

基于双阶段特征匹配的非同源 SAR 船只跟踪方法

王 炎^{1,2}, 张 晰², 孟俊敏², 刘根旺², 包 萌², 曹成会²

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;

2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要:开展星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)船只匹配跟踪研究是海上船只监测的重要内容,对提升海上目标监测管控能力有重要意义。当前利用 SAR 卫星进行船只目标匹配跟踪时,由于船只目标尺寸小且船只目标的运动会在 SAR 图像中产生几何畸变,导致船只目标在 SAR 图像中难以准确实现匹配跟踪。基于此,本文提出了基于全局和局部双阶段特征匹配的 SAR 船只目标匹配跟踪方法,该方法能够实现 TerraSAR-X 和 RadarSat-2 等不同波段、不同平台(非同源)SAR 图像的船只目标匹配跟踪。为验证本文算法的性能,采用了 2 对 TerraSAR-X 和 RadarSat-2 SAR 数据将本文提出的方法与 SURF(Speeded Up Robust Features)、Harris 和 PCA-SIFT(Principal Component Analysis-Scale Invariant Feature Transform)等经典船只目标匹配跟踪算法进行了对比。实验结果表明,本文提出的基于全局和局部双阶段特征匹配船只目标匹配跟踪方法,对运动船只的跟踪性能可达 83%,而 SURF、Harris 和 PCA-SIFT 算法精度仅为 36.2%、27.7% 和 23.4%,可见本文算法高于这些经典船只目标匹配跟踪算法。本文还分析了船只目标的运动在非同源 SAR 图像中的几何特征(周长、面积、长宽比等)差异,以及船只目标匹配跟踪算法在非同源 SAR 中的适用性评估,结果表明,本文方法在船只几何特征形变较大时,也能很好地实现船只目标匹配跟踪。

关键词:SAR; 船只跟踪; 特征匹配; 多层次特征

中图分类号:TN957.52

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2022)01-0048-13

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2022.01.005

引用格式:王炎, 张晰, 孟俊敏, 等. 基于双阶段特征匹配的非同源 SAR 船只跟踪方法[J]. 海岸工程, 2022, 41(1): 48-60. WANG Y, ZHANG X, MEGN J M, et al. Non-homologous SAR ship matching and tracking method based on two-stage feature matching[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(1): 48-60.

星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)相比于其他光学、红外等传感器具有不受光照和云雾影响及可全天时、全天候工作的优势,是海上船只目标监测的重要手段,已被广泛应用于船只目标的检测和分类识别^[1-5]。除船只目标的检测与识别之外,船只目标的跟踪也是海上船只目标监测的重要内容,对维护海上交通安全、提升海上维权执法的预警能力等具有重要意义^[6]。

近年来,随着星载 SAR 的快速发展, TerraSAR-X、COSMOS-SkyMed、RadarSat-2、Sentinel-1 和 GaoFen-3 等多颗卫星已能够提供高分辨率、多时相的 SAR 数据^[7],例如意大利的 COSMO-SkyMed 系统,由 4 个 SAR 卫星构成星座,可在一天内对固定区域进行 8 次快速重访^[8],从而使得海上船只目标跟踪逐渐成为可能。

SAR 船只利用多时相 SAR 影像获取船只目标位置信息,再对船只目标的特征进行提取与匹配,来实现船只目标跟踪。这其中的关键是目标特征的提取与匹配。当前 SAR 图像特征匹配主要有全局特征匹配和

收稿日期:2021-06-02

资助项目:国家重点研发计划项目——XXX 船技术系统(2017YFCXXX204);国家自然科学基金项目——旋翼无人机雷达船只目标虚拟多站三维成像与类型识别(61971455)和低空远距离条件下海态与目标一体化雷达探测理论与方法(U2006207)

作者简介:王 炎(1997—),男,硕士研究生,主要从事海洋微波遥感方面研究. E-mail: wang_yan0714@yeah.net

(王 燕 编辑)

局部特征匹配两类方法。其中,全局特征匹配法通过提取目标的纹理和形状等宏观特征量,并结合特征的相似度度量技术实现同名目标的匹配^[9-11],如:李绮雪等^[12]利用 Hu 不变矩形状特征,结合最小欧氏距离测度和余弦相似度实现光学与 SAR 影像村庄目标的匹配;黄勇等^[13]对区域边缘检测和轮廓特征提取,并利用图像区域不变矩来实现 SAR 影像香港地区的图像匹配。局部特征匹配法通过衡量目标的内部特征点间主方向和梯度关系等细节特征的相似度来实现匹配,典型方法包括 SIFT(Scale Invariant Feature Transform)、SURF(Speeded Up Robust Features)和 ORB(Oriented FAST and Rotated BRIEF)^[14-16]。这类算法具有目标旋转、尺度缩放不变性的优势,能够较好地适应复杂场景的匹配。如:雷禹和何家峰^[17]提出了融合恒虚警率(Constant False-Alarm Rate, CFAR)和 SURF 联合的 SAR 图像目标匹配算法;黎懿等^[18]利用多源 SAR 影像之间的空间信息实现了基于 SIFT 目标特征点的匹配;阴俊恺等^[19]联合光学以及 SAR 图像使用 Harris 与 SIFT 算法提取待匹配图像,并通过神经网络计算图像间的特征向量匹配程度,从而实现目标的匹配。

以往关于 SAR 目标匹配的研究均是针对建筑物等大型静止目标开展的。然而,船只目标有别于陆地建筑物,其尺寸小且处于运动状态,所以匹配难度远大于陆地目标。近年来,国内外学者开始关注船只等运动目标的匹配跟踪,特别关注船只目标 SAR 匹配跟踪方法,例如:陈建宏等^[20]利用多尺度 Harris 算子提取船只目标的特征点,并结合归一化相关系数度量来实现机载 PicoSAR 图像与仿真 SAR 图像的船只匹配。Li 等^[21]在遥感数据中从船只中提取特征向量并利用主成分分析方法降低特征向量的维数,然后再采用最近邻算法进行特征点匹配。顾丹丹和许小剑^[22]将 TerraSAR-X 船只 SAR 图像逆投影至三维目标空间,再提取目标空间逆投影散射图以表征船只目标强散射源的三维分布,进而实现船只目标匹配。此外,Niu 和 Lang^[23]采用基于孪生卷积神经网络对 TerraSAR-X、RadarSat-2 以及 Sentinel-1 SAR 图像进行船只目标匹配。这些研究大都是基于同一卫星平台(单一来源)SAR 数据开展的,但是单一来源 SAR 数据重访周期较长且船只目标机动性强,因此,较难通过单一来源 SAR 实现船只匹配跟踪。当前,已有诸多在轨的高分辨率 SAR 卫星能够弥补单一来源 SAR 数据的缺陷。然而,将这些非同源 SAR 应用于船只目标的匹配跟踪,还需要克服因船只目标运动状态各异、雷达参数不同所导致的船只目标形态几何畸变的问题,只有克服这些问题,才能提高非同源 SAR 船只目标的匹配跟踪精度。为此,本文提出一种全局和局部双阶段特征匹配的非同源 SAR 船只目标匹配跟踪算法。该方法共分为 2 个阶段:第一阶段,首先从第一时相 SAR 图像中提取待匹配船只目标的形状和纹理等宏观特征,再利用欧式距离对第二时相 SAR 图像中的船只目标进行相似度计算,进而筛选出高度相似的船只目标;第二阶段,提取待匹配船只目标的特征点间的方向和梯度关系等细节特征,并利用快速最近邻逼近搜索函数(Fast Library for Approximate Nearest Neighbor Search, FLANN)计算第一阶段选取的高度相似的船只目标与待匹配船只的相似度,从而实现精确的同名船只匹配。经测试,相较于其他经典船只目标匹配算法,该方法能够兼顾船只多个层次特征,即使在非同源 SAR 运动船只几何畸变的影响下,也具有较好的匹配跟踪精度。

