

高分辨 TerraSAR-X 图像舰船目标几何参数提取方法

陈建宏^{1,2}, 赵拥军¹, 赖涛¹, 黄洁¹

(1. 信息工程大学 导航与空天目标工程学院, 郑州 450001; 2. 73906 部队, 南京 210028)

摘要: 准确提取 SAR 图像舰船目标几何参数是实现舰船分类的基础. 由于 SAR 特有的成像机理, SAR 图像旁瓣效应和方位模糊严重影响了舰船目标的几何参数估计, 为此提出一种基于迭代线性回归的舰船几何参数提取方法. 首先通过线性回归提取目标的主轴方位; 然后利用循环迭代剔除远离主轴的虚假目标像素; 最后用实测 SAR 数据进行了验证. 实验结果表明, 该算法对高分辨率的 SAR 舰船目标切片具有较好的参数估计效果.

关键词: SAR 图像; 舰船; 几何参数估计; 迭代线性回归; 最小外接矩形

中图分类号: TN953

文献标志码: A

Geometric parameters extraction method of ship target in high resolution TerraSAR-X image

CHEN Jian-hong^{1,2}, ZHAO Yong-jun¹, LAI Tao¹, HUANG Jie¹

(1. School of Navigation and Aerospace Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China; 2. 73906 Troops, Nanjing 210028, China. Correspondent: CHEN Jian-hong, E-mail: gycjh2010@163.com)

Abstract: It is the basis of realization ship classification to accurately extract geometric parameters of the ship target in synthetic aperture radar(SAR) images. Due to the unique SAR imaging mechanism, azimuth ambiguity and sidelobe effects seriously impact on geometric parameters estimation of the ship target. Therefore, a method is presented to extract geometric parameters of the ship based on iterative linear regression. Firstly, the orientation of the goal spindle is extracted by linear regression. Then false target pixels are removed away from the ship spindle by iteration. Finally, the proposed method is verified with the actual measured SAR image. Experimental results show that the proposed algorithm has a better results of parameter estimation for high resolution SAR image of the ship target slice.

Keywords: SAR image; ship; geometrical parameter estimation; iterative linear regression; minimum enclosing rectangle

0 引言

星载合成孔径雷达(SAR)具有分辨率高、探测范围广和全天候、全天时观测等优点. 舰船监测与识别在海上交通管理、海洋资源保护等方面具有重要作用, 故此, 通过星载 SAR 监视海洋舰船得到广泛关注. 随着新一代 SAR 系统(如 TerraSAR-X 和 Sentinel-1 等传感器)的相继出现, 获取 SAR 图像的分辨率越来越高, 这些米级分辨率图像有力推动了舰船识别的研究进展.

几何特征参数主要指目标的尺寸、方位和形状等. 舰船几何特征是确定目标类型和判明目标性质的主要依据, 对判读具有重要作用. 各类舰船的功能、用

途、船上配置的设备不同, 每型舰船的船体形状(例如艏尖艉尖、矩形和艏尖艉方等)存在着一定差异, 但在米级分辨率条件下, 受电磁散射与相干斑的影响, 模糊了上述差异. SAR 图像中大、中型舰船目标的外形整体均呈现为长条形, 舰船尺寸相对保持稳定. 因此, 精确提取舰船目标几何参数成为舰船分类识别的首要任务.

SAR 舰船目标几何参数的提取研究已逐步展开, 按照算法原理的不同, 大致可分为 3 种方法: 1) 采用最小外接矩形法(MER)计算包含舰船目标像素的矩形面积最小时, 矩形长轴偏移角度即为主轴方位, 相应最小外接矩形的长宽即为舰船的长宽. 该方法前提

收稿日期: 2014-03-24; 修回日期: 2014-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301481, 61302160).

作者简介: 陈建宏(1980—), 男, 工程师, 博士生, 从事 SAR 图像解译的研究; 赵拥军(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事雷达信号处理等研究.

