[3].

通常情况下,SAR 图像中舰船目标几何特征的提取流程为:首先,采用舰船检测算法进行目标区域分割,这一环节实现舰船目标的快速定位检测及目标区域的二值化分割;其次,基于分割得到的舰船目标二值图结果提取几何特征.现阶段 SAR 图像舰船目标几何特征提取研究存在的主要问题是:1)在 SAR 图像舰船目标定位检测阶段,传统检测算法的针对性较强,缺乏通用性和鲁棒性检测模型和检测算法.常见如传统恒虚警率^[4](Constant false alarm rate, CFAR)检测方法在复杂海洋背景下虚警率过高满足不了检测的实时性要求.舰船检测的海陆分割过程中精度低会引起漏检等现象.2)由于高分辨率 SAR 图像尺寸越来越大,基于图像的逐点计算等传统的目标检测算法处理速度就变得缓慢,难以实时处理^[5].大数据量的 SAR 图像信息和有限的计算机处理能力之间的矛盾,迫切需要寻求快速的图像检测方法.3)在几何特征提取阶段,常用几何特征的计算方法受 SAR 图像中强散射目标旁瓣效应的影响,特征提取的精度普遍不高.

针对以上问题,本文提出一种高分辨率 SAR 图像的几何特征提取方法.算法主要包含两个阶段:第一阶段为视觉注意机制下舰船目标切片的区域分割,采用改进的频谱残差法得到视觉显著图.其次,在对得到的显著图的处理时采用显著图的二值化处理和感兴趣区域切片的获取两种操作.第二阶段,针对 SAR 图像舰船目标切片进行基于方位角估计的几何特征提取,并通过实验验证该方法的有效性和稳定性.

1 SAR 图像舰船目标切片的区域分割

大多数情况下,舰船目标是稀疏分布于海面上的.一般的检测算法对 SAR 图像进行检测时,往往会耗费较多时间在海面背景区域,这会大大降低算法的检测效率^[6].基于图像频域中视觉注意机制的思想,图像中频繁出现的信息不具备视觉显著性,相比之下舰船目标等新颖信息更能引起人眼视觉注意^[7].因此将视觉显著性检测用于目标检测,以完成图像内显著区域的快速提取.本文算法的流程图如图 1.

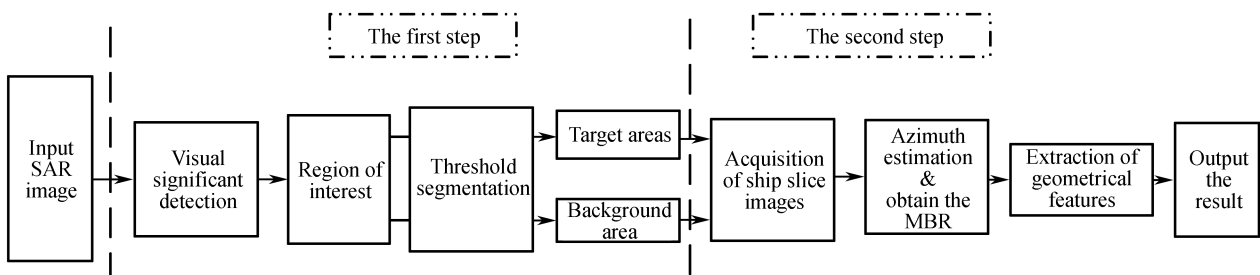


图 1 高分辨率 SAR 图像舰船目标几何特征提取步骤示意图

Fig.1 The flow chart of feature extraction in high-resolution SAR images

1.1 基于频谱残差视觉注意机制的检测理论

近年来计算机视觉的研究已经取得很大发展,并获得了一系列成果,但依旧不能媲美人眼视觉处理系统

对现实场景的信息分析及处理能力.因此学者们不断研究人眼视觉系统,提出了一些数学计算模型来模拟人眼视觉注意机制.目前常用的视觉注意计算模型有:ITTI 视觉注意模型,AIM 视觉注意模型和频谱残差视觉注意模型^[8-9].

考虑到前两类视觉注意模型的计算复杂度普遍较高,不利于实际实时系统的构建,尤其是将其应用于高分辨率 SAR 图像这类数据量较大的图像检测时,难以实时有效地获得显著图.

通常情况下得到一种实时性好的显著区域检测算法采用全局搜索方式,这也减轻了局部遍历的搜索代价^[10].文献[11]提出了一种基于图像频域的视觉显著区域提取方法,即频谱残差法(Spectral Residual, SR).与其它模型相比,SR 方法是一种全局显著性提取算法,基于频域计算处理,采用快速傅里叶变换实现,具有计算简单和快速的优点.方法的基本思想为:大多数自然图像的对数幅度谱具有近似相同的形状,因此一幅图像的频谱中有别于相同形状的部分即是蕴含着目标信息的频谱残差部分.