1 SAR 船只匹配跟踪方法

目标特征匹配主要有局部特征匹配和全局特征匹配两类方法。局部特征匹配法强调对目标内部细节特征的描述,虽具有较强抗噪声能力,但存在一些不足,如对目标形状与纹理等宏观特征描述能力不强以及因几何畸变造成目标特征信息发生变化,这就导致仅利用局部特征匹配的方法不能对船只这类小目标的自身特征进行良好的描述。因此,需要挖掘并使用船只的全局特征以提高匹配跟踪精度。当进行船只匹配跟踪时,先在第一阶段利用全局特征匹配的方法筛选出与待匹配船只在宏观特征上具有高相似度的船只,以解决局部特征匹配法中的不足;再在第二阶段利用局部特征匹配的方法进一步描述初步筛选后的船只内部细节特征信息,这样可充分利用船只多层次特征。

在 SAR 船只匹配跟踪的第一阶段中,选择形状和纹理等宏观特征来描述船只目标十分关键。通常利用一种统计特性即不变矩描述船只目标形状^[9],利用灰度共生矩阵(Gray Level Co-occurrence Matrix,

GLCM)^[11] 计算和描述纹理特征。

Hu 不变矩^[9]是提取目标不变矩的常用计算方法,该方法利用二阶、三阶归一化中心距构造的 7 个不变矩提取出描述船只形状的特征向量。对于一幅大小为 $M \times N$ 的图像 $f(x, y)$, 其 $p+q$ 阶矩阵、中心距 μ_{pq} 分别定义为:

$$m_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^p y^q f(x, y) \quad p=0,1,2,\dots,n; \quad q=0,1,2,\dots,n; \quad (1)$$

$$\mu_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (x - x_0)^p (y - y_0)^q f(x, y). \quad (2)$$

式中: x_0 和 y_0 分别为图像灰度在水平和垂直方向上的灰度质心, 即 $x_0 = \frac{m_{10}}{m_{00}}, y_0 = \frac{m_{01}}{m_{00}}$; y_{pq} 为归一化中心距, 即 $y_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^r}$, 其中 $r = \frac{p+q+2}{2} + 1, p+q=2,3,\dots,n$ 。利用 GLCM 提取船只目标的角二阶矩、熵、对比度和纹理相关性四个特征。

在船只匹配跟踪的第二阶段中,选择局部特征点等细节特征描述船只目标,并进行特征点间的匹配。SURF 算法在 SAR 影像目标特征提取方面已相当成熟,该算法能够从 SAR 影像中提取描述船只目标内部细节特征的高维特征点描述子。但在对船只特征点进一步匹配过程中,传统 SURF 算法采用的是基于最近邻距离匹配算法,对于 SURF 算法提取的高维特征点描述子,多船只目标间特征点匹配算法复杂度较高,计算量繁重。因此,为提高匹配的效率和速度,并保证匹配的精度,将 FLANN^[24] 最近邻算法用于船只目标特征的匹配,计算待匹配船只和初步筛选后的高相似度船只特征点的相似度。FLANN 模型的特征空间通常是一个 n 维实向量空间,命名为 R^n ,其核心是寻找基于欧式距离的相邻点。欧氏距离 ($\mathbf{D}$)^[25] 的定义式为:

$$\mathbf{D}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \sum_{i=1}^d (\mathbf{X}_i - \mathbf{Y}_i)^2, \quad (3)$$

式中, $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 为 SURF 算法提取到的特征点向量, $\mathbf{D}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 值越小,表示这些特征点对之间的距离越近,说明这些特征点相似程度越高。 R^n 中的所有 $\mathbf{D}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 都存储在若干个基于 KD(k-dimensional) 树部分的结构中。在整个 KD 树中搜索到接近查询点的最小欧氏距离,从而可有效地搜索与待匹配船只目标最相似的船只。

本文算法的基本流程(图 1)主要包括 5 个步骤:数据预处理、提取船只纹理及形状宏观特征、相似性度量、利用 Hessian 矩阵检测 SAR 船只图像中的极值点以及提取的船只目标局部特征点并匹配。

步骤 1:数据预处理。采用恒虚警率算法提取两景不同时相 SAR 图像中的船只目标,并利用形态学滤波处理减弱船只目标背景噪声的影响。

步骤 2:首先,提取出船只的形状和纹理的宏观特征,并构成整体特征向量。在船只目标特征提取中,基于 Hu 不变矩利用归一化中心距提取出描述船只形状的 7 个不变矩组,构造一组 7 维特征向量,用于表征船只的形状特征。然后,利用灰度共生矩阵取船只目标的角二阶矩(Asm)、熵(Ent)、对比度(Con)和纹理相关性(Corr)四种纹理特征,并分别计算它们的均值($\bar{m}$)和标准差(σ),构成一组 8 维特征向量 $\{\bar{m}_{\text{Asm}}, \sigma_{\text{Asm}}, \bar{m}_{\text{Ent}}, \sigma_{\text{Ent}}, \bar{m}_{\text{Con}}, \sigma_{\text{Con}}, \bar{m}_{\text{Corr}}, \sigma_{\text{Corr}}\}$ 来表征船只的纹理特征。最后,将表征形状的 7 个特征向量和表征纹理的 8 个特征向量组成 15 维的特征向量来表示 SAR 船只目标的宏观特征。

步骤 3:利用欧式距离^[26]筛选出高相似度的候选船只。以 $S_o = \{S_{ok} \mid k=1,2,\dots,n\}$ 表示提取到待匹配船只图像的特征向量,以 $S_i = \{S_{ik} \mid k=1,2,\dots,n\}$ 表示第 i 个船只图像的特征向量,进而计算二者间的欧式距离(dist),计算公式为:

$$\text{dist}(i) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{k=0}^n (S_{ok} - S_{ik})^2}, \quad (4)$$

