

## 宽幅SAR海上大型运动舰船目标数据集构建及识别性能分析

雷禹 冷祥光\* 孙忠镇 计科峰\*

(国防科技大学电子科学学院电子信息系复杂电磁环境效应国家重点实验室 长沙 410073)

**摘要:** 以TopSAR和ScanSAR成像模式为代表的宽幅合成孔径雷达(SAR)可以实现更大范围的海洋场景观测。但实现宽测绘带的同时降低了成像分辨率,因此宽幅SAR图像中的舰船目标缺乏清晰的结构特征,给大范围海上舰船目标识别带来了极大的挑战。同时,由于缺乏海上运动航母、两栖舰等大型关键目标的宽幅SAR样本数据,使得海上运动大型关键舰船目标识别更加困难。针对该问题,该文构建了宽幅SAR海上大型运动舰船目标数据集,共包含2291个大型舰船目标样本,类别划分为大型军事舰船,长度为 $\geq 250$  m的大型民用舰船和长度为150~250 m的大型民用舰船。其构建过程为:首先,通过先验知识辅助获取港口区域大型军事舰船目标样本;其次,利用属性信息对OpenSARShip数据集进行长度筛选获取大型民用舰船目标样本;最后,在样本的距离-多普勒域添加二次相位误差进行运动仿真来模拟海上运动舰船目标的成像结果。此外,该文使用经典识别算法和深度学习方法对构建的数据集与运动仿真处理后的数据进行了识别性能分析,结果表明在低分辨率情况下采用SAR图像复数信息可以在一定程度上提高算法的识别率;并且运动舰船目标的散焦问题对识别准确率具有较大影响。

**关键词:** 合成孔径雷达; 宽测绘带; 运动仿真; 大型舰船

**中图分类号:** TN957.51

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-283X(2022)03-0347-16

**DOI:** 10.12000/JR21173

**引用格式:** 雷禹,冷祥光,孙忠镇,等.宽幅SAR海上大型运动舰船目标数据集构建及识别性能分析[J].雷达学报,2022,11(3):347-362. doi: 10.12000/JR21173.

**Reference format:** LEI Yu, LENG Xiangguang, SUN Zhongzhen, *et al.* Construction and recognition performance analysis of wide-swath SAR maritime large moving ships dataset[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(3): 347-362. doi: 10.12000/JR21173.

## Construction and Recognition Performance Analysis of Wide-swath SAR Maritime Large Moving Ships Dataset

LEI Yu LENG Xiangguang\* SUN Zhongzhen JI Kefeng\*

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Wide-swath Synthetic Aperture Radar (SAR), represented by TopSAR and ScanSAR acquisition modes, can observe a vast area of ocean scenes. However, achieving wide-swath reduces the quality of imaging resolution, which causes the ships captured in wide-swath SAR images to not have clear structural characteristics. This phenomenon brings a great challenge to the identification of large maritime ships. Further, the lack of wide-swath SAR sample data of large critical ships, such as moving aircraft carriers and amphibious ships, makes the identification of maritime moving ships difficult. To solve this problem, we construct a wide-

收稿日期: 2021-11-09; 改回日期: 2022-03-06; 网络出版: 2022-03-31

\*通信作者: 冷祥光 luckight@163.com; 计科峰 jikefeng@nudt.edu.cn

\*Corresponding Authors: LENG Xiangguang, luckight@163.com; JI Kefeng, jikefeng@nudt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62001480), 湖南省自然科学基金(2021JJ40684)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62001480), Hunan Provincial Natural Science Foundation of China (2021JJ40684)

责任编辑: 刘涛 Corresponding Editor: LIU Tao

swath SAR large maritime moving ships dataset, which includes 2291 samples. The dataset is divided into the following categories: large military ships, large civilian ships of lengths greater than 250 m, and large civilian ships of lengths between 150~250 m. The construction process of the dataset is as follows: first, the sample data of large military ships in the port area are obtained from prior knowledge; second, the sample data of large civilian ships are obtained via the length screening of OpenSARShip dataset with attribute information; finally, the imaging results of moving ships at sea are simulated by adding quadratic phase error in a range-Doppler domain. This study also analyzes the recognition performance of the constructed dataset and motion simulation of the processed data using classical recognition algorithms and deep learning methods. Experimental results show that using SAR image complex information at low resolution can improve the recognition rate of the algorithm to a certain extent, and the defocusing problem of the moving ship target has a considerable impact on the recognition accuracy.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Wide-swath; Motion simulation; Large ship

## 1 引言

海上舰船目标识别是海洋监测的重要一环,对国防和经济安全具有重要意义,是世界各海岸地带国家的传统任务。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)因为其全天时、全天候的独特优势是实现海上舰船目标监视的一种重要手段<sup>[1]</sup>。SAR系统的聚束和条带模式虽然具有较高的分辨率但不具有较宽的测绘带,无法覆盖较大的海洋范围,而海上舰船目标监视期望SAR成像具有较大的观测范围。

以TopSAR和ScanSAR为代表的宽幅SAR成像模式具有较宽的测绘带,可以对感兴趣的目标区域进行重复观测和短时间内的全球监测,实现在一次观测过程中获得大范围的场景信息,提升雷达对广域场景的实时观测能力<sup>[2]</sup>。例如,加拿大的Radarsat卫星的窄幅ScanSAR成像模式下可以获得50 m分辨率300 km宽测绘带图像,在宽幅ScanSAR成像模式下可以获得100 m分辨率500 km宽测绘带图像<sup>[3,4]</sup>。中国的GF-3号卫星在窄幅ScanSAR成像模式下可以获得50 m分辨率300 km宽测绘带图像,在宽幅ScanSAR成像模式下可以获得100 m分辨率500 km宽测绘带图像,在全球观测成像模式下可以达到500 m分辨率650 km宽测绘带<sup>[5,6]</sup>。日本的ALOS-2卫星的观测幅度更是提高到了近千公里<sup>[7]</sup>。2014年10月3日开始运行的哨兵一号(Sentinel-1)卫星,具有20 m分辨率250 km宽测绘带的宽幅干涉模式(Interferometric Wide swath, IW)和50 m分辨率410 km宽测绘带的超宽幅模式(Extra Wide swath, EW),其中IW模式下的分辨率相较于其他卫星更高,非常适用于海上监视<sup>[8-10]</sup>,并且通过哨兵科学数据中心(Sentinels scientific data hub)和NASA的ASF (Alaska Satellite Facility) DAAC数据网站上就可以获取到大量的Sentinel系列SAR卫星数据。

但是,实现宽测绘带的同时降低了成像分辨率,

这一矛盾主要是因为宽测绘带需要维持较低的脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)以避免SAR图像在距离向上产生模糊,而高分辨率则需要足够高的PRF来避免在方位向上发生模糊<sup>[11,12]</sup>。未来高分辨率宽幅成像技术发展需要解决的主要问题是高分辨率和宽测绘带宽之间的矛盾,获取高分辨率宽测绘带SAR图像<sup>[13]</sup>。

因为宽幅SAR卫星牺牲分辨率换得了宽测绘带,导致尺寸较小的舰船目标在图像上的像素数量比较少,细节很少,所以本文研究的舰船目标皆为大型舰船目标。本文所称“大型舰船目标”主要是指长度 $\geq 150$  m的舰船目标,如大型货船、大型油船、航母和两栖舰等。这主要是因为目前全球主流航母和两栖舰的尺寸都在150 m以上,图1为全球主要航母和两栖舰的对比图。

目前公开发表的舰船数据集,例如SSDD (SAR Ship Detection Dataset)<sup>[14]</sup>, SAR-Ship-Dataset<sup>[15]</sup>, AIR-SARShip-1.0<sup>[16]</sup>和HR4S高分辨率SAR船只样本集<sup>[17]</sup>多用于高分辨率下舰船目标检测。FuSARship<sup>[18]</sup>是在126景高分三号图像上构建的高分辨率GF-3 SAR数据集,其分辨率为1.5 m,可用于舰船和海洋目标检测和识别。上海交通大学发布的OpenSARship数据集<sup>[19,20]</sup>采自41张Sentinel-1图像,结合舰船自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)数据对目标类别进行了标注,共包含10种类别民用舰船目标可用于舰船目标分类识别研究。然而,当前结合AIS信息构建数据集的方法存在无法确定海上大型军事舰船目标的弊端。因为大型军事舰船目标数量少并且也很少发送AIS信息,难以获得准确的目标位置进行标注。综上,当前缺少可用的宽幅SAR海上大型运动军事舰船目标数据集。

总体而言,目前宽幅SAR图像海上大型舰船目标识别所面临的问题可以总结为:

