

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)01-0106-08

论文引用格式: 殷雄,王超,张红,吴樊. 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

基于结构特征的高分辨率 TerraSAR-X 图像 船舶识别方法研究

殷雄^{1,2}, 王超¹, 张红¹, 吴樊¹

1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要: 针对高分辨率 TerraSAR-X 船舶图像, 提出一种基于结构特征的两阶段船舶识别方法。所识别船舶包括油船和货船两大类, 根据船舶结构的不同将油船分为显示油管油船和不显示油管油船, 货船分为闭合货船和不闭合货船。识别第 1 阶段根据船体内是否有孔洞将闭合货船与显示油管油船分为一类, 不闭合货船和不显示油管分为另一类; 识别第 2 阶段根据船体内最长直线是否在船体中部将闭合货船与显示油管油船分开, 根据船体内是否可以截断直线将不闭合货船和不显示油管油船分开。实验结果表明, 采用本文方法进行船舶识别能够得到较好的识别结果。

关键词: 高分辨率; TerraSAR-X; 船舶识别; 结构特征; SAR

Vessel recognition with high resolution TerraSAR-X image based on structure feature

Yin Xiong^{1,2}, Wang Chao¹, Zhang Hong¹, Wu Fan¹

1. Key Laboratory of Digital Earth, Center for Earth Observation and Digital Earth, CAS, Beijing 100094, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, CAS, Beijing 100049, China

Abstract: In this paper, we present a two-stage vessel recognition method based on structural features of high resolution TerraSAR-X images. We analyze two categories of vessels: tanker and cargo ship. The tanker class includes tube-showing-tanker and no-tube-showing-tanker. The cargo ship class includes closed rail cargo ship and open rail cargo ship. In the first recognition phase we distinguish closed rail cargo ships and tube-showing-tankers as one class from no-tube-showing-tankers and open rail cargo ships based on whether the ship body possesses holes. The second phase discriminates closed rail cargo ship from tube-showing-tanker based on whether the longest lines of the ship exist in the middle region of the vessel or not. The discrimination of open rail cargo ship from no-tube-showing-tanker is based on whether or not the ship body could cut off line. We obtained good experiment result with our method.

Key words: high resolution; TerraSAR-X; vessel recognition; structure feature; SAR

0 引言

对海洋船舶进行监测与识别是每个沿海国家的

重要任务,这在海洋资源保护、渔船监测与管理、打击走私偷渡等方面均起到了重要作用。由于星载 SAR 具有覆盖范围广、平台稳定、可连续观测等突出优势,因此近年来利用星载 SAR 数据对海洋船舶

收稿日期: 2011-03-30; 修回日期: 2011-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871191); 国家高技术科技发展计划(863)项目(2009AA12Z139)

第一作者简介: 殷雄(1985—)男, 主要研究方向为 SAR 图像目标识别。E-mail: yinxiong08@163.com

通讯作者: 王超, E-mail: cwang@ceode.ac.cn

目标进行监测与识别技术得到广泛的研究与应用。目前在美国、加拿大和欧盟,利用星载 SAR 技术进行船舶监测已经形成一套完整的体系和工作流程,但是在船舶识别研究方面限于 SAR 数据分辨率的原因,发展不及船舶监测技术成熟,随着新一代 SAR 传感器,如 TerraSAR-X 和 Cosmo-Skymed 等传感器的出现,人们已经能够获取高分辨率的 SAR 图像,针对这些米级分辨率图像的船舶识别研究也陆续展开。

