

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

鞠琦, 李刚, 李超越, 冯小蔓, 陈晓, 杨治斌, 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: 格陵兰冰盖流速监测对定量估算冰盖物质损失以及研究冰盖对全球变暖的响应具有重要意义。利用 SAR 影像强度信息进行偏移量追踪是目前冰川流速监测的主要方法。冰川表面散射特性的变化会导致 SAR 影像强度信息发生改变, 导致影像匹配失相关, 从而造成提取的流速场中存在大量错误与空洞。为了克服该问题, 本文提出了一套基于 Sentinel-1 SAR 影像提取冰川流速时序的数据处理流程: 通过开运算、连通性分析、自适应中值滤波等方法去除单对追踪影像中的噪声与错误; 同时利用现有产品的年度和月度平均流速数据完成基准校正并引入角度信息进一步去除部分噪声与粗差; 最后通过间隔 6 日、12 日、18 日的追踪影像引入冗余配对, 使用迭代的奇异值分解 (SVD) 方法求解时序方程组, 构建冰川流速时序。将利用本方法提取的 2018 年—2020 年间格陵兰 Petermann 溢出冰川 6 日间隔冰流速时序与现有流速产品进行对比表明, 与由单轨数据生成的 CPOM 冰川流速产品相比, 本方法获得的流速时序噪声更少, 流速场在时空上更连续平滑, 在相同冰川范围内有效数据覆盖范围更广。与由多轨数据合成的 PROMICE 产品比较表明两者的精度和有效数据覆盖率类似, 但本文方法提取的流速时序分辨率更高, 有效数据覆盖率更加稳定, 且在对于追踪效果较差的夏秋季本方法在抑制噪声方面表现更好。因此本文提出的算法能有效修补影像匹配空洞及剔除异常匹配, 并合成高时空分辨率冰川流速时序, 对利用星载 SAR 影像提取格陵兰冰盖流速监测具有重要意义。

关键词: 遥感, 格陵兰冰盖, 冰川流速, SAR, Sentinel-1, 偏移量追踪, 奇异值分解

中图分类号: P2

引用格式: 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

Ju Q, Li G, Li C Y, Feng X M, Chen X, Yang Z B and 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 [DOI:10.11834/jrs.20222031]

1 引言

格陵兰冰盖面积约为 1.71×10^7 km², 覆盖格陵兰约 80% 的地区, 是全球第二大冰盖 (Alley 等, 2005)。近几十年来, 随着格陵兰周边大气和海洋温度的明显升高 (Fettweis 等, 2017), 格陵兰冰盖出现了表面融水径流增加 (Trusel 等, 2018)、冰山崩解 (Nick 等, 2012)、冰川末端退缩 (Joughin 等, 2008)、冰流加速 (Rignot 和 Kanagaratnam, 2006) 等现象, 为全球海平面上升做出了显著贡

献 (Rignot 等, 2011)。溢出冰川在 1992 年—2018 年期间对格陵兰物质损失的贡献约为 48% (The IMBIE Team, 2020)。提取高时空分辨率的格陵兰冰川流速可以帮助了解其空间分布特点, 定量分析冰架输出的冰物质量, 了解局部冰盖和冰架的动态变化情况 (李斐 等, 2018); 此外冰川流速也是进行极地物质平衡计算和数值模拟的重要参数 (吴珊珊 等, 2015), 对定量评估全球气候变化和海平面上升等具有重要意义。

目前冰川流速监测的方法大致可以分为两大

收稿日期: 2022-01-21; 预印本: 2022-04-20

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: 鞠琦, 研究方向为极地遥感。E-mail: juqi@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

类：实地测量和遥感监测（Gao 和 Liu, 2001；李新等, 2020）。实地测量具有测量精度高的优点，但是需要人工架设测量仪器和布设测站，成本高，耗时长且无法深入人员难以到达的地区进行测量，因此难以大范围开展（Kaushik 等, 2019）。基于光学遥感影像的冰川流速提取算法主要基于影像匹配理论，通过对不同时间获取的遥感影像上的冰川特征进行提取和匹配，从而获取冰川流速（周建民等, 2021）。常用的影像匹配算法有：归一化互相关算法（NCC）（Scambos 等, 1992）、最小二乘匹配法（Whillans 和 Tseng, 1995）、基于频率域的相位相关算法（Heid 和 Käab, 2012）等。合成孔径雷达（SAR）获取数据不受天气条件与极夜的影响（Ouchi, 2013；Rott, 2009），在极地冰川流速监测领域相比光学遥感更具优势（黄磊等, 2014）。目前 SAR 影像监测冰川流速的方法主要分为两类：一类是基于 SAR 影像相位信息的干涉测量法 InSAR（Synthetic Aperture Radar Interferometry），如差分干涉法 D-InSAR（Differential-InSAR）、多孔径 InSAR 法 MAI（Multiple-aperture Interferometric）等；另一类是基于 SAR 影像强度信息的偏移量追踪法 POT（Pixel Offset Tracking），其原理与光学遥感影像匹配理论类似。与 InSAR 方法相比，偏移量追踪法受时间去相干的影响较小，尽管精度相比干涉测量低，但可适用于较长时间间隔的影像对（Hu 等, 2014）。

Goldstein 等（1993）基于 ERS-1 SAR 数据，首次利用 D-InSAR 法提取了南极格罗夫入海冰川的运动场，经过验证该方法垂直精度为 1.5 mm，水平精度为 4 mm。为了克服 InSAR 失相干影响的局限性，基于 SAR 影像的像素偏移追踪算法就利用影像配准的方式获取冰川位移（Gray 等, 1998）。Strozzi 等（2002）以 Monacobreen 冰川为例测试了基于强度和相干性的两种偏移量追踪算法，表明强度追踪法的计算效率较高且在相干性较差的情况下也能获得效果好的流速。随后偏移追踪法广泛应用于南极（Giles 等, 2009）、格陵兰岛冰川（Boncori 等, 2018），以及喜马拉雅山（Luckman 等, 2007）等山地冰川的流速监测中。

尽管偏移量追踪方法受影像失相关的影响较小，但是雪崩、冰崩、降雪、消融等现象会引起地表散射特性的变化（Pearce 等, 2014），图像强度信息随之发生改变，严重影响匹配精度及可靠

性，造成冰川流速场的误差与空洞。在对火山地区位移时序的提取中，为了提高偏移量追踪结果的覆盖率及精度，Casu 等（2011）提出了一种将小基线集技术 SBAS（Small Baseline Subset）应用到传统的强度偏移追踪方法中的技术，即 PO-SBAS 技术（Pixel Offset-Small Baseline Subset Technique），以获取火山地区位移时间序列，结果表明 PO-SBAS 精度可达到 1/30 个像素。随后 Li 等（2018）在 2018 年将 PO-SBAS 技术应用到天山伊尼尔切克冰川的流速监测中，提取冰川三维时间序列并证明了 PO-SBAS 技术相比传统的偏移量追踪技术监测精度提高了 17%。