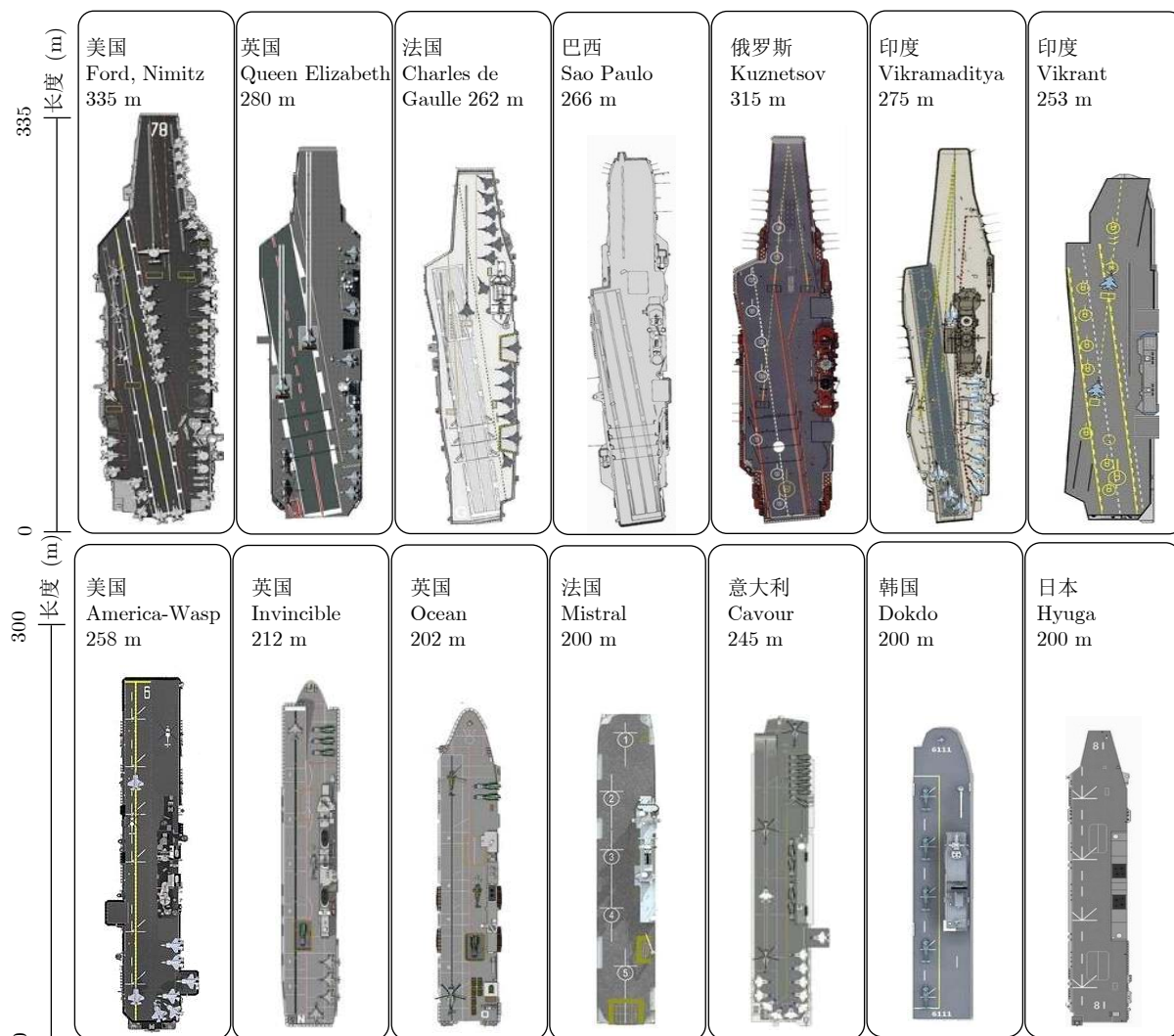


图1 全球主要航母和两栖舰对比图

Fig. 1 Comparison of major aircraft carriers and amphibious ships in the world

(1) 海上的军事舰船目标数量少且难以准确捕捉, 缺少可用的宽幅SAR海上大型运动舰船目标图像数据。

(2) 港口中停泊有大型军事舰船目标, 但海上舰船处于运动状态下会使得SAR成像结果产生散焦, 故港口停泊的舰船目标数据并不适用于海上舰船目标识别。

(3) 在宽幅SAR图像成像分辨率较低的情况下, 海上大型舰船目标细节较小并不具有高分辨率下丰富的细节信息, 只使用幅度图像所含信息量少。

对此, 本文构建了宽幅SAR海上大型运动舰船目标图像数据集, 并详细阐述了构建方法。主要的创新点和工作总结为:

(1) 依据先验知识在Sentinel-1 IW模式港口图像上获取停泊的大型关键舰船目标样本(航母, 两栖舰)。利用属性文件信息对OpenSARShip数据集进行长度筛选, 获得长度 $\geq 150$  m的民用舰船目标样本;

(2) 采用在距离-多普勒域添加二次相位误差的

方法, 对停泊的大型舰船目标样本进行运动仿真来模拟海上运动下的成像结果。

(3) 使用经典识别算法和深度学习方法对构建的宽幅SAR海上大型运动舰船目标图像数据集进行了实验, 并分析了运动目标成像时散焦现象以及复数信息对模型识别性能的影响。

本文内容将按照3个小节进行展开: 第2节为宽幅SAR海上大型运动舰船目标图像数据集构建, 详细介绍停泊大型军事舰船目标复数图像样本获取、大型民用舰船目标复数图像样本筛选、运动目标成像基础及运动仿真方法和数据集特性。第3节为数据集的识别性能分析, 详细介绍实验细节、实验配置以及实验结果与分析。第4节对本文内容进行总结。

## 2 宽幅SAR海上大型运动舰船目标图像数据集构建

目前宽幅SAR海上大型运动舰船目标的数据非

常少,尤其是缺少大型军事舰船目标。对此本文基于Sentinel-1图像和OpenSARShip数据集构建了一个宽幅SAR海上大型运动舰船目标图像数据集。首先,通过先验知识在Sentinel-1 IW模式的港口区域获得停泊的大型军事舰船目标(航空母舰、两栖

舰)样本;其次,利用属性文件信息对OpenSARShip数据集进行长度筛选,获得长度 $\geq 150$  m的民用舰船目标样本;最后,在距离-多普勒域添加二次相位误差进行运动仿真来模拟海上运动舰船目标的成像结果。图2为数据集构建流程。

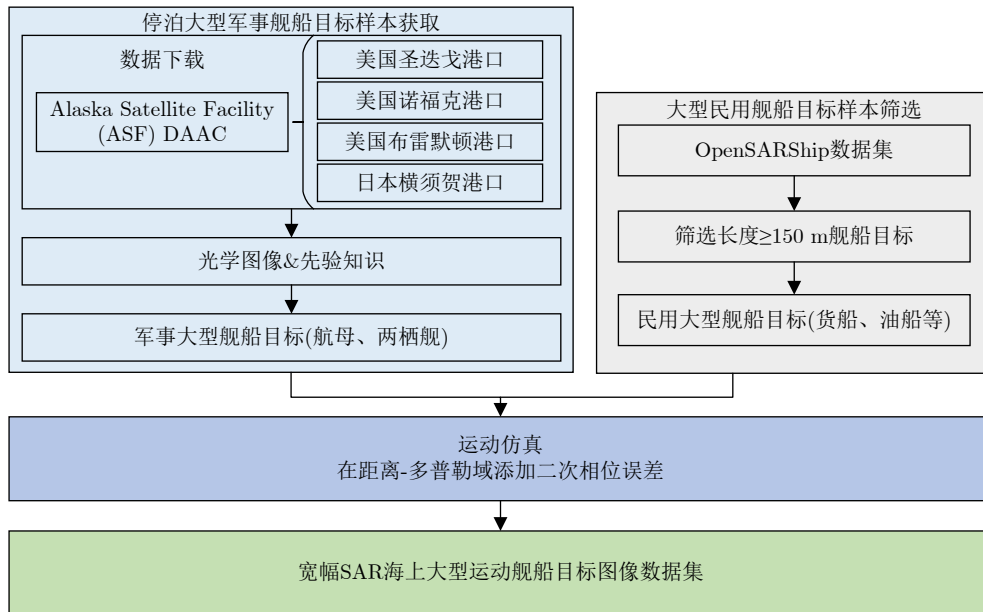


图 2 数据集构建流程

Fig. 2 Dataset construction process

## 2.1 停泊大型军事舰船目标样本获取

美国作为世界上最大的航母国,共拥有7个航空母舰母港基地。本文通过NASA的ASF (Alaska Satellite Facility) DAAC网站下载美国加利福尼亚州的圣迭戈港口图像110景、美国弗吉尼亚州的诺福克港口图像29景、美国华盛顿州的布雷默顿港口图像30景和日本横须贺港口图像148景,共2 TB多数据。所有数据均为Sentinel-1图像的单视复数(Single Look Complex, SLC)产品,具体参数如表1所示。

航母和两栖舰对停泊港口的大小规模和水文地理自然条件等都具有较高的要求,因此停泊的位置

也是相对固定的。图3为4个港口的光学图像,图中标注了航母和两栖舰经常停靠的区域。

因此根据光学图像和先验知识可以确定航母和两栖舰船可能停靠的区域,在SAR图像上找到对应区域就可以获取到对应的大型军事舰船的目标切片。停泊的大型军事舰船目标数据获取以美国圣迭戈港口为例,其制作的整体流程如图4所示。数据预处理和停泊军事舰船目标的SAR图像切片获取主要采用欧洲航天局提供的Sentinel应用程序平台(Sentinel Application Platform, SNAP),它是一款适用于所有Sentinel工具箱的通过架构<sup>[21]</sup>。因为IW模式下Sentinel-1的SLC数据包含3个子带(IW1, IW2, IW3),预处理中需要将包含港口区域的子带或Burst带分离出来。通过光学图像和先验知识辅助确定SAR图像中航母与两栖舰的位置,如图5为美国圣迭戈港口的SAR图像和光学图像的对比图,可以看出根据光学图像在SAR图像找到对应区域就可以确定航母和两栖舰停泊的区域进而获取舰船目标切片。最后通过在SAR图像上随机截取海洋背景图像与舰船目标切片进行融合来获取海上大型军事舰船目标数。该过程首先在海洋背景上确定中心位置,然后将舰船目标切片的实部与虚部通道的像素