现阶段国内外关于船舶识别的研究主要有两种,一种是针对实测数据的研究,另一种是针对模拟数据的研究。在基于实测数据研究方面,Gagnon 等人^[1]在提取长度特征的基础上,通过分级分类对 5 类船舶成功地进行了分类;Askari 和 Zerr^[2]利用船舶长宽比作为区分船舶类型的特征对船舶进行成功分类;Nilufen 等人^[3]应用基于多特征的分类器对油轮、快艇和渡船进行了分类,分类特征包括剖面强度、RCS 特征和长度特征。随着极化 SAR 图像的成功获取,人们开始利用极化信息和散射信息进行船舶分类。Touzi 等人^[4]使用 SSCM 方法对 Convair-580 极化 SAR 数据进行船只目标识别,取得了理想的实验结果。Yannick 等人^[5]在船舶识别过程中提出,将不同的极化目标分解特征进行融合后再进行目标检测与识别的方法,融合的极化目标分解特征包括奇偶基分解、Cameron 分解、极化反熵、SSCM 等,实验中他们根据船舶散射特征分布情况分析船舶类型。在基于模拟数据研究方面,西班牙的 Margarit 等人^[6-8]从 2004 年开始试图通过模拟极化数据对船舶散射机制进行研究,然后在研究的基础上进行船舶分类。他们对于不同结构的船舶,提取了不同的极化散射特征。在理论上他们的方法可以快速、准确地对船只进行分类,但由于使用的是模拟数据,未进行真实数据的比对,因此离实际应用还有一段距离。国内方面,关于船舶检测的文章较多^[9-11],所见研究成果较为成熟,而关于船舶识别方面的研究起步较晚,所见文献不多。王隽等人^[12]利用极化 SAR 目标分解理论对全极化数据进行了分解,对船只各部分按散射特性进行了分类研究,将船只的几何结构分为球体、圆柱体、二面角、1/4 波散射体等类别,初步分析了船只的几何结构。张晰^[13]等人进行了低分辨率星载 SAR 舰船目标探测实验研究,采用峰值点分布特征来区分船舶类型,但由于在区分高峰值点和低峰值点上没有

较严格的定义,分类准则是一种定性的准则,导致分类精度不高。

通过对前人的工作进行总结后可以得出,以往在船舶识别方面的研究对象多为中、低分辨率的 SAR 图像,船舶识别特征多为低层次的图像特征,而针对新一代 SAR 传感器高分辨率数据的研究不多,因此本文将探索基于 TerraSAR-X 图像船舶结构特征的识别方法,提取不同类型船舶结构特征后利用结构特征差异来识别船舶类型。

1 货船和油船结构特征分析

在高分辨率 SAR 图像上,船舶目标的散射强度分布是不均匀的,其中亮度较高的点是船舶上层建筑(如舰桥、桅杆、起货设备、油管等)的角反射引起的结果,亮度较低的点是船舶甲板等漫反射引起的结果。船舶不同结构对应了不同的散射强度分布,本节将讨论船舶不同的散射强度对应的船舶结构基础。

1.1 货船的结构特征

货船尾部有驾驶舱,能够在 SAR 图像上形成强反射区。有的货船装有起货设备,甲板主轴方向有直立排列的吊杆;而有的货船不装起货设备,甲板上仅有货仓。在 TerraSAR-X 图像中,具有起货设备的货船的散射结构多为不闭合的日、目字型船舶,即一侧船舷开口的货船,如图 1(a)(b)所示,图 1(b)中 SAR 切片中红线标注的船舷为实例图 1(a)中下侧船舷回波形成,与船舷垂直的短线是吊杆和甲板的二面角反射回波形成。船舷一侧开口的原因主要有 3 点:

- 1) 雷达波入射方位角与船头方位向夹角较小;
- 2) 雷达波的入射角较大,导致吊杆遮挡住部分入射到远距离船舷的雷达波;
- 3) 海面杂波的影响,例如海浪的起伏使得海浪部分浪峰形成强散射,导致船体散射较弱的部分与海面信噪比较低。

在这 3 点原因中,第 1) 2) 点原因为主要原因,第 3) 点原因进一步降低了船舷不闭合处与背景海面的信噪比。

甲板上仅有货仓的货船的散射结构多为闭合的日、目字型船舶,这些闭合的孔洞结构为货仓四周没有雷达波入射的区域形成。图 1(c)(d)分别为闭合货船的实例照片和 SAR 切片,由于雷达波无法入

射货仓间隔,因此形成图 1(d) 中红色虚线框所示区域。



图 1 货船、油船实例照片和切片示意图

Fig. 1 Slices of tanker and cargo ship

1.2 油船的结构特征

油船表面甲板平坦,由于油船不需要甲板上的吊车来装卸货物,因此除驾驶舱外只有在油轮的中部有一个小吊车,用于将码头上的管道吊到油船上与油船的管道对接,所以在 TerraSAR-X 图像中油船表面能够形成强反射的部分是船尾的驾驶舱部分、船体中轴线的输油管部分和小吊车部分,图 1(e)(f) 分别为显示油管油船的实例照片和 SAR 切片。油船散射具有如下特征:

1) 油船的首尾线(连接船尾和船首的直线)区

域存在较为明显的油管,如图 1(f) 中的红线所示;

