

# Sentinel-1 双极化数据舰船目标几何特性提取

李博颖, 柳彬, 郭炜炜, 张增辉, 郁文贤

上海交通大学智能探测与识别上海市重点实验室, 上海 200240

**摘要** 舰船目标几何特性提取是合成孔径雷达(SAR)图像海上目标检测识别的重要基础。在具有几何真值样本的基础上,通过参数寻优和拟合回归,能够提高几何特性提取的精度,这在TerraSAR-X数据上已有研究。本文考虑Sentinel-1大部分情况下均能提供双极化数据这一特点,探索双极化信息能否进一步提升几何特性提取的精度。基于OpenSARShip测试库,首先使用二维滤波进行图像处理,该图像处理过程中的关键参数使用交叉熵方法进行寻优,在大样本基础上,得到最优参数;之后,在目标几何特性的图像处理提取结果上,综合传感器、环境、目标3方面信息,特别是融合双极化信息,使用多元线性回归模型进行拟合,得到比仅用单极化信息更高的几何特性提取精度,证实了双极化信息的可用性。

**关键词** 合成孔径雷达(SAR);Sentinel-1;OpenSARShip;舰船目标;几何特性提取;双极化

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)由于其全天候、全天时、具有一定的穿透能力等诸多优势,广泛应用于地球遥感、海洋环境监测、海上目标探测识别等诸多方面。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的Sentinel-1是装载有C波段SAR的卫星系统,由于Sentinel-1数据具有覆盖范围广、公开数据量大、大幅宽、中高分辨率等独特优势,使其成为目前海洋监测、海冰监测、海洋目标检测识别、突发情况监控、人道主义救援的重要数据源<sup>[1-7]</sup>。

一般来说,在SAR图像中,平静海面表现为低后向散射强度<sup>[8]</sup>,而金属目标表现为高后向散射强度,体现了目标的几何结构、表面材质、粗糙度等许多重要信息。然而,由于SAR系统特殊的成像机制,容易受到多种因素影响,使成像质量下降,造成SAR图像上舰船目标的模糊、拉伸、压缩、平移等,给精确的目标解译、包括几何特性反演带来困难。

目标几何特性提取需要克服和抑制上述问题,精确地提取结果是目标解译的重要基础,因此该方面问题受到国内外学者的关注。为进行精确的几何特性提取,一般需进行以下3步:1)二值化;2)目标的精细化图像处理操作;3)高精度几何尺寸估计。第一步指在像素级将图像分为目标类和非目标类,相关研究通过针对特定环境下检测方法改进<sup>[9-12]</sup>或通过融合不同的目标检测方法<sup>[13]</sup>,在提高检测率降低虚警率的

同时,提高几何特性提取的准确性;后两步在二值结果上,通过图像处理和统计学进行高精度几何特性提取。图像处理方面,主要指目标边缘精细化处理操作,比如基于德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)的星载极化SAR系统TerraSAR-X和Sentinel-1数据集,剔除船体周围的异常值点等的形态学操作<sup>[14-15]</sup>,统计学方面,主要指结合散射特性信息等的相关统计学操作<sup>[14]</sup>。两方面共同作用,最终提高目标的几何提取精度。

虽然上述研究均取得了较好的结果,但仍然存在以下2个问题:1)缺乏具有几何真值的大数据支撑,导致方法的可扩展性不足,难以进行更为深入的研究探讨,得到更好提升结果。2)在几何特性提取方面,未充分考虑双极化信息,目前研究普遍将双极化通道信息区分处理,得到单个通道提取结果。因此,在大量具有几何真值Sentinel-1数据样本支持下,如何充分挖掘SAR图像中包含的目标信息,尤其是双极化信息,共同提升几何信息提取的精度,是本文探讨的主要问题。

针对上述不足和问题,本文基于Sentinel-1双极化大数据量的样本,采用参数寻优和拟合回归结合的方法,融合双极化通道信息,进行针对中分辨率SAR图像的目标高精度几何特性提取,证实了双极化信息的可用性。

收稿日期:2017-09-25;修回日期:2017-10-10

基金项目:国家自然科学基金重点项目(61331015)

作者简介:李博颖,博士研究生,研究方向为SAR图像解译,电子信箱:liboying.fhyt@sjtu.edu.cn;柳彬(通信作者),助理研究员,研究方向为SAR图像解译,电子信箱:liubin22810@gmail.com

引用格式:李博颖,柳彬,郭炜炜,等. Sentinel-1双极化数据舰船目标几何特性提取[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 94-101; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.20.010

### 1 SAR 极化研究现状

海洋目标在不同极化方式电磁波下具有不同的散射特性,传统 SAR 系统仅能在特定极化方式天线发射、接收电磁波,从而丢失了雷达回波中包含的极化信息。极化合成孔径雷达 (polarimetric synthetic aperture radar, PolSAR) 的出现克服了这类缺陷,PolSAR 一般指全极化 SAR 系统和双极化 SAR 系统。如图 1 所示,极化 SAR 系统经历了由机载 SAR 极化系统到星载 SAR 极化系统的发展阶段。



