

包萌, 张杰, 孟俊敏, 等. 高分辨率 SAR 船只样本集构建与特征分析[J]. 电波科学学报, 2019, 34(6): 789-797. DOI: 10.13443/j.cjors.2019043007

BAO M, ZHANG J, MENG J M, et al. Construction and feature analysis of high resolution SAR ship sample set [J]. Chinese journal of radio science, 2019, 34(6): 789-797. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2019043007

高分辨率 SAR 船只样本集构建与特征分析

包萌^{1,2} 张杰^{1,2} 孟俊敏^{1,2} 张晰^{1,2} 郎海涛³

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061; 2. 自然资源部海洋遥测技术创新中心, 青岛 266061;

3. 北京化工大学, 北京 100029)

摘要 随着高分辨率合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)技术的不断发展, 船只类型识别已成为遥感领域的重要研究课题. 为满足在大样本支撑下的船只类型精确识别, 文章利用 RADARSAT-2 和中国高分 3 号(GF-3)SAR 数据构建了名为 HR4S 的高分辨率 SAR 船只样本集, 详细阐述了构建 HR4S 的方法, 并建立了一套完整的船只样本提取流程. 该样本集涵盖 1 962 个不同极化方式、分辨率以及类型的船只样本, 在此基础上开展了船只几何参数分析, 以及不同分类器与特征组合的船只类型识别性能分析等方面工作. 结果表明: RADARSAT-2 在 HH、VH、VV 极化中提取的几何参数均优于 GF-3, 并且航向在 VV 极化对船只几何提取影响最小; 在类型识别性能上, 随机森林(random forest, RF)分类器对 GF-3 船只分类精度最优达到了 61.85%, 而对于 RADARSAT-2 的船只分类精度最优达到了 60.80%, GF-3 船只分类精度优于 RADARSAT-2. 本文所构建的 HR4S 不仅进一步完善了高分辨率船只样本, 并且在海上船只类型识别等方面具有重要的意义.

关键词 高分辨率 SAR 船只样本集; 合成孔径雷达; 船只几何参数; 船只类型识别

中图分类号 TN957.52 **文献标志码** A

文章编号 1005-0388(2019)06-0789-09

DOI 10.13443/j.cjors.2019043007

Construction and feature analysis of high resolution SAR ship sample set

BAO Meng^{1,2} ZHANG Jie^{1,2} MENG Junmin^{1,2} ZHANG Xi^{1,2} LANG Haitao³

(1. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;

2. Ocean Telemetry Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;

3. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract With the development of high resolution synthetic aperture radar (SAR) technology, ship type recognition become smore and more important in remote sensing. In order to improve the identification accuracy, a high-resolution SAR ship sample set, named as HR4S, is constructed using RADARSAT-2 and Chinese GaoFen-3 (GF-3) SAR data. The process of ship samples extraction and HR4S construction are introduced in detail. The HR4S covers 1 962 samples with different polarization modes, resolutions and ship types. The ship geometry parameters and the ship classification performance of HR4S with different classifier and features are analyzed. The results indicate that the geometrical parameters extracted from RADARSAT-2 in HH, VH and VV polarization are all better than that of GF-3. Furthermore, the direction has little influence on the geometric parameter of ships in VV polarization. In terms of ship type rec-

收稿日期: 2019-04-30

资助项目: 国家重点研发计划(2017YFC1405204); 海洋公益性科研专项(201505002)

联系人: 包萌 E-mail: baomeng@fio.org.cn

ognition performance, the accuracy of random forest (RF) classifier achieved 61.85% on GF-3 data and 60.80% on RADARSAT-2 data. In general, the classification accuracy of GF-3 ships is better than RADARSAT-2. The HR4S constructed in this paper not only further improves the high-resolution ship samples, but also has important significance in the recognition of ship types at sea.

Keywords high resolution SAR ship sample set; synthetic aperture radar; ship geometry parameters; ship classification

引 言

随着合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)技术的不断发展,获取的高分辨率 SAR 影像日益增多,为海洋监测提供了新途径. 由于 SAR 具有全天时、全天候观测能力,在海上船只目标监测领域受到了越来越多的关注^[1-5]. 随着全球船舶数量增多,以及近年来海上威胁的不断增加,船只类型识别已成为遥感领域的重要研究课题. 海上船只目标的精确识别主要依赖于大量的船只样本,然而早期的许多研究由于缺乏真实的船只样本,很多工作都是在模拟图像上进行的^[6-7].

近年来,随着 TerraSAR-X、RADARSAT-2、GF-3(GaoFen-3)等 SAR 卫星的发射,获得了多种不同分辨率、覆盖不同区域的 SAR 图像^[8],使构建多种船只类型、数据量丰富的船只数据集成为了可能. 然而,目前构建的数据集多数是针对不同地物类型和地面目标构建的^[9-12],针对海上船只目标的 SAR 数据集较少. OpenSARShip 数据集是利用中等分辨率 Sentinel-1 图像构建的海上船只目标样本数据集,旨在为提高船只分类算法性能以及评估 Sentinel-1 图像在海上船只应用的潜力^[13]. 该船只数据集的构建虽然推动了在遥感领域 SAR 目标数据集的发展,但仍然缺乏高分辨率的船只样本.