式中,欧式距离满足 $\text{dist}(i) > 0$, 欧式距离的值越小, 表明船只间相似程度越高。当欧氏距离阈值取值较大时, 多船只目标间的匹配范围也会随之扩大, 且局部特征中迭代匹配处理的计算量与误差会增加; 当欧式距离阈值取值过小时, 几何畸变等因素会对全局特征提取产生影响, 造成错误地剔除正确的同名船只目标。因此, 在本文中, 结合式(4)及实验测试, 当欧式距离的阈值选为 1 时, 能较准确地剔除与待匹配船只类型不同的船只, 实现第一阶段初步筛选高相似船只的目的, 剔除掉的船只也能极大减少第二阶段局部特征提取带来的计算量与误差, 从而使得两阶段中全局和局部特征的提取性能达到平衡, 保证匹配跟踪的效率和精度。

步骤 4: 利用 Hessian 矩阵^[15]检测 SAR 船只图像中的极值点, 用于提取待匹配船只和初步筛选后的高相似度船只目标的局部点特征。之后, 通过拟合待匹配船只和初步筛选后的船只极值点邻域内的离散点判定并选择出稳定的极值点。利用 4×4 方块的 Harr 小波响应确定特征点的主方向, 生成 64 维的船只局部特征点的特征矢量。

步骤 5: 对于提取的 64 维船只目标局部特征点的匹配, 利用 FLANN 算法计算待匹配船只目标和初步筛选后的高相似度船只目标的特征点相似度, 并形成特征点对, 依据特征点对匹配数量多少为原则, 从初筛的高相似度船只目标库中, 确定出同名船只目标, 从而实现船只目标的匹配跟踪。

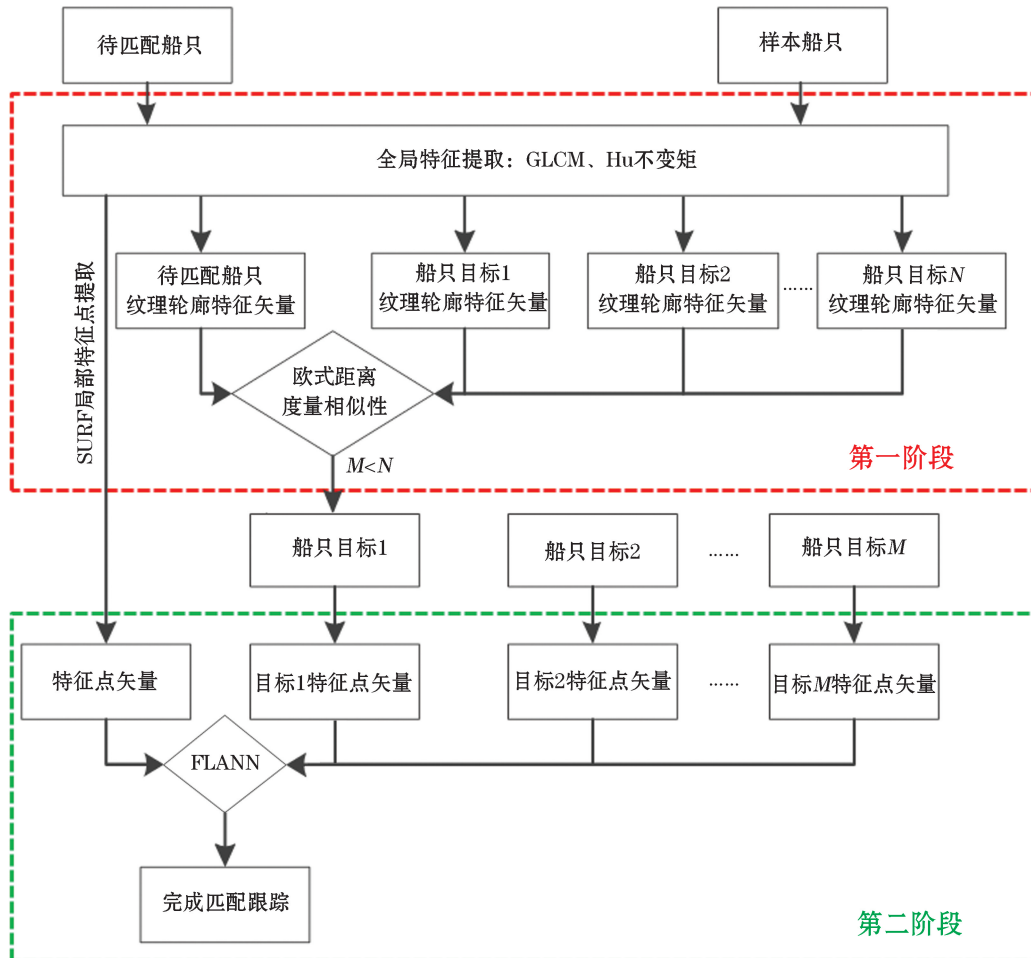


图 1 基于全局和局部双阶段特征匹配的非同源 SAR 船只匹配跟踪方法的流程

Fig.1 Flow chart of the method for non-homologous SAR ship matching and tracking based on global and local two-stage feature matching

2 数据与算法评估

2.1 数据和研究区域

本文利用 2 对 TerraSAR-X 和 RadarSat-2 卫星数据开展同名运动船只目标的匹配跟踪研究,所用的 SAR 参数如表 1 所示。本文还同步获取了 SAR 成像前后 30 min 的 AIS(Automatic Identification System)数据。利用 AIS 与 SAR 融合匹配方法^[27],确定出 2 对 SAR 影像中的同名船只目标,匹配的同名船只目标信息如表 2 所示。

表 1 本文所用的 TerraSAR-X 和 RadarSat-2 的工作参数

Table 1 The parameters of TerraSAR-X and RadarSat-2 used in the study

海 域	卫 星	UTC 时间	入射角	波束模式	极化方式	波 段	分辨率
新加坡海域	RadarSat-2	2012-01-07T22:51:10	30.44°~33.83°	超精细	VV	C	2.50 m×2.50 m
	TerraSAR-X	2012-01-07T22:53:46	33.88°~36.62°	条带	VV	X	2.00 m×2.00 m
舟山海域	RadarSat-2	2018-12-12T09:19:27	39.78°~42.18°	条带	HH	X	1.95 m×1.95 m
	TerraSAR-X	2018-12-12T10:01:20	45.11°~46.88°	超精细	HH	C	2.08 m×2.08 m