是精确获得目标区域, SAR 特殊的成像机理使得舰船目标形状没有光学图像清晰完整, 受桥楼顶部前端的舰桥、指挥舱桅杆和烟囱等高层建筑形成的拖尾、旁瓣等影响, 舰船成像后形状不规则, 造成提取的主轴方向和位置不准确, 从而使得最小外接矩形主轴无法与船舶实际主轴一致^[1]. 2) 线性回归参数估计和最小转动惯量矩估计方法^[2], 其中线性回归方位角估计的前提是假定目标二值图像像点分布对称. 最小转动惯量矩方位角估计的核心思想是寻求目标二值图像各点到某一直线的距离和最小时, 该直线对应的方位角. 据此, 当目标的几何结构不对称时, 估计的方位角将存在误差. 在低分辨率条件下, SAR 图像中大多数舰船目标表现为点目标, 不具有对称性, 所以估计误差较大^[3]. 3) Hough 变换或 Radon 变换及其改进方法^[4-7]. 该类变换将主轴的确定转化为 $\rho - \theta$ 域中的峰值检测问题, 而舰船的宽度转变为 $\rho - \theta$ 域中主轴在峰值区域内的范围. 该法效果较好, 但隐含一个提取最大峰值区域的难题, 同时返回原图后续分割处理的结果也影响最终效果.

基于上述问题, 本文提出一种基于迭代线性回归的高分辨率 SAR 图像舰船几何参数估计方法. 首先利用 MER 提取舰船目标初始切片, 然后以舰船切片的形心和矩形度为阈值进行迭代处理. 迭代中采用形心和线性回归获得舰船的新主轴, 剔除远离舰船主轴的像素后重新利用 MER 提取舰船切片, 直至形心位置不再发生变化或矩形度达到阈值后停止迭代, 最终保留的舰船切片经 MER 计算后即可获得舰船分类需要的方位角和长宽等几何参数.

1 高分辨 SAR 舰船几何特征分析

星载 SAR 一般处于中高空, 远离成像地域, 相应斜视角较小. 从高空观察, 舰船目标呈现俯视图, SAR 成像效果与舰船的几何形状息息相关. 图 1(a) 和图 1(b) 分别为外露油管油船、闭合货船和非闭合货船的实例照片及原始 TerraSAR-X 图像切片. 其中油船的甲板较平, 在甲板纵向正中位置有贯穿船体的输油管线, 在输油管线周围有相应金属材质的附属设施. 驾驶仓基本位于船尾, 图像中舰船轮廓清晰, 整体以油管为中心呈纵轴对称分布.

闭合货船一般甲板上有多个货舱, 货舱口边缘与甲板形成强散射二面角, 平坦舱口以镜面反射为主, 回波较弱. 图 1(b) 中闭合货船的黑色矩形区域即为弱反射平坦舱口形成的孔洞结构. 在船尾可以看到存在明显的高亮度十字叉, 这是由于船尾的高层金属建筑与船体之间形成类二面角结构, 雷达截面积极大, 根据 SAR 成像机理, 信号经过匹配滤波后产生类似 Sinc 函数形式的波形, 从而产生散射点距离分辨单元跨越问题, 在图像上表现为亮十字叉. 非闭合货船在甲板主轴或一侧有直立排列的吊机等起货设备, 散射结构多不闭合, 船舷一侧开口; SAR 图像中黑色区域是受起货设备的遮蔽而形成的. 观察图 1 中 SAR 切片, 可发现在不闭合货船中存在拖影, 其产生原因同亮十字叉. 从形状特征来看, 由于各类舰船的功能、用途、甲板上配置设备不同, 各类舰船的船体形状存在着一定差异, 但舰船大都呈现艏尖艉方的细长形状, 舰船 SAR 图像轮廓整体相似, 大都表现为近似长轴对称的长方形.