2) 船尾的驾驶舱和船体中部小区域形成强反射,如图 1(f) 红色虚线框所示区域,这些强散射区域形成一个很明显的“干”字;

3) 长度较小油船,表面没有孔洞结构和货船相似的日、目或者山字形结构,散射较均匀,如图 1(g)(h) 所示。

长度较小油船一侧表面无孔洞和明显强弱散射结构的原因在于同一分辨率图像中,如果船只尺寸太小,单个像素所包含的散射体较多,船体表面的异质性散射不明显,船体表面散射强度起伏不大,因此船只内部结构不明显。此外,由于海浪导致或船只本身发生的运动等因素也可能导致船只成像不可辨。

1.3 货船和油船的结构特征差异

根据上述分析可以得出货船和油船的差异如下:

- 1) 具有较大孔洞的船舶为闭合货船;
- 2) 一侧船舷处具有强反射,另一侧船舷区域具有微弱散射的为不闭合货船;
- 3) 首尾线处具有强反射直线的船舶为显示油管油船;
- 4) 船体表面散射差异性不大的船舶为不显示油管油船。

对船舶切片进行这些结构特征的提取,判断结构的有无即可准确识别不同类别船舶。

2 货船和油船识别

船舶识别的流程包括: 1) 船舶切片预处理; 2) 船舶特征提取; 3) 船舶类型识别。由于船舶中货船和油船还分别具有两种结构,因此整个船舶识别流程分为两个阶段。由于闭合船舷货船和显示油管油船具有孔洞结构,所以船舶识别第 1 阶段根据船体内是否有孔洞将闭合货船与显示油管油船分为一类,不闭合货船和不显示油管分为另一类。因此第 1 阶段所需要提取的船舶特征是船体孔洞船舶边缘叠加图,识别策略是判断船体边缘内是否有孔洞。由于有孔洞货船首尾线上没有强散射直线,显示油管油船首尾线上具有明显的油管,因此船舶第 2 阶段根据船体内最长直线是否在船体中部将有孔洞货船与显示油管油船分开,根据船体内是否可以截断直线将不

闭合货船和不显示油管油船分开。因此第 2 阶段首先需要将船舶切片归一化至垂直方向,提取特征为船体内被截断直线的数目,最终识别策略是判断截断直线的数目。

2.1 船舶切片预处理

船舶切片的预处理是整个船舶识别的基础,预处理的好坏对识别的精度造成较大影响。船舶切片预处理包括:1) 船舶切片分割;2) 船头方向旋转为垂直方向。

SAR 图像分割算法主要包括两大类:基于数据驱动的分割算法和基于模型驱动的分割算法^[14]。其中基于数据驱动的分割算法直接利用 SAR 图像数据的灰度、边缘和区域等信息对图像进行分割处理,包括阈值分割算法、基于边缘检测的分割算法和基于区域分开合并的分割算法。基于模型驱动的分割算法包括 SAR 图像分割的组合优化模型和 SAR 图像分割的 Markov 随机场模型。基于数据驱动的分割算法效率高,但在精度方面不及基于模型驱动的分割算法;基于模型驱动的分割算法建立在先验知识的基础上,虽然分割结果精度高,但是由于需要多次迭代,运算复杂度较高。因此,本文采用一种基于 MRF 模型和形态学运算的 SAR 图像分割算法^[15],此算法由倪维平等人提出,算法首先采用 MRF 模型和高斯分布假设,通过较少的迭代实现了 SAR 图像的初分割;然后利用形态学运算处理来抑制干扰性分割。此算法可以在保证分割质量的前提下,实现算法的高效率。

船体和背景分割开来之后,接下来将船头方向旋转为垂直方向,算法的基础在于准确提取船舶的最小外接矩形(MER)。本文定义切片的左下角为原点,从左下角到右下角的有向直线为 X 轴,定义船舶的主轴方向为船舶的首尾线所在直线绕 X 轴逆时针旋转一定角度的方向。MER 能够确定物体的主轴方向,反映主轴方向上的长度和与之垂直方向上的宽度。当 MER 计算完毕后,计算其主轴直线与切片 X 轴的夹角,根据夹角大小将主轴旋转到与 X 轴垂直方向,此时 MER 与船体也旋转到与 X 轴垂直方向。整个算法流程为:

- 1) 目标以每次 1° 的增量在 90° 范围内旋;
- 2) 每旋转一次记录一次其坐标系方向上的外

接矩形边界点坐标值;

3) 计算不同角度的外接矩形面积,面积最小的外接矩形为最小外接矩形;

4) 取 MER 的主轴直线,计算主轴直线与切片 X 轴的夹角;

5) 根据夹角旋转船舶切片,将其 MER 主轴直线与 X 轴垂直;

6) 保存与主轴方向垂直的船体切片。

2.2 船舶特征提取

船舶特征提取包括船舶孔洞边缘图和船舶内被截断直线数目。其中船舶内被截断直线数目根据垂直直线与船体进行减操作获得。船舶孔洞边缘图形成需要提取船舶孔洞和船舶边缘。船舶孔洞提取首先将船体内所有的孔洞进行填充,填充完毕后与原图相减形成孔洞图。船舶边缘提取根据 Canny 算子提取,在提取时可能会提取出孔洞边缘及背景中其他的小区域,实验中采用的方法是选取边界周长最长的边缘为船舶边缘。整个算法流程如下:

- 1) 提取船体边缘;
- 2) 将船体边缘内的所有像素值设为 1;
- 3) 将所有像素值设为 1 的船体减去未经过处理的船体,得到船体内的孔洞;
- 4) 将船体孔洞图像与船体边缘图像叠加,形成具有孔洞的边缘图像。

2.3 船舶类型识别

船舶类型识别的依据是船舶不同结构的空间关系,识别过程分为两个阶段。第 1 阶段将闭合货船、显示油管油船分为一类;将不闭合货船和不显示油管油船分为另一类。第 2 阶段将闭合货船和显示油管油船分开,并将不闭合货船和不显示油管油船分开。区分货船和显示油管油船是判断船舶主轴是否在船体中部区域(指横轴方向 $1/3 \gg 2/3$ 船宽区域),在中部则为油船,不在则为货船;而区分不闭合货船和不显示油管油船是判断船体内截断直线数目,如果截断数目为 0 则为不显示油管油船,如果大于 1 则为不闭合货船。第 1 阶段识别流程图如图 2 所示,第 1 阶段识别实验示意图如图 3 所示;第 2 阶段识别显示油管油船和闭合货船如图 4 所示,第 2 阶段识别不显示油管油船和不闭合货船如图 5 所示。

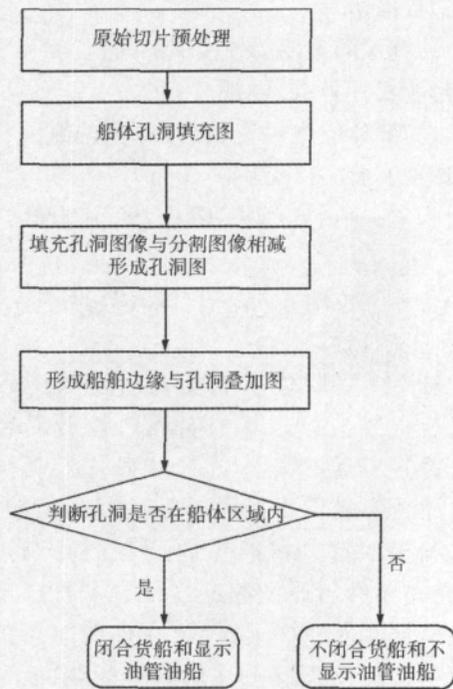


图 2 船舶识别第 1 阶段流程图
Fig. 2 The first phase of vessel recognition

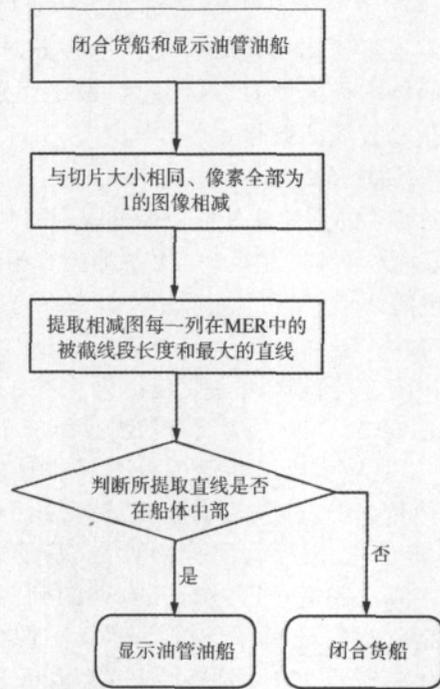


图 4 显示油管油船和闭合货船识别流程
Fig. 4 The flow chart of tube showing tanker and closed rail cargo ship's recognition

