

# 基于 Sentinel-1 影像特征匹配的北极海冰漂移 矢量提取

李超越, 李刚, 王雪, 鞠琦, 陈卓奇

中山大学 测绘科学与技术学院 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082

**摘要:** 海冰漂移对北极气候研究和人类活动保障有重要意义。针对星载辐射计或散射计数据采用模板匹配法提取的海冰漂移矢量结果存在空间分辨率较低及精度不佳等问题, 本文以 Sentinel-1 影像为数据源, 比较了 4 种常用的特征匹配算子 SIFT、SURF、ORB、A-AKZE 提取北极海冰漂移矢量的效果, 并分析了 HH 与 HV 极化通道提取的漂移矢量提取的空间分布差异。针对特征匹配中不可避免的误差, 结合既有算法的优势, 本文提出了一套高效且准确的错误矢量滤除算法。通过 MOSAiC 浮标定位数据验证了本文方法提取的海冰漂移矢量的精度, 并与基于 Sentinel-1 影像既有海冰漂移产品进行了精度对比。实验结果表明基于 A-KAZE 算子的算法在提取结果的数量与分布上优于 SIFT、SURF 与 ORB 算子; HH 与 HV 极化通道影像提取的海冰漂移矢量在数量与空间分布上有所差异, 结合两者可有效扩大海冰监测范围; 通过错误矢量滤除算法能高效滤除错误匹配的同时保留更多正确漂移矢量。基于 A-KAZE 算子提取的海冰漂移矢量平均速度误差低于 0.2 km/d, 平均方向误差低于 1°, 与同样基于 Sentinel-1 SAR 影像但采用模板匹配法的 DTU 海冰漂移产品具有较高的一致性, 但本方法提取的海冰漂移矢量具有更高的空间分辨率及更大的覆盖范围。

**关键词:** 遥感, 北极, 海冰漂移矢量, 图像特征匹配, A-KAZE, Sentinel-1

**中图分类号:** TP701/P2

**引用格式:** 李超越, 李刚, 王雪, 鞠琦, 陈卓奇. 2024. 基于 Sentinel-1 影像特征匹配的北极海冰漂移矢量提取. 遥感学报, 28(8): 2062-2072

Li C Y, Li G, Wang X, Ju Q and Chen Z Q. 2024. Sea ice drift vectors extraction based on feature tracking to Sentinel-1 images. National Remote Sensing Bulletin, 28(8): 2062-2072 [DOI: 10.11834/jrs.20222238]

## 1 引言

海冰是冰冻圈的重要组成部分, 监测海冰漂移运动, 对全球气候变化研究和保障北极航运安全具有重要意义 (Stroeve 等, 2012)。海冰受天气系统以及海流等外部驱动力的影响会产生大范围的漂移运动, 对区域气候和水文产生直接影响, 并对北极地区航运等人类活动产生威胁。目前海冰漂移信息提取主要依靠卫星遥感数据, 包括辐射计 (Heil 等, 2001)、散射计 (Liu 等, 1999) 以及光学卫星 (Emery 等, 1991) 等数据。OSI SAF (Ocean and Sea Ice Satellite Application Facilities)、NSIDC (National Snow and Ice Data

Center)、FREMER (The French Research Institute for Exploitation of the Sea) 等国际机构发布的海冰漂移矢量产品均基于辐射计和散射计数据 (Dybkjaer, 2018; Ezraty 等, 2007a, 2007b; Lavergne, 2016; Tschudi 等, 2019)。星载辐射计和散射计数据可完整地覆盖北极区域, 但其空间分辨率普遍较低 (10 km 级), 矢量漂移速度平均误差在 1—2 km/d, 漂移方向平均误差在 15°—20° (Wang 等, 2022)。

合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 影像不受天气与光照影响且具有较高的空间分辨率。2014 年发射的 Sentinel-1 卫星已提供大量的北极地区冰盖及海冰影像, 由此诸多学者利用 Sentinel-1 影像进行了冰盖消融、流速、北极海冰

收稿日期: 2022-05-23; 预印本: 2022-09-20

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2019YFC1509104); 国家自然科学基金 (编号: 41901384); 广州市科技计划项目 (编号: 202102020337); 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海) 创新团队建设项目 (编号: 311021008)

第一作者简介: 李超越, 研究方向为极地遥感。E-mail: lichy88@mail2.sysu.edu.cn

通信作者简介: 李刚, 研究方向为微波遥感。E-mail: ligang57@mail.sysu.edu.cn

漂移矢量提取的研究(陈晓等, 2023; 鞠琦等, 2024)。Muckenhuber等(2016)通过 Sentinel-1 影像结合特征匹配算法进行海冰漂移矢量提取。丹麦科技大学空间研究所(DTU Space)发布了一套基于 Sentinel-1 影像 10 km 级别海冰漂移矢量产品(Saldo 和 Hackett, 2022)。Sentinel-1 在北极地区通常提供 HH 与 HV 双极化影像。不同极化影像的后向散射系数存在一定差异。有研究认为以 HV 极化影像提取的海冰漂移矢量数量相比 HH 极化更多(Muckenhuber等, 2016; Komarov 和 Barber, 2012), 但 HH 极化影像能提供更多小尺度海冰变化的信息, 得到的角点特征更多, 而 HV 极化影像提取结果能体现出大尺度的冰情信息(Korosov 和 Rampal, 2017)。

基于遥感影像匹配的海冰漂移矢量提取方法主要包括模板匹配算法与特征匹配算法。模板匹配算法通过主影像上的一个参考模板, 在辅影像上搜索相同或相似的模板, 由此确定两幅影像上的同名点。常用于海冰漂移矢量提取的模板匹配算法包括: 最大互相关算法 MCC (Maximum Cross Correlation) (Saldo 和 Hackett, 2022)、归一化互相关算法 NCC (Normalized cross-correlation) (Ninnis 等, 1986; Thomas 等, 2008) 以及相位相关算法 PC (Phase Correlation) (Thomas 等, 2011) 等。模板匹配算法原理简单且计算正确率高, 但不具备对旋转海冰的抗性, 对影像噪声敏感且计算效率低(王军凯, 2019)。上文中提到的由辐射计、散射计与 Sentinel-1 影像提取的海冰漂移产品均基于模板匹配算法。

特征匹配算法由 Lowe (2004) 最早提出, 这类算法通过检测主、辅影像中的特征点, 包括角点、极值点等, 对特征点进行高维特征描述后, 根据描述信息对主、辅影像上的特征点进行匹配。目前主流的特征匹配算法包括 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform)、SURF (Speeded Up Robust Features)、ORB (Oriented Fast and Rotated Brief)、A-KAZE (Accelerated KAZE Features) 等。SIFT 算子通过对图像进行多次高斯核函数滤波模拟出不同尺度下的影像构成高斯金字塔尺度空间, 使得 SIFT 算子具有较好的尺度不变性(Lowe, 2004)。SURF 算子改进了 SIFT 算子的尺度金字塔, 不同层间尺寸一致, 通过增大滤波器的模糊系数以进行尺度变化(Bay 等, 2008)。ORB 算子通过下采样方