表 1 Sentinel-1图像参数

Tab. 1 Sentinel-1 image parameters

参数	数值
成像模式	IW
产品类型	SLC
产品级别	L1
极化方式	VV+VH/VV
轨道模式	升轨/降轨
分辨率(m)	20
幅宽(km)	250

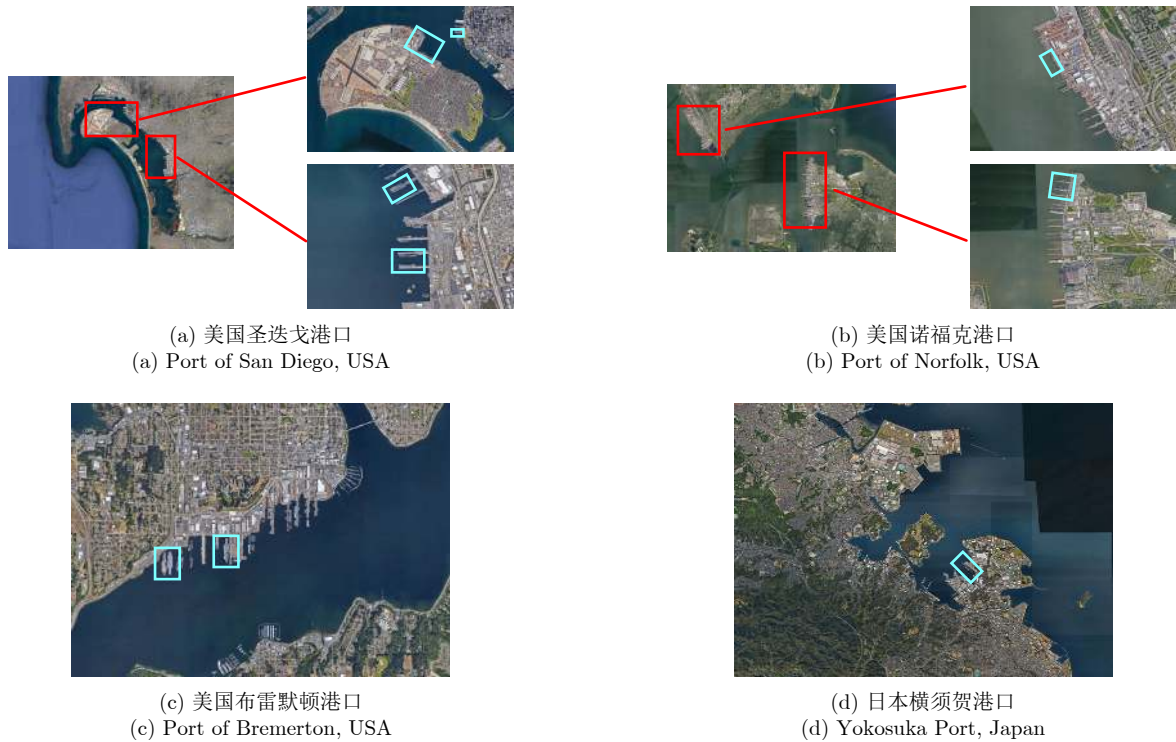


图3 4个港口光学图像

Fig. 3 Optical image of four ports

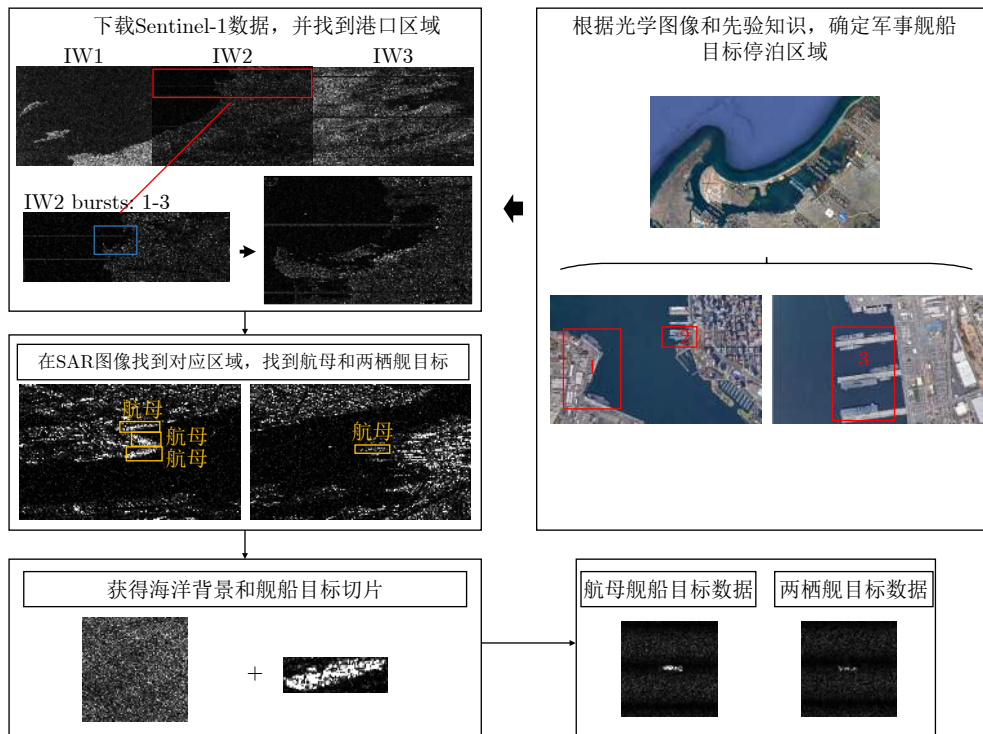


图4 停泊关键大型舰船目标数据获取流程

Fig. 4 Target data acquisition process for key large ships at anchor

值替换海洋背景实部与虚部的像素值，实现舰船目标与海洋背景的融合，该过程如图6所示。

### 2.2 大型民用舰船目标样本筛选

对OpenSARShip数据集进行长度筛选时，主

要利用到属性文件。属性文件是SAR数据与船舶自动识别系统匹配后记录原始数据信息和舰船目标信息的文件。本文根据课题组开发的OpenSARShip-Filter工具<sup>[22]</sup>对OpenSARShip数据集的舰船目标进

行筛选，其中长度筛选通过设定长度区间，与属性文件里的“AISShipInformation”中的长度信息进

行比较，保留符合条件的舰船目标样本。舰船目标筛选程序的界面及其长度筛选流程如图7所示。本

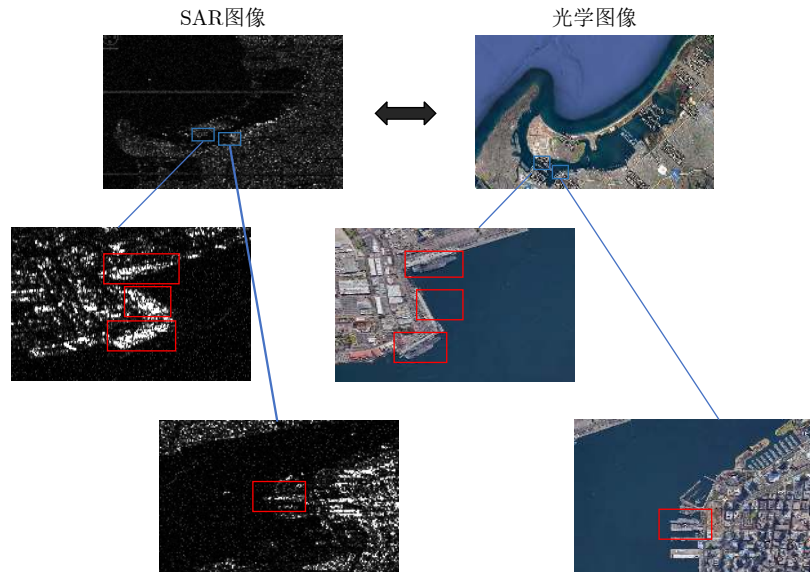


图 5 美国圣迭戈港口的SAR图像和光学图像的对比图

Fig. 5 Comparison of SAR image and optical image of the port of San Diego, USA

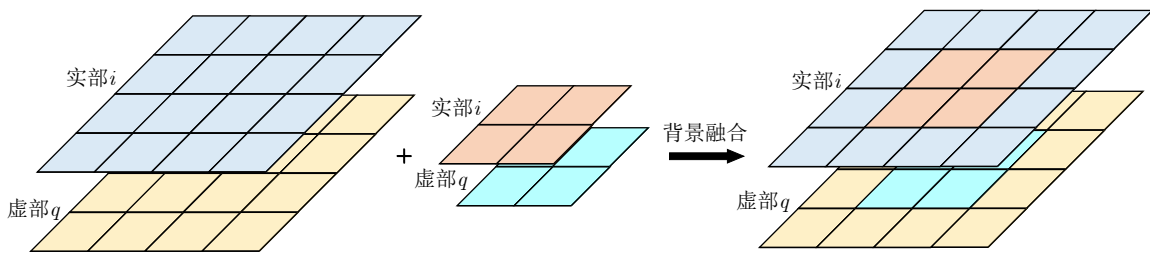


图 6 舰船目标与海洋背景融合过程

Fig. 6 Fusion process of ship target and ocean background

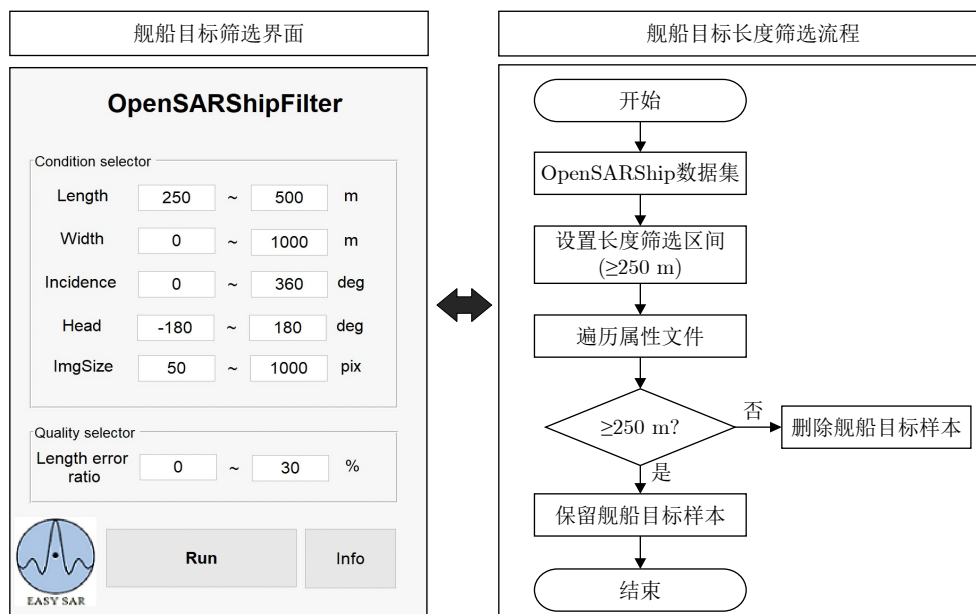


图 7 舰船目标筛选程序的界面及其长度筛选流程

Fig. 7 The interface of the ship target screening program and its length screening process

