

特征跟踪与模式匹配结合算法在海冰 漂移检测中的应用研究

王军凯¹, 吕晓琪^{1,2*}, 张明¹, 李菁¹, 孟娴静¹, 刘根旺³

¹内蒙古科技大学信息工程学院内蒙古自治区模式识别与智能图像处理重点实验室, 内蒙古 包头 014010;

²内蒙古工业大学, 内蒙古 呼和浩特 010051;

³自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061

摘要 基于 Sentinel-1 遥感数据, 采用有效的预处理方法, 得到较为准确的数据集, 并提出一种基于三角剖分的特征跟踪与模式匹配结合算法, 通过建立三角形网络并有效结合两者的优势, 既提高了算法效率, 又使海冰漂移矢量具有更均匀的空间分布。同时, 研究了 HH 极化及其数据强噪声区域下该算法的适用性。不同极化数据的实验结果显示, 本文算法所得海冰漂移矢量不仅有更高的覆盖率, 而且均方根误差降低了约 10%, 提高了检测精度。面对噪声稳健性的增强, 即使在条带噪声的干扰下, 检测准确率仍可高达 98%, 可见该算法对两种极化方式具有普适性, 从而证明该方法能够有效地应用于海冰漂移监测。

关键词 图像处理; 海冰漂移; 合成孔径雷达; 三角剖分; 特征跟踪; 模式匹配

中图分类号 TP751.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.161005

Combined Feature-Tracking and Pattern-Matching Algorithm for Sea-Ice Drift Detection

Wang Junkai¹, Lü Xiaoqi^{1,2*}, Zhang Ming¹, Li Jing¹, Meng Xianjing¹, Liu Genwang³

¹Inner Mongolia Key Laboratory of Pattern Recognition and Intelligent Image Processing, School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China;

²Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China;

³First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao, Shandong 266061, China

Abstract We introduced an effective preprocessing method based on Sentinel-1 remote-sensing data to obtain a more accurate dataset and proposed a triangulation-based feature-tracking and pattern-matching algorithm. By establishing a triangular network, the advantages of the two algorithms were effectively combined, which not only improved the efficiency but also enhanced the spatial-distribution uniformity of the sea-ice drift vectors. Additionally, this study investigated the applicability of the algorithm for strong-noise areas of like-polarized (HH) and cross-polarized (HV) data. The experimental results show that sea-ice drift vectors obtained using this algorithm exhibit a high coverage and reduce the root mean square error by $\sim 10\%$, thereby improving the detection accuracy and robustness against noise. Furthermore, the detection accuracy remains as high as 98%, even in the presence of interference by strip noise. These results demonstrate the effectiveness of this method for effectively monitoring sea-ice drift.

Key words image processing; sea-ice drift; synthetic aperture radar; triangulation; feature tracking; pattern matching

OCIS codes 100.2960; 100.2980; 280.6730

收稿日期: 2019-01-14; 修回日期: 2019-02-28; 录用日期: 2019-03-22

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0600102)、国家自然科学基金(61771266)、内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY18150)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2014G31)

* E-mail: lxiaoqi@imut.edu.cn

1 引言

复杂多变的海冰是极区最重要的自然现象之一,海冰及冰山在外部驱动力的作用下会发生漂移,直接影响极区船只的安全航行。北极海冰范围持续萎缩,大大提升了北极航道开通的可能性^[1]。北极由于其丰富的石油、天然气资源,备受各国瞩目^[2],在北极开展海洋运输以及近海活动已是当今的趋势^[3]。然而,我国在极区的研究资料有限,自2014年“雪龙”号的遇难事件以来,我国也在加强对极区海洋环境的监测^[4]。因此,提高对极区海冰运动的分析,不仅有重要的战略意义,也对我国乃至北半球的气候分析大有裨益^[5]。