表 2 根据 AIS 获取的同名船只的类型及数量

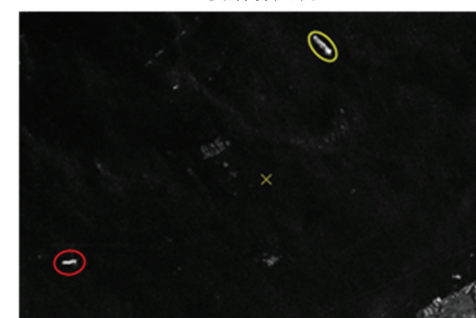
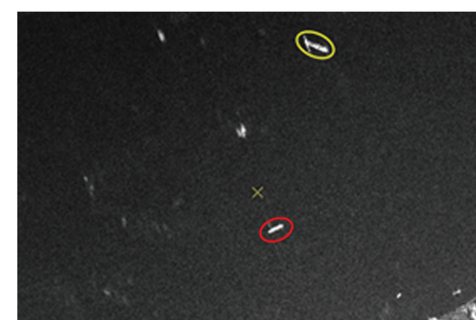
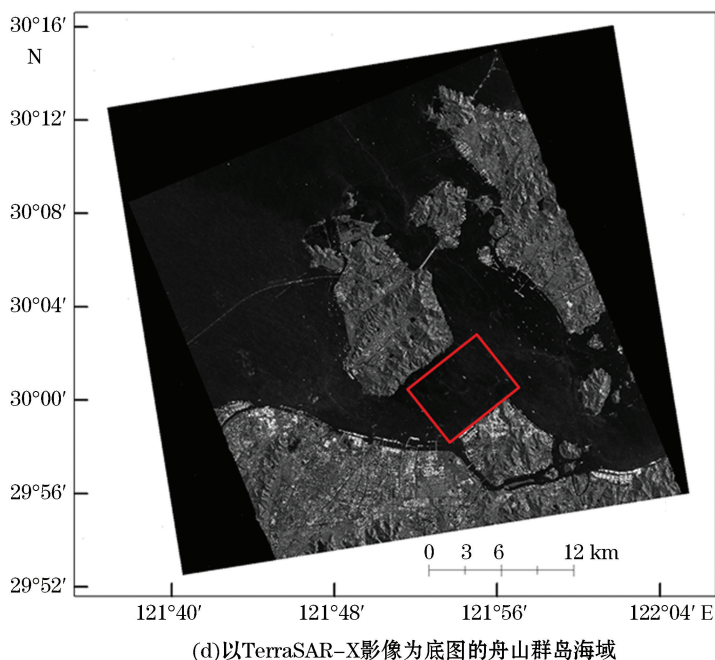
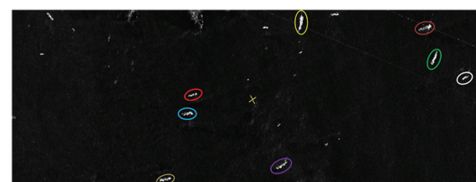
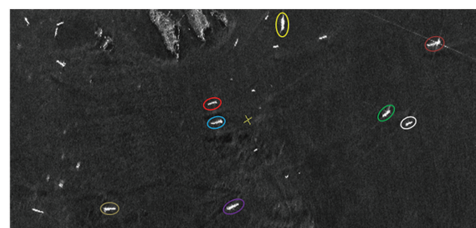
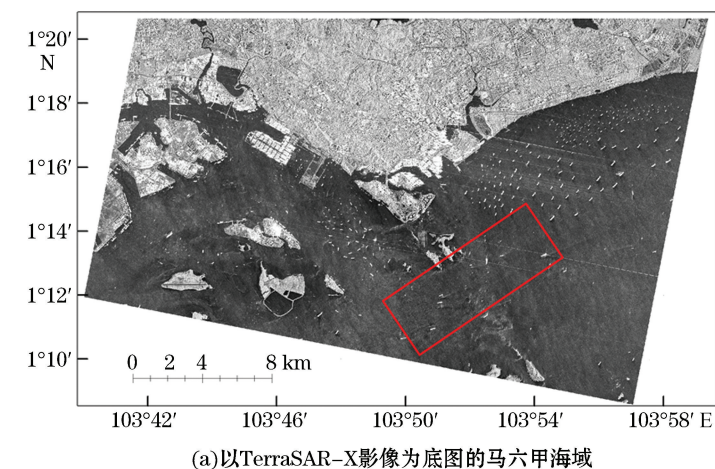
Table 2 The types and status of the ships with the same name obtained according to AIS

船只类型	静止船只		运动船只		船只总计	
	1 #	2 #	1 #	2 #	1 #	2 #
油轮/艘	84	8	6	2	90	10
货轮/艘	42	25	9	3	51	28
集装箱船/艘	34	20	8	7	42	27
其他船只/艘	50	25	10	2	60	27
总计/艘	210	78	33	14	243	92

注:其他船只指渔船等小尺寸的船只;1#指马六甲海峡海域,2#指舟山群岛附近海域。

第一对数据采自马六甲海峡海域(表 2 中 1#)。在这对数据中,TerraSAR-X 和 RadraSat-2 数据的获取时间差约为 3 min,两幅影像均为 VV 极化。根据 AIS 数据及其海上船只移动通信业务标识码(Maritime Mobile Service Identify,MMSI),共确定出 33 对同名运动船只和 210 对同名静止船只。其中,运动船只主要以集装箱船、货船等大型船只为主,静止船只主要以油轮为主。

第二对数据采自舟山群岛附近海域(表 2 中 2#)。在这对数据中,TerraSAR-X 和 RadarSat-2 数据的获取时间差约为 40 min,两幅影像为 HH 极化。根据 AIS 数据及 MMSI 号,共确定出 14 对同名运动船只以及 78 对同名静止船只。其中,运动船只中主要以集装箱船为主,静止船只主要以油轮为主。本文的研究区域如图 2 所示。



注:图 a 和图 d 红框内分别表示马六甲海域和舟山群岛海域内同名船只主要活动区域;图 b、图 c 和图 e、图 f 中两景影像中相同颜色圆圈表示同名船只。

图 2 马六甲海域和舟山群岛海域内同名船只主要活动区域

Fig.2 The main activity areas of ships with the same name in the sea areas of Malacca and Zhoushan Islands

2.2 算法评估

本文采用船只目标的正确匹配数(Number of Correct Matches, NCM)和匹配精度(Matching Precision, MP)两个指标来评估本方法的性能,其中,MP 的计算方法为:

$$MP = \frac{NCM}{NTM} \times 100\%, \quad (5)$$

式中,NTM(Number of total matches)是算法计算的总匹配对数。由于船只目标跟踪主要解决的是运动船

只目标的跟踪匹配问题,因此本文选用全部运动船只目标开展实验,即分别在 1# 和 2# 数据中选取全部 33 对和 14 对(共计 47 对)同名运动船只目标进行实验验证。同时,利用本文方法与文献[20]中的 Harris 算法、文献[21]中的 PCA-SIFT 算法和 SURF 算法所得的匹配精度(MP)进行对比实验。其中,利用 MATLAB R2017a 对 Harris 算法、PCA-SIFT 算法和 SURF 算法开展实验,基于 Python 3.7 对本文提出的算法开展实验。这些算法所得的船只目标匹配跟踪结果如表 3 所示。由表 3 可知,在正确匹配数量和匹配跟踪精度方面,本文算法所得结果都最大。其中,利用本文算法所得 MP 达 83%,显著高于其他算法。

不同船只类型(由 AIS 数据提供,包括油轮、集装箱船、货船、其他如渔船等小尺寸的船只,表 2)对船只目标的匹配跟踪影响结果如表 4 所示。由表 4 可知,本文方法对油轮、货船和集装箱船这三类尺寸较大船只目标的匹配跟踪精度分别为 87.5%、83.3%和 93.3%,均超过 80%;对渔船等尺寸较小船只目标的匹配跟踪精度为 66.7%。但是,Harris、PCA-SIFT 和 SURF 算法对油轮、货船和集装箱船三类船只目标的匹配跟踪精度较低,除 SURF 算法对油轮匹配精度为 62.5%外,其他算法对不同类型船只匹配精度均低于 60%。对于渔船等小型船只目标,Harris、PCA-SIFT 和 SURF 算法的匹配跟踪精度均低于 20%。综合结果表明,本文方法对不同类型船只的匹配跟踪精度明显高于 Harris、PCA-SIFT 和 SURF 算法。