现有的格陵兰冰川流速产品（如 CPOM, PROMICE 等）大多是以简单的单对影像偏移追踪方法为主，通常经过较为简单的空间域滤波处理，获得一段时间内的冰川流速时序或平均流速，并未使用 PO-SBAS 技术，因此存在匹配影像缺值多、匹配噪声大等缺点。特别是对于冰川表面融化剧烈的夏季，这类产品通常会出现大量缺失与噪声。

为了克服上述问题，本文提出了一套基于 Sentinel-1 SAR 影像提取冰川流速时序的数据处理流程：通过开运算、连通性分析、自适应中值滤波等数字图像处理方法去除单对追踪影像中的噪声与错误；同时利用现有产品的年度和月度平均流速数据完成基准校正并引入角度信息进一步去除部分噪声与错误；并基于 PO-SBAS 技术的思想，通过间隔 6 日、12 日、18 日的单对追踪影像引入冗余配对，使用多次迭代的奇异值分解 SVD（Singular Value Decomposition）方法求解时序方程组，构建冰川流速时序。本研究以格陵兰 Petermann 溢出冰川为例，将本方法提取的 2018 年—2020 年间的 6 日间隔冰流速时序与现有流速产品进行对比。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

本文选择的研究区 Petermann 冰川（81°N, 62°W），位于纳雷斯海峡以东的格陵兰岛西北部，与北冰洋相接，是北半球最大的溢出冰川之一，也是格陵兰岛 7 个入海冰川之一，面积约为 1280 km²（Hogg, 2016），其排冰量约占格陵兰冰盖的 4%（Rückamp 等, 2019）（图 1）。1959 年—2008 年期间，Petermann 冰川由于崩解、消融和表面物质损

失导致接地线后退，冰川面积减少了 352 km²，2010 年减少了 270 km²，2012 年减少了 130 km² (Johannessen 等，2013)。

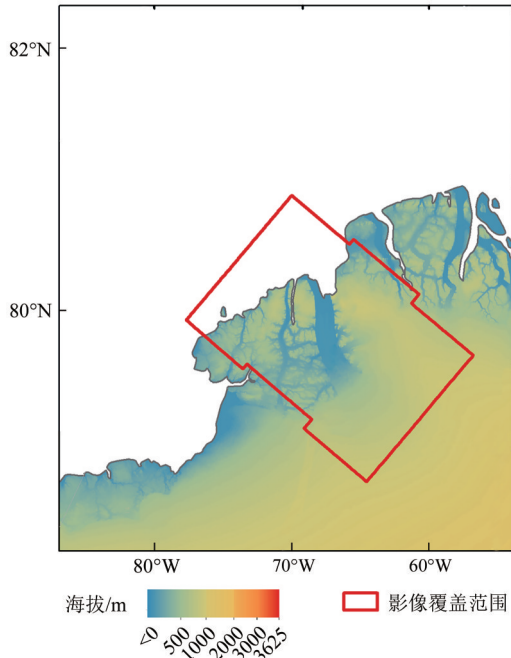


图1 研究区域

Fig. 1 The experiment area

2.2 数据源及预处理

2.2.1 实验数据

Sentinel-1 分为 1A 和 1B 两颗卫星，单星的重复周期为 12 d，双星重复时间为 6 d。本文选取轨道号为 26，影像号为 321 的 2018 年—2020 年中所有可获取的 Sentinel-1A/B 的 IW 模式 SLC（单视复数型）影像作为实验数据，共 178 景，其中仅有 3 日欧洲航天局未作获取。IW 模式影像幅宽为 250 km，方位向和距离向分辨率分别为 20 m 和 5 m。Sentinel-1 卫星在格陵兰的观测也常用于冰盖表面冻融监测 (陈晓等，2023)。

Sentinel-1 卫星数据预处理流程包括：SLC 数据读取、精密轨道更新、影像 burst 拼接、强度影像生成、地理编码查找表生成等。

2.2.2 其他数据

本文选择同期美国冰雪数据中心 NSIDC (National Snow and Ice Data Center) 发布的格陵兰冰盖测绘项目中 GIMP (Greenland Ice Mapping Project) 使用偏移量追踪方法生产的格陵兰冰盖速

度镶嵌产品 (Joughin 等，2018a) 作为进行基准校正的平均流速，其空间分辨率为 200 m×200 m。GIMP 冰流速产品提供了东西向 (V_x) 和南北向 (V_y) 流速，其中包括月度与年度平均流速。本文将不同方向的 GIMP 月度和年度平均流速作为基准流速，对单对追踪影像进行基准校正与降噪去错。

为了对 SLC 数据进行精密配准和地理编码，本文使用了由 NSIDC 发布的全格陵兰 30 m×30 m 分辨率的 DEM (Howat 等，2014)。

本文选取了两个高时间分辨率格陵兰冰川流速产品对实验结果进行评估。其中英国极地观测与建模中心发布的 CPOM (Centre for Polar Observation & Modelling, [https://cpom.org.uk/\[2022-01-21\]](https://cpom.org.uk/[2022-01-21])) 南北极主要溢出冰川流速产品是 CPOM 对格陵兰冰盖 4 大主要溢出冰川 (Petermann, Nioghalvfjordsfjorden, Zachariae Isstrøm, Jakobshavn Isbræ)，基于 Sentinel-1 卫星数据利用偏移量追踪方法结合低通滤波器与 SNR (信噪比) 对产品噪声进行去除后生产的 6 天或 12 天时间分辨率，100 m 空间分辨率的冰流速产品，其时间覆盖范围为 2015 年—2020 年 (Lemos 等，2018)。另一对比产品为丹麦格陵兰地质调查局 GEUS (Danish Greenland Geological Survey) 的冰川学和气候部与丹麦技术大学国家空间研究所 DTU Space (National Space Institute at the Technical University of Denmark) 发布的丹麦格陵兰冰盖监测计划 PROMICE (Programme for Monitoring of the Greenland Ice Sheet) 流速产品。该产品同样以 Sentinel-1 数据为数据源，利用偏移量追踪方法结合 SNR 与平均速度对误差进行剔除，使用加权平均的方法获得了 500 m 空间分辨率的 12 d 或 24 d 时间分辨率的格陵兰冰盖流速，时间覆盖范围为 2016 年 9 月至今 (Solgaard 等，2021)。