文主要对OpenSARShip中SLC数据进行筛选, 长度区间设置为150~250 m和 $\geq 250$  m。

### 2.3 海上运动舰船目标仿真

海上舰船目标一般为动目标, 和港口停泊的静止舰船目标存在一定区别, 所以需要获取到的大型舰船目标进行运动仿真来模拟海上运动舰船目标成像。对此本文通过对运动目标成像基础进行分析, 采用添加二次相位误差的运动仿真方法。

#### 2.3.1 运动目标成像基础

以地面坐标系( $x$ - $y$ )为参考对SAR与运动目标成像基础进行分析<sup>[23,24]</sup>。

图8为SAR与目标的成像几何, 其中卫星以 $v_a t$ 的速度进行飞行,  $\theta$ 为俯视角。 $t_0$ 时运动目标 $Q$ 所在位置为 $(x_0, y_0)$ ,  $R_0 = \sqrt{h^2 + y_0^2}$ 为其到SAR运动航

$$R(t) = \sqrt{h^2 + \left[ (v_a - v_x)t - \frac{1}{2}a_x t^2 - x_0 \right]^2 + \left( v_y t + \frac{1}{2}a_y t^2 + y_0 \right)^2}$$

$$\approx R_0 + \frac{(-x_0)(v_a - v_x) + y_0 v_y}{R_0} + \left( (v_a - v_x)^2 + x_0 a_x + v_y^2 + a_y y_0 - \frac{((-x_0)(v_a - v_x) + y_0 v_y)^2}{R_0^2} \right) \frac{t^2}{2R_0} \quad (2)$$

当 $t' = 2R(t)/c$ ,  $c$ 为光速。代入式(1)中可得

$$S_r(t, t') = G(t) \cdot \sqrt{\sigma_0(x_0, R)} \cdot T_0 \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t)\right) \quad (3)$$

其中,  $\lambda$ 为载波频率。通过式(3)可以得到回波的多普勒为

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t)\right)}{dt} = f_{d1} + f_{d2} \quad (4)$$

$f_{d1}$ 是雷达运动时产生的多普勒频率,  $f_{d2}$ 是由于运动目标产生的多普勒频率。

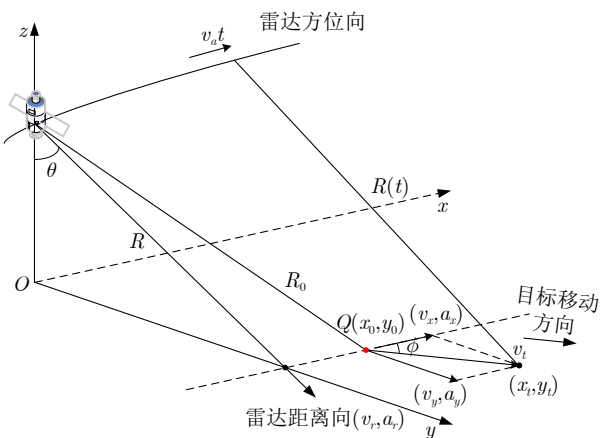


图8 SAR与运动目标的成像几何

Fig. 8 SAR geometry of moving targets

迹的距离,  $R_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + h^2}$ 为其到SAR卫星的距离。运动目标运动时速度为 $v_t$ ,  $\phi$ 为与方位向的夹角, 在方位向地面速度和加速度为 $v_x$ 和 $a_x$ , 在距离向地面速度和加速度为 $v_y$ 和 $a_y$ , 在斜距平面内距离向速度和加速度分别为 $v_r$ 和 $a_r$ 。

经过 $t$ 时刻, 目标 $Q$ 运动到 $(x_t, y_t)$ 处, 此时回波信号经过频率变化和距离向脉冲压缩后可以表示为

$$S_r(t, t') = G(t) \cdot \sqrt{\sigma_0(x_0, R)} \cdot T_0 \cdot \exp(-j2\pi f_c t') \quad (1)$$

其中,  $t$ 为方位向慢时间变量,  $t'$ 为回波信号延迟时间,  $G(t)$ 为雷达增益,  $\sigma_0(x_0, R)$ 为信号后向散射强度,  $T_0$ 为脉冲宽度,  $f_c$ 为载波频率。

此时运动目标 $Q$ 距离SAR卫星的距离 $R(t)$ 为

$$f_{d1} = \frac{2x_0 v_a - 2v_a^2 t}{\lambda R_0} \quad (5)$$

$$f_{d2} = \frac{-2}{\lambda R_0} \left( x_0 v_x + y_0 v_y + \left( v_x^2 - 2v_a v_x + v_y^2 + x_0 a_x + a_y y_0 - \frac{(x_0 v_x - x_0 v_a + y_0 v_y)^2}{R_0^2} \right) t \right) \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可以得到雷达运动产生的调频率 $f_r$ 和目标运动产生的调频率 $f_t$ 为

$$f_r = \frac{-2v_a^2 t}{\lambda R_0} \quad (7)$$

$$f_t = \frac{-2}{\lambda R_0} \left( v_x^2 - 2v_a v_x + v_y^2 + x_0 a_x + a_y y_0 - \frac{(x_0 v_x - x_0 v_a + y_0 v_y)^2}{R_0^2} \right) \quad (8)$$

假设运动目标的多普勒中心频率已知, 结合式(7)和式(8)可得静止与运动目标的调频率之差 $\Delta f$ 为

$$\Delta f = f_t - f_r = \frac{-2}{\lambda R_0} (R_0 a_r + v_x^2 - 2v_a v_x + x_0 a_x + v_r^2) \quad (9)$$

多普勒调频率决定图像质量, SAR卫星在对运动目标进行聚焦成像时, 会引起图像分辨率的损失, 导致目标方位向散焦的问题, 其散焦程度随着 $\Delta f$ 的增大而增大。

从相位误差角度来说,在方位压缩时使用静止目标对应的参考函数会带来二次相位误差(Quadratic Phase Error, QPE),相当于改变了回波多普勒调频斜率,使匹配滤波器失配因而导致目标压缩波形主瓣宽度展宽,主瓣峰值下降,旁瓣电平增高,引起图像分辨率的损失<sup>[25]</sup>。在信号通带边缘时,最大二次相位误差可以表示为

$$QPE = \pi \Delta f \left( \frac{T_s}{2} \right)^2 \quad (10)$$

其中,  $T_s$  为合成孔径时间。

### 2.3.2 运动仿真方法

由目标成像基础可知,对停泊舰船目标进行运动仿真时,可以通过在图像的距离-多普勒域添加二次相位误差使图像出现散焦现象来模拟海上运动目标的成像结果<sup>[25-27]</sup>。

运动仿真的过程如图9所示,首先将复数图像通过方位向的快速傅里叶变换至多普勒域,然后在距离向上添加二次相位误差,最后通过快速傅里叶逆变换恢复到图像域获得运动仿真图像。

二次相位误差可以表示为

$$\Delta\varphi = kz^2 + d \quad (11)$$

其中,  $z$  为方位时间,  $k$  为二次相位的参数,  $d$  为可

调参数。 $k$  的取值会影响目标发生散焦的程度,当  $k$  的取值范围在  $0 > k > -0.003$  时目标会发生程度较轻的散焦,与现实中的动目标成像结果最相近。图10展示了4种不同程度的运动仿真图像及其方位误差曲线。

## 2.4 数据集分析

### 2.4.1 基本信息

本文首先在317景Sentinel-1港口数据上获得491个停泊的大型军事舰船目标样本,包含381个航母目标切片,110个两栖舰目标切片。再对OpenSARShip数据进行筛选获得长度为150~250 m和 $\geq 250$  m的两个大型民用舰船目标样本,其中大型民船(150~250 m)目标样本数为1233个,包含1044个货船目标切片、142个油船目标切片、7个挖泥船目标切片、12个客船目标切片以及28个其他类型舰船目标切片;大型民船( $\geq 250$  m)目标样本数为567个,包含507个货船目标切片、40个油船目标切片、4个客船目标切片以及16个其他类型舰船目标切片。其舰船类别和目标数量统计如图11所示。图12随机展示了停泊和运动仿真两种情况下的部分大型舰船目标样本切片。