假设 $I(x)$ 为一幅图像,图像频谱 $\text{FFT}[I(x)]$ 分解成幅度谱 $A(f)$ 和相位谱 $P(f)$ 两部分.

$$A(f) = \text{Amp}\{\text{FFT}[I(x)]\} \quad (1)$$

$$P(f) = \text{Pha}\{\text{FFT}[I(x)]\} \quad (2)$$

通过一个低通滤波器与图像的对数幅度谱进行卷积,将该幅度谱平滑处理,与原图像的对数幅度谱作差求出频谱残差.结合所得的频谱残差和相位谱,求取原图像的视觉显著图.频谱残差的计算过程为

$$L(f) = \log[A(f)] \quad (3)$$

$$R(f) = L(f) - h_n(f) * L(f) \quad (4)$$

$$S(x) = g(x) * |\text{FFT}^{-1}[\exp(R(f) + i \cdot P(f))]|^2 \quad (5)$$

其中,FFT 和 FFT^{-1} 表示图像的傅里叶变换及其反变换; $h_n(f)$ 表示频域的低通滤波器,如均值滤波器. $g(x)$ 表示空域的低通滤波器,可采用一个高斯平滑滤波器; $A(f)$ 、 $P(f)$ 、 $L(f)$ 分别是原始图像的幅度谱、相位谱及对数幅度谱; $R(f)$ 表示频谱残差; $S(f)$ 为显著图.

在频谱残差计算模型中发现,相对于对数幅度谱,相位谱才是真正对于显著图具有实质贡献的部分,依据这点对经典的频谱残差模型进行改进.新的视觉显著计算模型为

$$P_M(f) = \text{FFT}[I(x)] / \{|\text{FFT}[I(x)]|\} \quad (6)$$

$$R_M(f) = \text{BP}(f) \cdot P_M(f) \quad (7)$$

$$S_M(f) = \text{FFT}^{-1}[R_M(f)] \quad (8)$$

其中,BP(f)指带通滤波器,本模型选择中心频率为 f_0 、截止频率为 Δf 的高斯滤波器; $P_M(f)$ 是原图像相位谱; $R_M(f)$ 表示频谱残差; $S_M(f)$ 为显著图.改进后的频谱残差显著计算模型主要包括两步运算:原始频谱的归一化处理 and 频域带通滤波.

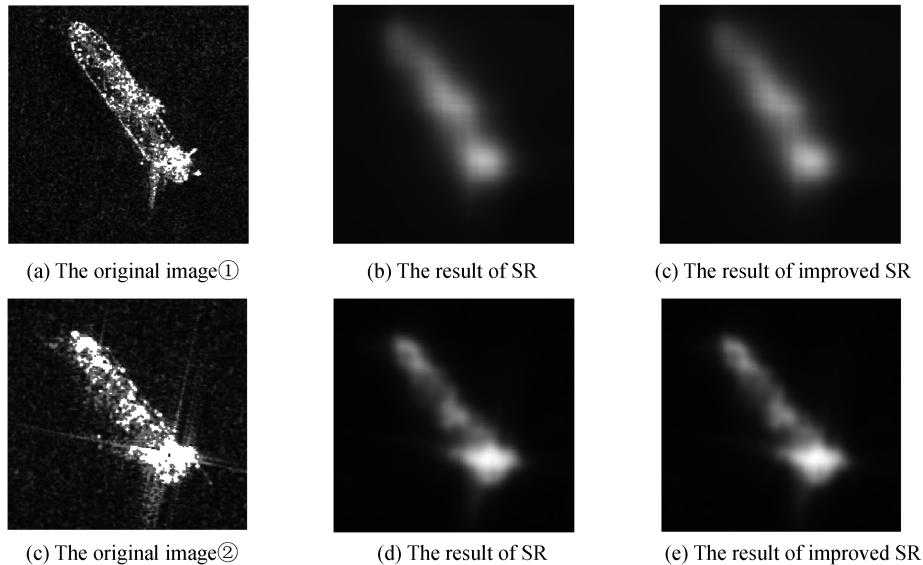


图2 两种频谱残差法的显著图细节对比

Fig.2 Comparison of the details of saliency maps

相比之前的频谱残差法,改进后的频谱残差法无需进行对数幅度谱计算和低通滤波,频域的指数运算以及空域的高斯滤波,大大提升了计算速度.改进的方法包含的两个控制参数 f_0 和 Δf ,可依据目标特性进行调整,因此计算模型具有一定适应性.通过实验对改进前后的计算模型进行对比分析.

通过人眼观察实验数据图 2,改进前后所得到的 SAR 图像显著图在人眼视觉感受上比较相近.通过图 3 进一步定量计算验证:两种显著图的残差取值随机分布于区间 $[-1, 3]$ 之间,在进一步说明了两种显著图相似性的同时,发现在舰船目标存在的坐标附近灰度差值更加突出.因此可以得出结论,新的频谱计算方法在一定程度上提高了目标的信杂比.

通常情况下 SAR 图像中目标的灰度值要高于其临近区域的背景像素点的灰度值,因此舰船目标潜在区域一般都包含在所得到的显著区域内^[12],采用这种显著区域提取的方法能够大大降低后续局部遍历检测时的数据量,在一定程度上提高检测算法的实用性能.另一方面,在视觉显著计算中,当陆地相对于舰船目标出现频率是相对较高时,陆地则表现为不显著信息,因此无需对图像做海陆分割的预处理,而是直接利用视觉注意计算模型获取图像中的感兴趣区域,进一步提高了检测效率.