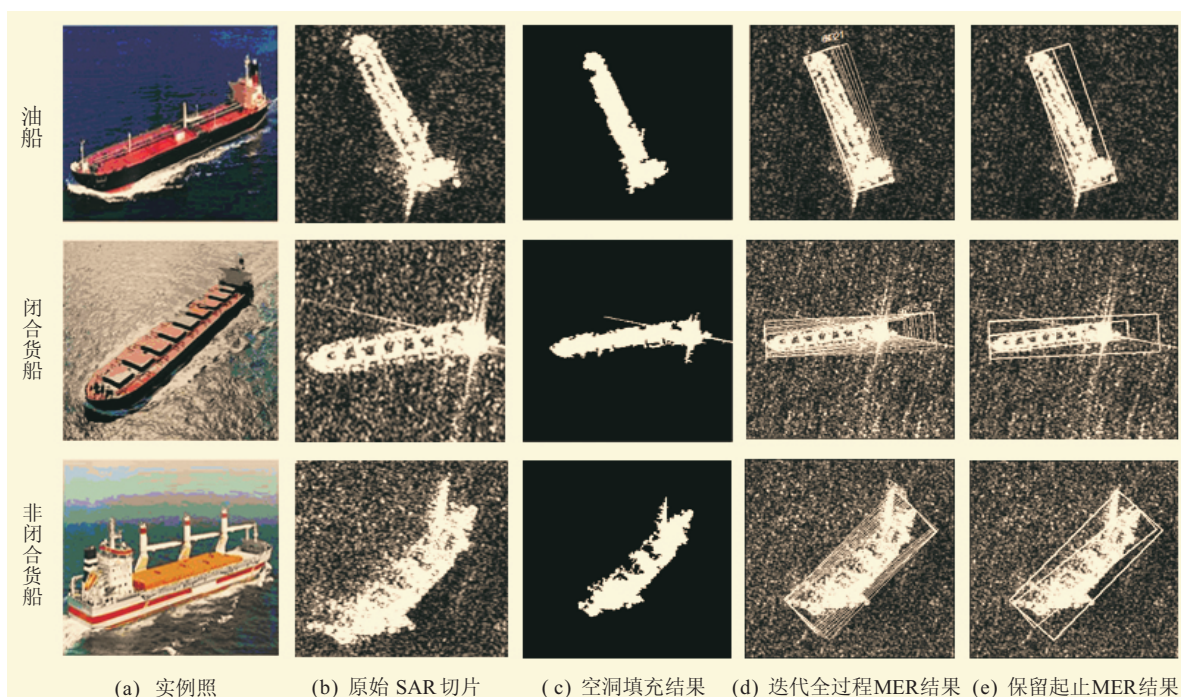


图 1 TerraSAR-X 舰船切片实验结果

2 舰船几何参数提取

2.1 最小外接矩形计算

最小外接矩形(MER)是指二维形状面积最小的外接矩形. 最小外接矩形反映了目标区域主轴方向上的长度及其垂直方向上的宽度, 可用于确定目标的主轴方向与方位角. 计算流程如下^[1]:

- 1) 根据目标包含像素点数量来确定旋转次数;
- 2) 目标按照固定角度增量在 $\pi/2$ 范围内旋转;
- 3) 计算不同角度下的外接矩形面积, 面积最小的外接矩形即为所求.

2.2 舰船主轴提取

鉴于高分辨条件下舰船具有轴对称结构特点, 选用线性回归作为主轴提取方法. 对于只有一个对称轴的截面图形, 其形心一定在其对称轴上, 具体在对称轴上的哪一点, 则需计算才能确定. 为此, 对于近似主轴对称的舰船 SAR 切片而言, 首先要确定其形心坐标 (\bar{x}, \bar{y}) , 形心是指二维图形的几何中心. 据此可知 \bar{x} 、 \bar{y} 分别为船体像素坐标的均值, x 和 y 为船体像素的横纵坐标.

得到形心后, 由于 SAR 舰船轮廓近似为长轴对称, 舰船的主轴可以利用回归分析法得到. 具体的线性回归方程为

$$y = a + bx. \quad (1)$$

其中: a 为截距, b 为回归系数.