本文针对海上船只目标,利用 53 景 GF-3 和 RADARSAT-2 卫星影像,以及船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)共同构建了含有 1 962 个船只样本名为 HR4S 的高分辨率 SAR 船只数据集. HR4S 涵盖了多种极化方式、分辨率以及船只类型. 首先,获取并处理 SAR 数据;然后,按照一定的规则和流程将 SAR 和 AIS 数据进行叠加处理,匹配船只目标;最后,提取出每个船

只样本;为了船只样本信息的准确性和多样性,对每个船只样本进行了验证. 基于此,本文充分分析了 HR4S 船只几何参数,进一步揭示了不同传感器的成像差异. 并利用 HR4S 开展了海上船只类型识别的初步应用,为船只分类算法和特征的选择提供了参考.

1 HR4S 构建

本节主要阐述如何基于 SAR 卫星数据和 AIS 数据共同构建 HR4S. 图 1 给出了构建 HR4S 的主要流程. 所用 SAR 数据分别是 GF-3 和 RADARSAT-2,并通过获取与卫星数据时空匹配的船只 AIS 信息确认合作船只,从而进一步构建船只样本.

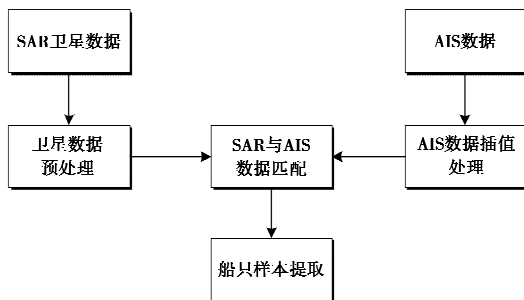


图 1 HR4S 构建流程

Fig. 1 Flowchart of HR4S

1.1 SAR 数据获取与预处理

本文共获取 2010—2018 年 53 景 C 波段 SAR 影像. 其中 GF-3 影像 28 景,涵盖了 4 种高分辨成像模式,该数据通过国家卫星海洋应用中心下载获取. RADARSAT-2 影像 25 景,涵盖了 2 种成像模式,该数据由编程获取或历史资料库中获取. 以上数据均为单视复(single look complex, SLC)图像数据类型,地面分辨率为 3~25 m,具体数据情况如表 1 所示.

表 1 卫星数据
Tab.1 Satellite data

卫星名称	工作模式	入射角/(°)	分辨率/m	极化方式	数据量
GF-3	超精细条带(UFS)	20~50	3	单极化(DH/DV)	2
	精细条带 1(FSI)	19~50	5	双极化(HH+HV/VH+VV)	7
	全极化条带 1(QPSI)	20~40	8	全极化(HH+HV+VH+VV)	18
	精细条带 2(FSII)	19~50	10	双极化(HH+HV)	1
RADARSAT 2	多视精细宽幅(wide multilook fine)	29~50	5	单极化(HH)	5
	标准模式(standard)	20~49	25	可选单、双极化(VH+VV/VV)	20

在预处理中,主要对影像进行几何校正和辐射校正处理. 我们使用 ENVI 5.3 对 1 级 SAR 数据进行几何校正,利用几何校正模型或 RPC 校正文件(针对 GF-3 影像)将数据映射到正确的地理坐标范围内. 然后,利用 SNAP 3.0 对 SLC 图像进行辐射校正,用以消除因传感器灵敏度、地形起伏等因素引起的辐射误差.

1.2 SAR 与 AIS 数据匹配

AIS 是一种海上船舶跟踪、识别系统,可以按照一定频率向地面传输船舶的位置、尺寸、航向、航速等信息,所传输的信息都与全球唯一编码船舶识别号(maritime mobile service identity, MMSI)相关联. AIS 系统报告船舶信息的频率是船舶运动的函数,发送信息频率通常在几秒钟到几分钟不等,即船只航行速度越快报告频率越高. 在本文中,以 SAR 过境时间为中心时刻,获取该时刻前后 30 min 的卫星扫描范围内的船舶 AIS 信息. 本文所获取的所有 SAR 影像均提供了 AIS 信息.

在实际作业中发现,捕捞船由于作业类型、船体的限制,航速相比货船或油轮较慢,在获取的时间范围内只能传输几个甚至仅有一个 AIS 点迹数据. 因此,对 AIS 进行插值处理时,考虑以卫星过境时间为中心时刻,时间窗口设置为 300 s,在时间窗口内对每个船只进行判断,保留与中心时刻距离最近的航迹点;若该时间窗口内无航迹点,则将时间窗口进行外推,直到找到最近的航迹点为止. 将插值处理后的 AIS 数据与 SAR 卫星数据进行叠加显示,使卫星探测的船只与 AIS 船舶信息建立空间关联.

1.3 船只样本提取

经过以上步骤,对匹配船只目标进行提取并构建样本. 每个船只样本包含 3 类文件:校正后的标准图像、属性文件以及船只光学照片,具体结构如图 2 所示.