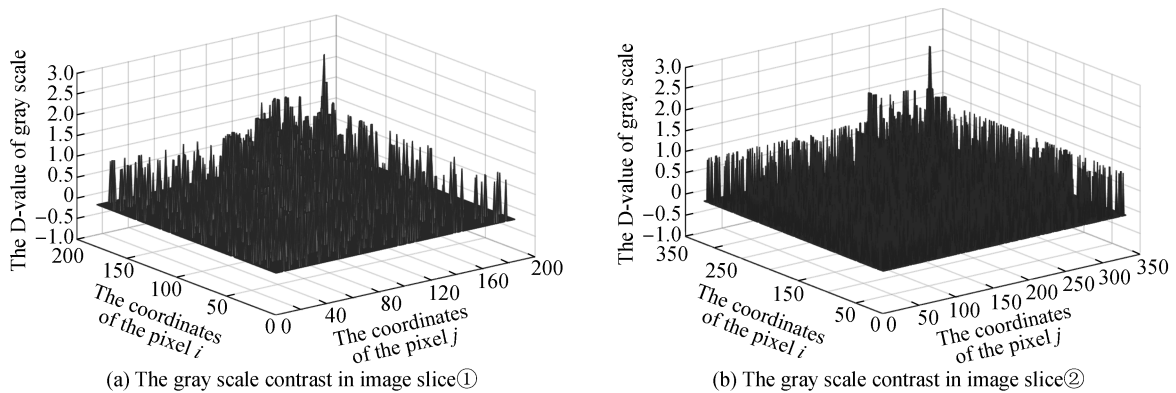


图 3 图像切片的两种显著图灰度差值对比
Fig.3 Comparison of gray difference of image slices

1.2 基于频谱残差显著计算的舰船目标区域分割

依据频谱残差视觉显著检测理论进行算法设计,实现 SAR 图像中舰船目标区域的分割.首先需要完成感兴趣区域的检测定位,本文采用新的频谱残差显著计算得到视觉显著图并对其处理.考虑到所得视觉显著图在抑制 SAR 图像中背景噪声的同时,舰船目标信号也得到了一定程度的增强,显著图更具灰度对比度,这也为后续检测算法的应用提供了更多可能.

目前提出和发展了大量针对 SAR 图像的舰船目标检测方法,但通常情况下一种检测算法对不同的 SAR 数据图像表现出的检测性能差异较大,存在适用性不强的问题.陈利民等基于 ENVISAT-ASAR、RADARSAT-2 和 TerraSAR-X 等 SAR 舰船图像进行舰船检测算法对比分析,选取 K-CFAR、G0-CFAR、双参数 CFAR、小波变换和最大熵阈值(KSW)五种常见的舰船检测算法,着重从检测性能和检测效率方面对算法进行评价和比较.对中等分辨率目标背景对比度较低的 SAR 图像,采用基于 K 分布的 CFAR 舰船检测算法能够很好的进行目标检测;对高分辨率目标和背景对比度较高的 SAR 图像,最大熵阈值舰船目标检测算法能够快速高效地检测舰船目标,并能较好地保留舰船轮廓信息^[13].新的频谱残差视觉显著图增强了高分辨率 SAR 图像背景与舰船目标的对比度,结合所得的 SAR 图像显著图特点进行分析,本文采用一种基于 SAR 图像显著图的最大熵阈值检测算法.

算法将信息论中的 Shannon 熵概念应用于图像分割领域,计算图像灰度直方图的信息熵.对于目标检测而言,需要找出使得目标和背景信息熵之和最大的最佳阈值,并以此阈值对待检测图像进行分类,从而达到检测提取舰船目标的目的.算法具体的实施是通过统计待检测显著图中各灰度级出现的概率,利用阈值将灰度值分为三部分,每部分熵值之和为总的熵值,找出使得总熵值最大的一组阈值.设显著图中灰度值(图像灰度为 2^N)被阈值 T_1, T_2 分为三部分 ($0 < T_1 < T_2 < N - 1$),各个部分的概率分别为 $P_0/P_A, P_1/P_A, \dots, P_{T_1}/P_A; P_{T_1+1}/P_B, P_{T_1+2}/P_B, \dots, P_{T_2}/P_B; P_{T_2+1}/P_C, P_{T_2+2}/P_C, \dots, P_{N-1}/P_C$.

各个部分的熵分别为

$$H_A = - \sum_{i=0}^{T_1} \frac{P_i}{P_A} \ln \frac{P_i}{P_A}, H_B = - \sum_{i=T_1+1}^{T_2} \frac{P_i}{P_B} \ln \frac{P_i}{P_B}, H_C = - \sum_{i=T_2+1}^{N-1} \frac{P_i}{P_C} \ln \frac{P_i}{P_C} \quad (9)$$

总熵为

$$H(T_1, T_2) = H_A + H_B + H_C = - \sum_{i=0}^{T_1} \frac{P_i}{P_A} \ln \frac{P_i}{P_A} - \sum_{i=T_1+1}^{T_2} \frac{P_i}{P_B} \ln \frac{P_i}{P_B} - \sum_{i=T_2+1}^{N-1} \frac{P_i}{P_C} \ln \frac{P_i}{P_C} \quad (10)$$

最佳阈值组合 T_1, T_2 为

$$(T_1, T_2) = \arg \left[\max_{0 < T_1 < T_2 < N-1} H(T_1, T_2) \right] \quad (11)$$

式中, $P_A = \sum_{i=0}^{T_1} P_i, P_B = \sum_{i=T_1+1}^{T_2} P_i, P_C = \sum_{i=T_2+1}^{N-1} P_i$; P_i 为灰度值为 i 时的概率, P_A, P_B, P_C 三部分所占概率. 根据式求出最佳阈值组, 选取 T_2 作为检测阈值. 遍历显著图中各个像素点 $X_{i,j}$, 判决准则为

$$\begin{aligned} X_{i,j} &\geq T_2 \text{ 像素为目标像素} \\ X_{i,j} &< T_2 \text{ 像素为背景像素} \end{aligned} \quad (12)$$

最后, 在显著图上对检测标记出的舰船目标区域予以分割, 获得舰船目标区域切片, 如图 4.