同时为了将本文方法提取的流速时序与选取的产品在相同冰川区域内进行对比，本文选择 NSIDC 发布的 90 m 分辨率格陵兰冰盖范围 GIMP-0714 产品 (Howat，2017) 作为掩膜提取相同冰川区域。

3 冰川流速提取

如图 2 所示，本文提取冰川流速时间序列算法分为以下 5 个步骤：第 1 步，利用 GAMMA 软件强度特征追踪模块完成对每幅影像与其 6 日、12 日和 18 日间隔影像的追踪，并获得距离向与方位向

的追踪图像；第2步，由于SVD的方法抗噪性能较差，若单对追踪影像中噪声或粗差较多，根据误差传播原理通过SVD方法求解得到的时序流速误差会更大（Höcker 和 Kartvelishvili, 1996），此步通过一系列的数字图像处理方法结合平均流速数据对原始追踪影像进行处理，尽量除其中的噪声与误差；第3步，利用冗余影像配对与SVD方法，

获得初始的6日流速时间序列；第4步，将得到的初始6日流速时间序列与对应日期单对追踪影像进行对比，滤除6日、12日和18日间隔单对追踪影像中的粗差值，而后再一次进行SVD方程求解，迭代此步骤；第5步，对求取的6日时间序列进行三维中值滤波，最终获得完整的2018年—2020年的6日间隔Petermann冰川流速时间序列。

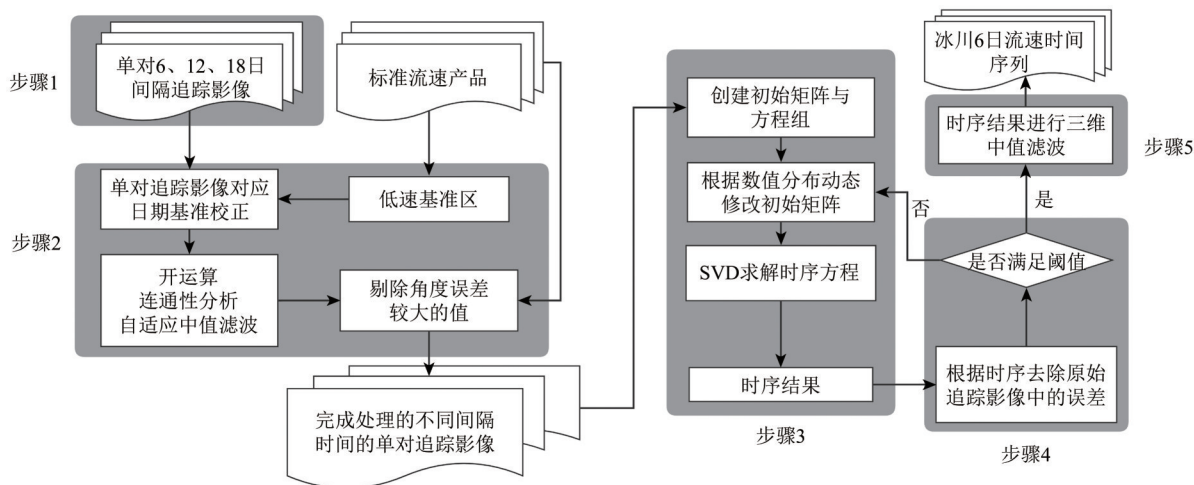


图2 技术路线

Fig. 2 The technical routine

3.1 强度追踪算法

归一化互相关算法 NCC (Normalized Cross Correlation) 通过计算参考影像中模板窗口和待配准影像中搜索窗口的互相关系数来确定二者的匹配程度。互相关系数反映了模板窗口与搜索窗口之间的相似程度。本文利用 GAMMA 软件强度特征追踪模块中的频率域 NCC 算法完成对每幅影像与其间隔 6 日、12 日和 18 日的影像的影像追踪，获得距离与方向向偏移量。

在使用 GAMMA 软件中的强度特征追踪模块时，需要设定搜索窗口及匹配步长等参数。随着搜索窗口的增大，匹配精度逐步提高，提取的有效像素数量逐渐增加，但数据运行时间相应增加；同时频率域 NCC 算法是评估模板窗口与搜索窗口间的整体位移，因此过小的窗口会导致难以描述流速场细节。匹配步长则会最终影响偏移影像的分辨率，匹配步长越大，输出的偏移量图像分辨率越低，反之则分辨率越高。因此结合实验区冰川大小、运算效率、分辨率等多方面因素，本文在距离向和方向向所使用的搜索窗口为 256×128 像

素，匹配步长为 20×4 像素。

3.2 单对追踪影像处理

原始偏移追踪影像中存在大量噪声与错误，本文通过下列处理方法来进行识别和去噪。

首先利用开运算、连通性分析和自适应中值滤波等方法综合消除图像中的一些明显的噪声异常点和孤立小区域。开运算是先对图像先腐蚀后膨胀的操作，可以去除小颗粒噪声并平滑形状边界，本文选择 5×5 像素的矩形作为结构元对单对追踪影像进行开运算。连通性分析用于判断哪些像素与其他像素相连，图像中形成一个连通组的一组像素称为一个连通分量。通过将面积较小的连通分量去除可以有效去除图像中的孤立小区域。本文将连通面积小于 10000 像素的连通分量视作孤立区域进行去除。自适应中值滤波是中值滤波的一种特殊形式，可以根据预设条件动态地改变中值滤波器的窗口尺寸，以同时兼顾去噪声和保护细节的作用，本文选择 25×25 像素的正方形窗口作为滤波的自适应窗口，对应地面约 2×2 km。

本文利用研究区域内对应 NSIDC 全格陵兰年

度与月度平均流速产品对追踪影像进行流速基准校正同时引入角度信息进一步去除噪声和错误。一般来说, 认为年平均流速小于 5 m/a 的地区为低速基准地区 (Joughin 等, 2018b)。考虑到 GIMP 产品的延迟发布, 本文针对每年追踪影像分别提取 GIMP 产品前一年低速地区作为基准区域, 计算基准地区的相应月份流速均值, 将单对追踪影像按月份提取基准地区并计算均值, 使得追踪影像的基准地区流速均值与对应月基准地区流速均值一致。此后利用月度数据的流速方位角作为参考角度, 将流速大于 3 倍月度数据且流动方向与参考角度差值大于 30° 的点滤除。

3.3 时序流速的构建

经过上一步处理我们已经获得了噪声与错误明显减少的间隔 6 日、12 日和 18 日的偏移量追踪影像。将不同间隔天数的追踪影像在同一像元处的偏移量值作为观测值构成冗余配对, 并通过 SVD 的方法求解方程组, 解算冰川 6 日时间序列的流速。其基本模型如下:

假设有 N 幅覆盖相同, 成像时间间隔 6 日的 SAR 影像序列, 以间隔 6 日、12 日、18 日生成偏移追踪影像 M ($M = (N - 2) \times 3$) 幅, 将 M 幅追踪影像每一个像元对应的流速 $\mathbf{d} = [d_1, \dots, d_M]^T$ 作为观测量, N 幅 SAR 影像相邻获取日期的 6 日流速 (位移) 作为未知数 $\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_{N-1}]^T$, 其中 v_i 表示 i 与 $i + 1$ 幅影像间 6 日流速, 建立 $N - 1$ 个未知数, M 个方程的方程组, 其方程组表达形式为

$$\mathbf{B}\mathbf{v} = \mathbf{d} \quad (1)$$

式中, \mathbf{B} 为 $M \times (N - 1)$ 阶的系数矩阵。将式 (1) 展开应为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 1 & 1 & 0 & 0 & \cdots \\ 1 & 1 & 1 & 0 & \cdots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 1 & 1 & 0 & \cdots \\ 0 & 1 & 1 & 1 & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ v_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ d_M \end{bmatrix}$$

在实际进行计算时对于某一像元, 由于错误值已被滤除而无观测值, 需要将方程去除, 即将 \mathbf{B} 矩阵中的对应一行及 \mathbf{d} 向量中相应元素去除。如有 k 景追踪影像中该像元为无效值, \mathbf{B} 矩阵的阶数为

$(M - k) \times (N - 1)$ 。此时矩阵 \mathbf{B} 可能秩亏, 因而无法求逆。因此使用奇异值分解 SVD (Singular Value Decomposition) 的方法利用式 (2) 求解方程组

$$\mathbf{B} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{W}^T \quad (2)$$

带入式 (1) 即可求解未知数 \mathbf{v}

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{W}\mathbf{S}^{-1}\mathbf{U}^T\mathbf{d} \quad (3)$$

3.4 滤除错误观测值

通过式 (3) 可以获得 6 日时间间隔的初始时序流速, 为了提高计算的准确性与去除单对追踪影像处理中未能消除的错误观测值, 本文将初始时间序列流速与对应日期的 6 日、12 日、18 日的单对追踪影像进行逐像元对比 (即连续 2 或 3 个 6 日流速合成 12 日或 18 日流速) 判断像元差值是否大于阈值, 若大于则将追踪影像中的该像元设为无效值, 并再次带入式 (1) 进行 SVD 求解, 可以反复迭代直到剔除像元个数小于一定阈值即可停止迭代。通过对不同阈值进行测试, 综合错误滤除效果与无效像元个数, 本文选择 1 m/d 作为像元间的差值阈值。考虑 SVD 需要逐像元求解, 耗时过长, 本研究停止于第二次迭代。

4 实验结果

4.1 2018 年—2020 年 6 日时间序列冰川流速

根据图 3 从浮冰区域开始到冰川上游, 提取冰川中流线上 6 日间隔时间序列流速如图 4 所示。浮冰区域 (Floating ice) 为与冰川末端连接但已经飘浮于海面的淡水冰, 属于冰川的一部分, 具有一定的流动速度。

根据图 3 和图 4 可以得到, 提取的冰川中流线流速在时间和空间上光滑连续, 除了时间序列开始和结束阶段以外未见明显缺失、噪声和异常值。

在季度变化方面, 春季冰川主体流速逐渐加快, 春末浮冰区域由于解冻而迅速降低, 无效值开始出现; 夏季时冰川主体流速加快, 6 日流速大于 3.5 m/d, 浮冰区域几乎均为无效值; 秋季流速放缓, 但浮冰区无有效观测维持至约 10 月末; 在冬季时, 冰川主体流速较慢, 6 日流速小于 3.5 m/d, 浮冰区域普遍存在且与冰川主体速度一致, 无效值很少。在年度变化方面, 2019 年和 2020 年夏季冰川主体流速较 2018 年快, 高流速持续时间更长。

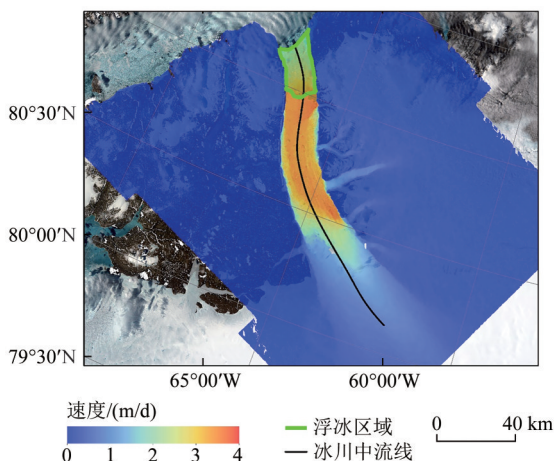


图3 Petermann冰川平均流速与冰川中流线(背景为 Sentinel-2真彩色影像)

Fig. 3 Mean velocity and mid-streamline of Petermann glacier (The background is Sentinel-2 true color image)

4.2 迭代SVD去除噪声与错误

为了对迭代SVD去除噪声与错误方法的效果进行评估,选择2019年1月、4月、7月、10月4幅6日序列,对比其第一次SVD后和与滤除错误观测值后第二次SVD的结果。图5所示,第二次SVD后的结果中噪声与异常值数量要明显低于第一次

SVD后的结果,通过迭代SVD的方法使冰川中的一些无法使用常规方法去除的噪声和错误得到了明显的改善。

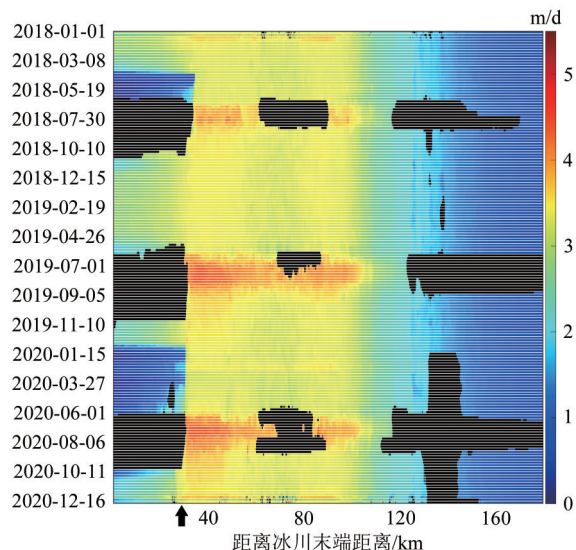


图4 Petermann冰川中流线流速时序(箭头左侧代表浮冰区域)

Fig. 4 Velocity time series of the mid-streamline of Petermann Glacier (Left to the red arrow stands for Floating Ice area)