图 1 极化 SAR 雷达发展

Fig. 1 Development of polarimetric SAR radar

极化 SAR 系统的发展始于 20 世纪 80 年代。1985 年,美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 喷气推进实验室成功研制了世界第 1 台机载 L 波段 PolSAR 系统 AIRSAR,标志着极化 SAR 系统进入实用阶段,AIRSAR 系统对于极化数据的成功获取加速了极化 SAR 系统的研制和相关理论的发展。之后,加拿大、法国、日本、德国相关机构相继推出了自己研制的机载极化 SAR 系统。随着机载 SAR 系统日益成熟,20 世纪 90 年代后,极化 SAR 系统开始装载在航天飞机平台上。NASA 和 DLR 合作研制成功搭载在航天飞机的成像雷达 SIR-C/X-SAR 系统,为 L、C 双频全极化 SAR 系统。SIR-C/X-SAR 系统的成功促进了星载 SAR 极化系统的飞速发展,ESA、DLR、加拿大等国家和机构也相继成功发射星载极化系统。如今 SAR 系统中,双/全极化已经成为一种固有的模式存在,并且新型的极化系统模式也正在研制中。众多极化 SAR 系统中,哨兵 1 号 (Sentinel-1) 卫星是欧洲航天局哥白尼计划 (global monitoring for environment and security, GMES) 中的地球观测卫星系统,由 2 颗卫星组成,载有 C 波段合成孔径雷达,可提供单/双极化 SAR 图像数据,具有覆盖范围广、可全天候/全天时成像的优点。极化 SAR 系统广泛应用于山脉、农作物、森林、城市、海洋等环境目标监督,并发展出日益成熟的极化 SAR 理论体系。

由于舰船目标具有特殊的角反射结构效应,因此在 SAR 图像上,目标与平静海面背景之间具有较强的对比度,基于此进行海洋目标的检测识别。在极化 SAR 图像中,目标与海洋间的信息差异体现在极化散射信息的差异,对于不同极化通道信息的提取融合可以提高海洋目标检测识别的效果。目前,极化 SAR 数据下海洋目标检测识别从以下 3 个思路展

开:1) 决策级的结果融合,即对各个通道 SAR 图像分别进行处理,之后融合相关结果。2) 像素级的图像信息融合,即首先融合各个通道 SAR 数据的幅度、相位等信息,再进行信息提取。3) 从极化分解的参数空间上进行相关信息的提取融合。第 1 种思路指导下,相关研究通过采取一些融合规则改善检测性能,如利用各通道的杂波和目标统计特性的极化高斯广义似然比检测器<sup>[16]</sup> (polarimetric Gaussian generalized likelihood ratio test detector, PG-GLRT) 等。第 2 种思路包括一些基于单通道 SAR 图像方法的扩展算法,如最优目标检测器<sup>[17]</sup> (optimal polarimetric detector, OPD),极化白化滤波检测器<sup>[18]</sup> (polarimetric whitening filter, PMF),SPAN 检测算法等。第 3 种思路指导下,通过对极化散射矩阵的使用,相关研究<sup>[19]</sup> 从相干目标分解或非相干目标分解的角度展开,使得海杂波和舰船目标散射特性具有明确的物理解释。近年来,众多新方法的产生促进了极化信息的利用,如采用模型分解方法<sup>[20]</sup> 提取全极化数据信息,基于海平面和金属目标对极化波相异的反射对称性来进行双极化信息提取<sup>[21-22]</sup>。

舰船目标特征提取广泛应用于 SAR 海洋目标识别中。舰船目标提取的特征主要包括以下几类<sup>[23]</sup>:几何形状信息、强度信息、纹理信息、Hu 不变矩特征信息、基于 RCS 的散射特征信息。相关研究表明<sup>[24]</sup>,上述各类特征中,几何形状特征和散射特征信息对于目标认知具有重要意义。而近年来,机器学习、深度学习网络的出现促进了 SAR 领域里目标特征信息的提取与目标检测识别<sup>[25]</sup>。本文探索的核心问题为双极化信息对于几何特性提取的贡献。

### 2 海洋目标几何特性提取方法

本文方法整体流程如图 2 所示,主要包括 2 个步骤:1) 基于 SAR 图像操作处理的初步几何特性提取。2) 加入双极化通道融合信息的拟合回归。其中,图像操作处理中的关键参数,如图 2 中步骤下方矩形框所示,均基于大样本支持,使用交叉熵进行参数寻优。拟合回归步骤中,结合提取得到的双极化融合信息,使用多元线性回归,进一步调整舰船长宽初步估计值,最终得到更高精度几何特性提取结果。

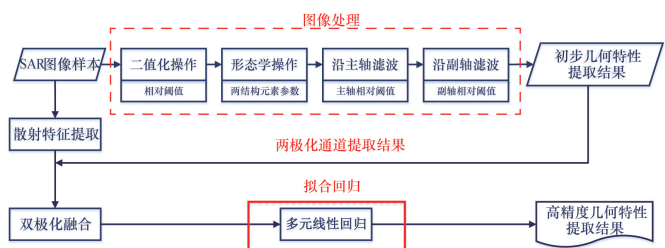


图 2 总流程

Fig. 2 Flow chart of whole process

#### 2.1 影响几何特性提取的主要因素

由于诸多因素会对几何提取产生影响,因此这里首先分析各类因素对于 SAR 图像几何特性提取的影响,作为相关基

础,进行后续实验设计。

由于SAR图像特殊的成像机制,对于SAR图像的影响因素分析主要从以下3个方面展开。

### 2.1.1 SAR系统

1) SAR图像产品。SAR系统的众多关键因素,包括分辨率、极化方式、雷达波段等均对海洋目标相关分析具有重要影响,而视数、SAR图像处理方法、旁瓣等也有一定影响。同时,由于散射体运动和SAR系统的斜视成像的几何物理关系,SAR图像产生了一些特殊的现象,例如相干斑、方位向模糊、多普勒位移、雷达阴影等。对于Sentinel-1的星载SAR数据来说,卫星的轨道高度及轨道倾角等参数同样会对几何特性提取产生影响。SAR系统的影响因素广泛,这里只对影响SAR图像海洋目标几何特性提取的重要因素分析,并对其影响效果进行一定预测。