法生成低分辨率影像构建图像金字塔以得到尺度不变性, 并使用简单快速的 FAST (Features from Accelerated Segments Test) 算法在图像中标记特征点(Rublee 等, 2011)。A-KAZE 算子通过非线性扩散滤波和通过 FED (Fast Explicit Diffusion) 构造非线性尺度空间, 尺度空间每层均保持了与原始图像一致的分辨率, 大幅度提升了非线性尺度空间的生成速度(Alcantarilla 等, 2013)。Muckenhuber 等(2016)采用 ORB 算子在 Sentinel-1 SAR 影像上进行海冰漂移矢量提取并提升了运算效率。Demchev 等(2017)采用 A-AKZE 算子进行矢量提取, 相比 ORB、SIFT 算子获得了更密集的海冰漂移矢量, 但其缺乏漂移矢量的精度分析, 且仅采用了 HH 极化通道影像。特征匹配算法计算效率比模板匹配高, 但在匹配过程中会产生难以滤除的错误匹配点对, 导致出现错误的海冰漂移矢量。Lowe 使用的最近邻距离比率测试 NNDR (Nearest Neighbor Distance Ratio) 法可以滤除 90% 的错误匹配点对。对于剩余的错误匹配点对形成的错误海冰漂移矢量, 可利用矢量邻域内相互比较的方式进行滤除(Demchev 等, 2017), 其滤除效果较好但是计算效率很低。张明等提出了基于矢量偏移分量置信区间的滤除方法, 这种算法计算效率高, 但是要求所有漂移矢量速度分量呈正态分布(张明等, 2019)。

本文对比了 4 种特征匹配算子 SIFT、SURF、ORB、A-KAZE, 以及 Sentinel-1 影像的 HH 与 HV 极化通道在海冰漂移矢量提取中的表现。针对生成的错误海冰漂移矢量, 本文提出的算法结合了 Demchev 等(2017)与张明等(2019)算法的优势, 在提升滤除效率的同时尽可能保留正确矢量。结合 MOSAiC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate) 冰上浮标定位数据对海冰漂移矢量进行了精度验证, 与同样基于 Sentinel-1 SAR 影像但采用模板匹配算法的 DTU 海冰漂移产品进行精度对比。两者结果保持了较高的一致性。

## 2 研究方法

### 2.1 SAR 影像及预处理

Sentinel-1 星座包含 Sentinel-1A 与 Sentinel-1B 两颗 5.405 GHz 的 C 波段 SAR 卫星。卫星运行于近

极地、太阳同步轨道，双星重复周期为6 d，轨道间距随纬度升高而收窄，因此在高纬北极地区重复周期可以缩短到1—2日，利于进行北极地区海冰漂移监测。本文采用了2020年1月及2020年4月两对共4景北极地区 Sentinel-1 EW 模式影像，幅宽400 km，空间分辨率40 m，具有HH、HV双极化通道。两像对的影像重叠区域覆盖面积基本一致，成像间隔约为1日。表1展示了实验影像的详细信息，图1展示了影像空间位置以及 MOSAiC 浮标在影像中的分布，每个像对内两张影像距离

向与方位向类似，因此不重复标注。影像对2的两幅影像分别为轨道升轨最后一景与降轨第一景，因此两者方位向和距离向相近。

表1 SAR影像详细信息

Table 1 Detail information of SAR images

像对	成像时间	成像星	Path	Frame	轨道
1	2020-01-02	1A	94	287	升轨
	2020-01-03	1A	109	284	升轨
2	2020-04-01	1B	99	289	降轨
	2020-04-02	1B	114	287	升轨

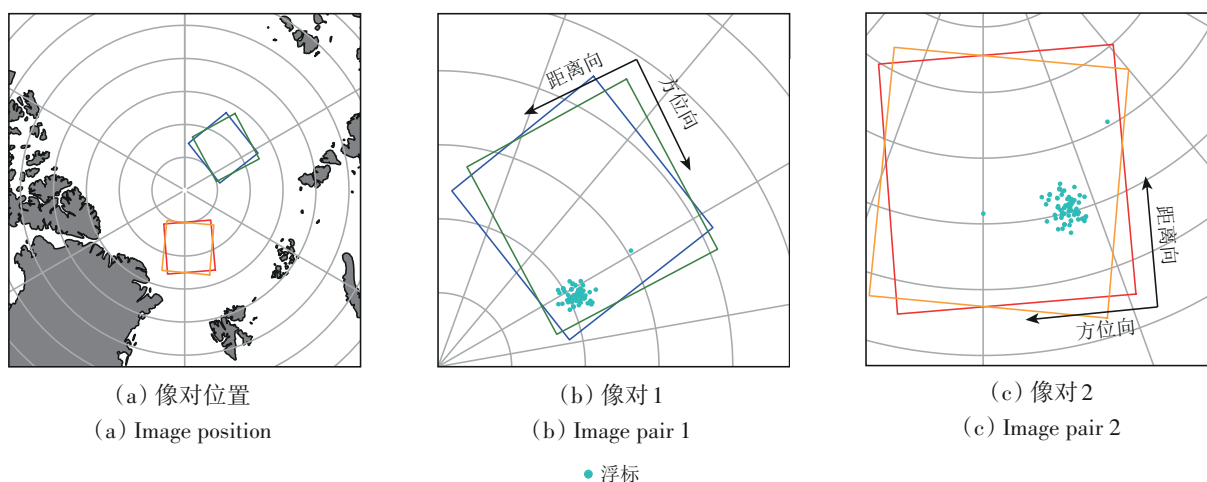


图1 实验影像对区域

Fig. 1 Coverage of SAR images used in this paper

本文使用SNAP的工具箱提供的API接口模块“Snappy”在Python环境下编写脚本进行图像的预处理工作。首先考虑到海冰漂移矢量提取对地理编码精度的需求，首先引入Sentinel-1精密轨道数据 (<https://scihub.copernicus.eu/gnss/#/home> [2022-05-23])，然后进行辐射校正，将原始图像改正至后向散射系数并进行Sentinel-1热噪声去除，最后采用“boxcar”斑点噪声滤波。考虑到海冰漂浮于海平面而与椭球面差异极小，本文采用椭球校正而非地形校正进行地理编码，影像的分辨率编码为200 m×200 m。

## 2.2 基于特征匹配算法的海冰漂移矢量提取

基于特征匹配的海冰漂移矢量提取算法主要步骤如下。(1) 将每个像对中成像时间较早的一景作为主影像，成像时间较晚的作为辅影像。对每一对经预处理得到HH极化通道影像和HV极化通道影像均采用SIFT、SURF、ORB、A-KAZE等4种特征算子分别进行特征点提取。(2) 主影像的