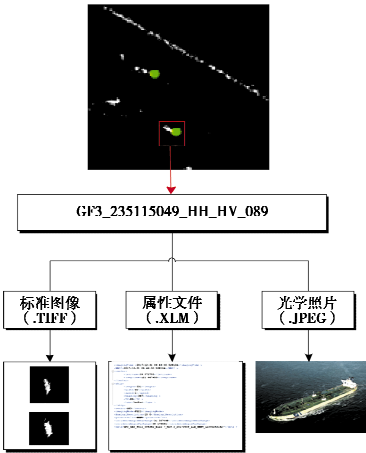


图 2 船只样本示意图(图中绿色圆点表示 AIS 信息)
Fig. 2 Diagram of ship samples (green dots represent AIS information)

标准图像(. TIFF)是经过几何校正和辐射校正后的雷达散射截面(radar cross section, RCS)图像,多极化方式对应图像的不同通道,最后形成船只样本标准图像. 属性文件(. XLM)中存储了原始影像信息,如成像时间、入射角、极化方式、成像模式、分辨率等,另外也记录了船只的 MMSI、中心经纬度、船只长宽、航速、航向、类型、国籍等船只信息. 查找并存储了每个船只样本对应的光学照片.

为了进一步确保 SAR 船只样本的可靠性,对每个提取的船只样本在船舶查询相关网站上进行验证,并对船只类型进行细化.

2 HR4S 特性分析

本文利用 53 景 C 波段 SAR 数据构建了 1 962 个船只样本,其中 GF-3 船只样本 1 037 个,RADARSAT-2 船只样本 925 个,包含 21 种船只类型,其中以货船、集装箱船、油轮和捕捞船为主(图 3). 从空间分布来看,HR4S 主要覆盖了中国的主要港口附近海域,以及日本、韩国等沿海区域(图 4). 并且注意到,较小的船只(<100 m)主要分布在烟台、连

云港以及上海港附件海域,这些区域有丰富的渔业资源,是国内主要渔港所在地。

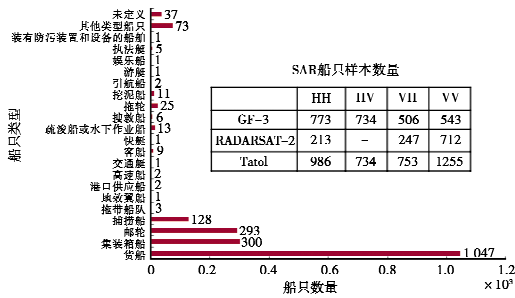
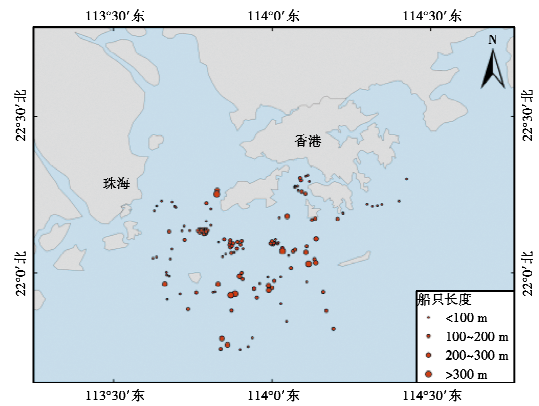