分辨率影响和制约着SAR图像解译效果。散射体可被看作是1组独立理想点目标的集合<sup>[26]</sup>。本实验所使用样本数据集分辨率为20 m×22 m(距离向×方位向),一个分辨率单元中包含有多个散射体的后向散射信息,制约了海洋目标几何特性提取效果的提升。

将聚焦后的原始SAR图像进行多视处理,并投影到地距上,以损失分辨率为代价,得到GRD(ground range detected)数据产品。在上述过程中,某些操作,例如过采样等,会使得图像上产生一些本不存在的点,从而造成虚警、模糊舰船边缘,给几何特性精确提取带来影响。

2) 极化信息。实验使用Sentinel-1 IW模式下的双极化SAR图像,数据由VH和VV这2个极化通道组成,表示发射端发射垂直(vertical)线性极化电磁波,而接收端接收水平(horizontal)和垂直(vertical)2种线性极化电磁波,分别得到VH和VV两种极化通道图像。

海洋目标在不同的极化通道中表现为不同的后向散射强度分布,反映了不同的散射特性信息,极化信息的相关研究受到研究者的广泛关注,例如:(1) VH通道<sup>[27]</sup>对于体散射有更好的表现。(2) VV通道往往具有更高的信噪比(clutter-to-noise ratio, CNR)<sup>[28]</sup>,更适于海洋目标检测。(3) 运动目标在两极化通道中的反应也不尽相同。而针对海洋目标检测的实验表明,在不同入射角情况下<sup>[29]</sup>,不同极化通道具有不同的效果:(1) 相较于VV通道,VH通道较少地受到海洋环境影响。(2) 雷达入射角越大,海洋海杂波水平越低,而舰船后向散射变化相对较小,检测效果变好。(3) 这种入射角的变化对于VH极化通道影响变化相对较小。基于上述相关研究分析可知,不同情况环境下,两极化通道信息可以互为补充,充分利用挖掘融合两极化通道信息优势,可以较好地提升目标几何特性提取效果。

3) 旁瓣影响。SAR系统的成像处理操作使得雷达图像的回波函数为2-D Sinc函数<sup>[30]</sup>,带来以下影响:(1) 对于散射体本身,其能量会以散射点本身为中心逸散到周围区域,造成中心点亮度下降、空间分辨率降低。(2) 对于点状散射体周

围区域,来自中心强散射点的后向散射可能遮挡该区域自身后向散射。上述情况在SAR图像上即表现为十字亮斑,对几何特性的精确提取带来影响。

### 2.1.2 海洋环境

特殊的海洋气候环境能反映在SAR图像上,复杂多变的海洋环境对目标解译具有重要影响。国内外学者开展了针对各种复杂海洋环境下的目标检测研究<sup>[10-12]</sup>。在Sentinel-1图像产品中,环境方面的影响主要表现为以下3个方面:1) SAR图像上的环境统计分布会潜在影响几何特性提取结果<sup>[13]</sup>。2) 考虑到船体周围海面与船体接触部分所形成的特殊结构,雷达回波在该区域容易造成多次散射,给SAR图像的船体边缘造成模糊。3) 海洋环境的动态变化,例如海浪等,会为海洋目标带来额外的运动,从而对SAR图像造成影响。

### 2.1.3 海上目标

SAR图像上舰船目标是真实世界中舰船目标结构的反应,为探究相关映射关系,研究者开展了众多仿真和真实数据实验<sup>[10,31-33]</sup>。考虑到本数据集的分辨率等的制约,一般来说,船体结构主要产生以下散射机制:金属二面角会带来偶次散射,例如船体建筑拐角区域等;船体甲板等粗糙表面,造成以体散射为主的随机散射;船体与海面接触部分的多次散射同样不可忽视,可能会对精确的边缘提取造成困难。

船体自身和海浪影响可能使船体具有六自由度运动(沿三轴的平移运动和沿三轴的转动运动)。这种运动同样会对雷达图像造成影响,Chen等<sup>[10]</sup>通过建立六自由度运动目标模型,进行了深入分析。平移运动和旋转运动的组合会使SAR图像产生多普勒平移和方位向模糊(散焦)的现象,在SAR图像上最终造成船体影像的压缩、拉伸、平移、剪切等,对解译造成困难。

## 2.2 图像处理操作

众多因素会对舰船几何特性提取带来不利影响,而相关的图像处理操作方法,可以抑制不利因素影响,剔除船体周围异常值点,得到尽量准确的船体边缘轮廓,从而得到其几何尺寸初步提取结果。实验图像处理操作主要包括2个步骤:1) 二值化操作;2) 以二维滤波操作为主的处理方法。

上述图像处理操作方法中包含5个常数参数,对于船体几何边缘的精细提取至关重要,因此,选择交叉熵法<sup>[34-35]</sup>进行参数寻优。该方法是一种基于蒙特卡洛法的机器学习方法,可以充分利用大量数据样本带来的优势,得到局部最优的参数结果,从而改善图像处理操作效果。

### 2.2.1 二值化操作

二值化操作分为2步:SAR图像预处理和阈值计算。考虑到切片统计分布会很大程度上受到目标区域统计特性分布的影响,而本数据集包含多种类型舰船样本,切片统计分布不尽相同,因此本文首先使用对数变换对SAR图像进行预处理,展宽低数值区间,压缩高数值区间,使得整个数据集得到相对统一的统计分布,方便进行后续二值化处理操作。阈值计算及二值化步骤如下:

$$I_{th} = \rho_{th}(I_{max} - I_{min}) \quad (1)$$

$$I_{mask}(x,y) = \begin{cases} 1 & I(x,y) \geq I_{th} \\ 0 & I(x,y) < I_{th} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)中,  $I_{th}$  为针对各个样本切片得到二值化阈值;  $\rho_{th}$  为相对阈值, 是一个常量, 需要使用交叉熵进行参数寻优;  $I_{max}$  和  $I_{min}$  为单个样本所有像素中的最大值和最小值。