极区由于其恶劣的环境条件,极大地限制了实测资料的获取,而早期的浮标观测和极地科考站都有其局限性,仅能观测小面积海冰漂移。然而,为了能够有效地观测海冰运动,模拟和预测海冰漂移,必须在一定的时空尺度上获取海冰的运动特征。随着卫星遥感技术的发展,这一问题得到有效地解决,目前最常用的卫星传感器包括微波辐射计(AVHRR)^[6]、散射计(NSCAT)^[7]、微波成像仪(SSM/I)^[7-8]、合成孔径雷达(SAR)^[9-10]等。其中,微波辐射计和散射计由于其分辨率的限制,常用于大范围的海冰漂移监测,无法得到高分辨率、重点区域的海冰漂移产品。合成孔径雷达具有全天候、多视角及对地物有一定的穿透能力等优点,近年来越来越多的国内外学者将其应用于海冰漂移检测。本文旨在选用 SAR 图像从空间上检测海冰的漂移,并对其进行量化。

本文提出一种基于三角剖分的特征跟踪与模式匹配结合算法,并将其有效地应用于高分辨率 SAR 图像海冰漂移检测。利用特征跟踪产生粗定位,通过建立三角网络,不仅为模式匹配提供搜索区域,而且可以自适应地确定模板窗口,较好地提高模式匹配算法的计算效率。该算法不仅能提高模式匹配

的检测速度,而且不易受尺度变换、光照和角度的影响,其检测结果对图像噪声也有较高的稳健性,能进一步提高检测精度和均匀度,弥补了传统的特征跟踪算法在局部区域特征点缺失的不足。

2 材料与方法

2.1 卫星数据及研究区域介绍

Sentinel-1 卫星是欧洲航天局 2014 年 4 月发射的对地观测卫星,其分辨率最高达 5 m,幅宽达到 400 km,支持双极化(HH+HV、VV+VH,其中 H 表示水平,V 表示垂直),与其他卫星相比,Sentinel-1 卫星数据不仅具有超高的辐射分辨率(1 dB/3 σ ,3 σ 表示辐射值的误差),有效地提升了雷达图像参数反演的精度,而且具有优良的覆盖和重访性能,能够在一天内覆盖整个欧洲和加拿大区域及周边海域^[11],这就为海冰漂移的实时检测提供了有力支持。

选用的 Sentinel-1 数据为超宽幅(EW)模式的地距影像(GRD),其为中等分辨率(40 m \times 40 m),该模式主要用于海上、冰川、极地等需要大范围覆盖和短重访周期的区域。相对于单视复数影像(SLC),GRD 数据有效地消除了热噪声并在一定程度上提高了图像质量^[12]。选择的图像对位于波弗特海域,覆盖区域如图 1 所示,其中,红色区域表示 2017 年 10 月 10 日的数据,绿色区域为 2017 年 10 月 12 日数据,虚线为本文截取的感兴趣区域,卫星数据如表 1 所示。

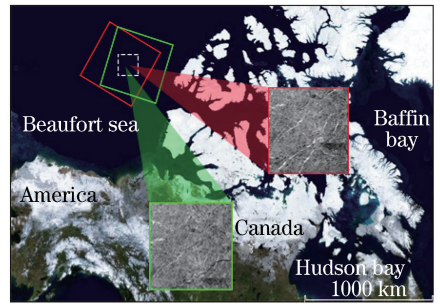


图 1 地理信息图

Fig. 1 Geographic information map

表 1 卫星数据表

Table 1 Satellite data sheet

Satellite	Imaging time	Latitude	Longitude	Polarisation	Incident angle /($^{\circ}$)
Sentinel-1	2017-10-10T17:11:42	From 79 $^{\circ}$ 03'N to 81 $^{\circ}$ 76'N	From 119 $^{\circ}$ 71'W to 134 $^{\circ}$ 42'W	HH+HV	19.14 to 46.38

2.2 算法介绍

2.2.1 Sentinel-1 数据预处理

对于每个像素 p ,Sentinel-1 数据 Level-1 产品的校准查找表(LUT)会提供一个数字量化值 D_p^N 和一个归一化系数 A_p ,根据该归一化系数 A_p ,本文