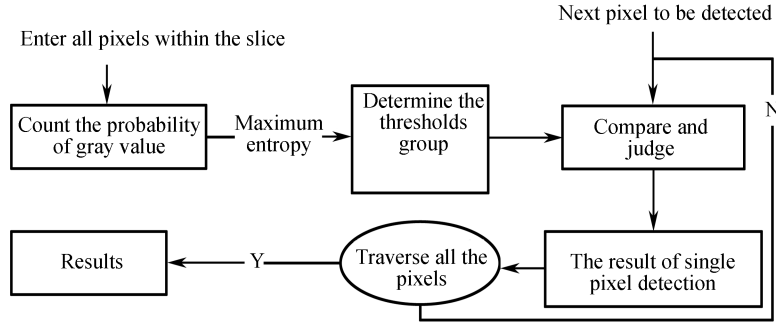


图 4 基于显著图的 KSW 算法流程图

Fig.4 The flow chart of KSW algorithm based on saliency maps

对比需要估计更多参数模型的 CFAR 等传统检测方法, 本文采用基于 SAR 图像分块区域的最大熵阈值检测算法运算量相对较少, 提高了检测效率.

2 基于方位角估计的舰船目标几何特征提取

本文基于方位角估计的几何特征提取的关键步骤在于, 首先基于获得的舰船目标二值图求取较为准确的 MBR, 其次基于获得的 MBR 的基础上构建更具适用性、更能表征真实舰船目标的数学模型以计算更准确的方位角, 最后在估计所得方位角的基础上求取舰船主轴和最佳舰船长宽 MBR 进而提取长宽比、矩形度等几何结构特征, 此步骤流程如图 5.

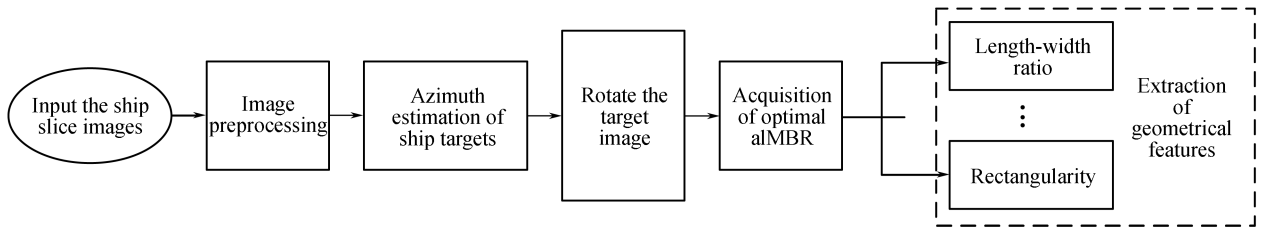


图 5 基于方位角估计的几何特征提取示意图

Fig.5 The flow chart of geometric feature extraction based on azimuth estimation

2.1 图像切片预处理

高分辨率 SAR 图像通常受到成像几何、雷达参数及舰船等目标运动特性的影响, 图像中舰船区域易受相干斑噪声、旁瓣模糊以及相邻船只干扰影响^[14], 如舰船区域中强散射点旁瓣效应在图像中形成亮线.

考虑这些干扰因素在后续的舰船目标特征提取分析过程中产生不利影响, 需要对舰船图像切片进行预筛选和图像预处理, 以实现非舰船目标的排除和旁瓣、斑点噪声的抑制. 基于舰船切片二值图像进行处理的

操作包括:1)通过计算检测区域的像素个数,设定阈值去除虚警.2)通过开运算实现旁瓣噪声的抑制.通常情况下,二值图像存在距离向和方位向的细线,即“十字叉”.通过腐蚀再膨胀的开运算对二值图像进行处理,去除舰船区域的强散射点的旁瓣效应影响.3)通过筛选机制抑制 SAR 图像斑点噪声.求取连通区域面积,设定阈值去除面积较小的区域.预处理的效果如后续仿真图所示,可以看出舰船区域的散射点旁瓣效应得到较好的抑制.其中,对舰船切片开运算的运算因子设置为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2.2 方位角估计

舰船目标方位角,反映目标的航向,表示为舰船主轴与图像距离向或方位向的夹角.方位角的估计精度对后续几何特征的提取至关重要^[15].现有方位角估计方法主要包含两类:基于主轴获取的方法和基于最小外接矩形的方法(Minimum Bounding Rectangle, MBR).

基于主轴获取方法采用回归分析法对方位角的计算为

$$\theta = \arctan \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

式中 (x_i, y_i) 为舰船目标各个像素的坐标.基于主轴获取的方法是以舰船目标具有几何对称性为前提,此类方法优点在于数学模型简单,缺点为处理的舰船目标结构不对称时误差大,适用性不强^[16].