式(2)中,  $I_{mask}(x,y)$  为最终得到的二值化图像结果,  $I(x,y)$  代表位于  $(x,y)$  处的像素值。

### 2.2.2 二维度滤波操作

为了消除初步二值化结果中船体周围的异常值点, 得到尽量精确的船体边缘信息, 需要二维度滤波为主的处理方法。该操作主要包括2步: 1) 沿方位向和距离向腐蚀膨胀的形态学操作, 以消除十字亮斑的影响, 其两个方向的结构元素大小为2个关键参数, 需要进行参数寻优。2) 沿主轴方向和副轴方向的二维度滤波处理, 主轴方向指船首至船尾的连线方向, 即船长维度; 副轴方向指船左右舷间的连线方向, 即船宽维度, 其2个维度下的相对阈值为两个关键参数, 需要进行参数寻优。

在二维度滤波处理中, 使用平行于2个维度(主轴方向和副轴方向)的线模板擦除该方向上的噪声像素点。以主轴方向为例, 提取平行主轴方向、且位于二值图像船体区域中的直线, 得到的长度以  $L_{line}$  表示。若  $L_{line} < \rho_{len} L_{bs}$ , 则认为该直线上的像素点为噪声点, 进行擦除, 遍历整个图像, 为一次滤波处理。副轴方向同理, 判决准则为:  $L_{line} < \rho_{wid} L_{ps}$ 。其中,  $\rho_{len}$  和  $\rho_{wid}$  分别为应用于主轴方向和副轴方向的2个相对阈值常数, 需要进行交叉熵参数寻优;  $L_{bs}$  和  $L_{ps}$  则指提取得到的主轴长度和副轴长度。

### 2.3 双极化融合的散射特征提取

不同的极化通道包含不同的极化信息, 但都表示真实世界中同一目标。因此, 针对同一样本, 融合两极化通道信息, 有助于更好地进行船体几何尺寸提取。这里介绍 SAR 图像中的相关散射特征提取, 以及进行双极化通道融合的相关方法。

散射特性一般使用归一化雷达横向截面积(normalized radar cross section, NRCS)代表, 首先提取样本的散射特性信息。之后, 将两极化通道提取得到的信息进行融合得到多元线性回归模型的输入信息, 双极化融合后的输入信息更加丰富, 对于几何特性的高精度提取具有重要作用。

本项研究所提取的散射特性信息主要为以下3个方面。

1) 海洋环境。包括环境区域像素的 NRCS 均值( $\mu_{env}$ )、NRCS 标准差( $\sigma_{env}$ )、NRCS 最大值( $M_{env}$ )。

2) 边缘信息。包括目标边缘区域像素的 NRCS 均值( $\mu_{edge}$ )、NRCS 标准差( $\sigma_{edge}$ )及 NRCS 最大值( $M_{edge}$ )。

3) 目标主体信息。包括以下3项信息。

(1) 主轴峰值信息。提取船体主轴上峰值像素点个数( $N_{center}$ )、NRCS 均值( $\mu_{center}$ )、NRCS 标准差( $\sigma_{center}$ )、NRCS 最大值

( $M_{center}$ )。

(2) 主轴信息。提取船体主轴, 即船头-船尾轴线像素点 NRCS 均值( $\mu_{axis}$ )、NRCS 标准差( $\sigma_{axis}$ )、NRCS 最大值( $M_{axis}$ )。

主轴分为船首、船中、船尾3部分, 提取各部分 NRCS 均值( $\mu_{BowAxis}$ 、 $\mu_{MiddleAxis}$ 、 $\mu_{SternAxis}$ )。

(3) 船体目标面信息。提取船体目标上的 NRCS 均值( $\mu_{Tar}$ )、NRCS 标准差( $\sigma_{Tar}$ )、NRCS 和( $S_{Tar}$ )。

将船体目标分为船首、船中、船尾3部分, 提取各部分 NRCS 均值( $\mu_{Bow}$ 、 $\mu_{Middle}$ 、 $\mu_{Stern}$ )、NRCS 标准差( $\sigma_{Bow}$ 、 $\sigma_{Middle}$ 、 $\sigma_{Stern}$ )、NRCS 和( $S_{Bow}$ 、 $S_{Middle}$ 、 $S_{Stern}$ )。

### 2.4 多元线性回归模型

在初步几何提取结果上, 本实验结合所提取的双极化散射特性信息, 使用多元线性回归模型进行拟合回归, 得到更加准确的几何特性提取结果, 如

$$\begin{aligned} L_{True} &= \beta_{len} X \\ W_{True} &= \beta_{wid} X \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{VH/VV} = & (\hat{L}, \hat{W}, \hat{H}_{cos}, \theta_{cos}, \mu_{env}, \sigma_{env}, M_{env}, \mu_{edge}, \sigma_{edge}, M_{edge}, \\ & N_{center}, \mu_{center}, \sigma_{center}, M_{center}, \mu_{axis}, \sigma_{axis}, M_{axis}, \\ & \mu_{BowAxis}, \mu_{MiddleAxis}, \mu_{SternAxis}, \mu_{Tar}, \sigma_{Tar}, S_{Tar}, \\ & \mu_{Bow}, \mu_{Middle}, \mu_{Stern}, \sigma_{Bow}, \sigma_{Middle}, \sigma_{Stern}, S_{Bow}, S_{Middle}, S_{Stern})_{VH/VV} \end{aligned} \quad (3)$$