对图像进行了辐射校准,其定量关系为平方级^[13],校准公式为

$$v_{\text{value}}(p) = \frac{|D_p^N|^2}{A_p^2}. \quad (1)$$

针对 Sentinel-1 图像存在的相干斑噪声,进行

滤波处理。采用 5×5 的自适应滤波进行平滑处理, 既在一定程度上抑制了斑点噪声, 又保留了图像的细节信息, 有效地提高了特征点检测的精度。

2.2.2 算法流程

基于特征跟踪和模式匹配相结合的算法, 流程如图 2 所示。

1) 选择特征跟踪算法, 对时间跨度为 t 的两幅图像进行初步检测。以尺度不变特征变换匹配 (SIFT) 算法为例, 使用高斯差分算子检测极值点, 其计算公式为

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)] \cdot I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma), \quad (2)$$

式中: k 为相邻两层尺度相差的比例因子; 变尺度高斯函数 $G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \times \exp\left[-\frac{(x-m/2)^2 + (y-n/2)^2}{2\sigma^2}\right]$, 其中 m, n 为高斯模板的维度; $L(x, y, \sigma)$ 为图像的高斯尺度空间, 其中 (x, y) 为图像的像素位置, σ 为尺度空间因子, 其值越小表明图像的平滑度相对较小; $I(x, y)$ 为原图像。将每一个像素都与相邻点在图像域和尺度域进行

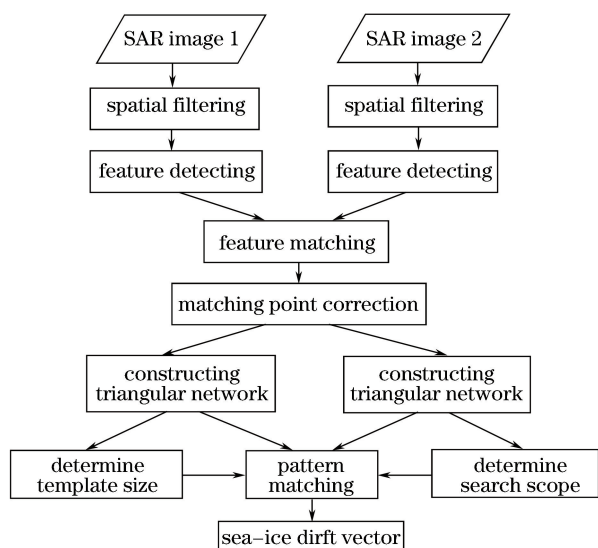


图 2 流程图

Fig. 2 Flow chart

比较, 这样在二维空间和尺度空间都能检测极值点, 且该方法对不同角度的卫星图像都有较高的适应性。同时, 算法利用特征点邻域像素的梯度方向分布特征确定方向参数, 使算子具备方向不变性。梯度的模值和方向的计算公式为

$$z(x, y) = \sqrt{[L(x+1, y) - L(x-1, y)]^2 + [L(x, y+1) - L(x, y-1)]^2}, \quad (3)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\{[L(x, y+1) - L(x, y-1)]/[L(x+1, y) - L(x-1, y)]\}. \quad (4)$$

然而, 主方向的确定过于依赖局部区域像素的梯度方向, 使得找到的主方向不准确, 而特征向量提取以及匹配都严重依赖于主方向, 即使微小的偏差角度也会造成特征匹配的较大误差, 从而造成不可避免的误匹配。为了提高后续的检测效率及精度, 本文对特征跟踪结果进行误匹配剔除。Thomas 等^[14]的离群点剔除方法为数据正则化提供了一种有效的手段; 同时还可利用一个中值滤波器剔除特征跟踪的异常矢量。

2) 针对剔除后的离散特征点, 采用模式匹配算法, 得到更均匀、规则的漂移矢量集。具体步骤为:

(1) 基于特征点的位置构造三角网络。为了得到最优三角网络, 选择 Bowyer-Watson 算法进行二维 delaunay 三角剖分。由于 delaunay 三角剖分具有空圆特性和最大化最小角特性, 实验得到的三角网络不仅具有唯一性, 而且每一个网格都是趋于规则的, 即相对于其他三角网络构造法, 在 delaunay 三角网络中对每一个三角形的最小角进行升序排列得到的数值最大, 这为模式匹配提供了更稳定的区