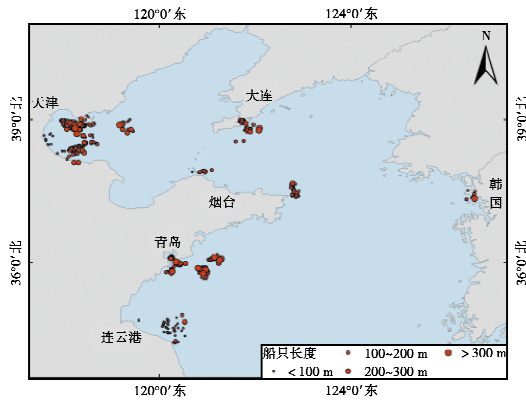
图 3 不同类型船只样本数量统计

Fig. 3 Statistics on the number of different types of ships



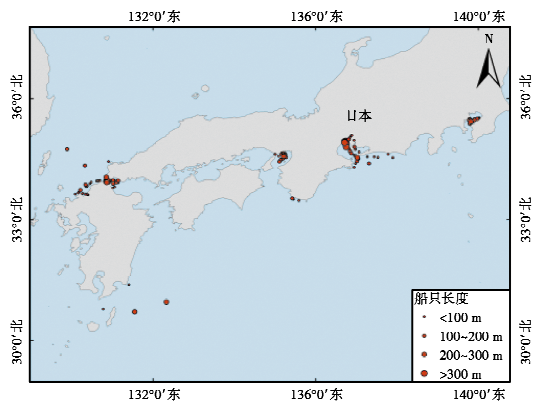
(c) 珠江口海域

(c) The Pearl River estuary



(a) 渤、黄海海域

(a) The Bohai and Huanghai seas

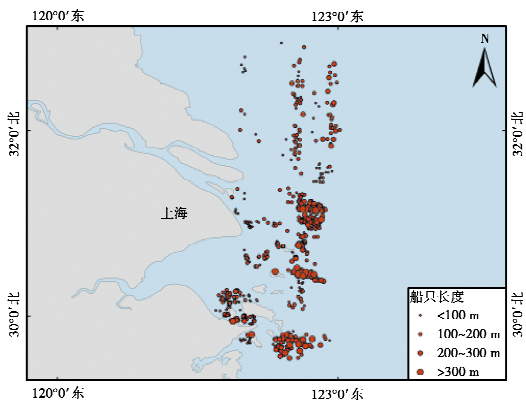


(d) 日本附近海域

(d) Japan adjacent seas

图 4 HR4S 船只分布图

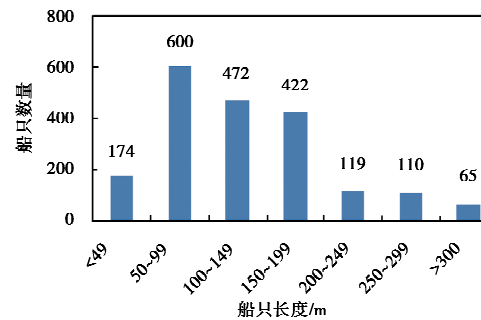
Fig. 4 HR4S ship distribution maps



(b) 长江口海域

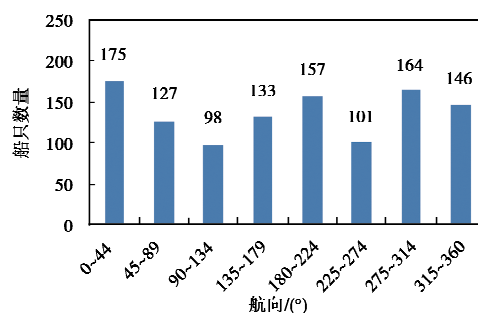
(b) The Yangtze estuary

对于船只检测和分类,目标和传感器是影响算法性能的两大因素,本文构建的 HR4S 保证了参数的多样性,其中目标属性包含了不同的长度、类型、航速、航向等,传感器包含了不同的入射角、极化方式和分辨率,如图 5 所示。

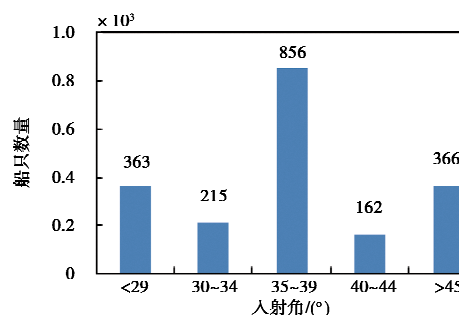


(a) 船只长度

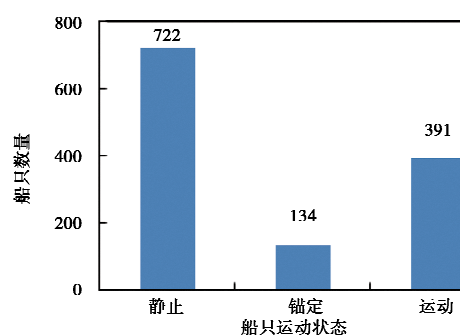
(a) Ship length



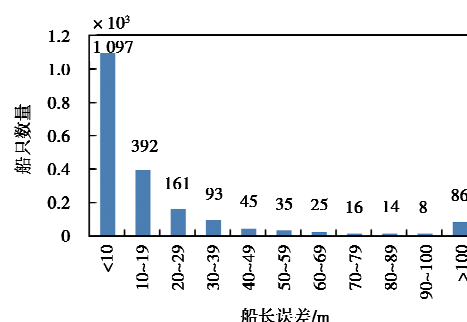
(b) 船只航向
(b) Ship course



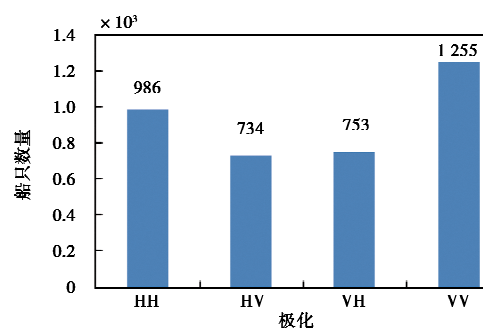
(f) 入射角
(f) Incident angle



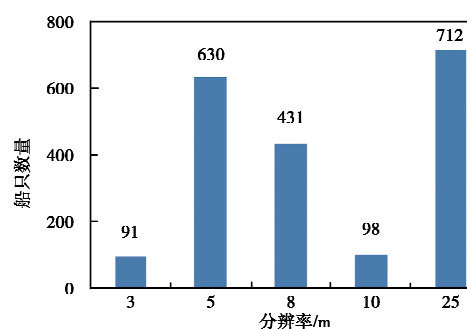
(c) 船只运动状态
(c) Motion state



(g) 匹配的船只长度误差
(g) Length error



(d) 极化
(d) Polarization



(e) 分辨率
(e) Resolution

图 5 SAR 船只数据集统计

Fig. 5 Statistics of SAR ship dataset

图 5(c)是对船只运动状态的统计,其中静止是船只速度为 0 时的状态,锚定是指船只航速在 1~2 节,运动则是指航速大于 2 节的船只状态.图 5(g)是 AIS 报告船只的真实船长与测量长度的误差统计.值得注意的是,由于卫星成像过程、船只的运动状态和船体散射都会引起目标的几何畸变,对船只长度的提取均有重要影响.因此,为了消除这些影响,本文在提取船只长度之前对船只样本进行了形态滤波处理,以保证提取参数的准确性.从统计结果来看,76%的船只样本长度误差在 20 m 内,表明了 HR4S 的真实性和可靠性.