$$X = (X_{VH}, X_{VV})$$

其中,  $L_{True}$  和  $W_{True}$  分别表示各样本的真实船长和船宽;  $X$  为第2.3节所介绍的提取得到的双极化信息融合矩阵, 按先 VH 通道、后 VV 通道放置数据;  $\hat{L}$ ,  $\hat{W}$ ,  $\hat{H}_{cos}$  为图像处理后提取得到的目标长度、宽度、朝向余弦值提取结果;  $\theta_{cos}$  为入射角余弦值;  $\beta_{len}$  和  $\beta_{wid}$  为线性回归模型中的系数。

## 3 实验与分析

### 3.1 数据集介绍

本实验使用的样本数据集为 Sentinel-1 IW 模式下 GRD 产品(ground range detected), 分辨率为 20 m×22 m(距离向×方位向)。像元大小为 10 m×10 m(距离向×方位向), 数据集包含 1850 个舰船样本, 样本几何真值由 AIS(automatic identification system)信息提供。船长覆盖范围 92~399 m, 船宽覆盖范围为 6~65 m。该数据集选自于 OpenSARShip 样本库<sup>[36]</sup>, 图3为一个双极化样本切片数据展示, 为了展示效果, 增加该目标的光学图像作为对比。

### 3.2 初步几何特性结果

基于参数优化后的图像处理操作方法, 即基于 SAR 原始图像基础上, 进行二值化操作和基于二值化结果的图像处理操作(图4)。几何特性初步提取结果如下。

表1为 VH、VV 极化通道和双极化通道船长船宽估计值的平均相对误差、绝对误差。图5为 1850 个样本切片的船长船宽提取结果散点图。其中, 黑色直线代表测量值等于几何真值情况, 红色散点代表船长提取结果, 蓝色散点代表船宽提取结果,  $r$  代表相关系数, 代表测量结果与其真实值之间的



图3 双极化样本展示

Fig. 3 Example of one dual-polarization ship target sample

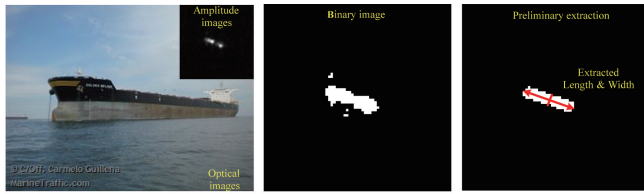


图4 图像处理操作及样例展示

Fig. 4 Example of image processing and the extracted geometric parameters

线性相关性,当 $|r|$ 越接近1,则相关性越大。

分析初步几何提取结果的图表可发现:船长提取结果中,两极化通道相对误差均小于9%,平均相对误差小于8%、绝对误差小于15 m;船宽提取结果中,平均相对误差在35%左右,绝对误差小于11 m。

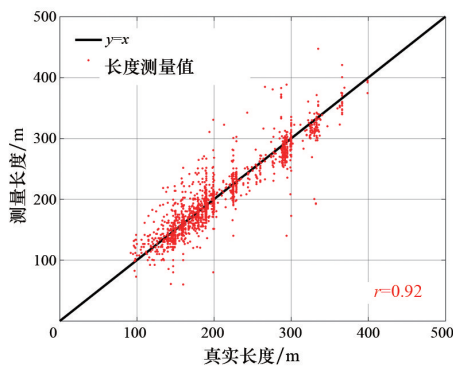
船宽和船长提取结果的绝对误差相差不大,但相对误差相差较大,船长结果远好于船宽结果,这在图5的散点图中表现较为明显,比较相关系数 $|r|$ ,船长测量值与真实值之间的相关性远大于船宽测量的相关性。

考虑到由于分辨率限制,船体自身几何结构的情况,SAR图像中船宽测量存在较大的不确定性,已有研究<sup>[14-15]</sup>也证明这点。在几何特性初步提取结果中,船长测量结果较好,船宽测量结果还需进一步在拟合回归中进行提升。

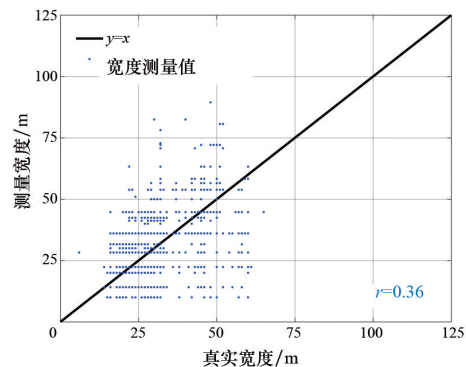
表1 初步舰船几何提取结果

Table 1 Preliminary geometric extraction results

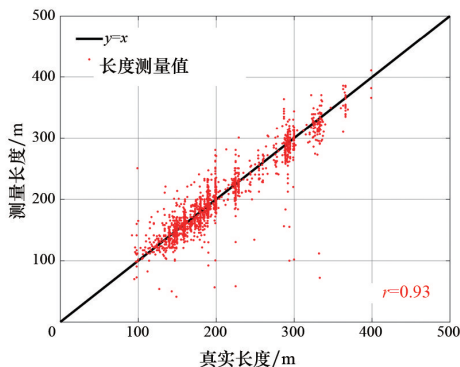
极化通道	船长误差		船宽误差	
	相对误差/%	绝对误差/m	相对误差/%	绝对误差/m
VH	8.13	15.63	32.43	9.77
VV	7.33	14.22	41.10	11.51
VH/VV平均	7.73	14.93	36.77	10.64