HH极化通道影像特征点与辅影像HH极化通道影像特征点相互匹配，主影像的HV极化通道影像特征点与辅影像HV极化通道影像相应特征的特征点相互匹配。不同的特征算子均可采用FLANN (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors) 匹配器进行主辅影像上特征点之间的匹配，这是一种近邻快速搜索算法 (Muja和Lowe, 2009)。(3) 得到匹配点对后，根据其影像点坐标取得地理坐标。结合成像时间间隔，即可得到海冰漂移矢量。(4) 最后对错误矢量进行滤除。

## 2.3 错误漂移矢量滤除算法

特征匹配会产生错误匹配点对，最近邻距离比率测试 (NNDR) 常被用于在SIFT算法中保留正确的匹配点对。匹配点对的相似性是匹配器 (如FLANN) 通过特征点描述子之间的欧式距离或者汉明距离进行度量，距离最短的点对被认为是正确匹配。由于不同图像特性不同，因此难以使用固定阈值用于筛选正确匹配点对。NNDR测试通过

距离最近的匹配点与距离第二近的匹配点之间的距离比值为参考指标筛选错误匹配点对。第二近距离与最近距离相近说明最近距离匹配不可靠。经验上以此距离比值低于 0.8 时能以 5% 正确匹配点对为代价滤除 90% 的错误匹配点 (Lowe, 2004)。

NNDR 测试依赖于特征点的描述子之间的相关性, 与海冰运动特点无关, 因此经过 NNDR 测试的结果中仍会保留一定数量的错误矢量。Demchev 利用一定范围内的海冰运动基本一致为假设 (Karvonen 等, 2007), 比较 5—10 km 范围内矢量相似性滤除错误矢量 (Demchev 等, 2017)。符合保留条件的矢量需满足 3 个条件, 即 (1) 至少有 8 个周围矢量; (2) 矢量长度与周围矢量长度均值之差不超过周围矢量长度的 1 倍标准差; (3) 其漂移方向至少与 4 个相近矢量一致。该滤除算法效果较好但是由于每一个矢量均要经过一次查找和比较, 导致其计算效率较低。张明等 (2019) 提出了基于矢量分量置信区间的滤除方法, 认为漂移速率符合正态分布, 计算所有矢量的漂移分量均值和抽样误差, 设立  $\pm 0.08$  m/s 的置信区间, 矢量在区间外则判定为错误矢量。这种算法效率相对较高, 但如果影像覆盖范围内出现较大幅度的旋转变化和/或其他不规则漂移场, 则其速率不附合正态分布, 则会导致大量正确海冰漂移矢量被滤除。

针对于上述问题, 本文提出一种新的滤除方法。如果矢量分量与所有矢量分量均值之差不超过 2 倍标准差 (经验值), 则认为是正确匹配; 否

则考察该矢量周围 10 km 内的其余矢量, 如果存在 8 个或以上其余矢量, 且该矢量分量与这些矢量分量均值之差不超过 1 倍标准差则认为正确匹配, 否则判别为错误匹配。

## 2.4 结合 MOSAiC 浮标数据的矢量精度分析

为验证海冰漂移矢量的精度, 本研究采用了 MOSAiC 浮标的 GPS 定位数据对漂移矢量进行精度验证。MOSAiC 计划对极地海冰进行了全面的观测, 其中包含在北极投放的多种类型浮标, 其定位时间间隔在 10 min—2 h, 定位精度约为 2.5—3.0 m (Grosfeld 等, 2016)。MOSAiC 浮标在影像中的分布展示于图 1 中。

影像提取的漂移矢量与浮标的精度分析流程如下。首先对 SAR 影像提取的海冰漂移矢量按照 WGS 84/NSIDC Sea Ice Polar Stereographic North (EPSG: 3413) 投影系分为  $x$ ,  $y$  两个方向的速度场, 并生成两方向克里金插值场。而后通过浮标 GPS 位置在克里金插值场中提取浮标位置速度矢量。最后将该矢量与真实浮标的漂移矢量进行速度与方向对比。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 特征匹配算子对比分析

图 2 展示了像对 1 中 100 km×100 km 范围内的不同特征匹配算法得到的海冰漂移矢量的分布。HH 与 HV 极化通道结果合并显示, 所有的海冰漂移矢量结果均经过 NNDR 测试。

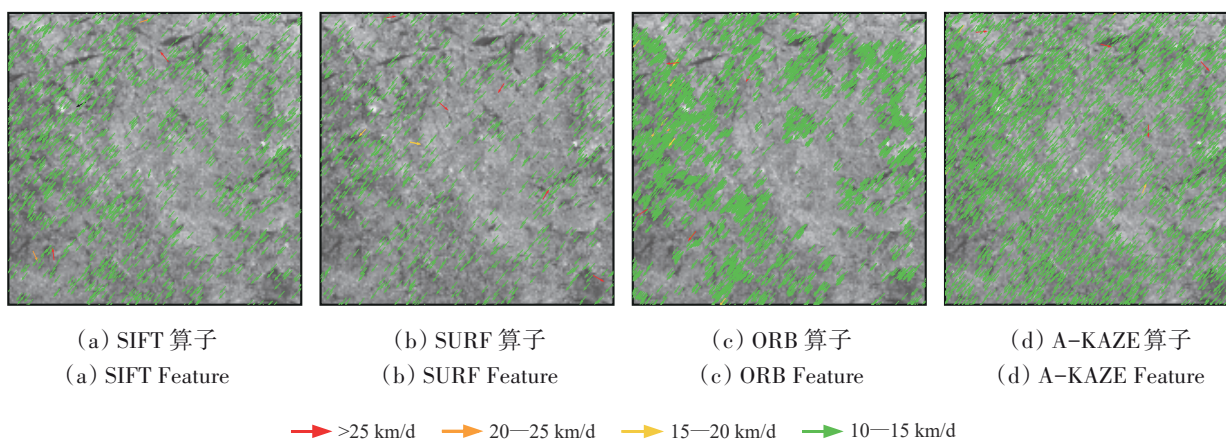


图 2 不同算子提取矢量对比

Fig. 2 Sea ice drift vectors derived with different features

表2展示了不同算子进行影像特征提取后获得的特征点数量和海冰矢量数量，其数量由HH与HV影像合并统计。每副影像匹配中ORB算子的最大保留特征数量设定为100000（Muckenhuber等，2016）。不同特征匹配算子在影像中提取的特征点数量有较大的差异，在像对1和像对2中，SIFT算子可以提取较多特征点，但是得到的矢量数量较少；ORB算子得到的矢量数量最多；A-KAZE算子提取的特征点较少，但相比于SIFT和SURF可以得到更多的漂移矢量。

表2 不同特征匹配算子匹配结果

Table 2 Matching results of different features

像对	算子	主影像特征点数	辅影像特征点数	匹配矢量数量	耗时/s
1	SIFT	199587	197002	17032	15.59
	SURF	142067	142389	10434	12.92
	ORB	200000	200000	40850	15.02
	A-KAZE	143525	141398	37965	17.64
2	SIFT	177312	176828	10252	13.46
	SURF	141065	141474	6369	13.82
	ORB	200000	200000	30089	17.13
	A-KAZE	97056	94528	20577	10.99