域选择。图 3 所示为算法示意图, IMG_1 和 IMG_2 分别为参考图像和待匹配图像, 参考图像中的点 A_1 、 B_1 、 C_1 分别对应待匹配图像中的 A_2 、 B_2 、 C_2 , W 为搜索窗口, 点 P 为插入的预测点, 通过在搜索窗口里进行模式匹配确定匹配点 P' 。

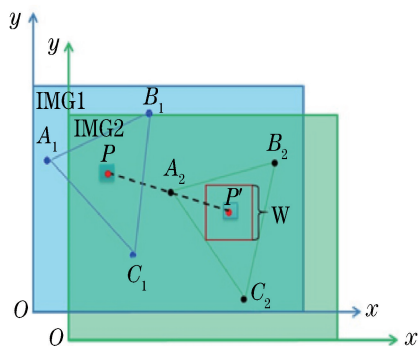


图 3 算法示意图

Fig. 3 Diagram of algorithm

(2) 利用三角网络对特征点进行划分。为了有效逼近准确位置且减少不必要的运算, 计算每一个三角形的面积, 选择合适的阈值滤除高密度的

区域。

本文选用最大互相关(MCC)算法,确定最佳匹配区域。MCC算法的主要思想是匹配相关系数的计算,可表示为

$$\rho(x, y) = \frac{\text{cov}[f(x, y), g(x, y)]}{\sqrt{D_{x, y} D}}, \quad (5)$$

式中: cov 为两者的协方差; $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 分别为参考图像和待匹配图像的计算模板; $D_{x, y}$ 为 $f(x, y)$ 的方差; D 为 $g(x, y)$ 的方差。由于所选择的卫星图像精度相对较高,因此对于样本窗口的选择需要遵循两方面的原则:样本窗口不能过大,以保证模板内海冰运动均一;样本窗口不能过小,以保证模板内有足够多的特征,并提高区分度。

海冰漂移的速度 v 可以表示为

$$v = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \times 40 / (3600 \times t), \quad (6)$$

式中: d_x 和 d_y 分别为海冰在水平和垂直方向的偏移分量(以像素为单位),分辨率为40 m, $d_x = x_2 - x_1$, $d_y = y_2 - y_1$; (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 分别为时刻 t_1 和 t_2 的目标在两景影像中的位置; t 为监测海冰漂移的时间间隔 $t = t_2 - t_1$ 。

3 实验与结果讨论

3.1 参数调整

特征跟踪算法剔除后有142个特征向量和249个剖分三角形,但部分三角区域较小,进行模式匹配有两点不足:1)匹配模板相对较小,限制了MCC算法的匹配精度;2)计算得到的漂移矢量与初始的漂移矢量临近,检测结果冗余。为了提高计算效率,选择面积大于300 pixel的区域进行模式匹配,同时为了保证算法的准确性与精度,还设置阈值为0.95的相似度,滤除匹配系数相对较低的矢量,在129组运算中,准确匹配的有126组,准确率高达98%。

3.2 实验

对HH极化和HV极化的Sentinel-1图像分别进行海冰漂移检测,如图4所示,其中HH极化的特征跟踪结果为164组,经过误匹配剔除后为142组,最终的漂移矢量为268个,而HV极化下的特征结果为234组,经过误匹配剔除后为215组,最终的漂移矢量为367个,约为HH极化的1.37倍。其结果与Komarov等^[15]对于Radarsat-2 ScanSAR的结论相吻合,相比于HH极化数据,HV极化数据在海冰漂移检测上具有更加可靠的检测效率,本文算法对两种极化方式的检测结果

有明显的提高;相比于Muckenhuber等^[16]的结论(HV极化数据提供的海冰漂移矢量大约是HH极化数据的4倍),本文算法对HH极化数据的检测结果提升更明显,可见该算法适用性不受极化方式限制。