经推导线性回归方程, 可得回归系数^[8]

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

将其代入式(1)即可得 a .

2.3 舰船矩形度分析

矩形度体现了物体对其外接矩形的充满程度, 反映物体矩形度的参数是矩形拟合因子

$$R = \frac{S_0}{S_{\text{MER}}}. \quad (3)$$

其中: S_0 为目标的面积, S_{MER} 为目标最小外接矩形的面积.

从形状特征来看, 每型舰船的船体形状各异, 相应的矩形度也不同. 航母的形状不规则, 通常呈斜多边形, 矩形度最小; 巡洋舰、驱逐舰和护卫舰等战舰形状类似, 都是形状细长, 舰首比较尖; 油船、货船等民用船的船体形状比较宽, 船头微尖, 船尾形状不定, 矩形度相对较大. 为鉴别过程中不丢失舰船目标像素, 以航母的矩形度作为极值; 同时, 考虑到 SAR 成像过程中在雷达波入射一侧, 船边缘与海水之间形成

了二面角强反射, 导致虚假地增大了舰船尺寸, 使得舰船矩形度进一步下降. 因此, 将舰船矩形度极小值 R_m 设定为 0.75.

3 算法流程

整个算法处理步骤如下:

Step 1 舰船检测与鉴别. 采用文献[9]中迭代 CFAR 进行舰船检测, 再根据面积特征设定阈值后剔除虚假小目标, 完成舰船鉴别.

Step 2 舰船空洞填充. 由 Step 1 获得的二值舰船切片中可能存在大量空洞, 如闭合货船中的货舱盖因发生镜面反射而造成的空洞. 为精确计算舰船的形心, 利用形态学对前一步结果进行空洞填充.

Step 3 MER 计算. 根据 2.1 节流程, 计算填充后舰船的最小外接矩形, 初始化船体像素集合.

Step 4 进入循环, 计算船体最终的像素坐标:

Step 4.1: 初始化. 根据 MER 结果, 分别对形心位置、船体像素集合和矩形度初始化.

Step 4.2: 利用船体像素集合, 按照 2.2 节方法, 求取形心与舰船主轴.

Step 4.3: 离轴距离计算. 在拖尾、旁瓣等影响下, 舰船的轮廓发生了畸变, 其中最为显著的是舰船宽度显著增大, 使得在实验过程中由 MER 获得的长宽比明显低于正常范围. 为此, 提出通过迭代缩减舰船宽度来逼近真实值, 以准确提取舰船的几何参数. 在 2.2 节中已经取得了舰船的形心与长轴, 进而利用下式来计算舰船切片所有像素到主轴的距离:

$$d = \frac{|y - bx - a|}{(1 + b^2)^{1/2}}. \quad (4)$$

Step 4.4: 剔除远离主轴像素, 更新船体像素集合. 在实验过程中, 将门限设置为 $\alpha \times \max(d)$, 剔除超过该门限的像素, 剩余像素即为更新后舰船目标像素, 衰减系数 $\alpha \in [0, 1]$.

Step 4.5: MER 计算. 获得更新后船体像素集合的最小外接矩形.

Step 4.6: 矩形度与形心更新.

Step 4.7: 检测形心位置是否发生变化, 矩形度是否达到极小值, 如果两个条件均满足, 则返回 Step 4.1 继续循环, 否则结束.

Step 5 根据输出的船体最终像素集合, 用 MER 方法提取几何参数.