### 2.4.2 聚类分析

为更好地分析所构建数据集的相关性,通过使

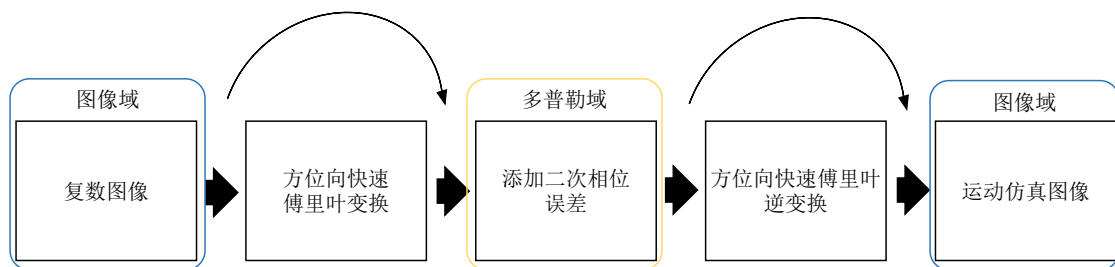


图 9 运动仿真流程

Fig. 9 Motion simulation flow chart

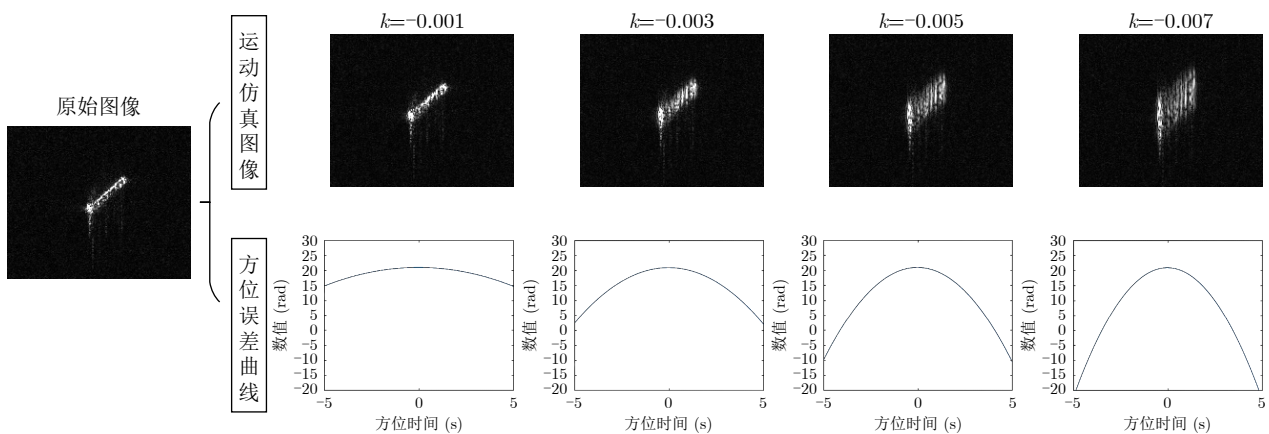


图 10 运动仿真及其方位误差曲线

Fig. 10 Motion simulation images and their azimuth error curves

用K均值聚类算法(K-means clustering algorithm)<sup>[28]</sup>进行聚类分析。K-means算法根据图像之间的相似性进行簇的划分，但是需要给定聚类数并且其值与聚类效果相关。因此通过使用手肘法<sup>[29]</sup>来获取最佳聚类数。

首先对原始的大型舰船目标样本数据和二次相位参数设置为 $k = -0.002$ 的运动仿真数据使用手肘法进行聚类数估计。然后根据所得的聚类数开展K-means聚类，并利用主成分分析方法(Principal Component Analysis, PCA)将图像数据进行降维。

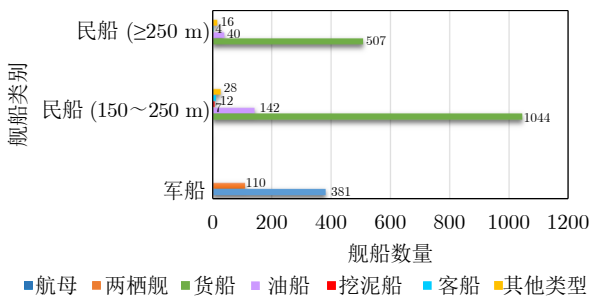


图 11 舰船目标数量统计

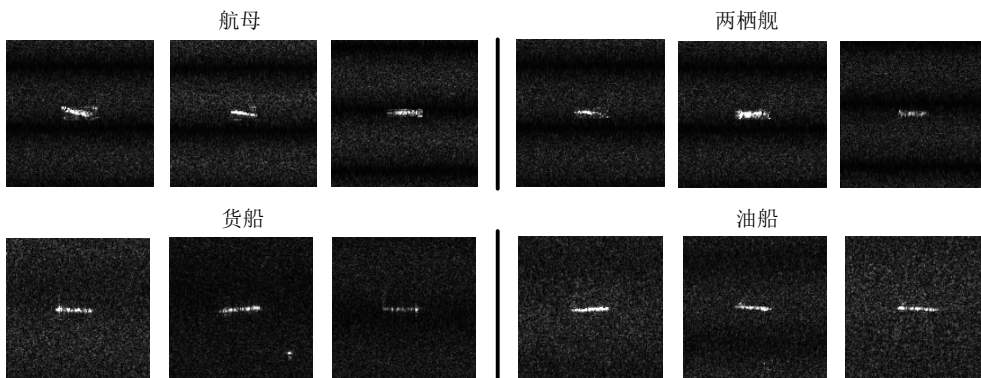
Fig. 11 Statistics of the number of ship targets

为便于分析，在聚类可视化结果图中使用不同的颜色表示聚类所得到的不同簇，数字表示数据真实的类别标签。图13为聚类数估计与聚类可视化结果。

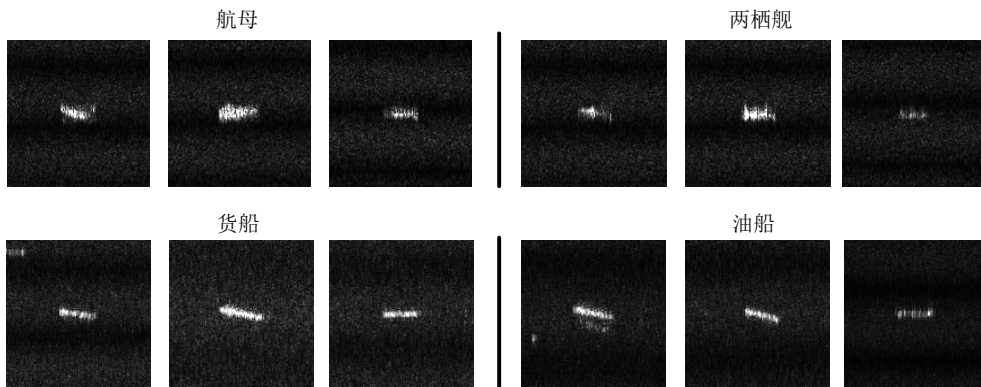
由图13的手肘法聚类数估计结果曲线可得原始数据和运动仿真数据的聚类数为3，与数据的真实类别值相同。并且K-means算法聚类可视化结果图中数字“0”代表大型军事舰船目标，数字“1”和“2”分别代表两种长度的大型民用舰船目标，可以发现大型军事舰船目标皆为美国的航母和两栖舰所以类内差异要小于大型民船目标，在可视化结果上更加聚集。相对而言大型民船目标的类内差异大，因此聚类效果差一些。

### 3 识别性能分析

本节对构建的宽幅SAR海上大型运动舰船目标图像数据集进行识别性能分析，通过使用传统识别算法支持向量机(Support Vector Machine, SVM)<sup>[30,31]</sup>和基于深度学习的方法在VGG16Net网络<sup>[32]</sup>，GoogLeNet网络<sup>[33]</sup>，ResNet18网络<sup>[34]</sup>和改进的ResNet18网络<sup>[35]</sup>上进行相关实验。



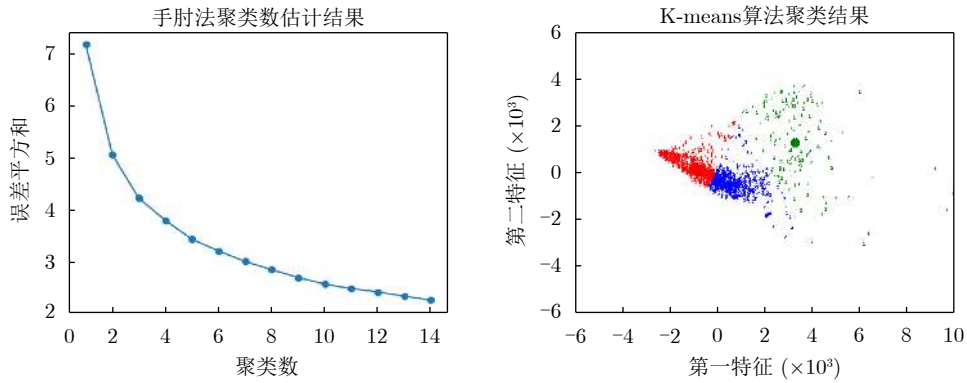
(a) 停泊舰船目标图像  
(a) Moored ship image



(b) 运动仿真 ( $k=-0.002$ )舰船目标图像  
(b) Motion simulation ( $k=-0.002$ ) ship image

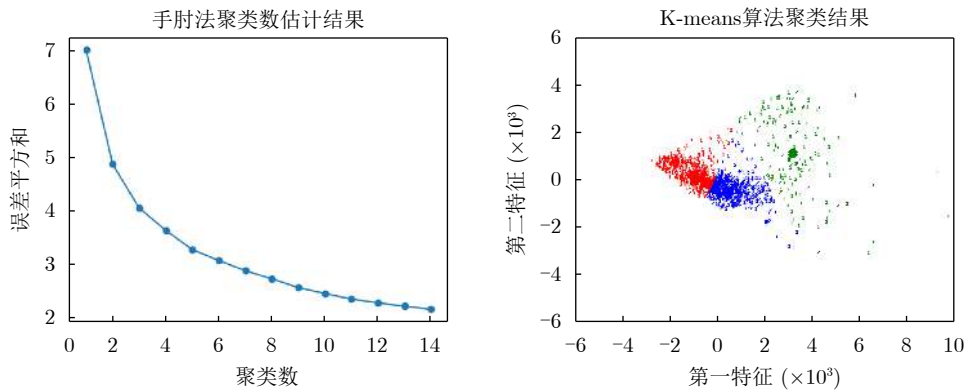
图 12 大型舰船目标样本切片

Fig. 12 Large-scale ship sample slices



(a) 原始数据手肘法聚类数估计与聚类可视化结果

(a) Raw data elbow method cluster number estimation and cluster visualization results



(b) 运动仿真数据手肘法聚类数估计与聚类可视化结果

(b) Motion simulation data elbow method cluster number estimation and cluster visualization results

图 13 数据手肘法聚类数估计与聚类可视化结果

Fig. 13 Data elbow method cluster number estimation and cluster visualization results