表 4 4 种算法对不同类型船只目标的跟踪结果

Table 4 Statistics of the tracking results of different ship targets obtained by using the 4 algorithms

算 法	油 轮			货 船			集装箱船			其 他		
	总数/艘	NCM/艘	MP/%	总数/艘	NCM/艘	MP/%	总数/艘	NCM/艘	MP/%	总数/艘	NCM/艘	MP/%
本文	8	7	87.5	12	10	83.3	15	14	93.3	12	9	66.7
SURF	8	5	62.5	12	6	50.0	15	4	26.7	12	2	16.7
Harris ^[20]	8	4	50.0	12	3	25.0	15	5	33.3	12	1	8.3
PCA-SIFT ^[21]	8	4	50.0	12	2	16.7	15	5	33.3	12	0	0.0

3 几何特征对运动船只匹配跟踪的影响

即使是同名船只目标,在不同波段、极化 SAR 影像中也会有明显的特征差异,如 X 波段相较于 C 波段对目标细节特征描述能力更强,因此,相较于 RadarSat-2 影像,在 TerraSAR-X 影像中,船只目标的边缘和内部结构等细节特征表现更加显著。此外,不同分辨率的 SAR 影像中目标轮廓大小及纹理也存在差异。所以,本文在分析运动船只目标在非同源 SAR 图像中的几何特征差异基础上,评估本文算法与 Harris、PCA-SIFT 和 SURF 算法在船只目标几何特征变化较大时的适用性。

首先,利用最小外接矩^[28]和 Canny 边缘检测,提取同名运动船只在 TerraSAR-X 和 RadarSat-2 数据对中的船长和船宽;然后,利用得到的船长和船宽提取船只目标的周长及面积,计算同名运动船只在 2 种卫星下的船只几何特征值变化率 W ,计算式为:

$$W = \left| \frac{T_C - T_X}{T_C} \right|, \quad (6)$$

式中, T_C 和 T_X 分别为 RadarSat-2 和 TerraSAR-X 两个波段的同名船只几何特征量。将 W 分为 $W < 10\%$ 、

表 3 利用本文方法与 Harris 算法、PCA-SIFT 算法和 SURF 算法所得船只目标正确匹配个数和匹配精度的比较

Table 3 Comparison of the correct number and accuracy of the ship target matching obtained by using the method of this study and the algorithms of Harris, PCA-SIFT and SURF

算 法	NCM/艘	MP/%
本文	39	83.0
SURF	17	36.2
Harris ^[20]	13	27.7
PCA-SIFT ^[21]	11	23.4

$10\% \leq W \leq 20\%$ 和 $W > 20\%$ 三种情况。 W 越大,表明船只目标的运动对 SAR 图像中的几何特征估算的影响越大,也表示对算法匹配跟踪性能影响越大,因此,本文将主要分析运动船只目标几何特征变化对不同算法匹配精度的影响。

3.1 周长差异对匹配跟踪的影响

根据式(6)计算可知,在不同波段 SAR 数据中,同名运动船只周长变化率 $W_c < 10\%$ 的有 12 艘, $10\% \leq W_c \leq 20\%$ 的有 12 艘, $W_c > 20\%$ 的有 23 艘,所以 $W_c \geq 10\%$ 的船只达到 35 艘,这说明船只目标的运动对 SAR 图像中的周长估算有很大的影响。

在不同的运动船只周长变化率下,各个算法的匹配跟踪精度结果如图 3 所示。由图 3 可知,本文算法在 $W_c \leq 20\%$ 时所得的 MP 没有任何变化,均为 75%;在 $W_c > 20\%$ 时所得 MP 提高至 91.3%。总体来说,船只周长的变化对本文算法的影响较小,而 PCA-SIFT 算法 MP 在 $W_c \leq 20\%$ 时有明显下降,从 41.5% 下降至 16.7%,但在 $W_c > 20\%$ 时,PCA-SIFT 算法 MP 也仅为 17.4%,所以 MP 并无显著变化。在三类不同程度的 W_c 下,SURF 算法 MP 先从 50% 下降至 41.7%,最后降至 26.1%。显然,相较于 PCA-SIFT 算法,SURF 算法的 MP 随 W_c 的增加而减小的趋势更加明显。可见,SURF 算法匹配跟踪精度在一定程度上受船只周长变化的影响较大。此外,Harris 算法 MP 在不同 W_c 下变化较小,即 $16.7\% \leq W_c < 34.8\%$,表明 Harris 算法的 MP 随 W_c 的变化幅度较小。

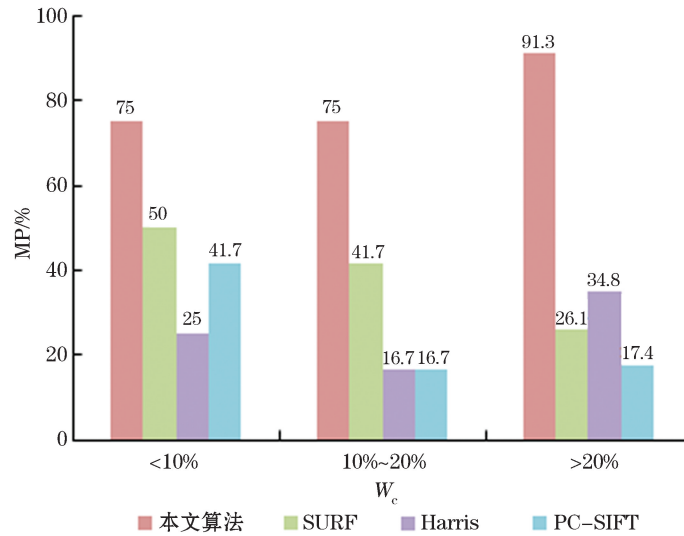


图 3 不同周长变化率(W_c)下的船只目标匹配跟踪精度(MP)分布

Fig.3 The distribution of the accuracy of ship target matching and tracking at different perimeter change rates (W_c)

3.2 面积差异对匹配跟踪的影响

由式(6)计算可知,同名运动船只 $W_a < 10\%$ 的有 22 艘, $10\% \leq W_a \leq 20\%$ 的有 14 艘, $W_a > 20\%$ 的有 11 艘,相较于周长 W_c , $W_a \geq 10\%$ 的仅有 25 艘,可见船只目标的运动对 SAR 图像中的面积估算较周长估算的影响较小。在不同 W_a 下,各算法的匹配跟踪精度(MP)结果如图 4 所示。由图 4 可知,本文算法的 MP 随 W_a 的增加而减小,但整体上本文算法 MP 远高于其他算法的 MP。SURF 算法和 PCA-SIFT 算法的 MP 也均随船只 W_a 的增加而减小,Harris 算法 MP 变化幅度很小,主要集中在 30% 左右,说明 Harris 算法匹配跟踪精度受面积变化幅度影响较小。