A-KAZE算子采用了非线性扩散滤波构建了非线性尺度空间，有效解决了特征损失的问题。从图2中可知，相比另外两种算子，ORB和A-KAZE算子获得了更密集的海冰漂移矢量，但是ORB算子分布更加集中，空洞更大，而A-KAZE算子在空间上更加均匀。由于特征匹配得到矢量非均匀分布，为验证漂移矢量的有效覆盖面积，本文对每一个矢量的起始点向外膨胀直径5 km或10 km的圆形缓冲区，计算所有矢量缓冲区面积之和，重叠的缓冲区只会计算一次。表3展示了矢量覆盖面积与两景影像重叠面积之比，即为覆盖率。

由表3可见，不同特征匹配算子覆盖面积比率差异较大，ORB算子提取的矢量数量最多，但是其有效覆盖面积相比SIFT算子更低，仅与SURF算子接近。A-KAZE算子提取的矢量数量相比ORB较低，但覆盖了最大的空间范围。所以A-KAZE算子相比另外几种算子提取的矢量分布更加均匀，可以得到更大范围内的海冰运动信息，且有足够的漂移矢量信息反映运动情况。

表3 不同特征匹配算子的覆盖率

Table 3 Covering ratio of different features

像对	算子	匹配矢量数量	覆盖率(5 km缓冲区)/%	覆盖率(10 km缓冲区)/%
1	SIFT	17032	70.98	93.59
	SURF	10434	58.44	88.53
	ORB	40850	60.36	84.92
	A-KAZE	37965	84.96	94.52
2	SIFT	10252	54.12	85.21
	SURF	6369	42.39	77.56
	ORB	30089	52.94	77.52
	A-KAZE	20577	70.94	89.35

像对1中A-KAZE算子近似5 km的分辨率覆盖85%的面积，在像对2中达到了70%。当将缓冲区直径扩大为10 km后则分别达到了94.52%和89.35%，几乎可以覆盖两幅影像的所有重叠区域，对比同样以Sentinel-1影像对为数据源，采用模板算法的DTU海冰漂移10 km分辨率级别产品，其在10 km缓冲区直径时仅为65.28%（影像对1）与65.25%（影像对2）。因此本研究提出的基于特征匹配算法的海冰漂移矢量提取算法可以取得更高密度、更高分辨率的海冰漂移矢量。

### 3.2 各极化通道对比分析

考虑到海冰对不同极化的后向散射响应差异，本文只进行相同极化通道的影像的特征匹配。不同极化通道下的海冰漂移矢量数量如表4所示。

表4 不同极化通道海冰漂移矢量数量

Table 4 Numbers of sea ice drift vectors derived with images of different polarizations

像对	算子	HH矢量数量	HV矢量数量
1	SIFT	8371	8661
	SURF	5549	4885
	ORB	20399	20451
	A-KAZE	18169	19796
2	SIFT	4076	6176
	SURF	2837	3532
	ORB	13753	16336
	A-KAZE	6867	13710

从表4中可得到，不同的极化通道影像对得到的海冰漂移矢量数量存在一定的差异，HV极化通道影像提取的海冰漂移矢量数量一般多于HH极化。为考察HH、HV极化通道影像提取的海冰漂

移矢量空间覆盖率, 表5以A-KAZE算子为例统计了HH与HV影像提取矢量的覆盖面积比。

表5 不同极化通道影像的覆盖率

Table 5 Covering ratio of different polarizations

像对	极化	覆盖率(5 km 缓冲区)/%	覆盖率(10 km 缓冲区)/%
1	HH	74.08	91.65
	HV	67.73	82.10
	HH+HV	84.96	94.52
2	HH	45.51	77.13
	HV	61.99	83.35
	HH+HV	70.94	89.35

尽管HH与HV覆盖面积比存在一定差异, 但将HH与HV极化通道矢量合并以后, 5 km缓冲区和10 km缓冲区覆盖率均比单独两个极化通道更大, 说明HH与HV极化通道提取的漂移矢量在覆盖范围上存在互补性。合并两个极化通道提取结果有助于获得更大范围的海冰漂移场。

Sentinel-1 SAR影像中HV极化通道会受到较为严重的热噪声影响, 存在了子条带间后向散射系数跳变。图3展示了像对1中选择了一块以A-KAZE算子提取的跨EW1与EW2条带的100 km×100 km范围内HH与HV极化影像提取的漂移矢量。

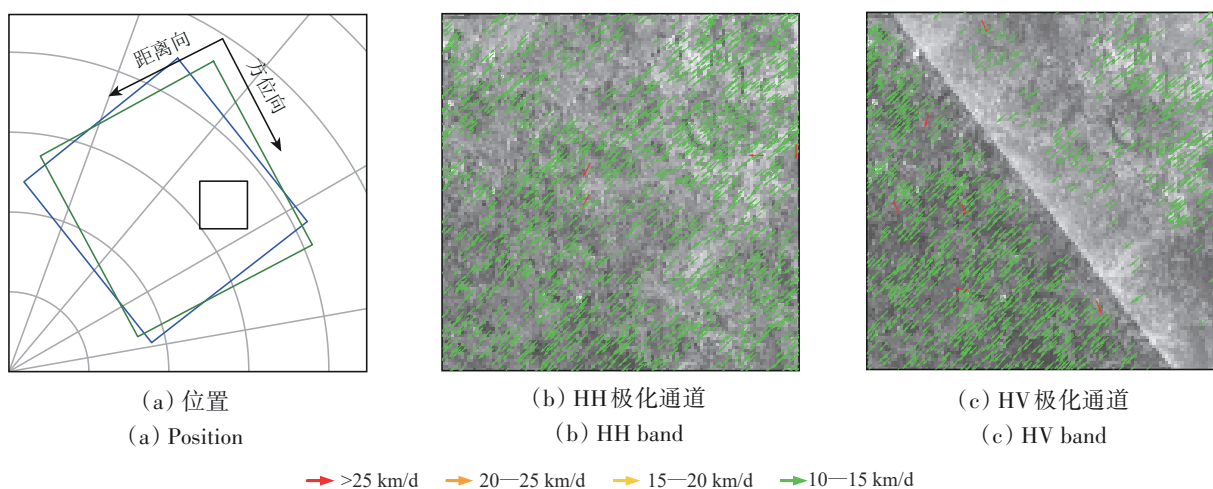


图3 不同极化通道提取海冰漂移矢量

Fig. 3 Sea ice drift vectors derived with different polarizations

尽管本文进行了热噪声条带去除的预处理, HV极化通道影像后向散射系数在EW1与EW2子条带间仍有明显的跳变。在EW1条带边界处则难以提取有效漂移矢量。尽管特征匹配算法对图像亮度具有一定抗性, 但结果表明热噪声条带不仅影响图像的亮度, 也影响了图像的特征算子, 进而影响特征匹配。