### 3.1 实验细节及配置

考虑到样本不均衡问题, 实验中将宽幅SAR海上大型运动舰船目标图像数据集分为3个类别, 分别为大型军事舰船目标, 长度为 $\geq 250$  m的大型民用舰船目标和长度为150~250 m的大型民用舰船目标, 并对3类目标进行了筛选和数量上均衡。其次通过在实际数据中融入了二次相位参数设置为 $k = -0.002$ 的运动仿真数据以扩大数据集的数量进行扩展实验, 并在实验中利用OpenSARship数据中的两类民船目标即货船(Cargo)和油船(Tanker)数据进行运动仿真来增加不同目标不同散焦程度下分类识别的结果。所有舰船数据样本大小设置为 $128 \times 128$ , 并随机划分为训练集和测试集, 划分比例为8:2。

因为宽幅SAR图像下分辨率较低所以幅度图像所含信息比较少, 根据文献[35]提出的利用复数信息进行SAR数据通道重组作为数据输入。将SAR图像的实部、虚部和幅度3通道信息进行组合, 在幅度图像的基础上增加了SAR图像的实部和虚部通道信息, 在复数层面更加完整地描述舰船目标。主要步

骤是将复数SAR图像中的实部 $i$ 、虚部 $q$ 进行绝对值处理后与幅度 $A$ 进行组合, 可以表示为 $F = [|i|; |q|; A]$ 。

在实验配置上本实验所采用的编程语言为Python, 深度学习框架为Pytorch。硬件采用AMD Ryzen 7 4800HS with Radeon Graphics @ 2.90 GHz, 内存为8 GB, 显卡为GeForce GTX 1660Ti, Windows64位环境, 采用CUDA10.0和CUDNN7.5.1加速计算。实验中初始学习率设置为0.0001, 迭代次数设置为30, 改进ResNet网络中的降维率 $r$ 设置为16, 改进ResNet网络中的修正参数 $\varepsilon$ 设置为0.01。

### 3.2 实验结果与分析

#### 3.2.1 评价指标

本文实验采用准确率(Accuracy)和精确率(Precision)进行评估。准确率是指分类模型判断正确的数据占测试数据的百分比, 它可以反映分类器对整个样本的判定能力, 如式(12)所示。精确率用来计算每一类舰船的分类精度, 如式(13)所示。

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \quad (12)$$

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (13)$$

其中，TP, FP, FN, TN分别表示为真正例、假正例、假负例和真负例。

### 3.2.2 实验结果

实验中将大型军事舰船目标的标签设置为jun0，长度为 $\geq 250$  m的大型民用舰船目标的标签设置为min1和长度为150~250 m的大型民用舰船目标的标签设置为min2。且由2.3.2节的分析，将运动仿真的二次相位的参数 $k$ 的取值范围设置在 $0 > k > -0.003$ 。

#### 3.2.2.1 复数信息对识别性能影响分析

在探究复数信息对识别性能影响的实验中设置了两组实验数据，如表2所示，A组为停泊的大型舰船目标样本数据，B组为二次相位参数设置为 $k = -0.002$ 的运动仿真数据，分别进行只保留幅度信息和3通道重组处理。

将实验数据分别在VGG16Net网络、GoogLeNet网络、ResNet18网络进行实验，识别结果如表3所示。

通过表3的对比实验结果可以看出，利用复数信息进行SAR数据通道重组作为数据输入在识别准确率上有提升。表明在低分辨率情况下采用SAR图像复数信息添加了细节表示，可以有助于更加完整地描述舰船目标，在一定程度上提高了算法的识别率。

#### 3.2.2.2 数据集实测性能分析

在数据集实测分析中，首先在两类民船目标数据集上进行实测，实验设置如下：C组为静止民船数

表 2 复数信息对识别性能影响实验设置

Tab. 2 Experimental setup for the influence of complex information on recognition performance

组号	处理方式	是否运动仿真处理
A	A1 幅度	否
	A2 3通道重组	否
B	B1 幅度	二次相位参数设置为 $k = -0.002$ ，进行运动仿真
	B2 3通道重组	二次相位参数设置为 $k = -0.002$ ，进行运动仿真

据，D组为二次相位参数设置为 $k = -0.002$ 的运动仿真数据，E组为二次相位参数设置为 $k = -0.003$ 的运动仿真数据，且都经过3通道重组处理。将3组数据分别在SVM算法、VGG16Net网络、GoogLeNet网络、ResNet18网络上进行实验，实验结果如表4所示。

其次实验中考虑到深度学习往往需要大量的样本进行训练，因此在宽幅SAR海上大型运动舰船目标图像数据集的实际数据中融入了二次相位参数设置为 $k = -0.002$ 的运动仿真数据以扩大数据集的数量，设置为F组且经过3通道重组处理。并在SVM算法、VGG16Net网络、GoogLeNet网络、ResNet18网络和改进ResNet网络上进行了对比实验，实验结果如表5所示。

通过民用舰船目标的实验结果表明，经过运动仿真处理后民船目标的识别率有所下降，分析原因是二次相位参数的取值会影响目标发生散焦的程度，所以经过运动仿真处理后的数据类间差变小导致识别准确率有所下降，并且随着散焦程度增强导致目标的可识别性就越差。在混合数据的实验结果上可以得出，将实际数据与运动仿真数据进行融合后在5种方法上皆具有较好的可分性。通过两组的实验结果也表明了本文方法的有效性。

#### 3.2.2.3 运动仿真对识别性能影响分析

在探究运动仿真对识别性能的影响中，在大型舰船目标样本数据上设置了3组实验，如表6所示，A2组为停泊的大型舰船目标样本数据，B2组为二

表 3 复数信息对识别性能影响实验结果

Tab. 3 Experimental results of the effect of complex information on recognition performance

网络	数据	准确率(%)	数据	准确率(%)
VGG16Net	A1	85.19	A2	87.59
GoogLeNet	A1	85.88	A2	86.13
ResNet18	A1	87.72	A2	88.35
VGG16Net	B1	79.87	B2	81.77
GoogLeNet	B1	84.87	B2	85.94
ResNet18	B1	86.51	B2	86.89

表 4 民船目标识别实验结果

Tab. 4 Experimental results of civilian ship recognition

网络	数据	准确率(%)	数据	准确率(%)	数据	准确率(%)
SVM+GLGM	C	66.33	D	65.66	E	64.70
VGG16Net	C	69.10	D	68.51	E	67.26
GoogLeNet	C	69.96	D	68.38	E	68.18
ResNet18	C	71.28	D	70.42	E	68.18

次相位参数设置为 $k = -0.002$ 的运动仿真数据, G2组为二次相位参数设置为 $k = -0.003$ 的运动仿真数据, 且都经过3通道重组处理。

将3组数据分别在SVM算法、VGG16Net网络、GoogLeNet网络、ResNet18网络和改进ResNet网络上进行实验, 实验结果如表7所示。

通过表7中组1和组2实验对比分析, 可以发现对数据进行运动仿真处理后识别准确率皆发生了不同幅度的下降, 使用数据A2的识别准确率皆要好于使用数据B2的识别准确率, 且深度学习方法要优于传统分类方法。在识别性能较好的ResNet18网络上识别准确率由88.35%下降为86.89%, 下降1.5%。改进的ResNet网络上识别准确率由90.75%下降为87.02%, 下降3.7%, 实验结果表明在距离-多普勒域上添加二次相位误差进行运动仿真后的识别准确率有所下降, 说明运动目标成像的散焦问题对识别效果具有一定影响。

本文在2.3.2节分析了二次相位参数的取值会影

响目标发生散焦的程度, 在组2和组3实验中分别将二次相位的参数设置为 $k = -0.002$ 和 $k = -0.003$ 进行分析, 散焦现象也逐渐加强, 如图14所示。由表7的实验结果可知, 组3的数据经过运动仿真后散焦程度强于组2的数据, 识别准确率也发生了明显下降。再一次验证了散焦问题对识别准确率影响较大, 也说明了散焦程度越严重目标的可识别性就越差。

通过3组实验的结果可以发现改进ResNet网络的识别性能皆要好于其他经典网络, 整体准确率最高且下降幅度较小, 可证明该方法对海上运动舰船目标识别上具有识别优势。在3组实验中可以发现大型军事舰船目标的识别精确率皆要高于大型民用舰船的识别精确率, 分析认为本文主要是在4个港口中获取大型军事舰船目标样本, 且以航母为主。又因为航母和两栖舰在港口的停泊位置相对固定, 因此获取的航母和两栖舰船多为同一目标。当数据类型间差异大且类内差异小时往往会获得较好的识别结果, 所以大型军事舰船目标皆为美国的航母和两栖舰, 类内差异要小于大型民船目标, 对此在识别

表 5 混合数据F组识别实验结果

Tab. 5 Mixed data F recognition experimental results

网络	准确率(%)
SVM+GLGM	47.17
VGG16Net	74.43
GoogLeNet	74.36
ResNet18	77.05
改进ResNet	78.29

表 6 运动仿真对识别性能影响实验设置

Tab. 6 Experimental setup of the influence of motion simulation on recognition performance

组号	处理方式
A2	未处理
B2	二次相位参数设置为 $k = -0.002$ , 进行运动仿真
G2	二次相位参数设置为 $k = -0.003$ , 进行运动仿真

表 7 运动仿真对识别性能影响实验结果

Tab. 7 Experimental results of the influence of motion simulation on recognition performance

组号	实验方法	实验数据	jun0精确率(%)	min1精确率(%)	min2精确率(%)	准确率(%)
1	SVM+GLGM	A2	97.96	68.81	73.39	55.13
	VGG16Net	A2	98.64	82.36	83.24	87.59
	GoogLeNet	A2	99.80	77.96	82.68	86.13
	ResNet18	A2	99.60	82.98	83.80	88.35
	改进ResNet	A2	100	90.60	83.44	90.75
2	SVM+GLGM	B2	98.98	62.39	75.23	53.37
	VGG16Net	B2	98.44	72.72	76.28	81.77
	GoogLeNet	B2	99.40	78.38	81.66	85.94
	ResNet18	B2	99.60	83.80	79.36	86.89
	改进ResNet	B2	100	78.72	86.40	87.02
3	SVM+GLGM	G2	97.96	61.47	71.56	52.75
	VGG16Net	G2	95.74	72.28	72.60	79.11
	GoogLeNet	G2	100	76.68	82.06	85.31
	ResNet18	G2	99.60	77.40	83.88	85.94
	改进ResNet	G2	100	76.54	85.50	86.26