从主观角度评价,无论是HH极化还是HV极化下,特征跟踪的结果存在明显的信息缺失,而本文算法很好地弥补了这些缺失,有效地提高了海冰漂移检测的空间覆盖率。

本文的另一个目的是提高计算效率,特征跟踪的用时约为5.04 s,模式匹配的用时约为9.61 s,共用时14.65 s,而单独使用模式匹配算法,选取10个分布均匀的海冰样本,用时为125.34 s,算法时间缩短了约88%,为海冰漂移检测的实时性研究提供了有力的保障。

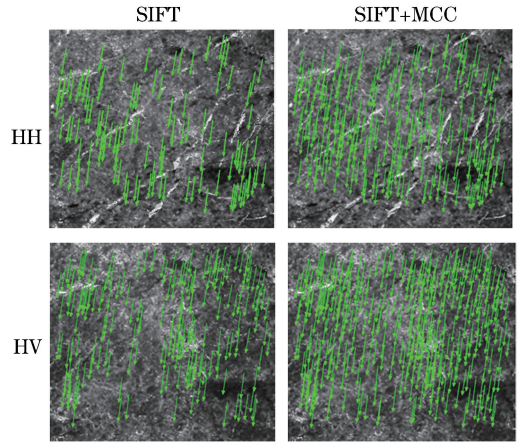


图4 海冰漂移矢量图

Fig. 4 Sea-ice drift vectors

3.3 结果讨论

为了验证本文测出海冰漂移速度的准确性,根据参考图像和待匹配图像的时间信息,选择相同时间对应的浮标数据,使用国际北极浮标计划(IABP)的浮标数据集进行标定和验证。通过浮标的经纬信息,确定其速度,与本文的海冰漂移结果相比较,并计算误差。由于浮标数量有限,本文针对感兴趣区域寻找最近的浮标(表2)。

将提取的海冰漂移速度用散点图的形式表示。图5为SIFT算法与本文算法的海冰漂移速度散点图,可以看出本文算法除了有少数小于 $0.080 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,大部分都在 $0.080 \sim 0.085 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,与浮标速度相一致。本文又比较了两种算法的均方根误差(RMSE),其中SIFT算法的RMSE为0.0036,本文算法的RMSE为0.0031。结果表明,本文算法具有较好的稳健性和较高的检测精度。

表 2 浮标信息
Table 2 Buoy information

Buoy ID	Start time	End time	Longitude and latitude (start)	Longitude and latitude (end)	Velocity of buoy / ($m \cdot s^{-1}$)
900108	2017-10-10T 17:00:00	2017-10-12T 17:00:00	80°91'N, 136°16'W	80°79'N, 136°45'W	0.0833

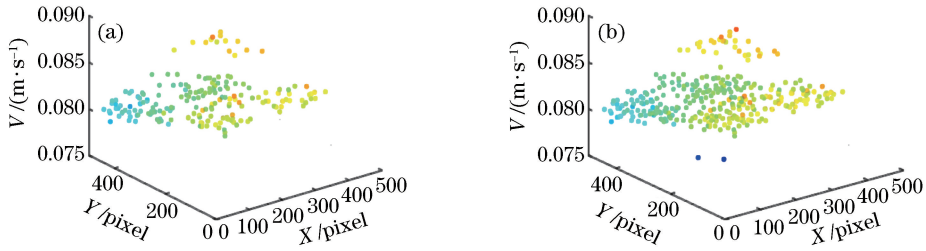


图 5 海冰漂移速度散点图。(a) SIFT; (b) SIFT+MCC
Fig. 5 Scatter diagrams of sea-ice drift speed. (a) SIFT; (b) SIFT+MCC

从客观角度评价,通过盒状图对本文结果进行分析,如图 6 所示。本文算法的离群值明显降低,基本控制在 40 pixel 内,其中 HH 极化的降低效果相对更好,箱体明显减小,漂移矢量分布更加均匀,而下 4 分位数和平均值的略微提高并非与实验目的相违背,本文的参数设置也在刻意避免矢量的相互重合,从而提高了海冰漂移结果的可观性。