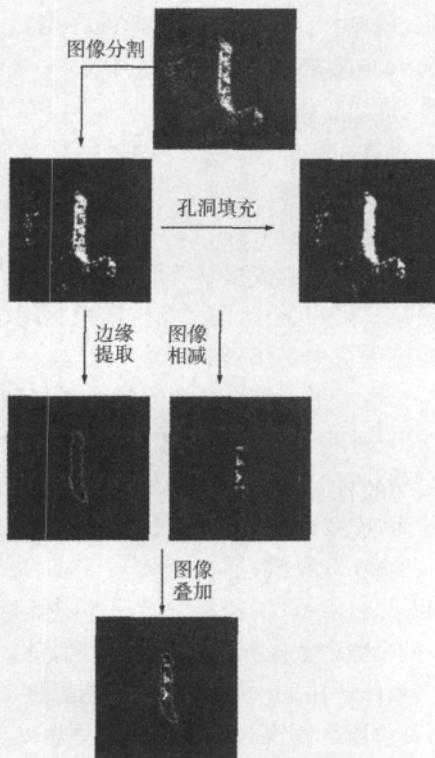


图 3 船舶识别第 1 阶段识别实验示意图
Fig. 3 The first phase's experimental illustration of vessel recognition

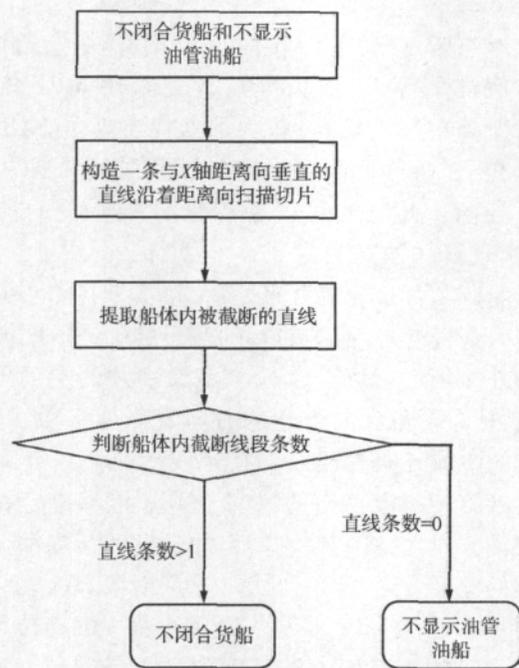


图 5 不显示油管油船和不闭合货船识别流程
Fig. 5 The flow chart of no tube showing tanker and open rail cargo ship's recognition

3 实验结果与分析

本文进行了基于高分辨率 TerraSAR-X 数据的船舶识别研究, 识别的船舶包括货船和油船两类船舶。

实验数据切片大小为 200×200 , 空间采样率为 1.25 m, 研究区域为上海长江入海口的海域。切片数量为 38 个, 其中货船切片 27 个, 油船切片 11 个。图 6 所示为部分待识别货船和油船切片。表 1 所示为船舶识别实验结果。