精确率上要更高。同时本文在构建数据集时在停泊港口中获取到大型关键舰船目标切片，在背景融合中大型舰船目标的背景会对识别结果产生一定影响，也会导致大型军事舰船目标的识别精确率高于大型民用舰船的识别精确率。

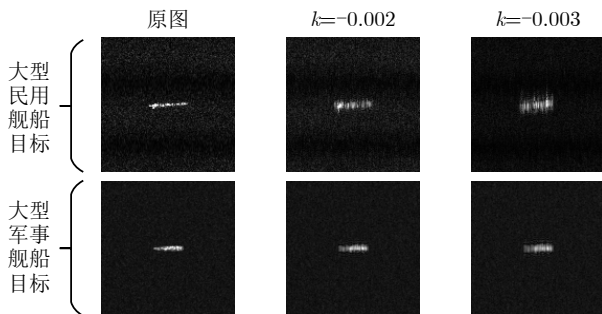


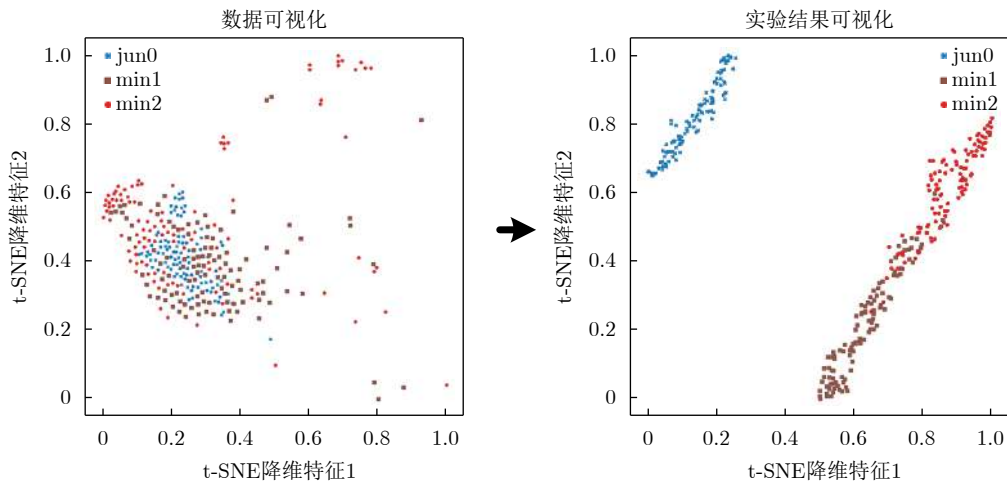
图 14 大型舰船目标运动仿真图像

Fig. 14 Large ship target motion simulation image

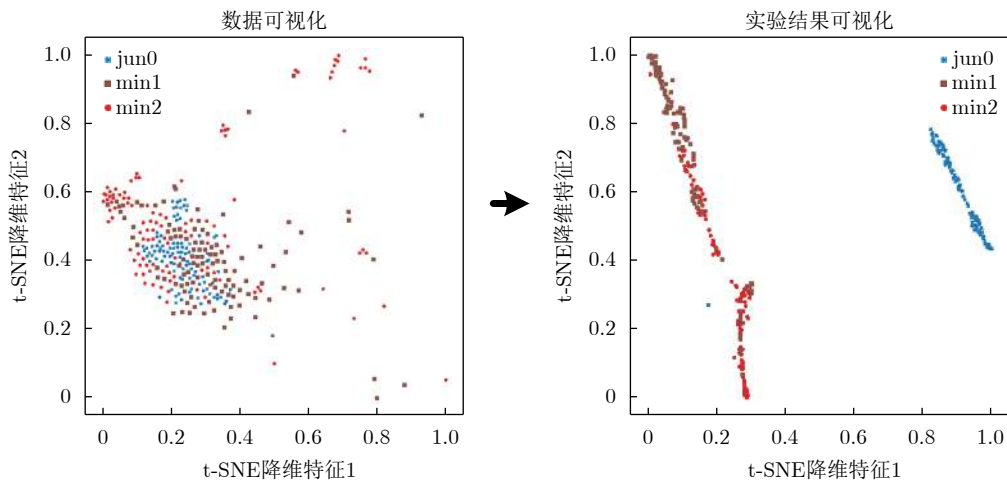
同时本文利用t-随机邻近嵌入(t-distributed Stochastic Neighbor Embedding, t-SNE)<sup>[36]</sup>算法对数据A2，数据B2以及在组1、组2中使用改进Res-Net方法的识别结果进行特征可视化，该算法可以将输出特征映射到二维平面上，如图15所示。图中蓝色点代表大型军事舰船目标，灰色点代表长度 $\geq 250$  m的大型民用舰船目标，红色点代表长度为150~250 m的大型民用舰船目标。通过结果可视化可以发现改进ResNet方法可以较好地3类舰船目标识别出来，对比图15(a)和图15(b)的识别结果可以发现进行运动仿真后对大型舰船目标识别产生一定影响。

#### 4 结论

本文主要针对目前缺少可用的宽幅SAR海上大型运动舰船目标图像数据集的问题进行研究，整体工作可总结为：



(a) 数据A2可视化及改进ResNet方法的识别结果特征可视化  
(a) Data A2 visualization and improved ResNet method's recognition result visualization



(b) 数据B2可视化及改进ResNet方法的识别结果特征可视化  
(b) Data B2 visualization and improved ResNet method's recognition result visualization

图 15 数据及识别结果特征可视化

Fig. 15 Visualization of data and recognition result

(1) 针对缺少宽幅SAR图像大型舰船目标数据和海上军事舰船目标的问题, 本文在317景Sentinel-1港口数据上依据先验知识获取了停泊的大型关键舰船目标样本(航母、两栖舰), 并在OpenSARShip数据集进行长度筛选保留长度 $\geq 150$  m的大型民船舰船目标样本。

(2) 根据SAR卫星对运动目标成像时会产生一个二次相位误差, 改变回波多普勒调频率的原理, 本文采用在大型舰船目标的距离-多普勒域添加二次相位误差进行运动仿真来模拟海上舰船目标运动时成像结果。构建了宽幅SAR海上大型运动舰船目标数据集, 共包含2291个大型舰船目标样本。

(3) 通过使用经典识别算法和深度学习方法对构建的宽幅SAR海上大型运动舰船目标图像数据集进行了识别性能分析, 通过实验结果可知在低分辨率情况下采用SAR图像复数信息可以在一定程度上提高算法的识别率, 并且运动目标成像的散焦问题对识别效率具有一定影响, 随着目标散焦程度加重其可识别性就越差。

同时本文也为今后海上运动舰船目标数据集构建和目标识别研究提供了参考与学习思路。

### 参 考 文 献

- [1] 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. doi: [10.12000/JR14144](https://doi.org/10.12000/JR14144).  
XING Xiangwei, JI Kefeng, KANG Lihong, et al. Review of ship surveillance technologies based on high-resolution wide-swath synthetic aperture radar imaging[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(1): 107–121. doi: [10.12000/JR14144](https://doi.org/10.12000/JR14144).
- [2] 李健. 星载宽幅 SAR 及目标检测算法研究[D]. [博士论文], 西安电子科技大学, 2018: 15–21.  
LI Jian. Study on spaceborne SAR with wide swath and target detection[D]. [Ph. D. dissertation], Xidian University, 2018: 15–21.
- [3] RANEY R K, LUSCOMBE A P, LANGHAM E J, et al. RADARSAT (SAR imaging)[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1991, 79(6): 839–849. doi: [10.1109/5.90162](https://doi.org/10.1109/5.90162).
- [4] 匡燕, 李安, 李子扬, 等. RADARSAT 卫星产品[J]. 遥感信息, 2007(2): 82–85, 27. doi: [10.3969/j.issn.1000-3177.2007.02.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3177.2007.02.019).  
KUANG Yan, LI An, LI Ziyang, et al. RADARSAT satellite overview[J]. *Remote Sensing Information*, 2007(2): 82–85, 27. doi: [10.3969/j.issn.1000-3177.2007.02.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3177.2007.02.019).
- [5] 张庆君. 高分三号卫星总体设计与关键技术[J]. 测绘学报, 2017, 46(3): 269–277. doi: [10.11947/j.AGCS.2017.20170049](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2017.20170049).  
ZHANG Qingjun. System design and key technologies of the GF-3 satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 269–277. doi: [10.11947/j.AGCS.2017.20170049](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2017.20170049).
- [6] SUN Zhongzhen, DAI Muchen, LENG Xiangguang, et al. An anchor-free detection method for ship targets in high-resolution SAR images[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 7799–7816. doi: [10.1109/JSTARS.2021.3099483](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3099483).
- [7] KANKAKU Y, SUZUKI S, and OSAWA Y. ALOS-2 mission and development status[C]. 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS, Melbourne, Australia, 2013: 2396–2399. doi: [10.1109/IGARSS.2013.6723302](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6723302).
- [8] VAN WIMERSMA GREIDANUS H and SANTAMARIA S C. First analyses of Sentinel-1 images for maritime surveillance[R]. JRC92666, 2014. doi: [10.2788/132810](https://doi.org/10.2788/132810).
- [9] SANTAMARIA C, ALVAREZ M, GREIDANUS H, et al. Mass processing of Sentinel-1 images for maritime surveillance[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 678. doi: [10.3390/rs9070678](https://doi.org/10.3390/rs9070678).
- [10] GEUDTNER D, TORRES R, SNOEIJ P, et al. Sentinel-1 system capabilities and applications[C]. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, Canada, 2014: 1457–1460. doi: [10.1109/IGARSS.2014.6946711](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946711).
- [11] 王玉莹, 张志敏, 李宁, 等. 高分宽幅SAR系统下的方位多通道运动目标成像算法研究[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(3): 541–546. doi: [10.11999/JEIT190211](https://doi.org/10.11999/JEIT190211).  
WANG Yuying, ZHANG Zhimin, LI Ning, et al. A moving target imaging approach for the multichannel in azimuth high resolution wide swath SAR system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(3): 541–546. doi: [10.11999/JEIT190211](https://doi.org/10.11999/JEIT190211).
- [12] 潘洁, 王帅, 李道京, 等. 基于分布式压缩感知的高分宽幅 SAR 动目标成像技术[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 166–173. doi: [10.12000/JR19060](https://doi.org/10.12000/JR19060).  
PAN Jie, WANG Shuai, LI Daojing, et al. High-resolution wide-swath SAR moving target imaging technology based on distributed compressed sensing[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(1): 166–173. doi: [10.12000/JR19060](https://doi.org/10.12000/JR19060).
- [13] 邓云凯, 禹卫东, 张衡, 等. 未来星载SAR技术发展趋势[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 1–33. doi: [10.12000/JR20008](https://doi.org/10.12000/JR20008).  
DENG Yunkai, YU Weidong, ZHANG Heng, et al. Forthcoming spaceborne SAR development[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(1): 1–33. doi: [10.12000/JR20008](https://doi.org/10.12000/JR20008).
- [14] LI Jianwei, QU Changwen, and SHAO Jiaqi. Ship detection in SAR images based on an improved faster R-CNN[C]. 2017 SAR in Big Data Era: Models, Methods and Applications (BIGSAR DATA), Beijing, China, 2017: 1–6. doi: [10.1109/BIGSAR DATA.2017.8124934](https://doi.org/10.1109/BIGSAR DATA.2017.8124934).
- [15] WANG Yuanyuan, WANG Chao, ZHANG Hong, et al. A SAR dataset of ship detection for deep learning under