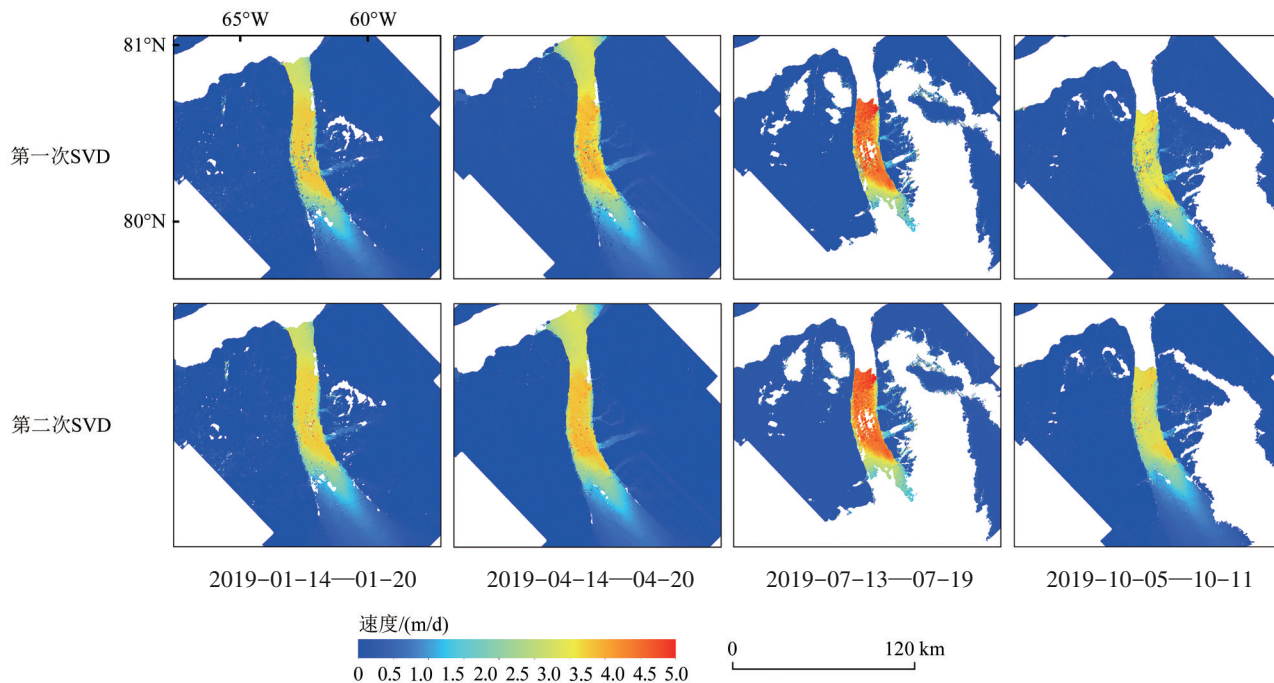


图5 不同月份第一次SVD与第二次SVD去噪结果对比

Fig. 5 Comparison of denoising results between the first SVD and the second SVD in different months

5 数据比较与精度验证

为了验证流速序列的正确性,将利用本文方法

提取的流速时序与CPOM和PROMICE发布的格陵兰冰川流速产品中的Petermann冰川区域在速度精度、数值差异、有效数据覆盖率等多方面进行比较。

5.1 与 CPOM 产品对比

CPOM 的 Petermann 冰川 6 日间隔时间序列流速产品所用轨道和影像与本文相同, 但产品范围远小于本文方法提取的流速时序, 因此选择 CPOM 产品范围作为比较区域。

表 1 分别展示了本文方法提取的流速时序与 CPOM 产品在 2019 年 1 月、4 月、7 月、10 月相同日期相同范围内冰川流速均值、流速差值的均值、流速差值的标准差以及所有流速差数据中大于或者小于均值加减两倍标准差的所占比率。流速差

值指本文提取的流速 (标量) 时序减去 CPOM 产品, 在文中用 R_{mc} (Results minus CPOM) 指代, 其均值为 $\overline{R_{mc}}$, 标准差为 $\sigma_{R_{mc}}$ 。 $R_{mc} < (\overline{R_{mc}} - 2\sigma_{R_{mc}})$ 比率指 R_{mc} 中小于 $\overline{R_{mc}} - 2\sigma_{R_{mc}}$ 所占比例 (即 CPOM 的离群值更大)。 $R_{mc} > (\overline{R_{mc}} + 2\sigma_{R_{mc}})$ 比率指 R_{mc} 中大于 $\overline{R_{mc}} + 2\sigma_{R_{mc}}$ 所占比例 (即本文提取的流速时序离群值更大)。以流速标量为考量, 错误的匹配通常数值更大, 因此差值大于或小于两倍标准差占比可作为异常值评估标准。

表 1 本文提取的流速时序与 CPOM 产品比较

Table 1 Comparison of derived our velocity time series result with CPOM products

产品日期	流速时序均值/ (m/d)	CPOM 产品均值/ (m/d)	$\overline{R_{mc}}/(m/d)$	$\sigma_{R_{mc}}/(m/d)$	$R_{mc} < (\overline{R_{mc}} - 2\sigma_{R_{mc}})$ 比率/%	$R_{mc} > (\overline{R_{mc}} + 2\sigma_{R_{mc}})$ 比率/%
2019-01-14—01-20	2.771	2.826	-0.054	0.222	3.104	0.852
2019-04-14—04-20	2.083	3.036	-0.232	0.253	2.556	0.528
2019-07-13—07-19	2.923	3.156	-0.245	0.291	3.253	0.178
2019-10-17—10-23	2.176	2.626	0.091	0.235	2.612	1.043

图 6 展示了从 2019 年 1 月、4 月、7 月、10 月分别选择日期对应的流速时序与 CPOM 数据在 CPOM 数据范围内 (仅包含 Petermann 冰川小范围区域) 绘制 6 日的冰川流速图。非冰川区结果增加了透明度 (下文不再赘述)。图 7 展示了 2018 年一

2019 年所有本文流速时序与 CPOM 数据对应日期产品的有效值覆盖率。有效值覆盖率指在格陵兰冰盖范围内本文方法提取的流速时序与 CPOM 产品中非空像素占有所有像素的比例。