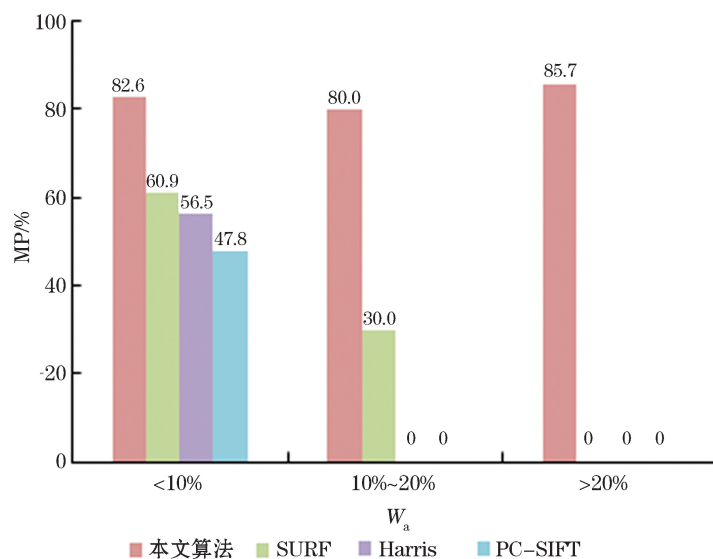


图4 不同面积变化率(W_a)下的船只目标匹配跟踪精度(MP)分布

Fig.4 The distribution of the accuracy of ship target matching and tracking at different area change rates (W_a)

3.3 长宽比差异性对匹配跟踪的影响

由式(6)计算可知,同名船只长宽比变化率 $W_{l,w} < 10\%$ 的有 23 艘, $10\% \leq W_{l,w} \leq 20\%$ 的有 14 艘, $W_{l,w} > 20\%$ 的有 14 艘,所以, $W_{l,w} \geq 10\%$ 的船只只有 28 艘,与 $W_a \geq 10\%$ 的船只数量相近,可见船只目标的运动对长宽比的估算与面积估算的影响相当。

在不同 $W_{l,w}$ 下,各算法的匹配跟踪精度(MP)结果如图 5 所示。由图 5 可知,在不同 $W_{l,w}$ 下,本文方法的 MP 依次为 82.6%、80.0% 和 85.7%,均高于 80%,而其他 3 种算法所得的 MP 均较低,最高为 60.9% (SURF 算法, $W_{l,w} < 10\%$),最低为 0 (Harris 算法、PCA-SIFT 算法, $W_{l,w} > 10\%$)。当 $W_{l,w} > 10\%$ 时, Harris 和 PCA-SIFT 算法 MP 大大降低,分别从之前的 56.5% 和 47.8% 均降低至 0,导致无法实现有效匹配跟踪,说明 Harris 算法和 PCA-SIFT 算法受船只目标的长宽比影响较大。

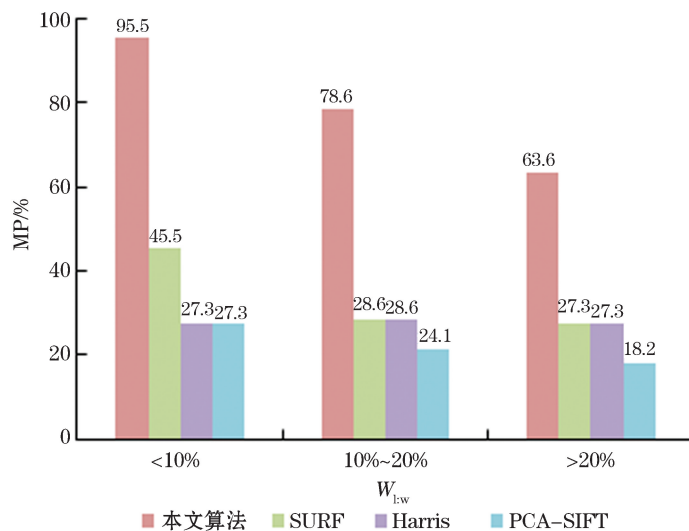


图5 不同长宽比变化率 $W_{l,w}$ 下的船只目标匹配跟踪精度分布

Fig.5 The distribution of the accuracy of ship target matching and tracking at different aspect ratio change rates ($W_{l,w}$)

在匹配跟踪实验中,Harris、PCA-SIFT 和 SURF 算法在部分同名船只中出现了误配及失配的情况,为进一步解释误配和失配的原因,探寻不同方法匹配跟踪性能,本文以一组 SAR 同名船只(MMSI: 248819000)为例开展分析。由于船只在运动过程中发生显著几何畸变,所以选用该船只能更好地反映船只真实运动状态及检验本文算法的鲁棒性。

本文从匹配关联结果方面评价不同算法的匹配跟踪性能。不同算法均基于匹配点对数确定目标,目标内部间匹配点对数越多,证明同名船只目标间的特征结构越相似,进而确定同一目标的概率也就越大。不同算法匹配关联结果如图 6 所示。由图 6a 和图 6b 可知,Harris 算法得到的匹配点对数大都集中在目标背景