3 船只几何参数分析

船只的几何参数是表达影像中船只目标的基础特征,对深入分析船只目标几何参数具有重要意义.本节中,在 HR4S 基础上,基于两种不同的卫星传感器,分析不同极化方式、航向等参数对船只几何特征的影响.

在分析中,通过 AIS 信息提供的真实船长 L_{AIS} 与 SAR 影像中测量船长 L_{SAR} 计算得到的相对长度

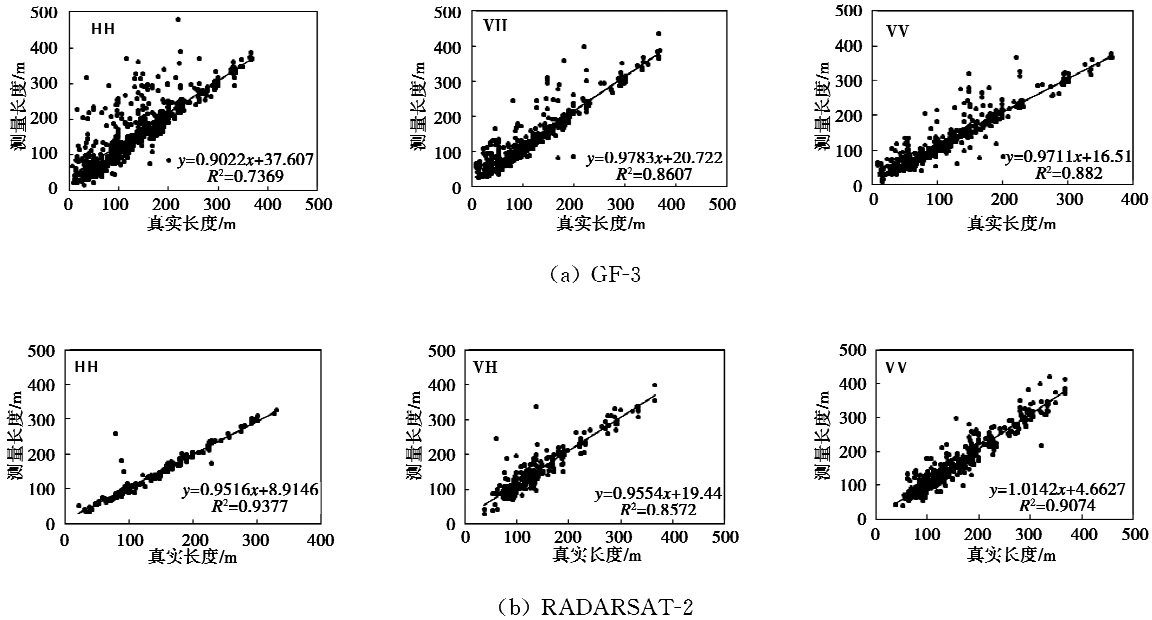
误差 ϵ 判断船只几何参数提取的准确性, ϵ 可表示为

$$\epsilon = |L_{\text{AIS}} - L_{\text{SAR}}| / L_{\text{AIS}}$$

3.1 极化

图 6(a)、(b) 和表 2 给出了 HH、VH、VV 极化

方式的船只真实长度与测量长度之间的关系. 对于 GF-3 传感器, VV 极化提取的几何参数优于 VH 和 HH 极化, 这表明了 GF-3 传感器的 VV 极化方式提取的船只几何参数更符合船只真实长度.



注: R 表示拟合系数

图 6 不同极化的船只真实长度与测量长度的对比

Fig. 6 Comparison of the true length and measured length in different polarization

表 2 不同极化方式的相对长度误差的均值 μ 和标准偏差 σ

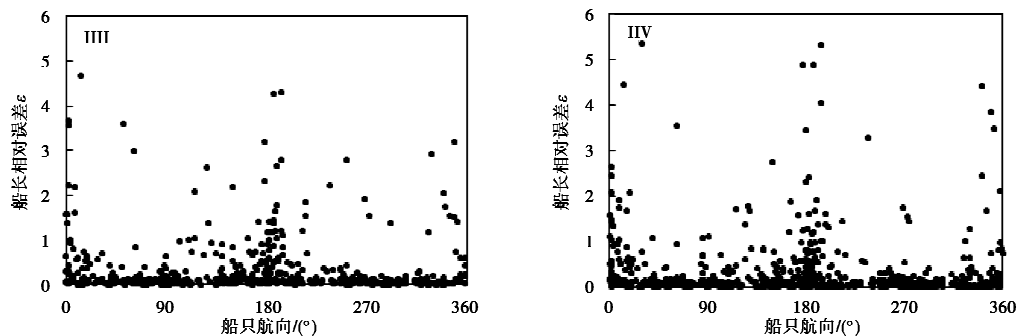
Tab. 2 Relative length error of different polarization modes