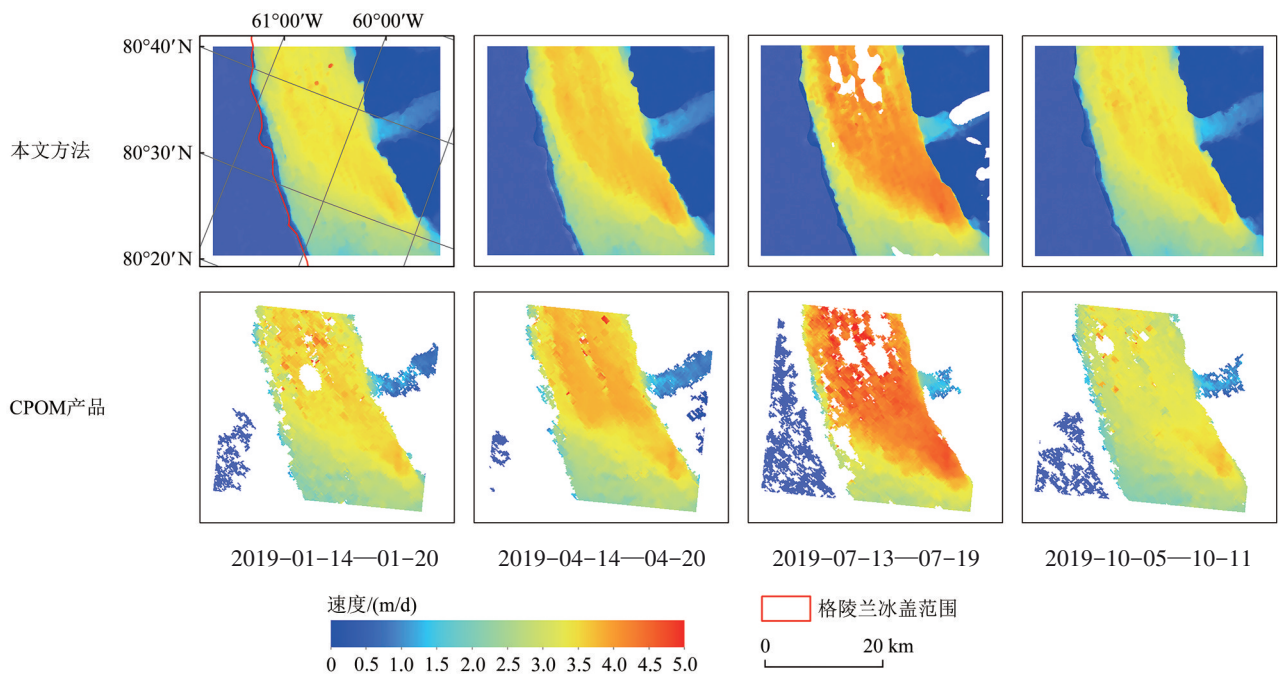


图 6 不同月份本文提取流速时序与 CPOM 产品流速对比

Fig. 6 Comparison of our derived velocity time series with CPOM products in different months

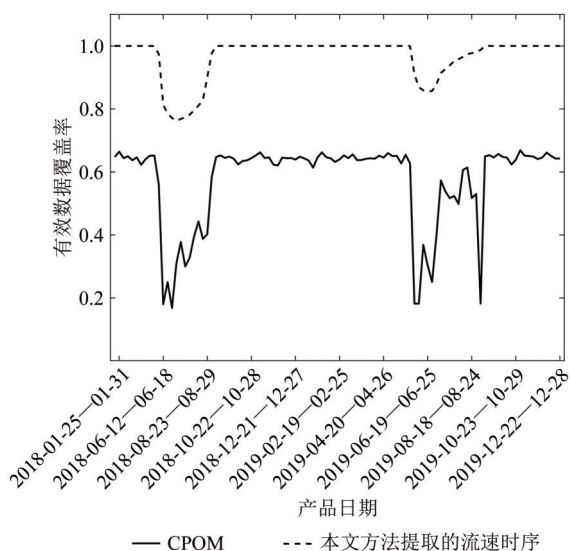


图7 本文流速时序与CPOM产品的有效值覆盖率对比
Fig. 7 Coverage rates of valid data between our derived velocity time series and CPOM products

根据表1, 本文提取的流速时序与CPOM产品相比差值均值的绝对值均小于0.25 m/d, σ_{Rmc} 均小于0.3 m/d, 这说明在数值分布上本文方法提取的流速时序与CPOM产品类似。在1月、4月、7月、10月共4个月份中, $Rmc < (\overline{Rmc} - 2\sigma_{Rmc})$ 比率远大于 $Rmc > (\overline{Rmc} + 2\sigma_{Rmc})$ 比率, 即CPOM离群值更大的比率高于本文提取流速时序, 且本文流速时序(图6)明显的噪声点与错误值较CPOM结果少, 这说明本文流速时序在噪声数量上要远小于

表2 本文提取的流速时序镶嵌结果与PROMICE产品比较

Table 2 Comparison of our derived velocity time series mosaic result with PROMICE products

产品日期	流速时序均值/ (m/d)	PROMICE产品 均值/(m/d)	$\overline{Rmp}/(m/d)$	$\sigma_{Rmp}/(m/d)$	$Rmp < (\overline{Rmp} - 2\sigma_{Rmp})$ 比率/%	$Rmp > (\overline{Rmp} + 2\sigma_{Rmp})$ 比率/%
2019-01-12-02-05	0.266	0.276	-0.096	0.093	0.748	0.374
2019-04-18-05-12	0.263	0.273	-0.011	0.088	0.836	0.396
2019-07-11-08-04	0.333	0.339	-0.007	0.146	0.989	0.723
2019-10-15-11-08	0.253	0.266	-0.013	0.081	0.879	0.419

图8为2019年1月、4月、7月、10月份分别选择对应邻近日期的本文镶嵌结果与PROMICE产品绘制24日的冰川主体流速图。图9表示2018年—2019年所有本文镶嵌数据与PROMICE数据最接近产品日期的在格陵兰冰盖范围提取的相同部分冰川主体中的有效值覆盖率。

根据表2可以得知, 本文流速时序镶嵌结果与PROMICE产品相比, \overline{Rmp} 约为0.01 m/d, σ_{Rmp} 均小于0.15 m/d, 这说明本文提取的流速时序与

CPOM产品。由图6与图7可见, 本文提取的结果与CPOM产品相比有效数据覆盖率远高于CPOM产品, 且噪声与流速突变更少, 数据质量更高。

5.2 与PROMICE数据对比

PROMICE的全格陵兰冰川24日时间序列流速产品是由多个轨道合成(包含本文所用轨道), 其产品日期与本文提取的流速时序有2日时间差异, 本文将与PROMICE产品时间最接近的4个6日流速镶嵌为24日流速并与对应PROMICE产品进行比较。