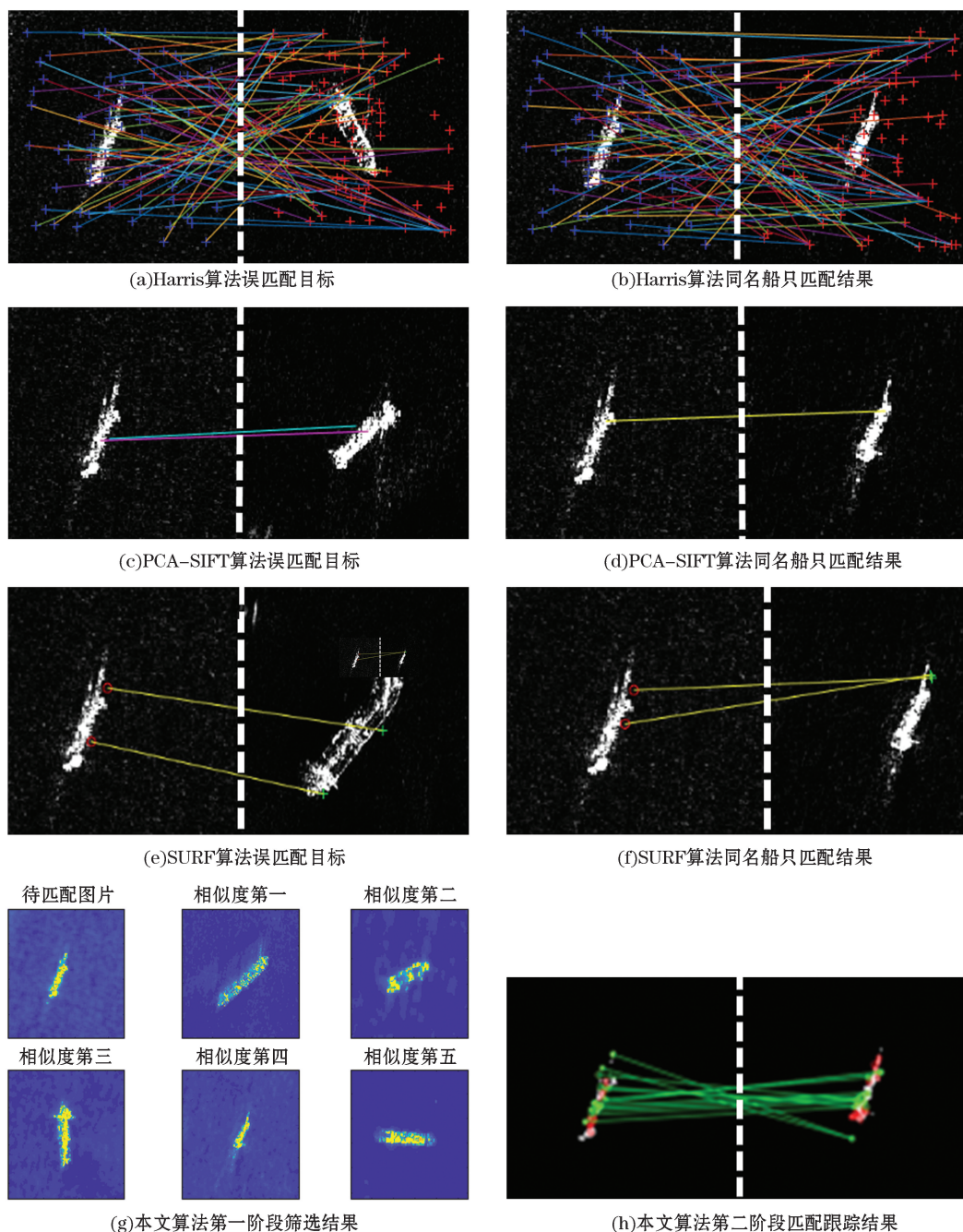


图 6 不同算法对 SAR 船只影像匹配跟踪结果

Fig.6 Results of the ship matching and tracking in the SAR images obtained by different algorithms

中,均为无效匹配点对,因此,依据 Harris 算法生成的匹配点对数最终将导致船只目标发生误配。由图 6c~图 6f 可知,PCA-SIFT 和 SURF 算法在误匹配目标和同名船只中均产生部分匹配点对,其中,PCA-SIFT 算法在误匹配目标及同名船只目标中分别生成 2 组特征点对和 1 组特征点对,SURF 算法在误匹配目标及同名船只目标均生成 2 组特征点对,依据特征点对数,将导致 PCA-SIFT 算法和 SURF 算法最终出现误配和失配,这是由船只内部具有相似特征点和算法误差等所致。本文算法能很好地解决上述问题,如图 6g,第一阶段依据全局特征能将图 6a、图 6c 和图 6e 中 Harris、PCA-SIFT 和 SURF 算法误配和失配的目标剔除,结果如图 6h 所示,第二阶段再依据匹配点对数确定同名目标。最终,本文算法在匹配关联结果中能保持较高的匹配跟踪精度。

4 结 论

本文针对当前利用 SAR 卫星进行船只目标匹配跟踪时,由于船只目标尺寸小且船只目标的运动会在 SAR 图像中产生几何畸变,导致船只目标在 SAR 图像中难以准确实现匹配跟踪的问题,提出了基于全局和局部双阶段特征匹配的非同源 SAR 船只目标匹配跟踪方法。该方法首先从第一时相 SAR 图像中提取待匹配船只目标的形状和纹理等宏观特征,并利用欧式距离对第二时相 SAR 图像中的船只目标进行相似度计算,筛选出高度相似的船只目标。基于此,通过提取待匹配船只目标的特征点间的方向和梯度等细节特征,并利用 FLANN 计算第一阶段选取的高度相似的船只目标与待匹配船只的相似度,从而实现精确的同名船只匹配。主要结论如下:

1) 本文算法对于运动船只的匹配跟踪精度(MP)为 83%,相较于其他算法,本文算法能显著提高运动船只目标匹配跟踪精度。

2) 本文对油轮、货船、集装箱船这三类尺寸较大的船只目标,其匹配跟踪精度均在 80%以上,对于其他类型船只如渔船等小型船只匹配精度为 66.7%。而 Harris 算法和 PCA-SIFT 算法对油轮、货船、集装箱船的匹配跟踪精度均小于 50%,特别对于其他船只,SURF 算法、Harris 算法和 PCA-SIFT 算法匹配跟踪精度均低于 20%。相较于其他算法,本文算法对不同类型船只具有良好匹配跟踪精度。

3) 在非同源 SAR 船只周长、面积和长宽比三个几何特征变化率(W_c , W_a 和 $W_{l,w}$)中,本文算法匹配跟踪精度与面积特征的变化有一定的相关性,在周长和长宽比变化中仍能保持 75%以上的精度,特别在长宽比特征变化下,本文整体匹配精度超过 80%。在其他算法中,长宽比变化对 Harris 算法、PCA-SIFT 和 SURF 算法影响最大,具有较强相关性。另外,SURF 算法匹配跟踪精度也与周长的变化有一定相关性。

综合结果表明,本文的方法能够实现 TerraSAR-X 和 RadarSat-2 不同波段、不同平台 SAR 图像的船只目标匹配跟踪。目前,本文仅分析了 RadarSat-2 和 TerraSAR-X 两种卫星平台的数据,并未在其他卫星平台开展分析,后续将在其他更多平台评估算法的性能。另外,本文中 2 对 SAR 数据的分辨率很接近,未来将进一步评估分辨率对本文算法的影响。最后,本文数据拍摄时的海况为低海况条件,下一步将评估复杂海况下本文算法对运动船只匹配跟踪的性能。

参考文献(References):

- [1] AO W, XU F, LI Y C, et al. Detection and discrimination of ship targets in complex background from spaceborne ALOS-2 SAR images[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(2): 536-550.
- [2] LI Y Z, XIE P C, TANG Z S, et al. SVM-based sea-surface small target detection: a false-alarm-rate-controllable approach[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 16(8): 1225-1229.
- [3] WANG Z C, WANG R N, FU X Y, et al. Unsupervised ship detection for single-channel SAR images based on multiscale saliency and complex signal kurtosis[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021. DOI: 10.1109/LGRS.2021.3064425.
- [4] SNAPIR B, WAINE T W, BIERMANN L. Maritime vessel classification to monitor fisheries with SAR: demonstration in the North Sea