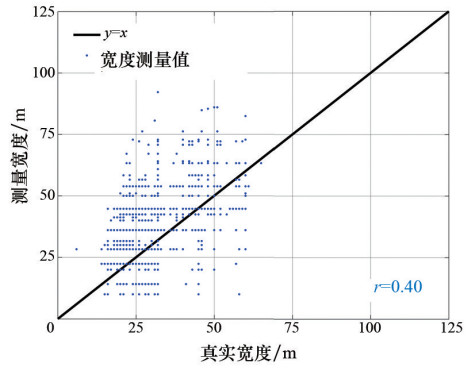
(a) VH通道船长初步提取结果



(b) VH通道船宽初步提取结果



(c) VV通道船长初步提取结果



(d) VV通道船宽初步提取结果

图5 初步几何提取结果

Fig. 5 Preliminary geometric extraction results

### 3.3 拟合回归结果

基于初步的几何特性提取结果,增加融合后的双极化散射特性信息及SAR系统重要参数,使用多元线性回归模型进行拟合。随机选取总样本集中的70%作为训练集,剩下的30%作为测试集。为了更好地展示合并双极化通道的效果,本研究组单独使用VH和VV极化通道样本进行多元线性拟合回归,作为对比实验。

实验结果如表2和图6所示。表2为双极化融合、单独VH和VV极化通道的船长船宽相对误差、绝对误差的拟合回归结果。图6为测试集样本的船长船宽提取散点图。其中,黑色直线代表测量值等于几何真值情况,红色散点代表船长提取结果,蓝色散点代表船宽提取结果,图6中的 $r$ 与图5中 $r$ 含义相同,均代表相关系数。

比较表1和表2、图5和图6,可以看到,在拟合回归之后,

几何特性提取结果有了较大的提升:普遍来说,船长误差下降约2%(3 m),船宽误差下降约28%(8 m)。船长相关系数增加约0.04,船宽相关系数增加约0.5,达到0.92,表明拟合回归后的船长船宽估计值与真实值之间有较高的相关性,几何尺寸提取较为准确。

表2 线性拟合回归结果

Table 2 Geometric estimation results obtained by using regression

极化通道	船长误差		船宽误差	
	相对误差/%	绝对误差/m	相对误差/%	绝对误差/m
VH/VV融合	5.78	11.02	8.54	2.68
VH	6.53	12.47	9.09	2.87
VV	6.84	12.84	9.47	2.87

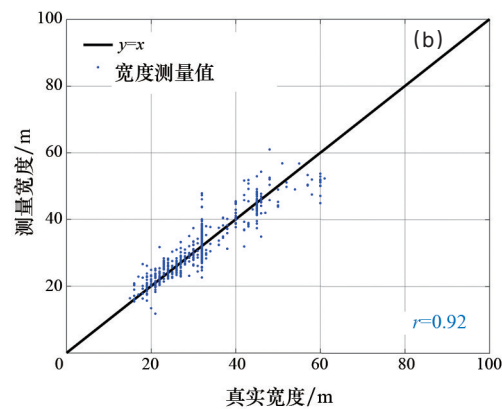
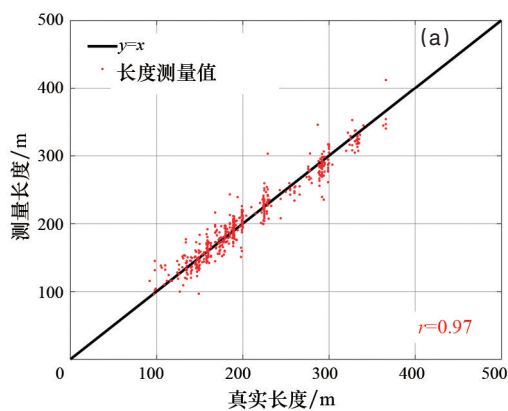


图6 多元线性拟合回归结果

Fig. 6 Size estimation results obtained by using linear regression

比较双极化融合与单独使用VH和VV极化通道结果,可以看到,船长船宽估计结果中,双极化融合后,相对误差均降低约1%,船长相对误差降至5%左右,船宽相对误差降至8%左右,而此时的船长绝对误差达到11 m左右,接近SAR图像的像元大小(10 m),船宽绝对误差达到3 m左右,远小于SAR图像像元大小。

上述结果表明,双极化融合后,舰船目标的几何特性提取精度有了进一步的提升,得到最终高精度的几何特性提取

结果。证实了融合双极化通道信息的有效性。

为了进一步对比分析,列举相关有代表性研究工作及其效果<sup>[13-15]</sup>(表3),这些研究在不同分辨率、极化模式下得到了不错的效果。

对比本文实验效果,可发现本研究组在更加巨大和多样的数据集上,通过双极化信息的提取和融合,获得了远优于相关研究的实验结果,证明了双极化信息融合的效果提升和大数据集样本的潜力。

表3 几何特性提取近期相关研究及效果

Table 3 Related latest researches and the results for geometric estimation

相关数据源	方法	效果	文献
使用127个Sentinel-1 IW单\双极化舰船样本	检测得到二值图后,使用数字形态学图像处理方法	船长平均相对/绝对误差:16%/30 m;船宽平均相对/绝对误差:37%/11 m Stripmap单极化:船长估计相关系数 $r=0.71$ ;船宽估计相关系数 $r=0.70$	[15]
TerraSAR-X ScanSAR Wide(151样本)、ScanSAR(97样本)、Stripmap Single-Pol(97样本)	检测得到二值图后,图像处理与回归拟合结合	ScanSAR单极化:船长估计相关系数 $r=0.76$ ;船宽估计相关系数 $r=0.66$ ScanSAR Wide单极化:船长估计相关系数 $r=0.67$ ;船宽估计相关系数 $r=0.77$	[14]
使用59个RADARSAT-2和COSMO-SkyMed舰船目标样本	检测得到二值图后,提取几何特性	船长估计 $r^2=0.5666$ 船宽估计 $r^2=0.4641$	[13]