通过 Voronoi 图比较特征点的空间密度,如图 7 所示。颜色映射带由蓝到红分别表示由小到大

的区域块,图 7(a)和 (c)分别显示了 SIFT 算法在 HH、HV 极化下的特征跟踪结果的空间分布,而图 7(b)、7(d)分别显示了本文算法的空间分布。可以明显看出对于两种极化方式,本文算法的检测结果具有更好的空间分布,仅在边缘区域存在较大缺失,其原因为目标区域海冰在单位时间跨度内,已经漂离待检测图像的区域。对于大部分区域,本文算法提供了更高的空间覆盖率,即更完善的漂移数据集。

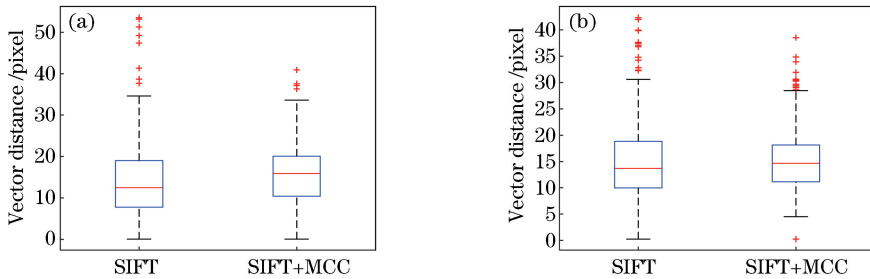


图 6 矢量距离盒状图。(a) HH 极化; (b) HV 极化
Fig. 6 Box charts of vector distance. (a) HH polarization; (b) HV polarization

4 结 论

基于三角网络,提出一种特征跟踪和模式匹配相结合的新算法。在双极化 Sentinel-1 图像的海冰漂移检测应用中,本文算法表现出较高的空间覆盖率和较好的均匀性,相比模式匹配算法,算法时间降低了约 88%,有效提高了检测效率。本文算法的优越性也在一定程度上依赖于预处理,其中辐射校准、热噪声处理以及利用自适应滤波器降低相干斑噪声对图像的干扰,在一定程度上提高了特征识别的效率。为了提高海冰漂移结果

的准确率,没有直接在特征跟踪结果上进行模式匹配,而是采用有效的剔除算法,对离群点进行剔除,降低了误匹配率。

通过建立 delaunay 三角网络将两种算法进行结合,有以下优势:

- 1) 相较于简单的插值,小面积网格的滤除,使模式匹配结果更加均匀;
- 2) delaunay 三角网络具有唯一性和规则性,为模式匹配提供了稳定可靠的搜索空间;
- 3) 利用网格区域大小自适应地确定模式匹配的样本窗口与搜索范围,提高了算法的稳健性。