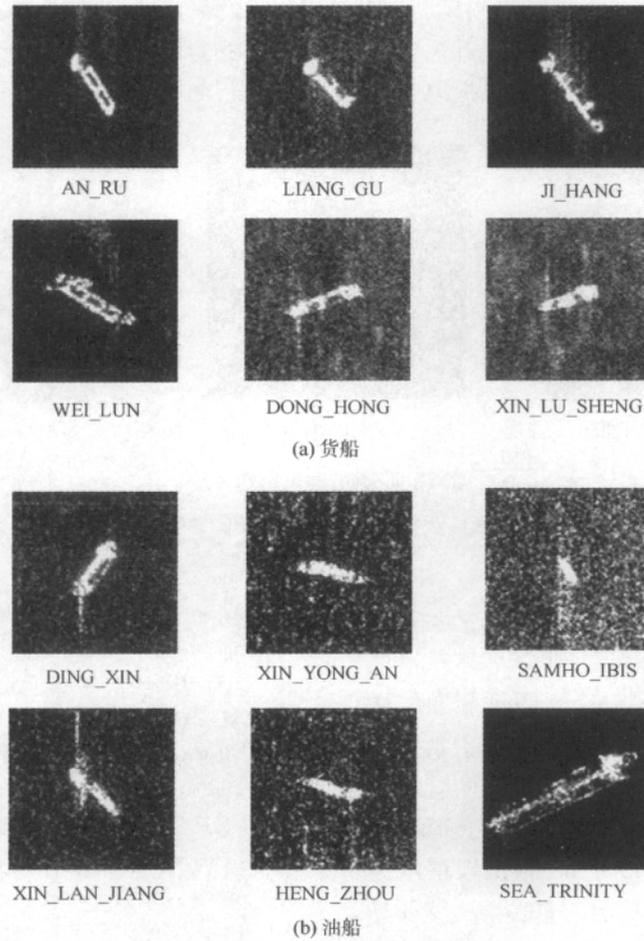


图 6 部分待识别船舶切片
Fig. 6 Some samples of vessel slices

表 1 船舶识别精度及混淆矩阵

Table 1 Vessel recognition precision and confusion matrix

类别	货船	油船	总数	识别精度 / %
货船	24	3	27	88.89
油船	2	9	11	81.82
总数	26	12	38	
过程精度 / %	92.30	75.00		总精度 = 86.84

从表 1 混淆矩阵可以看出, 货船的识别精度较高, 为 88.89%, 货船的高识别率与货船的独特结构有关。在不同的方位角情况下, 如图 6(a) 的货船切片, 虽然切片显示船舶成像结果各异, 但是能够辨别

出货船独特的日、目、山字型特征; 在海况不好的情况下, 如 DONG_HONG 切片和 XIN_LU_SHENG 切片, SAR 切片上的山字型结构依然能够清楚辨别。这说明货船的日、目、山字型结构在不同的方位角及海况情况下都能清楚显示, 原因在于货船的货仓和起货架是刚性特征, 即使在海面杂波和方位角不同的影响下也可以进行强反射, 能够与油船的干字型和均匀散射型特征分开。对错分的货船切片进行分析, 发现货船的错误识别原因主要有两点: 1) 船舶自身方位向拖尾严重, 切片质量较差; 2) 由于分割、旁瓣等引起的 MER 提取不准确。油船的识别率为 81.82%, 错分的油船为不显示油管油船, 显示油管

油船能够被准确的区分开来造成识别错误的主要原因具体分析如下:

1) 船体分割不准确。当海况较差时, SAR 图像上海洋背景噪声较大, 此时船舶分割效果较差, 对于后续 MER 提取影响较大, 如图 7(a) 所示。

2) MER 提取不准确。主要原因是受拖尾、旁瓣等影响船舶成像形状不规则(不是常规的近矩形或者近椭圆形), 而船舶分割失效, 会造成所提取主轴

方向不准确、主轴位置不准确, 从而使得 MER 的主轴无法与船舶实际主轴平行, MER 主轴将会斜穿船舶, 如图 7(b) 所示。

3) 船舶成像原因。由于船舶运动造成的方位向拖尾效应造成船尾与船体分离, 船体的空间结构显示模糊, 船体上层结构位移较为严重, 此时对于船体结构的判断和空洞的提取造成很大影响, 使得识别错误, 如图 7(c) 所示。