基于 MBR 的方法将最小外接矩形的长边方向视为目标方位角,计算舰船目标在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 角度区间内所有的外接矩形,以判决准则以寻找 MBR.常见的 MBR 判决准则包含最小外接矩形周长准则、最小外接矩形面积准则和最大信噪比(目标背景像素面积比)准则等.基于 MBR 方法的适用性相对较强,能获取较高的估计精度,但容易受到舰船目标遮挡因素、不规则形状的影响而产生误差.

现阶段方位角估计方法受假设前提的影响都存在一定的局限性,往往无法满足后续舰船目标识别的要求.目前仍然不能绝对准确地求取方位角,因此需要寻找更精确、更强适用性的方法.

目前,矩技术在图像解译处理领域中得到广泛应用,采用矩技术进行特征提取能降低噪声干扰的影响,特征提取的稳定性强,并能较好地反映图像细节^[17-18].通过检测算法分割得到 SAR 图像舰船切片,将目标切片灰度图或二值化结果图看作密度分布函数,可以进行矩技术应用,计算求取表征图像尺寸和方位角的二阶矩.以矩技术进行 SAR 图像特征的提取需要对待处理图像进行数学计算模型的近似,将 SAR 图像舰船目标切片近似为椭圆模型,椭圆中心为图像质心,构造的椭圆数学模型具有一定的方向、面积和离心率,则舰船目标的方位角即为椭圆的倾角.

假设一幅 SAR 图像切片 $I(x, y)$, 图像切片中包含一个舰船目标.通过阈值分割得到二值图为 $B(x, y)$, 则二维图像舰船目标切片的 $(a+b)$ 阶二维笛卡尔原点矩可计算为

$$E_{ab} = \sum_x \sum_y x^a y^b \times B(x, y) \quad (14)$$

其中,零阶矩 E_{00} 代表估计的舰船目标面积;一阶二维笛卡尔原点矩 E_{10} 和 E_{01} 分别代表舰船目标在 X 轴和 Y 轴的质量矩心.

方位角的计算方法为

$$\theta = \arctan \left[\frac{M_{xx} - M_{yy} + \sqrt{(M_{xx} - M_{yy})^2 + 4M_{xy}^2}}{2M_{xy}} \right] \quad (15)$$

其中二阶中心矩 M_{xx} 、 M_{yy} 和 M_{xy} 为待处理图像切片在水平、垂直方向的净矩及最小转矩角,为

$$\begin{cases} M_{xx} = E_{20} - E_{10}^2/E_{00} \\ M_{yy} = E_{02} - E_{01}^2/E_{00} \\ M_{xy} = E_{11} - E_{10} \cdot E_{01}/E_{00} \end{cases} \quad (16)$$

2.3 几何特征提取

根据上一步骤估计所得方位角将舰船目标旋转至水平状态,得到初始的 MBR, 外接矩形的长为 L , 宽为

W ,依据逐步逼近法求取最佳表征舰船目标长宽等特征的外接矩形

1) 计算舰船切片二值图每行的平均像素个数 $P_m = E_{00}/W$;

2) 设置调整系数 K_1 ,计算外接矩形上下边界的像素个数 N_{m1} 和 N_{m2} ,若 $N_m < K_1 P_m$,则在垂直方向上缩小外接矩形,直到 $N_m \geq K_1 P_m$;

3) 类似地,计算舰船切片二值图每列平均像素数 $P_n = E_{00}/L$;

4) 设置调整系数 K_2 ,计算外接矩形左右边界的像素个数 N_{n1} 和 N_{n2} ,若 $N_n < K_2 P_n$,则在水平方向上缩小外接矩形,直到 $N_n \geq K_2 P_n$.

调整系数 K_1 和 K_2 的设置需要考虑外接矩形逼近舰船目标时的各种情况:设置过小会导致外接矩形逼近舰船目标旁瓣时会终止循环,进而导致最佳外接矩形相对于真实舰船目标偏大,特征提取失准;由于舰船目标背向雷达一侧 SAR 成像后区域像素损失,系数设置过大会导致外接矩形逼近此区域时不能终止循环,因此得到的最佳外接矩形小于真实舰船目标.考虑到 SAR 图像中舰船目标两侧成像为稍长的线性,舰船的尖状舰首部分在 SAR 图像中成像为弧状,因此系数的取值一般 $K_1 > K_2$.实验验证通过此步骤,获得的最佳外接矩形能够较好的去除旁瓣和舰船 SAR 成像中不规则的突起现象.

3 实验结果与分析

本节在视觉显著性和方位角估计的理论基础上进行舰船目标几何特征提取实验.针对具有代表性的高分辨率 SAR 图像,按照实验处理流程中两个操作步骤进行实验数据仿真分析,给出了本文几何特征提取方法的结果,并与经典的算法进行对比,分析其优缺点.

3.1 舰船目标区域分割结果及分析

实验采用的机器系统配置为 Inter(R) Core(TM) i3-4170 CPU @3.70GHz 处理器,内存为 8GB,Windows 7 操作系统的台式电脑,运行平台为 MATLAB 2016.实验选取一幅 $5\ 517 \times 3\ 712$ 的 TerraSAR-X 图像作为实验数据,其成像区域为直布罗陀海峡区域,图像采样率为 1.25 m,极化方式为 HH 极化,该区域包含大量的不均匀海杂波背景以及尺寸较大差别的舰船目标,并且还有一定面积的陆地区域.