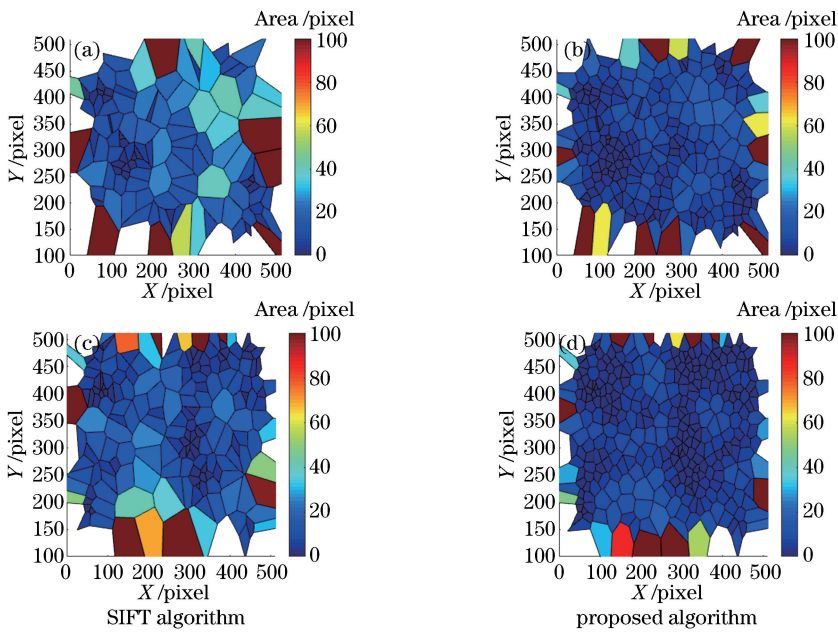


图 7 空间密度图。(a)(b) HH 极化；(c)(d) HV 极化

Fig. 7 Spatial density diagrams. (a)(b) HH polarization; (c)(d) HV polarization

本文算法对于 HH 极化和 HV 极化都有良好的检测效果,其检测结果也与浮标数据保持较高一致性,相对于传统特征跟踪方法,其误差更小,对噪声稳健性更高,可以有效地应用于海冰漂移检测的定量分析。

参 考 文 献

- [1] Parkinson C L. Global sea ice coverage from satellite data: annual cycle and 35-Yr trends[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(24): 9377-9382.
- [2] Meier W N, Hovelsrud G K, van Oort B E H, *et al.* Arctic sea ice in transformation: a review of recent observed changes and impacts on biology and human activity[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(3): 185-217.
- [3] Humpert M, Raspotnik A. The future of Arctic shipping along the transpolar sea route[J]. *Arctic Yearbook*, 2012, 2012(1): 281-307.
- [4] Sun H Q, Li C H, Zhang Z G. Study on the polar sea ice drift based on remote sensing image analysis[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 34(1): 10-14.
孙鹤泉, 李春花, 张志刚. 基于遥感图像分析的极区海冰漂移研究[J]. *海洋技术学报*, 2015, 34(1): 10-14.
- [5] Wu B Y, Handorf D, Dethloff K, *et al.* Winter weather patterns over northern Eurasia and Arctic sea ice loss[J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141

(11): 3786-3800.

- [6] Barth A, Canter M, van Schaeybroeck B, *et al.* Assimilation of sea surface temperature, sea ice concentration and sea ice drift in a model of the Southern Ocean[J]. *Ocean Modelling*, 2015, 93: 22-39.
- [7] Zhao Y H, Liu A K, Long D G. Validation of sea ice motion from QuikSCAT with those from SSM/I and buoy[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(6): 1241-1246.
- [8] Girard-Ardhuin F, Ezraty R. Enhanced Arctic sea ice drift estimation merging radiometer and scatterometer data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(7): 2639-2648.
- [9] Yu J, Yang Y, Liu A K, *et al.* Analysis of sea ice motion and deformation in the marginal ice zone of the Bering Sea using SAR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(14): 3603-3611.
- [10] Linow S, Hollands T, Dierking W. An assessment of the reliability of sea-ice motion and deformation retrieval using SAR images[J]. *Annals of Glaciology*, 2015, 56(69): 229-234.
- [11] Li C S, Wang W J, Wang P B, *et al.* Current situation and development trends of spaceborne SAR technology[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(1): 229-240.
李春升, 王伟杰, 王鹏波, 等. 星载 SAR 技术的现状

- 与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 229-240.
- [12] Yang K, Yang J B, Jiang B R. Sentinel-1 satellite overview [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, (2): 24-27.
杨魁, 杨建兵, 江冰茹. Sentinel-1 卫星综述[J]. 城市勘测, 2015, (2): 24-27.
- [13] Gao Y G, Lin Y Q. Radiometric calibration model and error analysis of SAR image[J]. Modern Radar, 2010, 32(6): 39-42.
高彦贵, 林幼权. SAR 图像辐射校准模型与误差分析[J]. 现代雷达, 2010, 32(6): 39-42.
- [14] Thomas M, Geiger C A, Kambhamettu C. High resolution (400 m) motion characterization of sea ice using ERS-1 SAR imagery[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 52(2): 207-223.
- [15] Komarov A, Barber D. Detection of sea ice motion from co- and cross-polarization RADARSAT-2 images[C]//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 22-27, 2012, Munich, Germany. New York: IEEE, 2012: 3277-3280.
- [16] Muckenhuber S, Korosov A A, Sandven S. Open-source feature-tracking algorithm for sea ice drift retrieval from Sentinel-1 SAR imagery [J]. The Cryosphere, 2016, 10(2): 913-925.