- [J]. Remote Sensing, 2019, 11(3): 353-369.
- [5] LENG X G, JI K F, ZHOU S L, et al. Ship detection based on complex signal kurtosis in single-channel SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 59(9): 6447-6461.
- [6] BRUSCH S, LEHNER S, FRITZ T, et al. Ship surveillance with TerraSAR-X[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(3): 1092-1103.
- [7] 耿旭朴, 薛思涵. 合成孔径雷达星座发展综述[J]. 地理信息世界, 2017, 24(4): 58-63. GENG X P, XUE S H. Trend analysis of SAR constellation[J]. Geomatics World, 2017, 24(4): 58-63.
- [8] MIGLIACCIO M. Single-look complex COSMO-SkyMed SAR data to observe metallic targets at sea[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2012, 5(3): 893-901.
- [9] HU M K. Visual pattern recognition by moment invariants[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1962, 8(2): 179-187.
- [10] KHOTANZAD A, HONG Y H. Invariant image recognition by Zernike moments[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(5): 489-497.
- [11] GAO C C, HUI X W. GLCM-based texture feature extraction[J]. Computer Systems and Applications, 2010, 19(6): 195-198.
- [12] 李绮雪, 尹奎英, 袁功霖, 等. SAR 村庄目标 ROI 提取和异源图像匹配[J]. 现代雷达, 2019, 41(6): 31-36. LI Q X, YIN K Y, YUAN G L, et al. ROI extraction of village targets and heterogeneous image registration[J]. Modern Radar, 2019, 41(6): 31-36.
- [13] 黄勇, 王建国, 黄顺吉. SAR 图像匹配算法及实现[J]. 信号处理, 2003, 19(2): 64, 87-89. HUANG Y, WANG J G, HUANG S J. An image matching algorithm and important for SAR images[J]. Signal Processing, 2003, 19(2): 64, 87-89.
- [14] LOWE D G. Distinctive image features from scale invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [15] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T, et al. Speeded-up robust features[J]. Computer Vision & Image Understanding, 2008, 110(3): 404-417.
- [16] MA C Q, HU X G, XIAO J, et al. Homogenized ORB algorithm using dynamic threshold and improved quadtree[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021(1): 1-19.
- [17] 雷禹, 何家峰. 基于改进 SURF 算法的 SAR 图像目标匹配[J]. 广东工业大学学报, 2014(1): 65-69. LEI Y, HE J F. SAR image target matching based on the improved SURF algorithm[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2014(1): 65-69.
- [18] 黎旻懿, 杨杰, 李平湘, 等. 尺度不变特征转换算法的多源 SAR 影像匹配[J]. 遥感信息, 2015, 30(6): 3-7. LI M Y, YANG J, LI P X, et al. Multi-sensor SAR imagery matching by using SIFT[J]. Remote sensing information, 2015, 30(6): 3-7.
- [19] 阴俊恺, 张正强, 吴震, 等. 一种基于图像块描述子学习的异源遥感图像匹配方法[J]. 通信技术, 2021, 54(2): 344-351. YIN J K, ZHANG Z Q, WU Z, et al. A heterogeneous remote sensing image matching method based on image block descriptor learning[J]. Communications Technology, 2021, 54(2): 344-351.
- [20] 陈建宏, 刘伟, 赵拥军, 等. 高分辨率 SAR 图像舰船目标匹配技术研究[J]. 信息工程大学学报, 2016, 17(3): 292-297. CHEN J H, LIU W, ZHAO Y J, et al. Ship matching in high-resolution SAR imagery[J]. Journal of Information Engineering University, 2016, 17(3): 292-297.
- [21] LI M, LUO Z D, YUAN X J, et al. Image of ship target matching algorithm based on PCA-SIFT in the complicated environments with noise[J]. Journal of Physics Conference Series, 2018, 1069(1): 01239-1-012139-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1069/1/012139.
- [22] 顾丹丹, 许小剑. SAR 图像舰船识别的三维空间逆投影与匹配技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(8): 1078-1084. GU D D, XU X J. 3-D back projection and matching for ship recognition from SAR images[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(8): 1078-1084.
- [23] NIU L, LANG H T. Ship matching using convolutional neural network in multi-source Synthetic Aperture Radar images[J]. Journal of Coastal Research, 2020, 102(Suppl.1): 166-175.
- [24] MUJA M, LOWE D G. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration[C]//VISAPP 2009-Proceedings of the fourth Conference on Computer Vision Theory and Applications. Lisboa, Portugal. 2009.
- [25] 徐明, 刁燕, 罗华, 等. 基于改进的 SURF 算子和透视变换模型的图像配准[J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(3): 671-677. XU M, DIAO Y, LUO H, et al. Image registration based on improved SURF operator and perspective transform model[J]. Computer & Digital Engineering, 2020, 48(3): 671-677.
- [26] 王振海. 融合 HU 不变矩和 SIFT 特征的商标检索[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(1): 187-190. WANG Z H. Trademark retrieval by combining HU invariant moments with SIFT features[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(1): 187-190.
- [27] JI Y G, ZHANG J, MENG J M, et al. Point association analysis of vessel target detection with SAR, HFSWR and AIS[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 33(9): 73-81.
- [28] 武思文, 郎海涛, 石洪基, 等. 一种新的合成孔径雷达图像船只几何特征提取方法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(2):

101-105. WU S W, LANG H T, SHI H J, et al. A novel ship geometric features extraction method for SAR imagery[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(2): 101-105.

Non-Homologous SAR Ship Matching and Tracking Method Based on Two-Stage Feature Matching

WANG Yan^{1,2}, ZHANG Xi², MENG Jun-min², LIU Gen-wang², BAO Meng², CAO Cheng-hui²

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: Study on satellite-borne SAR ship matching and tracking is an important part of maritime ship monitoring and has great significance for improving the ability of maritime target monitoring and control. However, when SAR satellite is used for the ship target matching and tracking, geometric distortions may possibly be generated in the SAR images due to the small size and movement of the ship target, which makes it difficult to accurately match and track the ship target in the SAR images. For this reason, a method for SAR ship target matching and tracking based on global and local two-stage feature matching is proposed. This method can make it possible to realize the ship target matching and tracking on the SAR images of different bands such as TerraSAR-X and Radarsat-2 and different platforms (non-homologous). In order to verify the performance of the algorithm proposed in the paper, two pairs of TerraSAR-X and Radarsat-2 SAR data are used for comparing the method proposed in the paper with the classic algorithms such as SURF (Speeded Up Robust Features), Harris and PCA-SIFT (Principal Component Analysis-Scale Invariant Feature Transform). The results show that the method proposed in the paper can make the tracking performance for moving ships reach to 83%, while by using SURF, Harris and PCA-SIFT algorithms the accuracy are only 36.2%, 27.7% and 23.4%, respectively. It can be seen that the algorithm of this study is much better than those classic algorithms. In addition, the differences in geometric features (e.g. perimeter, area, aspect ratio, etc.) of the ship target motion in the non-homologous SAR images are analyzed and the applicability of the ship target matching and tracking algorithm in the non-homogeneous SAR images is evaluated. The results indicate that by using the method of this study, the ship target matching and tracking can also be achieve better, even when the geometric characteristics of the ship undergo a larger deformation.

Key words: SAR (Synthetic Aperture Radar); ship tracking; feature matching; multi-level features

Received: June 2, 2021