### 3.3 错误点滤除算法对比

张明等(2019)提出的置信区间滤除算法和Demchev的邻域矢量对比滤除算法(Demchev等, 2017)均为NNDR测试之后的补充滤除算法。本研究以A-KAZE算子提取的矢量场为例对比了这两种算法以及本文提出的算法在海冰漂移矢量数量、覆盖面积比(5 km直径缓冲区)及计算耗时方面的差异, 展示于表6中。

表6 不同滤除算法对比

Table 6 Comparison of different filters

像对	滤除算法	矢量数量	覆盖率/%	计算耗时/s
1	NNDR	37965	84.96	—
	置信区间	37850	84.74	0.1
	邻域对比	30120	81.26	794.46
	本文算法	37832	84.70	5.09
2	NNDR	20577	70.94	—
	置信区间	19566	65.70	0.06
	邻域对比	16731	65.35	234.97
	本文算法	20321	69.65	13.58

对于像对1, 置信区间算法与本文算法保留了更多的正确矢量, 同时具有相似的空间覆盖率, 计算效率均高于邻域比较滤除算法。在像对2中, 置信区间的算法造成了一定覆盖面积的下降。图4

以像对2为例展示了3种算法滤除结果,为了可视化效果,矢量进行了10%抽稀显示。像对2中经过

NNDR滤除后的偏移分量分布直方图展示在图5中,分为dx, dy方向。

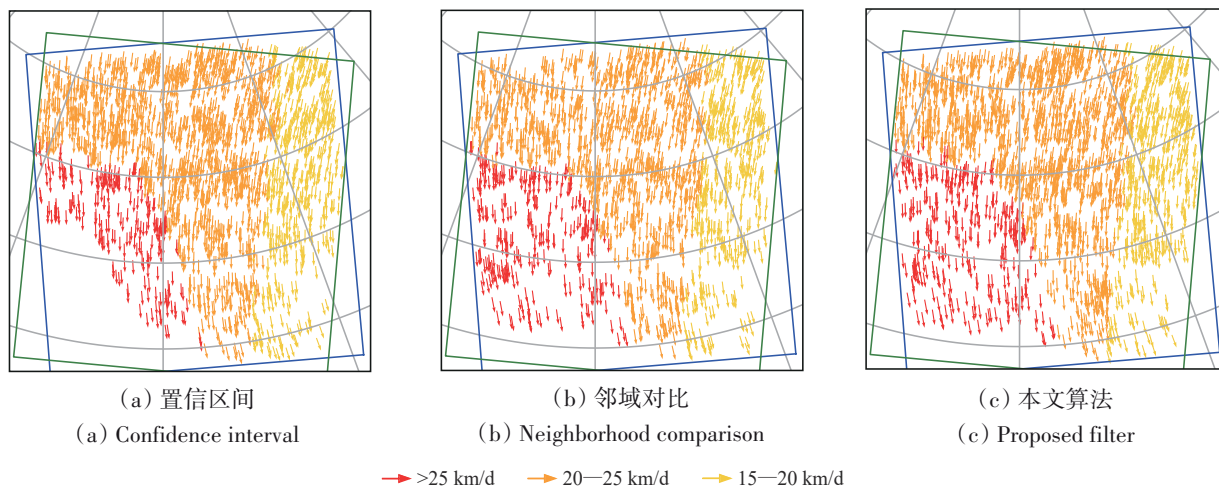


图4 影像对2的不同错误矢量滤除算法结果

Fig. 4 Results of different wrong vectors filters for image pair 2

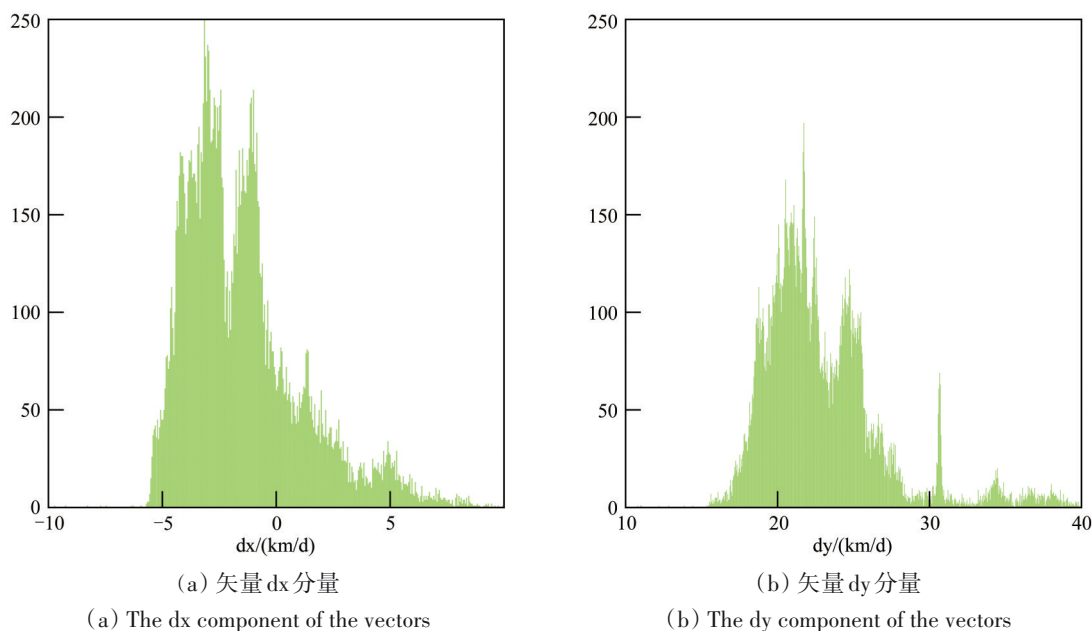


图5 像对2中矢量不同分量的分布直方图

Fig. 5 Histograms of different components of sea ice drift vectors for image pair 2

从图4中可以看出,采用置信区间的滤除算法在影像左下角出现了明显的空缺,这是由于矢量分量的分布不符合正态分布所致。尽管该漂移场仅有少量旋转,其边缘依然被置信区间算法错误地滤除。本文提出的算法利用了矢量分量分布基本符合正态分布的特性,首先以计算速度较快的置信区间算法筛选出正确矢量,其余待定矢量通过计算效率较低的邻域对比方法进一步判断。在较好地保留了正确漂移矢量的同时避免了对所有

矢量进行邻域对比,大幅度地提高了计算效率。

### 3.4 结合 MOSAiC 浮标数据进行精度分析

DTU海冰漂移产品由DTU Space发布,包含两种北极海冰漂移数据产品文件,分别为L4-NRT-OBS单对SAR影像匹配数据与L4-MOSAIC-OBS每日合成数据。NRT产品使用一对Sentinel-1影像对重采样至300 m后通过MCC方法匹配,对比前后两景影像并提取北极海冰漂移的10 km格网数据(Saldo和Hackett, 2022)。