卫星名称	$\mu \pm \sigma$		
	HH	VH	VV
GF-3	0.338 6 $\pm$ 0.781 7	0.347 0 $\pm$ 0.741 0	0.247 1 $\pm$ 0.431 6
RADARSAT-2	0.073 5 $\pm$ 0.205 3	0.164 4 $\pm$ 0.253 2	0.140 6 $\pm$ 0.179 0

3.2 航向

航向是指船只的对地真实航行方向, 是船艏向与真北方向顺时针的夹角, 取值范围为 $(0^\circ \sim 360^\circ)$.

图 7 给出了 HH、HV、VH 和 VV 极化方式的长度相对误差 ϵ 与航向的关系, 表 3 定量统计了不同航向影响下长度相对误差 ϵ 的均值 μ 和标准偏差 σ .



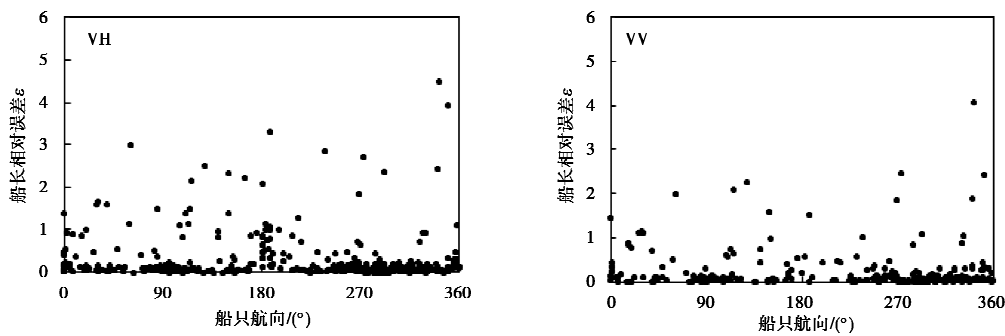


图 7 不同航向的相对长度误差统计

Fig. 7 Relative length error statistics in different directions

表 3 不同航向对船只几何参数提取影响定量统计

Tab. 3 Statistics for the effect of heading on the extraction of ship geometric parameters

极化方式	$\mu+\sigma$ 航向/(°)			
	(45° 135°]	(135° 225°]	(225° 315°]	(315° 45°]
HH	0.221 3±0.506 0	0.500 4±0.741 3	0.156 4±0.393 3	0.419 8±0.746 0
HV	0.212 1±0.419 1	0.520 9±0.846 7	0.154 6±0.354 8	0.498 8±0.856 2
VH	0.272 6±0.557 7	0.492 1±0.628 3	0.166 5±0.409 0	0.357 4±0.702 1
VV	0.188 7±0.414 0	0.375 8±0.384 8	0.128 1±0.296 2	0.318 3±0.544 1

由图 7 和表 3 可知:当船只沿方位向运动时,即航向接近 0°、180°和 360°,船长相对误差 ϵ 明显偏大,船长相对误差均值 μ 为 0.318 3~0.520 9;而在距离向上运动时,即航向接近 90°和 270°,船长相对误差 ϵ 相对较小,均值 μ 为 0.128 1~0.272 6。通过定量分析发现,四种极化中 VV 极化受航向影响最小。另外,基于以上分析发现,航向对船只几何特征提取影响较为显著。

4 HR4S 类型识别性能分析

在本节中,从 IIR4S 中选取 1 548 个船只样本,包括三种船只类型(货船、集装箱、油轮),并利用三种典型分类器开展船只类型识别性能分析实验。本文主要提取了五类船只特征,主要包括几何、强度、矩、纹理和散射特征,具体描述如下:

- $f_1=\{G_i\}_{i=1}^8$ 表示船只几何特征^[14],包括长、宽、纵横比、面积、周长、形状复杂度和质心 (x,y) 。
- $f_2=\{I_i\}_{i=1}^3$ 表示强度特征,包括均值、标准偏差和变异系数。
- $f_3=\{H_i\}_{i=1}^7$ 表示矩不变量特征,包括七个 Hu 矩不变量特征。
- $f_4=\{T_i\}_{i=1}$ 表示纹理特征,包括分形维数。
- $f_5=\{S_i\}_{i=1}^8$ 表示散射特征,包括散射中心能量、散射中心数量,以及受文献[14-15]启发而得到的船

首、中、尾的散射密度,船只左侧、主轴和右侧的散射密度特征。散射密度特征可表示为

$$\delta_i=\left(\frac{M_i}{A_i}\right)/\max_{1\leq i\leq p}\left(\frac{M_i}{A_i}\right);$$
 (1)

$$\delta_j=\left(\frac{M_j}{A_j}\right)/\max_{1\leq j\leq q}\left(\frac{M_j}{A_j}\right).$$
 (2)