- complex backgrounds[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 765. doi: [10.3390/rs11070765](https://doi.org/10.3390/rs11070765).
- [16] 孙显, 王智睿, 孙元睿, 等. AIR-SARShip-1.0: 高分辨率SAR舰船检测数据集[J]. *雷达学报*, 2019, 8(6): 852–862. doi: [10.12000/JR19097](https://doi.org/10.12000/JR19097).  
SUN Xian, WANG Zhirui, SUN Yuanrui, *et al.* AIR-SARShip-1.0: High-resolution SAR ship detection dataset[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(6): 852–862. doi: [10.12000/JR19097](https://doi.org/10.12000/JR19097).
- [17] 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.2019043008](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2019043008).  
BAO Meng, ZHANG Jie, MENG Junmin, *et al.* Construction and feature analysis of high resolution SAR ship sample set[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2019, 34(6): 789–797. doi: [10.13443/j.cjors.2019043008](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2019043008).
- [18] HOU Xiyue, AO Wei, SONG Qian, *et al.* FUSAR-ship: Building a high-resolution SAR-AIS matchup dataset of Gaofen-3 for ship detection and recognition[J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 63(4): 140303. doi: [10.1007/s11432-019-2772-5](https://doi.org/10.1007/s11432-019-2772-5).
- [19] HUANG Lanqing, LIU Bin, LI Boying, *et al.* OpenSARShip: A dataset dedicated to Sentinel-1 ship interpretation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(1): 195–208. doi: [10.1109/JSTARS.2017.2755672](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2755672).
- [20] LI Boying, LIU Bin, HUANG Lanqing, *et al.* OpenSARShip 2.0: A large-volume dataset for deeper interpretation of ship targets in Sentinel-1 imagery[C]. 2017 SAR in Big Data Era: Models, Methods and Applications (BIGSAR DATA), Beijing, China, 2017: 1–5. doi: [10.1109/BIGSAR DATA.2017.8124929](https://doi.org/10.1109/BIGSAR DATA.2017.8124929).
- [21] ZÜHLKE M, FOMFERRA N, BROCKMANN C, *et al.* SNAP (sentinel application platform) and the ESA sentinel 3 toolbox[C]. Proceedings of Sentinel-3 for Science Workshop, Venice, Italy, 2015: 21.
- [22] LENG Xiangguang, JI Kefeng, ZHOU Shilin, *et al.* Fast shape parameter estimation of the complex generalized Gaussian distribution in SAR images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(11): 1933–1937. doi: [10.1109/LGRS.2019.2960095](https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2960095).
- [23] 张绪锦, 朱兆达, 邓海涛, 等. 一种适用于双通道星载SAR的目标检测技术[J]. *电子学报*, 2007, 35(9): 1794–1798. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2007.09.037](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2007.09.037).  
ZHANG Xujin, ZHU Zhaoda, DENG Haitao, *et al.* A moving target detection method for dual-aperture spaceborne SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(9): 1794–1798. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2007.09.037](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2007.09.037).
- [24] 闫贺, 王珏, 黄佳, 等. 基于二维速度搜索的星载SAR运动目标聚焦算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(6): 1287–1293. doi: [10.11999/JEIT180663](https://doi.org/10.11999/JEIT180663).  
YAN He, WANG Jue, HUANG Jia, *et al.* A moving-targets detection algorithm for spaceborne SAR system based on two-dimensional velocity search method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(6): 1287–1293. doi: [10.11999/JEIT180663](https://doi.org/10.11999/JEIT180663).
- [25] 张道成, 张正成. 运动目标对SAR成像的影响[J]. *舰船电子对抗*, 2014, 37(1): 49–52, 67. doi: [10.3969/j.issn.1673-9167.2014.01.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9167.2014.01.012).  
ZHANG Daocheng and ZHANG Zhengcheng. Influence of moving targets on SAR imaging[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2014, 37(1): 49–52, 67. doi: [10.3969/j.issn.1673-9167.2014.01.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9167.2014.01.012).
- [26] 马琳, 潘宗序, 黄钟冷, 等. 基于子孔径与全孔径特征学习的SAR多通道虚假目标鉴别[J]. *雷达学报*, 2021, 10(1): 159–172. doi: [10.12000/JR20106](https://doi.org/10.12000/JR20106).  
MA Lin, PAN Zongxu, HUANG Zhongling, *et al.* Multichannel false-target discrimination in SAR images based on sub-aperture and full-aperture feature learning[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(1): 159–172. doi: [10.12000/JR20106](https://doi.org/10.12000/JR20106).
- [27] 温雪娇, 仇晓兰, 尤红建, 等. 高分辨率星载SAR起伏运动目标精细聚焦与参数估计方法[J]. *雷达学报*, 2017, 6(2): 213–220. doi: [10.12000/JR17005](https://doi.org/10.12000/JR17005).  
WEN Xuejiao, QIU Xiaolan, YOU Hongjian, *et al.* Focusing and parameter estimation of fluctuating targets in high resolution spaceborne SAR[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(2): 213–220. doi: [10.12000/JR17005](https://doi.org/10.12000/JR17005).
- [28] HARTIGAN J A and WONG M A. Algorithm AS 136: A  $k$ -means clustering algorithm[J]. *Journal of the Royal Statistical Society. Series c (Applied Statistics)*, 1979, 28(1): 100–108. doi: [10.2307/2346830](https://doi.org/10.2307/2346830).
- [29] THORNDIKE R L. Who belongs in the family?[J]. *Psychometrika*, 1953, 18(4): 267–276. doi: [10.1007/bf02289263](https://doi.org/10.1007/bf02289263).
- [30] BURGESS C J C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1998, 2(2): 121–167. doi: [10.1023/A:1009715923555](https://doi.org/10.1023/A:1009715923555).
- [31] SMOLA A J and SCHÖLKOPF B. A tutorial on support vector regression[J]. *Statistics and Computing*, 2004, 14(3): 199–222. doi: [10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88](https://doi.org/10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88).
- [32] SIMONYAN K and ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[C]. 3rd International Conference on Learning Representations, San Diego, USA, 2014.
- [33] SZEGEDY C, LIU Wei, JIA Yangqing, *et al.* Going deeper with convolutions[C]. The 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Boston, USA, 2015: 1–9. doi: [10.1109/CVPR.2015.7298594](https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594).

- [34] HE Kaiming, ZHANG Xiangyu, REN Shaoqing, *et al.* Deep residual learning for image recognition[C]. The 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Las Vegas, USA, 2016: 770–778. doi: [10.1109/CVPR.2016.90](https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90).
- [35] 雷禹, 冷祥光, 周晓艳, 等. 基于改进Res Net网络的复数SAR图像舰船目标识别方法[J/OL]. 系统工程与电子技术: 1–11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20220225.0948.018.html>, 2022.
- [36] VAN DER MAATEN L and HINTON G. Visualizing data using t-SNE[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2008, 9(86): 2579–2605.

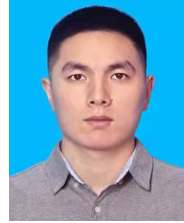
### 作者简介



雷禹(1997–), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 国防科技大学电子科学学院硕士研究生。主要研究方向为智能电子对抗与评估、SAR图像目标智能解译。



冷祥光(1991–), 男, 江西九江人, 博士, 国防科技大学电子科学学院副教授, 硕士生导师。主要研究方向为遥感信息处理、SAR图像智能解译和机器学习。



孙忠镇(1996–), 男, 江西上饶人, 国防科技大学电子科学学院硕士研究生。主要研究方向为智能电子对抗与评估、SAR图像目标识别。



计科峰(1974–), 男, 陕西长武人, 博士, 国防科技大学电子科学学院教授, 博士生导师。主要研究方向为SAR图像解译、目标检测与识别、特征提取、SAR和AIS匹配。

(责任编辑: 于青)