实验仿真数据如图 6,从图中标记结果可以看出,实验图像中舰船数目为 19 个.首先采用改进的频谱残差方法计算得到显著图.图 6(c)为所得实验图像显著图,针对本文实验图像,频谱残差计算中的高斯滤波器方差参数设为 0.25.从图中可以看出显著图保留了视觉认知中明显的目标,同时也消除了陆地区域.通过对显著图进行 KSW 阈值分割操作,完成舰船目标的潜在区域提取,仿真结果为图 6(d).

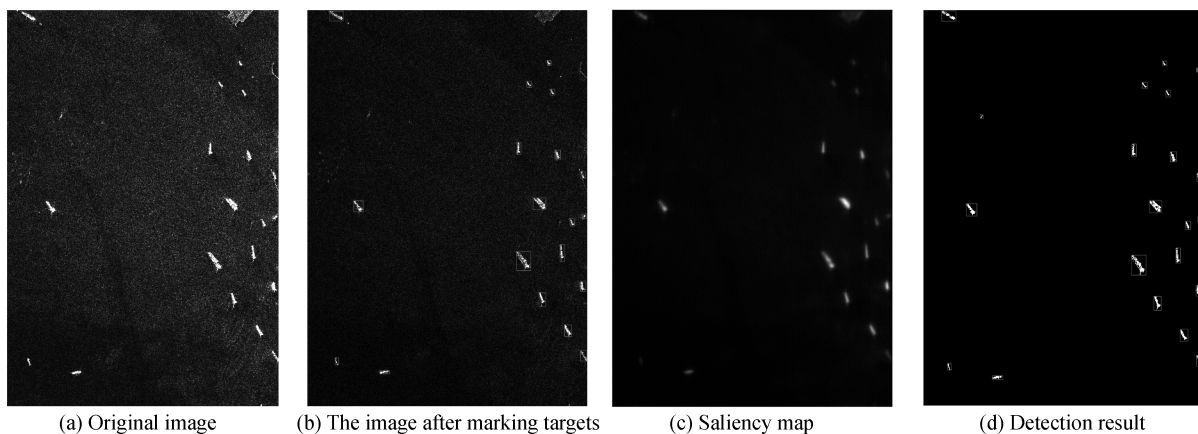


图 6 实验仿真图像

Fig.6 Experimental simulation results

为了评价本文算法有效性,表 1 给出本文算法、双参数 CFAR 算法和对数正态分布 CFAR 算法基于实验数据进行检测的对比结果.为客观评价算法检测效率,保证算法在相同条件下执行,每种算法均运行 5 次,记录每次运行时间,取 10 次实验耗时的平均值.其中双参数、对数正态分布的 CFAR 的虚警率设为 10^{-5} .由结果可以看出:双参数 CFAR 检测算法存在漏检,并且检测出 7 个虚警目标,检测耗时较长;基于 log-normal 分布的 CFAR 舰船检测算法检测出了所有真实目标,但存在 5 个虚警目标,并且耗时最长.对比以上方法,本

文基于频谱残差显著计算进行目标区域分割时具有更高的检测效率和更低的虚警率。

表 1 海面 TerraSAR 图像 3 种检测方法检测结果对比

Table 1 Comparison of three detection methods in sea surface TerraSAR image

Detection algorithm	Missed number of targets	The number of detected targets	The number of false alarms	Detection time	Figures of Merit (FoM)
Two-parameter CFAR	1	18	7	92.63 s	0.720
Log-normal CFAR	0	19	5	130.13 s	0.792
The proposed algorithm	0	19	4	46.24 s	0.826

3.2 几何特征提取结果分析及分析

针对高分辨率 SAR 图像提出了一种舰船目标几何特征提取方法,该方法的实现依赖于方位角估计的精度,所以首先需要进行舰船目标方位角估计的准确率及实用性验证分析.基于上一步视觉显著机制检测获取的舰船目标切片进行实验验证.本文从中选取了 5 幅舰船切片样本进行方位角估计,结果如表 2 所示,其中真实方位角通过目视测量判读得到,可以看出:受强散射点等雷达成像因素影响,舰船目标在 SAR 成像中呈现出不均匀不对称结构,利用基于主轴获取和最小外接矩形的方法估计方位角误差较大,本文采用矩估计的思想得到的方位角更趋于真实值,且该方法在多个样本进行估计时,都取得较好的估计精度,验证了本文估计方法良好的稳定性.