表2展示本文流速时序镶嵌结果与PROMICE产品在2019年1月、4月、7月、10月最邻近日期流速均值、流速差值的均值、流速差值的标准差以及所有流速差值数据中大于或者小于均值加减两倍标准差的所占比率。其中流速差值指本文流速(标量)时序镶嵌结果有效像元值减去PROMICE产品对应的有效像元值, 在文中用Rmp (this Results minus PROMICE) 指代, 其均值为 \overline{Rmp} , 标准差为 σ_{Rmp} , $Rmp < (\overline{Rmp} - 2\sigma_{Rmp})$ 比率为Rmp小于 $\overline{Rmp} - 2\sigma_{Rmp}$ 所占比率(即PROMICE的离群值更大)。 $Rmp > (\overline{Rmp} + 2\sigma_{Rmp})$ 比率为Rmp大于 $\overline{Rmp} + 2\sigma_{Rmp}$ 所占比率(即本文提取的流速时序离群值更大)。

PROMICE产品在数值上相比与CPOM产品更为接近。结合图8, PROMICE的噪声较本文流速时序略大。由图8与图9可见, 本文流速时序与多轨合成产品在相同冰川范围内有效值覆盖率基本保持一致, 在夏季存在一定差异, 且本文数值更加稳定。2018年7月本文提取流速结果有效值覆盖更高, 而2019年7月则PROMICE产品覆盖率更高, 但其中一部分是由于PROMICE产品噪声未有效去除所致(图8(g))。

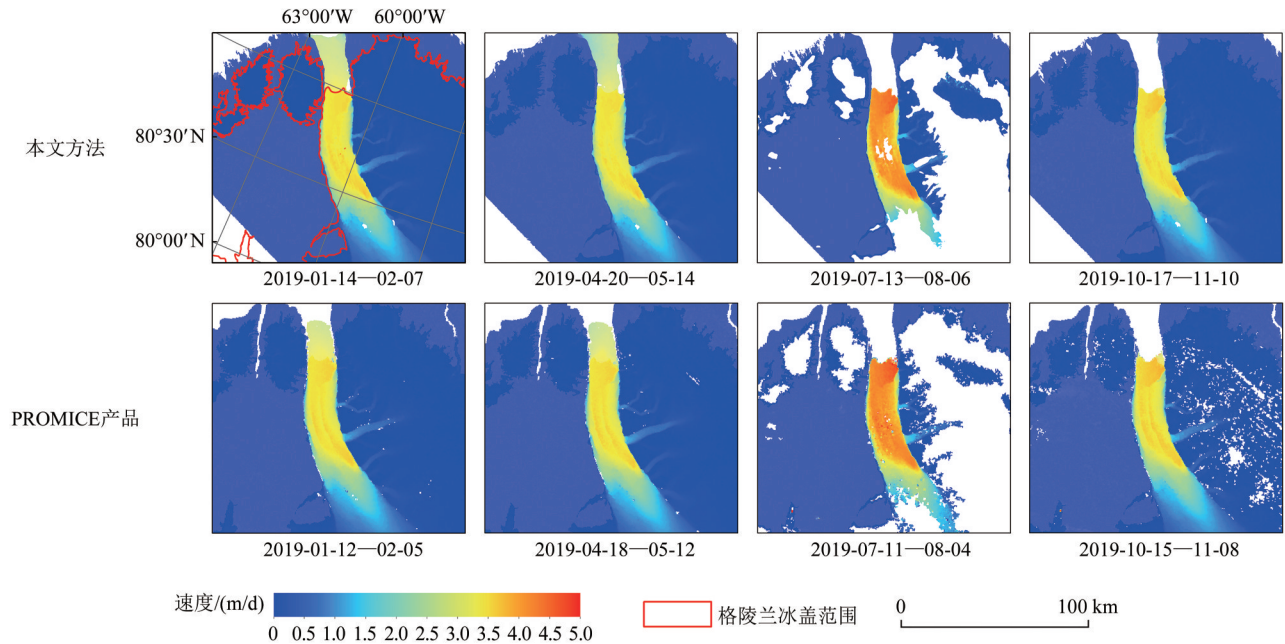


图8 不同月份本文提取的流速时序镶嵌结果与PROMICE产品流速对比

Fig. 8 Comparison of our derived mosaic velocity sequence results with PROMICE data in different seasons

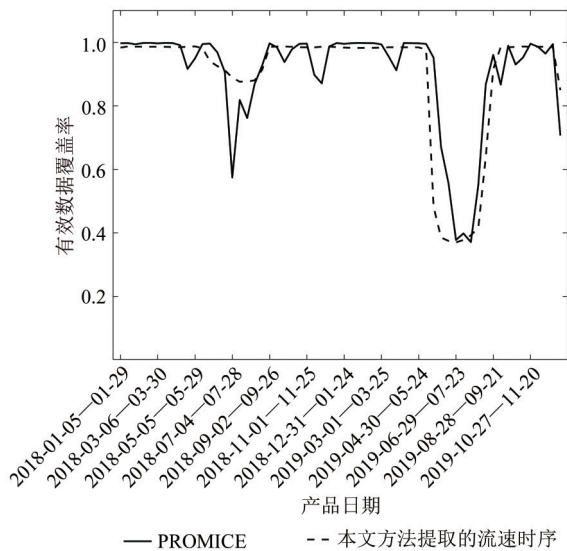


图9 本文流速时序镶嵌结果与PROMICE产品有效值覆盖率对比

Fig. 9 Coverage rates of valid data between our derived mosaic velocity sequence results and PROMICE products

6 讨论

本文利用 Sentinel-1 卫星 SAR 数据进行基于影像追踪的格陵兰 Petermann 冰川流速监测, 通过开运算、连通性分析、自适应中值滤波等方法去除单对追踪影像中的噪声与错误。由于 SVD 的方法抗噪性能较差, 若单对追踪影像中噪声较多, 根据误差传播原理通过 SVD 方法求解得到的时序

流速误差会更大, 因此这一过程的结果直接影响后续时间序列流速的求取。而对单对追踪影像的数字图像处理过程中各种参数并没有明确的选取标准, 需要根据影像本身噪声水平来进行调整, 因此需要反复调试参数, 尽量提高单对影像的去噪效果。

对冗余配对的迭代 SVD 求解时间序列的过程表明流速结果的质量与冗余配对的数量存在明显的正比的关系。对于冗余配对较多的时间序列, 其流速值平滑连续, 噪声与异常值较少; 在冗余配对较少的时间序列, 如 2018 年起始与 2020 年结尾, 其流速值存在明显噪声与异常值 (图 4)。因此对于头部和尾部的时间序列, 迭代 SVD 的方法难以有效去除其存在的错误匹配。尽管增加冗余观测可以提高最终流速时序提取质量, 但考虑到单对影像追踪耗时较长, 且随着影像间隔时间增加有效追踪像素逐渐降低, 本研究对每一景 Sentinel-1 影像仅选择了与后续 3 次获取影像配对。