本文以 MOSAiC 浮标 GPS 数据为参考对比了特征匹配算子提取的漂移矢量以及 DTU 海冰漂移产品的速度精度以及方向精度。以像对 1 为例, 结果

展示在图 6 中。不同算子提取的漂移矢量以及 DTU 产品验证误差箱线图展示在图 7 中, HH 与 HV 极化数据合并显示。

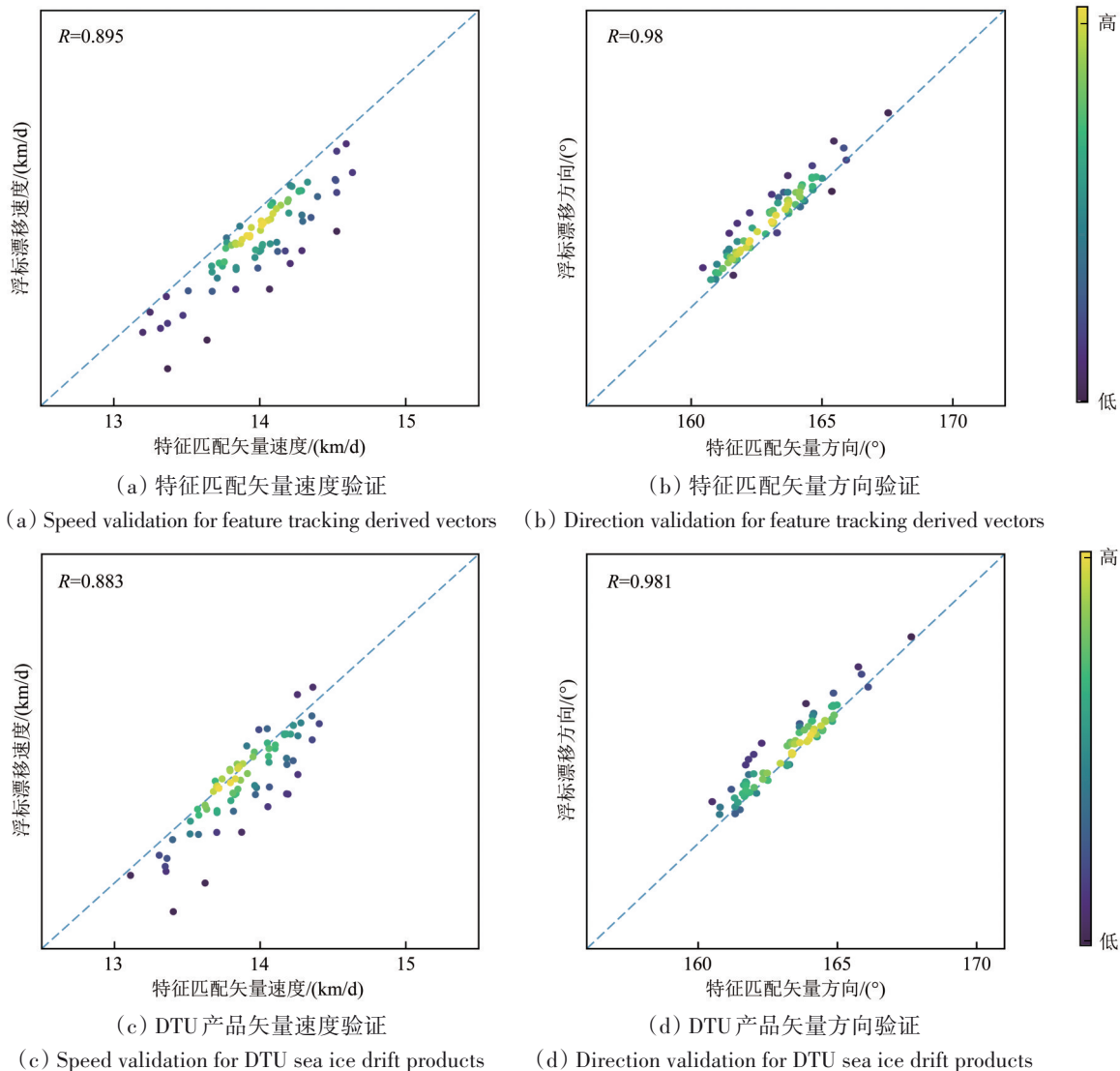
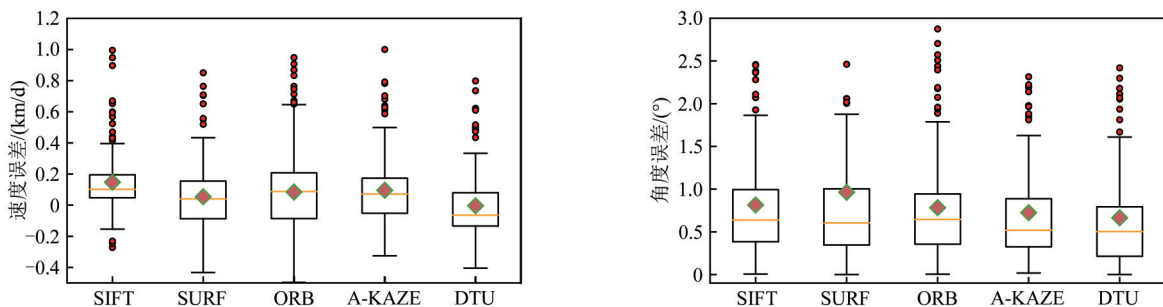


图 6 特征匹配矢量与 DTU 产品的 MOSAiC 浮标验证结果密度图, 以像对 1 为例

Fig. 6 Validation of feature tracking derived vectors and DTU products with MOSAiC buoys, example for image pair 1



(a) Speed validation of feature tracking derived vectors and DTU products to MOSAiC buoys (b) Direction validation of feature tracking derived vectors and DTU products to MOSAiC buoys

图 7 特征匹配矢量与 DTU 产品与 MOSAiC 浮标验证结果

Fig. 7 Feature tracking derived vectors and DTU products validation to MOSAiC buoys



由图6可见,以MOSAiC浮标验证表明本文方法以算子提取的海冰漂移矢量与DTU产品具有较高的一致性。两者与浮标漂移验证得到的相关性基本一致,本研究算法提取矢量漂移速度略高。结合图7,4种特征匹配算子得到的海冰漂移矢量精度差异较小,A-KAZE算子提取的矢量总体精度略高。与DTU产品相比,特征匹配取得的矢量漂移速度稍快,速度误差集中在0—0.2 km/d,而DTU产品速度误差集中与-0.1—0.1 km/d,两者角度误差基本一致。

## 4 结 论

对Sentinel-1 EW模式影像采用A-KAZE特征匹配算法可高效地提取高分辨率高精度海冰漂移矢量,本研究基于特征匹配算法对海冰漂移矢量提取技术进行深入研究,并得到以下结论:

(1) 本文对比了4种常用的特征匹配算子SIFT、SURF、ORB、A-KAZE对Sentinel-1 EW模式影像上进行海冰漂移矢量提取的效果。在计算耗时接近的情况下,A-KAZE算子提取的海冰漂移覆盖率相比于其他3种算子多出15%—30%。相比于10 km分辨率的DTU海冰漂移产品,本研究提出的算法可提高近30%的覆盖率,可以用于生成高分辨率高覆盖率的海冰漂移矢量产品。

(2) Sentinel-1 HV极化影像提取的海冰漂移矢量数量多于HH极化影像,但HV极化影像受到较为严重的条带热噪声影响,在EW1与EW2条带边缘会造成矢量丢失。不同极化通道提取结果在一定程度互补,合并HH与HV极化影像提取结果可提升海冰漂移矢量覆盖范围。

(3) 针对特征匹配算法提取海冰漂移矢量中的错误。本文对比了置信区间滤除法与邻域对比滤除法,前者运算速度快但是需要海冰漂移矢量分量呈正态分布,后者计算速度较慢且容易造成正确漂移矢量丢失。本文结合了两种算法的优势,通过漂移分量基本属于正态分布这一特性快速筛选正确矢量,对于剩余矢量则采取相对耗时的邻域比较算法进行滤除。不仅避免了对所有矢量进行邻域比较的时间消耗,且在尽可能保留正确矢量的同时可快速滤除错误漂移矢量。

(4) 采用MOSAiC浮标定位数据验证本文算法提取漂移矢量结果与DTU海冰漂移产品表明这两类基于Sentinel-1影像提取的海冰漂移矢量场在速

度与方向上都具有很高的准确度,但以A-KAZE特征提取的海冰漂移场具有更广泛的覆盖范围及更高的密度。

以上几点可以说明:利用Sentinel-1影像,结合A-KAZE特征匹配方法,并进行合理的错误匹配剔除,可以有效且快速生成高分辨率的北极海冰漂移场,能为北极地区的环境和气候研究提供精确详实的数据支撑,并为北极航运安全提供数据服务。

## 参考文献(References)

- Alcantarilla P F, Nuevo J and Bartoli A. 2013. Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces//Proceedings of the British Machine Vision Conference. Bristol [DOI: 10.5244/C.27.13]
- Bay H, Ess A, Tuytelaars T and Van Gool L. 2008. Speeded-up robust features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3): 346-359 [DOI: 10.1016/j.cviu.2007.09.014]
- Chen X, Li G, Chen Z Q, Ju Q, Zheng L and Cheng X. 2023. A backscatter coefficient normalization method to incidence angle based on ascending and descending Sentinel-1 SAR imagery at the Greenland. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(9): 2072-2084 (陈晓, 李刚, 陈卓奇, 鞠琦, 郑雷, 程晓. 2023. 基于升降轨 Sentinel-1 影像的格陵兰后向散射系数入射角归一化方法. *遥感学报*, 27(9): 2072-2084) [DOI: 10.11834/jrs.20211243]
- Demchev D, Volkov V, Kazakov E, Alcantarilla P F, Sandven S and Khmeleva V. 2017. Sea ice drift tracking from sequential SAR images using Accelerated-KAZE features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(9): 5174-5184 [DOI: 10.1109/Tgrs.2017.2703084]
- Dybkjaer G. 2018. Medium Resolution Sea Ice Drift Product User Manual. Version 2.0[EB/OL]. [2022-04-17]. [https://osisaf-hl.met.no/sites/osisaf-hl.met.no/files/user\\_manuals/osisaf\\_ss2\\_pum\\_sea-ice-drift-mr\\_v2p0.pdf](https://osisaf-hl.met.no/sites/osisaf-hl.met.no/files/user_manuals/osisaf_ss2_pum_sea-ice-drift-mr_v2p0.pdf)
- Emery W J, Fowler C W, Hawkins J and Preller R H. 1991. Fram Strait satellite image-derived ice motions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C3): 4751-4768 [DOI: 10.1029/90JC02273]
- Ezraty R, Girard-ardhuin F and Piollé J F. 2007b. Sea-Ice Drift in the Central Arctic Estimated from SeaWinds/QuikSCAT Backscatter Maps. User's Manual, Version 2.2. Brest, France, French Research Institute for the Exploitation of the Seas (Ifremer)[EB/OL]. [accessed on 2022-04-17]. <ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/psi-drift/documentation/quikscat.pdf>
- Ezraty R, Girard-ardhuin F, Piollé J F, Kaleschke L and Heygster G. 2007a. Arctic and Antarctic Sea-Ice Concentration and Arctic Sea Ice Drift Estimated from Special Sensor Microwave Imager Data.