表 2 方位角估计结果对比

Table 2 Comparison of results of azimuth estimation

Method of estimation	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
Method based on spindle acquisition	60.505 0	55.945 1	124.458 4	-11.580 8	64.589 4
Method based on MBR	57.362 4	55.560 3	128.900 4	-13.041 3	65.405 1
The proposed method.	53.544 9	54.208 6	125.320 0	-9.568 1	66.546 1
Actual azimuth	54.020 6	53.463 8	126.248 1	-10.521 0	66.405 1

图 7 验证了 MBR 提取的效果,选取几何特征区别明显的舰船切片样本 1、样本 2 和样本 5 进行 MBR 求取,图 7(a)为原始图像相应位置的 SAR 图像舰船区域,(b)为频谱残差显著图的舰船目标区域,(c)为 MBR

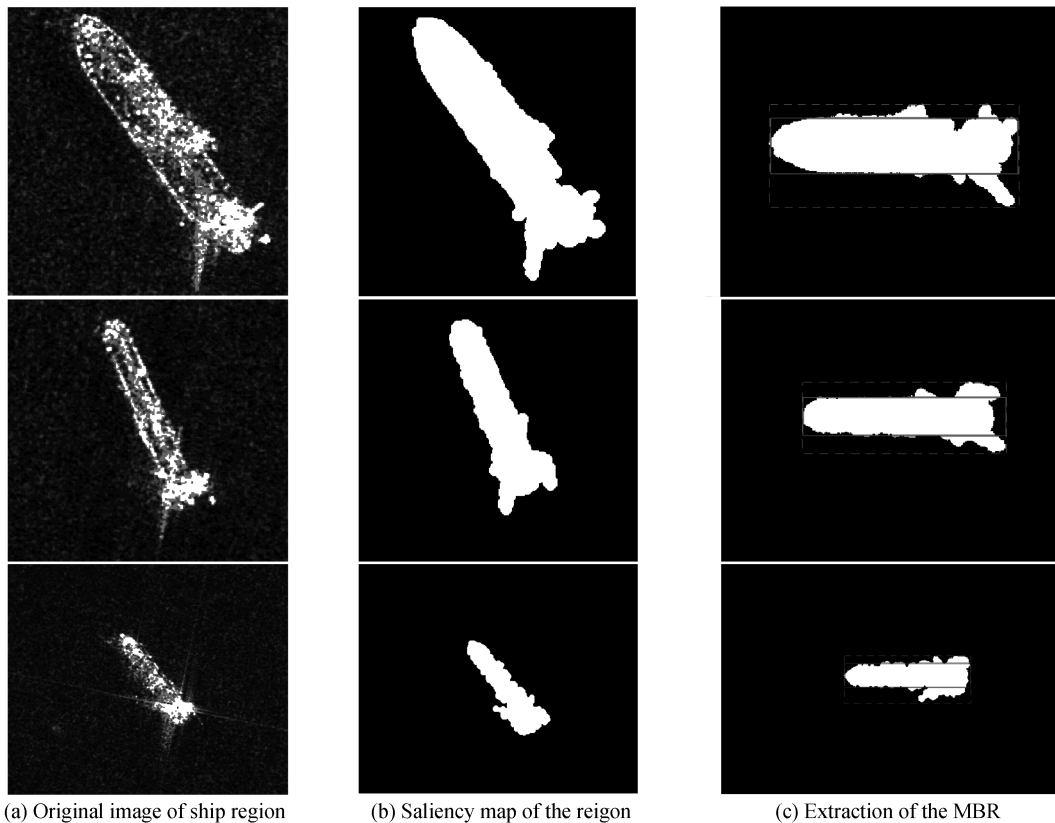


图 7 MBR 提取结果

Fig.7 The results of MBR extraction

提取结果,定性分析得出结论,本文算法最终能够相对有效地逼近了舰船目标真实几何轮廓。

为进一步精确的验证该算法的特征提取精度,本文以长度和宽度两个几何特征为检验标准,选取7个舰船切片,针对常规MBR提取方法与本文特征提取算法进行实验.结果如表3和4,表2为基于常规MBR提取方法的长宽特征提取结果,表1为相应的本文算法提取结果。

表3 常规MBR算法的舰船几何特征提取结果(单位:像素数)

Table 3 The results of geometric features extraction by MBR method (Unit: pixel)

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7
Length	57	139	60	91	87	65	118
Actual length	60	134	56	85	89	56	120
Error 1	3	5	4	6	2	9	2
Width	25	25	24	20	28	14	32
Actual width	20	28	26	23	24	16	30
Error 2	5	3	4	3	4	2	2

表4 本文算法的舰船几何特征提取结果(单位:像素数)

Table 4 The results of geometric features extraction by our method (Unit: pixel)

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7
Length	63	135	59	88	90	59	120
Actual length	60	134	56	85	89	56	120
Error 1	3	1	3	3	1	3	0
Width	21	28	30	26	28	19	31
Actual width	20	28	26	23	24	16	30
Error 2	1	0	4	3	4	3	1

对以上表中的结果进行分析,常规方法提取特征的平均长度误差为4.4个像素、宽度平均误差为3.3像素;而本文方法的平均长度误差为2.1个像素、平均宽度误差为2.0个像素.另外,针对有明显散射旁瓣的样本切片2和7,本文几何特征提取准确率远远高于常规方法,验证了本文算法在抑制旁瓣上有很好的效果.总结得出结论,本文提出的几何特征提取方法能够去除强散射点导致的不规则成像影响以及斑点噪声,有效地逼近了舰船目标真实几何轮廓,有效提高了特征提取的精度。

4 结论

针对SAR图像检测识别问题中几何特征提取的问题,提出了一种基于视觉显著性和方位角估计的几何特征提取方法.通过仿真实验验证了本文提出的方法能够在不同杂波环境下相对有效地检测定位舰船目标并予以特征提取,在相同的目标区域检测率条件下,具有比经典方法更低的虚警率和更快的检测速度,也能更好地抑制旁瓣噪声,进一步提高了舰船目标几何特征提取的准确率。