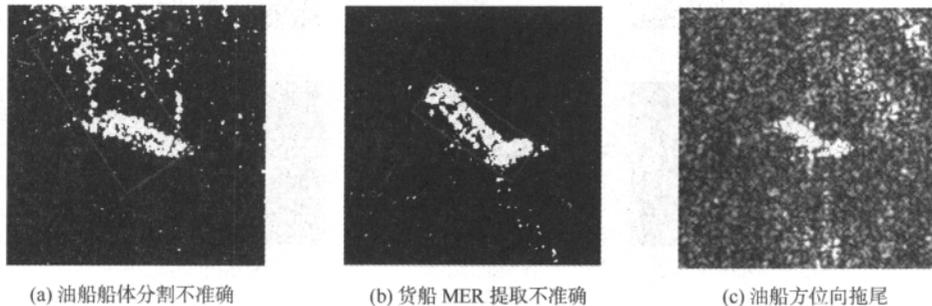


图 7 船舶错误识别切片

Fig. 7 Misrecognition slices of vessels

4 结 论

新的基于高分辨率 TerraSAR-X 图像船舶结构特征的识别方法。首先分析了不同船舶的散射结构特征, 然后根据其中的结构特征差异利用两阶段法将 4 小类船舶进行了识别, 其中货船的识别率为 88.89%, 油船的识别率为 81.82%, 总识别精度为 86.84%。实验结果表明, 所选取的船舶结构特征具有较强的鲁棒性, 所采用的识别方法有效可行; 实验结果同时表明, 船体的预处理, 如船体分割和 MER 提取精度需要进一步提高, 船体特征在船舶成像较差状况下鲁棒性不强。因此, 下一步研究的工作一方面要提高预处理的效果, 另一方面准备挖掘更多的船舶结构特征及其他类型特征, 并且在分类方法上进行更深入研究。

志谢 实验数据得到德国宇航局(DLR)支持(LAN0035), 在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

[1] Gagnon L, Klepko R. Hierarchical Classifier Design for Airborne SAR Images of Ships [EB/OL]. (1998-9-18) [2011-05-17].

http://spie.org/x648.html?product_id=323866.

- [2] Askari F, Zerr B. Automatic Approach to Ship Detection in Spaceborne Synthetic Aperture Radar Imagery: An Assessment of Ship Detection Capability Using RADARSAT [R]. Italy: SACLANT Undersea Research Centre 2000.
- [3] Nilufen Cotuk, Sedat Turea, Mujdat Cetin. Application of Point Enhancement Technique or Ship Target Recognition by HRR [M]// Edmund G Zelnio, Frederick D. Garber. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery, Bellingham: Society of Photo Optical 2003.
- [4] Touzi R, Raney R K, Charbonneau F. On the use of permanent symmetric scatterer for ship characterization [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2004 42(10): 2039-2045.
- [5] Yannick A, Mickael G, Olivier B. Ship Detection and Characterization Using Polarimetric SAR Data [R]. Tallinn: NATO Advanced Research Workshop 2005.
- [6] Margarit G, Mallorquí J J. Exploitation of ship scattering in polarimetric SAR for an improved classification under high clutter conditions [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2009 47(4): 1224-1235.
- [7] Margarit G, Mallorquí J J, Fábregas X. On the usage of GRECOSAR, an orbital polarimetric SAR simulator of complex targets, to vessel classification studies [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2006 44(12): 3517-3526.
- [8] Margarit G, Mallorquí J J, Fábregas X. Single-pass polarimetric SAR interferometry for vessel classification [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2007 45(11): 3494-3502.
- [9] Zhang H, Wang C, Zhang B, et al. Target Recognition Based on

- High Resolution Image [M]. Beijing: Science Press, 2009: 172-185. [张红, 王超, 张波, 等. 高分辨率 SAR 图像目标识别[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 172-185.]
- [10] Chong J S, Zhu M H. Survey of the study on ship and wake detection in SAR imagery [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(9): 1356-1360. [种劲松, 朱敏慧. SAR 图像舰船及其尾迹检测研究综述[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1356-1360.]
- [11] Chong J S, Zhu M H. Comparison on ship target detection algorithms of SAR imagery [J]. Signal Processing, 2003, 19(6): 580-582. [种劲松, 朱敏慧. SAR 图像舰船目标检测算法的对比研究[J]. 信号处理, 2003, 19(6): 580-582.]
- [12] Wang J, Zhong J S, Huang W G, et al. Preliminary Analysis of Ship's Geometric Construction Based on Polarization SAR Target Decomposition Theory [R]. Beijing: The Second Technology Workshop of Microwave Remote Sensing, 2006. [王隽, 种劲松, 黄伟良, 等. 基于极化 SAR 目标分解理论的船只几何结构初步分析[R]. 北京: 第二届微波遥感技术研讨会, 2006.]
- [13] Zhang X. Study on Ships Detection Experiments with Spaceborne SAR Imagery [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. [张晰. 星载 SAR 舰船目标探测实验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.]
- [14] Ji K F, Li Y, Li Y. Segmentation summarization of SAR image [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(2): 407-412. [计科锋, 李禹, 粟毅. 合成孔径雷达图像分割技术综述[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 407-412.]
- [15] Ni W P, Yan W D, Bian H. SAR image segmentation based on MRF and morphological operation [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(1): 32-36. [倪维平, 严卫东, 边辉. 基于 MRF 模型和形态学运算的 SAR 图像分割[J]. 电光与控制, 2011, 18(1): 32-36.]