#### 4 展望

随着极化 SAR 雷达系统的发展,极化 SAR 数据分辨率的提升、极化 SAR 系统新技术的应用发展,包括 Sentinel-1 在内的星载极化 SAR 系统为海洋目标检测、海洋环境监控等带来海量的数据源支持,未来必将发挥越来越重要的作用。

近年来,干涉极化、紧缩极化 SAR 等多种新的极化 SAR 系统接连被提出。其中,交轨干涉极化 SAR 的众多特点使其在海洋目标、海冰、海岛等结构的精细化提取和 3 维重建中具有很大应用前景。顺轨干涉极化 SAR 在海上目标和海流速度提取方面同样具有极大潜力。在上述极化 SAR 系统中,紧缩极化 SAR 系统是一个重要关注热点。全极化 SAR 具有可以完整描述入射波与散射波之间矢量关系的优点,然而该产品一般幅宽很窄,无法满足日益发展的应用研究需要,在此基础上,紧缩极化 SAR 系统的提出,可以减少数据量和提升 SAR 成像覆盖的幅宽,同时能在一定程度上保持全极化系统的极化能力。由于紧缩极化 SAR 系统具备双极化 SAR 和全极化 SAR 的优点,未来将在大范围海洋环境监控、海洋目标检测等方面发挥重要作用。在此基础上,如何设计性能出众的新体制极化 SAR 系统,是未来一个重要研究方向。

在未来,SAR 图像上舰船目标的特征提取不仅仅基于手动设计提取的传统方法,也可以通过机器学习、深度学习等相关研究技术的帮助,基于 SAR 图像自身潜在的某种规律,进行有效特征的自动提取。

针对极化 SAR 系统的检测识别相关研究已开展众多。但是针对于 Sentinel-1 数据源及其相似分辨率产品下,检测相关研究虽开展众多,而识别方法依然很少。在未来,如何克服分辨率的限制,充分挖掘极化 SAR 图像中的信息,发展针对中-低分辨率、大幅宽数据源下的高精度识别算法是一项十分重要的工作应用发展。

#### 5 结论

基于大样本下的具有真值 Sentinel-1 双极化数据源,基于参数寻优和拟合回归结合的方法,探索 Sentinel-1 数据的双极化融合信息,进行针对中分辨率 SAR 图像的目标高精度几何特性提取,实验结果显示,相较于仅使用单极化通道信息,双极化融合信息的使用,使得几何尺寸结果的估计有了较好的提升,证实了双极化信息的可用性,使得海洋目标的长宽提取误差均降至 6% 和 9% 以下。

未来工作,将利用 Sentinel-1 大样本数据,进一步分析各种因素对于几何特性反演的影响,并且考虑改进拟合模型、提升拟合效果。

#### 参考文献 (References)

[1] Torres R, Snoeij P, Geudtner D, et al. GMES Sentinel-1 mission[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 120: 9-24.  
[2] Malenovsky Z, Rott H, Cihlar J, et al. Sentinels for science: Potential of Sentinel-1,-2, and-3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 120: 91-

101.

[3] Imperatore P, Azar R, Calò F, et al. Effect of the vegetation fire on backscattering: An investigation based on Sentinel-1 observations[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2017, 10(10): 4478-4492.  
[4] Mouginot J, Rignot E, Scheuchl B, et al. Comprehensive annual ice sheet velocity mapping using Landsat-8, Sentinel-1, and RADARSAT-2 Data[J]. Remote Sensing, 2017, 9(4): 364.  
[5] Hornacek M, Wagner W, Sabel D, et al. Potential for high resolution systematic global surface soil moisture retrieval via change detection using Sentinel-1[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5(4): 1303-1311.  
[6] Lohberger S, Stangel M, Atwood E C, et al. Spatial evaluation of Indonesia's 2015 fire-affected area and estimated carbon emissions using Sentinel-1[J]. Global Change Biology, 2017, doi: 10.1111/gcb.13841.  
[7] Delgado-Aguilar M J, Fassnacht F E, Peralvo M, et al. Potential of TerraSAR-X and Sentinel 1 imagery to map deforested areas and derive degradation status in complex rain forests of Ecuador[J]. International Forestry Review, 2017, 19(1): 102-118.  
[8] Margarit M G. Marine applications of SAR polarimetry[M]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2007.  
[9] Messina M, Greco M, Fabbri L, et al. Modified Otsu's algorithm: A new computationally efficient ship detection algorithm for SAR images [C]//2012 Tyrrhenian Workshop on Advances in Radar and Remote Sensing (TyWRRS). Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 262-266.  
[10] Chen X, Guan J, Bao Z, et al. Detection and extraction of target with micromotion in spiky sea clutter via short-time fractional Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(2): 1002-1018.  
[11] 陈小龙, 关键, 何友. 微多普勒理论在海面目标检测中的应用及展望[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 123-134.  
Chen Xiaolong, Guan Jian, He You, et al. Applications and prospect of micro-motion theory in the detection of sea surface target[J]. Journal of Radars, 2013, 2(1): 123-134.  
[12] 陈小龙, 关键, 黄勇, 等. 雷达低可观测目标探测技术[J]. 科技导报, 2017, 35(11): 30-38.  
Chen Xiaolong, Guan Jian, Huang Yong, et al. Radar low-observable target detection[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(11): 30-38.  
[13] Stasolla M, Mallorqui J J, Margarit G, et al. A comparative study of operational vessel detectors for maritime surveillance using satellite-borne synthetic aperture radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(6): 2687-2701.  
[14] Tings B, Bentes da Silva C A, Lehner S. Dynamically adapted ship parameter estimation using TerraSAR-X images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(9): 1990-2015.  
[15] Stasolla M, Greidanus H. The exploitation of Sentinel-1 images for vessel size estimation[J]. Remote Sensing Letters, 2016, 7(12): 1219-1228.  
[16] Sciotti M, Pastina D, Lombardo P. Polarimetric detectors of extended targets for ship detection in SAR images[C]//2001 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS). Piscataway, NJ: IEEE, 2001, 7: 3132-3134.  
[17] Novak L M, Burl M C. Studies of target detection algorithms that use Polarimetric radar data[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1989, 25(2): 150-165.