现有研究需要深入和完善的地方在于:1)检测场景中若存在较多小面积的岛屿时,需要进行陆地消除的预处理.陆地消除也是另外一个比较重要的研究领域;2)在进行频域变换的视觉显著性处理中,需要根据舰船目标的图像特性进一步完善带通滤波器的参数设置,以寻求相对适用性强的滤波器;3)本文针对显著图所采用阈值分割方法只适用于满足部分特征类型的显著图,这是本文算法存在的局限性,下一阶段考虑将借鉴生物认知、机器学习思想来设计显著图自适应检测算法,进而更准确的完成目标检测。

参考文献

- [1] MOREIRA A. A tutorial on synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, 1(1): 6-43.
- [2] GU D, XU X. Multi-Feature extraction of ships from SAR images[C]. 2013 6th International Congress on Images and Signal Processing, 2013: 454-458.
- [3] XING Xiang-wei, JI Ke-feng, KANG Li-hong, et al. Review of ship surveillance technologies based on high-resolution wide-swath synthetic aperture radar imaging[J]. *Journal of Radar*, 2015, 4(1): 107-121.
邢相薇,计科峰,康利鸿,等. HRWS SAR 图像舰船目标监视技术研究综述[J]. 雷达学报, 2015, 4(1): 107-121.
- [4] HE You, GUAN Jian, PENG Ying-ning. Automatic radar detection and constant false alarm rate processing[M]. Tsinghua University Press, 1999.

- 何友,关键,彭应宁. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
- [5] DENG Yun-kai, ZHAO Feng-jun. Development trend and application of spaceborne SAR Technology[J]. *Journal of Radar*, 2012, **1**(1): 1-10.
邓云凯,赵凤军. 星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报,2012,**1**(1):1-10.
- [6] JIAO Li-cheng, ZHANG Xiang-rong, HOU Biao, *et al.* Intelligent SAR image processing and interpretation[M]. Science Press, 2007.
焦李成,张向荣,侯彪,等. 智能 SAR 图像处理与解译[M]. 科学出版社,2007.
- [7] FARROUKI A, BARKAT M. Automatic censoring CFAR detector based on ordered data variability for nonhomogeneous environments[J]. *IEEE Proceeding Radar, Sonar and Navigation*, 2005, **152**(1): 43-51.
- [8] HARM G. Developments in detection algorithms at JRC[C]. The Third Meeting of the DECLIMS Project, Vancouver, BC, 2004: 1-7.
- [9] ACHANTA R, ESTRADA F, WILS P, *et al.* Salient region detection and segmentation[C]. Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision Systems (ICVS 2008), Santorini, Greece, 2008, **2507**: 66-75.
- [10] ZHANG Zhi-long, YANG Wei-ping, ZHANG Yan Li, *et al.* Ship detection in infrared remote sensing images based on spectral residual transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, **2**(5): 8-15.
张志龙,杨卫平,张焱,等. 基于频谱残留变换的红外遥感图像舰船目标检测方法[J]. 电子与信息学报,2015,**2**(5):8-15
- [11] HOU X, ZHONG L. Saliency detection: a spectral residual approach[C]. Proceedings of the 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2007), Minneapolis, Minnesota, USA, 2007: 1-8.
- [12] ITTI L. Models of bottom-up and top-down visual attention[D]. California Institute of Technology, 2000: 13-19, 32-34.
- [13] CHEN Li-min, YANG Xue-zhi, ZHANG Xi, *et al.* The comparison and analysis of the ship detection algorithm in SAR images[J]. *Remote Sensing Information*, 2015, **5**(2): 99-104.
陈利民,杨学志,张晰,等. SAR 舰船检测算法对比分析研究[J]. 遥感信息,2015,**5**(2):99-104.
- [14] GAO Gui, HE Juan, KUANG Gang-yao, *et al.* A survey of target's orientation estimation in SAR image[J]. *Signal Processing*, 2008, **24**(3): 438-443.
高贵,何娟,匡纲要,等. SAR 图像方位角估计方法综述[J]. 信号处理,2008,**24**(3):438-443.
- [15] GAO D, HAN S, VASCONCELOS N. Discriminant saliency, the detection of suspicious coincidences and applications to visual recognition[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, **31**(6): 989-1005.
- [16] JI Ke-feng, KUANG Gang-yao, YU Weng-xian. A method of estimating target azimuth from SAR image based on linear regression[J]. *Modern Radar*, 2003, **26**(11): 26-29.
计科峰,匡纲要,郁文贤. 基于线性回归的 SAR 目标方位角估计方法[J]. 现代雷达,2003,**26**(11):26-29.
- [17] GUO Shao-jun, Lou Shu-li, LIU Feng. Multi-ship saliency detection via patch fusion by color clustering[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(7): 1807-1817.
郭少军,娄树理,刘峰. 应用颜色聚类图像块的多舰船显著性检测[J]. 光学精密工程,2016,**24**(7):1807-1817.
- [18] WANG Xiao-hong. Moment Technique and its Applications in Image Processing and Recognition[D]. Xi'an: North-western Polytechnic University, 2001.
王晓红. 矩技术及其在图像处理与识别中的应用研究[D]. 西安:西北工业大学,2001.