- User's Manual, Version 2.1. Brest, France, French Research Institute for the Exploitation of the Seas (Ifremer)[EB/OL]. [accessed on 2022-04-17]. <ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/psidrift/documentation/ssmi.pdf>
- Grosfeld K, Treffeisen R, Asseng J, Bartsch A, Bräuer B, Fritsch B, Gerdes R, Hendricks S, Hiller W, Heygster G, Krumpen T, Lemke P, Melsheimer C, Nicolaus M, Ricker R and Weigelt M. 2016. Online sea-ice knowledge and data platform <[www.meereisportal.de](http://www.meereisportal.de)>. *Polarforschung*, 85(2): 143-155 [DOI: 10.2312/polfor.2016.011]
- Heil P, Fowler C W, Maslanik J A, Emery W J and Allison I. 2001. A comparison of East Antarctic sea-ice motion derived using drifting buoys and remote sensing. *Annals of Glaciology*, 33: 139-144 [DOI: 10.3189/172756401781818374]
- Ju Q, Li G, Li C Y, Feng X M, Chen X, Yang Z B, Chen Z Q. 2024. Time-series Surface Velocity Extraction of Petermann Glacier based on Sentinel-1 Pixel Offset-tracking and Iterative SVD. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(6): 1453-1464 (鞠琦, 李刚, 李超越, 冯小蔓, 陈晓, 杨治斌, 陈卓奇. 2024. 基于 Sentinel-1 影像追踪与迭代 SVD 技术提取格陵兰 Petermann 冰川流速时序. *遥感学报*, 28(6): 1453-1464) [DOI: 10.11834/jrs.20222031]
- Karvonen J, Similä M and Lehtiranta J. 2007. SAR-based estimation of the baltic sea ice motion//2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona: IEEE: 2605-2608 [DOI: 10.1109/Igarss.2007.4423378]
- Komarov A and Barber D. 2012. Detection of sea ice motion from co-and cross-polarization Radarsat-2 images//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich: IEEE: 3277-3280 [DOI: 10.1109/Igarss.2012.6350604]
- Korosov A and Rampal P. 2017. A combination of feature tracking and pattern matching with optimal parametrization for sea ice drift retrieval from SAR data. *Remote Sensing*, 9(3): 258 [DOI: 10.3390/rs9030258]
- Lavergne T. 2016. Low Resolution Sea Ice Drift. Product User's Manual. Version 1.8[EB/OL]. [2022-04-17]. [https://osisaf-hl.met.no/sites/osisaf-hl.met.no/files/user\\_manuals/osisaf\\_cdop2\\_ss2\\_pum\\_sea-ice-drift-lr\\_v1p8.pdf](https://osisaf-hl.met.no/sites/osisaf-hl.met.no/files/user_manuals/osisaf_cdop2_ss2_pum_sea-ice-drift-lr_v1p8.pdf)
- Liu A K, Zhao Y H and Wu S Y. 1999. Arctic sea ice drift from wavelet analysis of NSCAT and special sensor microwave imager data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C5): 11529-11538 [DOI: 10.1029/1998jc900115]
- Lowe D G. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2): 91-110 [DOI: 10.1023/B:Visi.0000029664.99615.94]
- Muckenhuber S, Korosov A A and Sandven S. 2016. Open-source feature-tracking algorithm for sea ice drift retrieval from Sentinel-1 SAR imagery. *The Cryosphere*, 10(2): 913-925 [DOI: 10.5194/tc-10-913-2016]
- Muja M and Lowe D G. 2009. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration. *Visapp 2009: Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, Vol 1: 331-340
- Ninnis R M, Emery W J and Collins M J. 1986. Automated extraction of pack ice motion from advanced very high resolution radiometer imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C9): 10725-10734 [DOI: 10.1029/JC091iC09p10725]
- Rublee E, Rabaud V, Konolige K and Bradski G. 2011. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF//2011 International Conference on Computer Vision. Barcelona: IEEE: 2564-2571 [DOI: 10.1109/iccv.2011.6126544]
- Saldo R and Hackett B. 2022. Product User Manual for Global High Resolution SAR Sea Ice Drift SEAICE\_GLO\_SEAICE\_L4\_NRT\_OBSERVATIONS\_011\_006. Issue: 2.13. EU Copernicus Marine Service.]. <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SI-PUM-011-006.pdf>[2024-06-11]
- Stroeve J C, Serreze M C, Holland M M, Kay J E, Malanik J and Barrett A P. 2012. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis. *Climatic Change*, 110(3/4): 1005-1027 [DOI: 10.1007/s10584-011-0101-1]
- Thomas M, Geiger C A and Kambhamettu C. 2008. High resolution (400 m) motion characterization of sea ice using ERS-1 SAR imagery. *Cold Regions Science and Technology*, 52(2): 207-223 [DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.06.006]
- Thomas M, Kambhamettu C and Geiger C A. 2011. Motion tracking of discontinuous sea ice. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(12): 5064-5079 [DOI: 10.1109/Tgrs.2011.2158005]
- Tschudi M, Meier W N, Stewart J S, Fowler C and Maslanik J. 2019. Polar Pathfinder Daily 25 km EASE-Grid Sea Ice Motion Vectors. Version 4[EB/OL]. [2022-04-17]. <https://doi.org/10.5067/INAWU-WO7QH7B>
- Wang J K. 2019. Research on Sea Ice Drift Detection Technology Based on Combination of Feature Tracking and Pattern Matching. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology (王军凯. 2019. 基于特征跟踪和模式匹配结合算法的海冰漂移检测技术研究. 包头: 内蒙古科技大学) [DOI: 10.27724/d.cnki.gnmkg.2019.000187]
- Wang X, Chen R T, Li C, Chen Z Q, Hui F M and Cheng X. 2022. An intercomparison of satellite derived arctic sea ice motion products. *Remote Sensing*, 14(5): 1261 [DOI: 10.3390/rs14051261]
- Zhang M, Wang J K, Lü X Q, Zhang X, Li J, Liu G W and Zhang T. 2019. Detection of sea-ice drift based on different polarization data. *Laser and Optoelectronics Progress*, 56(10): 101008 (张明, 王军凯, 吕晓琪, 张晰, 李菁, 刘根旺, 张婷. 2019. 结合不同极化数据的海冰漂移检测. *激光与光电子学进展*, 56(10): 101008) [DOI: 10.3788/LOP56.101008]

# Sea ice drift vectors extraction based on feature tracking to Sentinel-1 images

LI Chaoyue, LI Gang, WANG Xue., JU Qi, CHEN Zhuoqi

*School of Geospatial Engineering and Science, Sun Yat-sen University, Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China*

**Abstract:** Sea ice drift is an important natural phenomenon in the Arctic, and it is important for climate research and human activities such as shipping security in the Arctic area. At present, sea ice drift products are often derived with space-borne radiometers and scatterometers with the template matching algorithm and suffer from low resolution and low accuracy. Sentinel-1 synthetic aperture radar imagery has high spatial resolution and holds great potential for deriving sea ice drift fields with high resolution and high accuracy by applying feature matching algorithms.

This research compared sea ice drift results derived from four popular features including SIFT, SURF, ORB, and A-KAZE by using two pairs of Sentinel-1 Arctic sea ice SAR images. The similarities and differences between the performances of HH and HV imagery were also analyzed in terms of spatial distribution and coverage of the derived sea ice drift vectors. We proposed a filtering method combined with two published methods to identify incorrect vectors after the NNDR test with high calculation efficiency and accuracy. Finally, we evaluated the accuracy of sea ice drift vectors by comparing our derived results and DTU sea ice products with GPS data of MOSAiC buoys.

Employing A-KAZE features to Sentinel-1 EW imagery can effectively derive sea ice drift fields with high spatial resolution and coverage rates. A-KAZE feature performs better than SIFT, SURF, and ORB in terms of spatial distribution and the number of vectors. Combining the vectors obtained from HH and HV polarization imagery can effectively extend the coverage of sea ice motion fields. The incorrect vector filter checks the similarity of a vector to its neighbors only if its speed or direction exceeds two times the standard deviation. It improves computational efficiency and retains more correct vectors than the two traditional methods. Validation with data of MOSAiC buoys found that the average speed error of sea ice drift vectors extracted using the proposed A-KAZE-based method was less than 0.2 km/d, and the average direction error was less than 1°. These products share a high consistency with DTU sea ice drift products obtained through employing Sentinel-1 SAR imagery but applying the template matching algorithm. However, our proposed methods presented a higher spatial coverage.

This study demonstrates the potential of deriving sea ice drift vectors by applying dual-polarized Sentinel-1 SAR imagery and A-KAZE features. This approach can effectively and quickly generate sea ice drift vector fields of high spatial resolution with high spatial covering rates and high accuracy, which can serve as an accurate data source for climate research and maritime security in the Arctic.

**Key words:** remote sensing, Arctic, sea ice drift, image feature tracking, A-KAZE, Sentinel-1

**Supported by** National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFC1509104); National Natural Science Foundation of China (No. 41901384); Guangzhou Science and Technology Program (No. 202102020337); Innovation Group Project of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai) (No. 311021008)