式中: M_i 和 M_j 分别为垂直和平行主轴方向的剖面单元后向散射强度总和; A_i 和 A_j 分别为垂直和平行主轴方向的剖面单元面积; p 和 q 分别是垂直和平行主轴方向的剖面单元的个数。

基于以上五类特征进行组合,共生成 31 个特征组合,具体如表 4 所示。

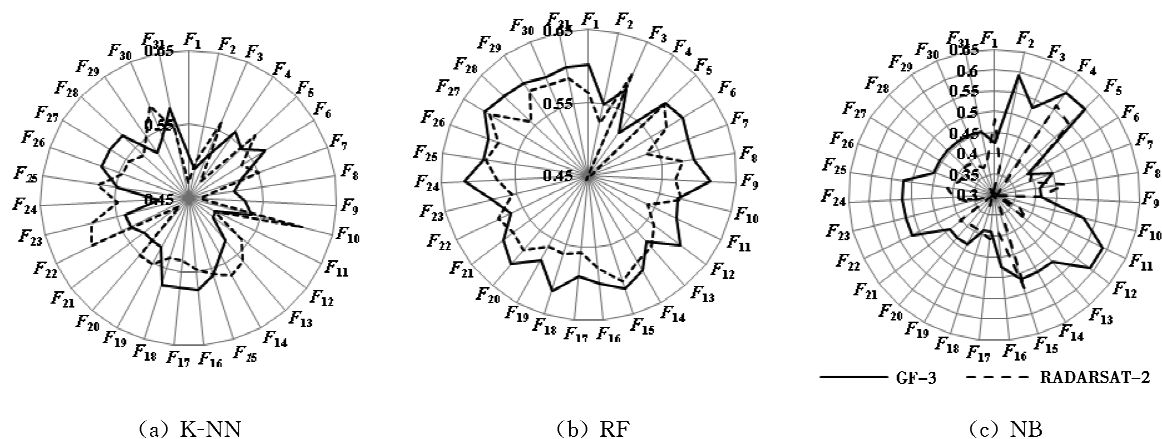
表 4 船只特征信息表

Tab. 4 Ship features

特征	组合	特征	组合	特征	组合
F_1	$\{f_1\}$	F_{12}	$\{f_2, f_5\}$	F_{23}	$\{f_2, f_3, f_5\}$
F_2	$\{f_2\}$	F_{13}	$\{f_3, f_4\}$	F_{24}	$\{f_2, f_4, f_5\}$
F_3	$\{f_3\}$	F_{14}	$\{f_3, f_5\}$	F_{25}	$\{f_3, f_4, f_5\}$
F_4	$\{f_4\}$	F_{15}	$\{f_4, f_5\}$	F_{26}	$\{f_1, f_2, f_3, f_4\}$
F_5	$\{f_5\}$	F_{16}	$\{f_1, f_2, f_3\}$	F_{27}	$\{f_1, f_2, f_3, f_5\}$
F_6	$\{f_1, f_2\}$	F_{17}	$\{f_1, f_2, f_4\}$	F_{28}	$\{f_1, f_2, f_4, f_5\}$
F_7	$\{f_1, f_3\}$	F_{18}	$\{f_1, f_2, f_5\}$	F_{29}	$\{f_1, f_3, f_4, f_5\}$
F_8	$\{f_1, f_4\}$	F_{19}	$\{f_1, f_3, f_4\}$	F_{30}	$\{f_2, f_3, f_4, f_5\}$
F_9	$\{f_1, f_5\}$	F_{20}	$\{f_1, f_3, f_5\}$	F_{31}	$\{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\}$
F_{10}	$\{f_2, f_3\}$	F_{21}	$\{f_1, f_4, f_5\}$		
F_{11}	$\{f_2, f_4\}$	F_{22}	$\{f_2, f_3, f_4\}$		

由于船只样本包含了多种极化,在分析中,将所有极化数据作为本文船只分类样本,并使用 70% 船只样本用于分类器训练,30% 用于测试. 利用 K -最近邻(K -nearest neighbor, K -NN)分类器,随机森林(random forest, RF)分类器以及朴素贝叶斯(naive Bayes, NB)分类器分别对船只进行分类,并对比 GF-3 和 RADARSAT-2 卫星船只样本的分类精度. 其中, K -NN 算法将 K 值设置为 4, RF 中树的数量设置为 150, NB 算法是利用服从高斯分布算法实现的.

图 8 给出了三种分类器对不同卫星船只样本的分类结果. 整体来看,三种分类器对 GF-3 船只分类精度均优于 RADARSAT-2,其主要原因为 RADARSAT-2 船只样本中 25 m 分辨率约占 80%,从而导致了特征敏感度降低. 三种分类器中, RF 分类器表现更优,其中联合特征 $F_{24} = \{f_2, f_4, f_5\}$ 的 GF-3 船只分类精度达到了 61.85%,联合特征 $F_{27} = \{f_1, f_2, f_3, f_5\}$ 的 RADARSAT-2 船只分类精度达到了 60.80%. 基于以上分析发现,船只的特征组合分类精度一般高于单类特征.