- [18] Novak L M, Burl M C. Optimal speckle reduction in POL-SAR imagery and its effect on target detection[C]//1989 Orlando Symposium. Orlando: International Society for Optics and Photonics. New York: SPIE, 1989: 84-115.
- [19] Cloude S R, Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(2): 498-518.
- [20] Sugimoto M, Ouchi K, Nakamura Y. On the novel use of model-based decomposition in SAR polarimetry for target detection on the sea[J]. Remote sensing letters, 2013, 4(9): 843-852.
- [21] Nunziata F, Migliaccio M, Brown C E. Reflection symmetry for polarimetric observation of man-made metallic targets at sea[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2012, 37(3): 384-394.
- [22] Velloto D, Nunziata F, Migliaccio M, et al. Dual-polarimetric TerraSAR-X SAR data for target at sea observation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(5): 1114-1118.
- [23] Chen W, Ji K, Xing X, et al. Ship recognition in high resolution SAR imagery based on feature selection[C]//Computer Vision in Remote Sensing (CVRS), 2012 International Conference on. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 301-305.
- [24] Wang C, Zhang H, Wu F, et al. A novel hierarchical ship classifier for COSMO-SkyMed SAR data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(2): 484-488.
- [25] Kang M, Leng X, Lin Z, et al. A modified faster R-CNN based on CFAR algorithm for SAR ship detection[C]//2017 International Workshop on Remote Sensing with Intelligent Processing (RSIP). Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1-4.
- [26] Xu F, Jin Y Q, Moreira A. A preliminary study on SAR advanced information retrieval and scene reconstruction[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(10): 1443-1447.
- [27] Velloto D, Bentes C, Tings B, et al. Comparison of Sentinel-1 and TerraSAR-X for ship detection[C]//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 3282-3285.
- [28] Vachon P W, Wolfe J. GMES Sentinel-1 analysis of marine applications potential(AMAP)[R/OL]. [2017-08-31]. <http://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc79/p530368.pdf>.
- [29] Olsen R B, Wahl T. The role of wide swath SAR in high-latitude coastal management[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2000, 21(1): 136-140.
- [30] Smith B H. An analytic nonlinear approach to sidelobe reduction[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(8): 1162-1168.
- [31] Liu P, Jin Y Q. A study of ship rotation effects on SAR image[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(6): 3132-3144.
- [32] Margarit G, Mallorqui J J, Fortuny-Guasch J, et al. 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.
- [33] Margarit G, Mallorqui J J, Fortuny-Guasch J, et al. Phenomenological vessel scattering study based on simulated inverse SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(4): 1212-1223.
- [34] Wang E, Kurniawati H, Kroese D P. CEMAB: A Cross-Entropy-based method for large-scale multi-armed bandits[C]//Australasian Conference on Artificial Life and Computational Intelligence. Australasian: Springer International Publishing, 2017: 353-365.
- [35] Kroese D P, Rubinstein R Y, Cohen I, et al. Cross-entropy method [M]//Encyclopedia of Operations Research and Management Science. New York: Springer, 2013: 326-333.
- [36] Huang L, Liu B, Li B, et al. OpenSARShip: A dataset dedicated to Sentinel-1 ship interpretation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, in press.

## Ship geometric parameter extraction for Sentinel-1 dual-polarization products

LI Boying, LIU Bin, GUO Weiwei, ZHANG Zenghui, YU Wenxian

Shanghai Key Laboratory of Intelligent Sensing and Recognition, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** The ship geometric parameter extraction is an essential basis for the marine target detection and classification for the Synthetic Aperture Radar(SAR) images. With the assistance of the ground true value sample of the marine target size, the improvement of the geometric dimension extraction can be achieved by the parameter optimization and regression, as verified in TerraSAR-X datasets. Taking into consideration of the typical characteristics of the dual-polarization for the sentinel-1 products, this paper explores the usefulness of the dual-polarization fusion information. Based on the OpenSARShip, firstly we utilize a two-dimensional filter method for image processing. The parameters in the image processing are optimized by a cross-entropy method based on the large dataset. Next, with the preliminary extraction results, we combine the information from the sensors, the environment and the target, and especially the information from the dual-polarization. We employ a multiple linear regression model to obtain the precise physical dimensions. The size extraction performance by the dual-polarization fusion information is much better than merely using the single-polarization information, which proves the usefulness of the dual polarization information.

**Keywords** Synthetic Aperture Radar(SAR); Sentinel-1; OpenSARShip; marine target; geometric parameter extraction; dual-polarization

(编辑 王志敏)