4 实验及结果分析

为验证本文算法的有效性, 使用真实 SAR 舰船切片进行实验. 实验图像为 2008 年 TerraSAR-X 卫星 SAR 图像, 分辨率为 3 m, 图像采样率为 1.25 m, 成像区域为地中海直布罗陀海峡, 该海域有大量的舰

船. 选取的比较方法是原始MER, 选用两组大小为 250×250 , 一组大小为 330×330 的舰船切片进行实验, 衰减系数取 $\alpha = 0.9$, 结果如图 1 所示. 图 1(c) 为检测初鉴别后空洞填充结果; 图 1(d) 中白色矩形框为迭代过程中提取的MER结果; 图 1(e) 中大小矩形框为仅保留迭代终止与初始得到的MER结果, 3 个切片的迭代次数分别为 6 次、10 次和 11 次. 显然, 所提出算法鉴别结果中剔除了拖影与十字叉造成的虚假目标像素, 较为精准地保留了舰船目标像素. 不论是舰船的主轴, 还是舰船的长、宽, 相应参数提取精度均大幅提升. 实验结果表明本文算法是有效的, 在实际工程实践中效果显著.

5 结 论

本文提出了一种高分辨率 SAR 图像舰船几何参数的精确提取算法, 通过形心找到舰船中心点, 利用线性回归提取舰船主轴, 通过引入舰船半宽度与矩形度两个约束, 循环迭代后剔除了拖影与十字叉形成的虚假目标像素, 并进行了实测 SAR 图像验证. 结果表明, 一般经过 10 次左右迭代后达到平衡, 提取的舰船几何参数误差大幅减少, 为舰船精确分类提供了支撑. 考虑到拖影可能虚假增大舰船的长度, 如图 1(e) 中闭合货船鉴别结果, 在此仅考虑了舰船宽度, 如果增加长度信息, 结果可能更为精确.

参考文献(References)

- [1] 殷雄, 王超, 张红, 等. 基于结构特征的高分辨率 TerraSAR-X 图像船舶识别方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(1): 106-113.
(Yin X, Wang C, Zhang H, et al. Vessel recognition with high resolution TerraSAR-X image based on structure feature[J]. J of Image and Graphics, 2012, 17(1): 106-113.)
- [2] 高贵, 何鹏, 匡纲要, 等. SAR 图像目标方位角估计方法综述[J]. 信号处理, 2008, 24(3): 438-443.
(Gao G, He J, Kuang G Y, et al. A survey of target's orientation estimation in SAR image[J]. Signal Processing, 2008, 24(3): 438-443.)
- [3] 刘聪, 李言俊, 张科. 基于目标特征的 SAR 图像车辆目标的方位角联合估计[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(4): 1566-1569.
(Liu C, Li Y J, Zhang K. Combined pose estimation method of SAR imagery to vehicle target based on feature[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(4): 1566-1569.)
- [4] Murphey L M. Linear feature detection and enhancement in noisy image via radon transform[J]. Pattern Recognition Letters, 1986, 4(4): 279-284.
- [5] 徐牧, 王雪松, 肖顺平. 基于 Hough 变换与目标主轴提取的 SAR 图像目标方位角估计方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2): 370-374.
(Xu M, Wang X S, Xiao S P. Target aspect estimation in SAR imagery based on Hough transform and major axis extraction[J]. J of Electronics and Information Technology, 2007, 29(2): 370-374.)
- [6] 杜琳琳, 安成锦, 陈曾平, 等. 一种舰船 ISAR 图像中心线特征提取新方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1023-1028.
(Du L L, An C J, Chen Z P, et al. A new algorithm for ship center line extraction in ISAR image[J]. J of Electronics and Information Technology, 2010, 32(5): 1023-1028.)
- [7] 陈文婷, 赵和鹏, 邢相薇, 等. 基于 Radon 变换的 SAR 舰船目标切片精细分割[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 144-148.
(Chen W T, Zhao H P, Xing X W, et al. Radon transform-based algorithm for refined segmentation of SAR ship target chips[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2012, 33(8): 144-148.)
- [8] 孙家柄. 遥感原理与应用[M]. 第 3 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2013: 157.
(Sun J B. Remote sensing principles and applications[M]. 3rd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2013: 157.)
- [9] Cui Y, Zhou G-Y, Yang J, et al. On the iterative censoring for target detection in SAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(4): 641-645.
(责任编辑: 孙艺红)