注:雷达图外圈表示船只特征;雷达轴表示分类精度(范围为 0~1)

图 8 船只分类结果

Fig. 8 Ship classification results

5 结 论

本文利用 53 景 GF-3 和 RADARSAT-2 卫星影像,以及 AIS 数据共同构建了 1 962 个高分辨率 SAR 船只样本集. 基于 HR4S 开展了船只几何参数分析工作,结果表明:RADARSAT-2 提取的几何参数优于 GF-3,并且航向对船只几何提取影响较为显著. 另外,基于三种典型分类器,联合 31 种船只特征开展了海上船只类型识别精度对比工作,结果显示:GF-3 船只分类精度均优于 RADARSAT-2,并且 RF 分类器表现更优. 其中, RF 分类器联合 $F_{24} = \{f_2, f_4, f_5\}$ 对 GF-3 船只分类最优精度达到了 61.85%, RF 分类器联合 $F_{27} = \{f_1, f_2, f_3, f_5\}$ 对 RADARSAT-2 船只分类最优精度达到了 60.80%,并且船只的特征组合分类精度优于单类特征. 本文得到的初步结论为船只样本库的应用提供了参考. 随着卫星资源的不断丰富,HR4S 将会进一步扩充完善;并且在大量不同类型船只数据支撑下,将实现更高精度、更多类型船只的识别,这也是

对未来工作的挑战.

致谢:感谢国家卫星海洋应用中心为本文提供的 GF-3 数据,感谢博懋信(北京)科技有限公司提供的 AIS 数据,感谢欧洲航天局提供的 SNAP 软件.

参考文献

- [1] VELOTTO D, NUNZIATA F, MIGLIACCIO M, et al. Dual-polarimetric TerraSAR-X SAR data for target at sea observation[J]. IEEE geoscience & remote sensing letters, 2013, 10(5):1114-1118.
- [2] VELOTTO D, BENTES C, TINGS B, et al. First Comparison of sentinel-1 and TerraSAR-X data in the framework of maritime targets detection: South Italy case[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2016, 41(4):993-1006.
- [3] SCHWEGMANN C P, KLEYNHANS W, SALMON B P. Synthetic aperture radar ship detection using haar-like features[J]. IEEE geoscience & remote sensing letters, 2017, 14(2):154-158.
- [4] 刘泽宇, 柳彬, 郭炜炜, 等. 高分三号 NSC 模式 SAR

- 图像舰船目标检测初探[J]. 雷达学报, 2017, 6(5): 45-54.
- LIU Z Y, LIU B, GUO W W, et al. Ship detection in GF-3 NSC mode SAR image[J]. Journal of radars, 2017, 6(5):45-54. (in Chinese)
- [5] 李健伟, 曲长文, 彭书娟, 等. 基于卷积神经网络的SAR图像舰船目标检测[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(9):62-68.
- LI J W, QU C W, PENG S J, et al. Ship detection in SAR image based on convolution neural network [J]. Systems engineering and electronics, 2018, 40(9):62-68. (in Chinese)
- [6] GOUAILLIER V, GAGNON L. Ship silhouette recognition using principal components analysis [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3164(1):59-69.
- [7] MARGARIT G, MALLORQUI J J, RIUS J M, et al. 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] MA M Y, CHEN J, LIU W, et al. Ship classification and detection based on CNN using GF-3 SAR images [J]. Remote sensing, 2018, 10(12): 2043-2064.
- [9] YANG Y, NEWSAM S. Bag-of-visual-words and spatial extensions for land-use classification [C]//18th ACM SIGSPATIAL International Symposium on Advances in Geographic Information Systems. San Jose, November 3-5, 2010: 270-279.
- [10] ISPRS 2D semantic labeling contest[EB/OL]. [2019-04-30]. <http://www2.isprs.org/commissions/comm3/wg4/semantic-labeling.html>.
- [11] GREEN R O, EASTWOOD M L, SARTURE C M, et al. Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS)[J]. Remote sensing of environment, 1998, 65(3):227-248.
- [12] Western North America interferometric synthetic aperture radar consortium. [EB/OL]. [2019-04-30]. <https://www.unavco.org/data/imaging/sar/sar.html>.
- [13] HUANG L Q, LIU B, LI B Y, et al. OpenSARship: a dataset dedicated to sentinel-1 ship interpretation [J]. IEEE journal of selected topics in applied earth observations & remote sensing, 2017(99):1-14.
- [14] CHEN W T, JI K F, XING X W, et al. Ship recognition in high resolution SAR imagery based on feature selection[C]//International Conference on Computer Vision in Remote Sensing (CVRS), 2012: 301-305.
- [15] MARGARIT G, TABASCO A. Ship classification in single-pol SAR images based on fuzzy logic[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2011, 49(8):3129-3138.

作者简介

包萌 (1988—), 女, 辽宁人, 自然资源部第一海洋研究所助理工程师, 硕士, 研究方向为 SAR 海洋遥感。

张杰 (1963—), 男, 内蒙古人, 自然资源部第一海洋研究所研究员, 博士, 研究方向为海洋遥感。

孟俊敏 (1973—), 男, 内蒙古人, 自然资源部第一海洋研究所研究员, 博士, 研究方向为海洋遥感。