格陵兰冰盖位于高纬地区, Sentinel-1 影像相邻轨道间重叠率较高。为了提高冗余配对, 在算力充足的情况下对于某一研究区域可以采用多轨影像以达到更好的流速提取效果。此外, 本文利用了 GIMP 产品的流速方向值作为滤除标准, 这一步的考虑是尽管冰川流动速率会随季节有所变化,

但其流动方向通常不变。但 GIMP 产品延迟发放且分辨率为 200×200 m, 与本研究提取的目标分辨率 90×90 m 有所差异, 后续生产过程中也可以以本文平均流速或提取的前一年的流速作为后续角度参考滤除的标准。

7 结 论

针对冰川表面散射特性的变化导致利用 SAR 影像使用偏移量追踪方法获得的流速场中存在大量错误与空洞的问题, 本文提出了一种利用迭代的 SVD 方法处理 SAR 影像冗余配对偏移量追踪结果获得冰川高时空分辨率流速场的算法, 并将该方法应用于格陵兰冰盖的 Petermann 冰川。将本文方法提取的流速时序与现有机机构发的 Petermann 冰川流速产品进行比较得到以下结论:

(1) 结合数字图像处理算法与迭代的 SVD 方法能有效判别并去除单对追踪影像中的匹配错误, 填补时间序列中流速场的空洞; 为实现对格陵兰冰川进行大范围、高空间分辨率、高时间分辨率的流速快速提取提供了技术方案。

(2) 本文方法提取的流速时序相比单轨影像生成的 CPOM 产品在数值分布、离群值数量、有效数据覆盖率上均具有明显优势, 且由于产品分辨率较高, 能更好地覆盖冰川支流; 与多轨合成的 PROMICE 产品相比, 分辨率更高, 在数值精度上接近且离群值略少, 有效值覆盖率基本保持一致。

(3) Petermann 冰川运动具有明显的年度与季节变化, 同时冰川前缘的浮冰区域流速也会随着季节的变化而变化, 且每年冰川前缘位置有所改变。夏季冰川流速加快, 浮冰区域较少, 至约 10 月中下再度形成浮冰; 其他季节冰川流速较夏季慢, 且流速提取更为完整。2019 年和 2020 年夏季冰川主体流速较 2018 年快, 高流速持续时间长。

此外, 由本文提取的冰川流速时序可见依然存在夏季空洞, 在后续的研究中, 可结合多轨或及多星 SAR 影像、光学影像等追踪结果进行联合平差, 以进一步提高冰川流速监测时空覆盖率。

志 谢 感谢欧州航天局提供了 Sentinel-1 卫星影像, NSIDC 提供了格陵兰年平均及月平均流速, 地形及冰盖掩膜数据, 英国极地观测和建模中心提供 CPOM 流速产品, 丹麦格陵兰地质调查局提供 PROMICE 流速产品。

参考文献 (References)

- Alley R B, Clark P U, Huybrechts P and Joughin I. 2005. Ice-sheet and sea-level changes. *Science*, 310(5747): 456-460 [DOI: 10.1126/science.1114613]
- Boncori J P M, Andersen M L, Dall J, Kusk A, Kamstra M, Andersen S B, Bechor N, Bevan S, Bignami C, Gourmelen N, Joughin I, Jung H S, Luckman A, Mouginot J, Neelmeijer J, Rignot E, Scharer K, Nagler T, Scheuchl B and Strozzi T. 2018. Intercomparison and validation of SAR-Based ice velocity measurement techniques within the Greenland ice sheet CCI project. *Remote Sensing*, 10(6): 929 [DOI: 10.3390/rs10060929]
- Casu F, Manconi A, Pepe A and Lanari R. 2011. Deformation Time-Series generation in areas characterized by large displacement dynamics: The SAR amplitude Pixel-Offset SBAS technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(7): 2752-2763 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2104325]
- 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]
- Fettweis X, Box J E, Agosta C, Amory C, Kittel C, Lang C, Van As D, Machguth H and Gallée H. 2017. Reconstructions of the 1900-2015 Greenland ice sheet surface mass balance using the regional climate MAR model. *The Cryosphere*, 11(2): 1015-1033 [DOI: 10.5194/tc-11-1015-2017]
- Gao J and Liu Y S. 2001. Applications of remote sensing, GIS and GPS in glaciology: A review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 25(4): 520-540 [DOI: 10.1177/030913330102500404]
- Giles A B, Massom R A and Warner R C. 2009. A method for sub-pixel scale feature-tracking using Radarsat images applied to the Mertz Glacier Tongue, East Antarctica. *Remote Sensing of Environment*, 113(8): 1691-1699 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.03.015]
- Goldstein R M, Engelhardt H, Kamb B and Frolich R M. 1993. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream. *Science*, 262(5139): 1525-1530 [DOI: 10.1126/science.262.5139.1525]
- Gray A L, Mattar K E, Vachon P W, Bindschadler R, Jezek K C, Forster R and Crawford J P. 1998. InSAR results from the RADARSAT Antarctic Mapping Mission data: Estimation of glacier motion using a simple registration procedure//IGARSS '98. *Sensing and Managing the Environment*. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Symposium Proceedings. (Cat. No. 98CH36174). Seattle: IEEE: 1638-1640 [DOI: 10.1109/IGARSS.1998.691662]
- Heid T and Käab A. 2012. Evaluation of existing image matching

- methods for deriving glacier surface displacements globally from optical satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118: 339-355 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.024]
- Höcker A and Kartvelishvili V. 1996. SVD approach to data unfolding. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 372(3): 469-481 [DOI: 10.1016/0168-9002(95)01478-0]
- Hogg A E, Shepherd A, Gourmelen N and Engdahl M. 2016. Grounding line migration from 1992 to 2011 on Petermann Glacier, North-West Greenland. *Journal of Glaciology*, 62(236): 1104-1114 [DOI: 10.1017/jog.2016.83]
- Howat I. 2017. MEaSURES Greenland Ice Mapping Project (GIMP) land ice and ocean classification mask, Version 1. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. [DOI: 10.5067/B8X58MQBFUPA]
- Howat I M, Negrete A and Smith B E. 2014. The Greenland Ice Mapping Project (GIMP) land classification and surface elevation data sets. *The Cryosphere*, 8(4): 1509-1518 [DOI: 10.5194/tc-8-1509-2014]
- Hu J, Li Z W, Ding X L, Zhu J J, Zhang L and Sun Q. 2014. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review. *Earth-Science Reviews*, 133: 1-17 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.02.005]
- Huang L, Li Z, Zhou J M and Tian B S. 2014. Glacier change monitoring using SAR: An overview. *Advances in Earth Science*, 29(9): 985-994 (黄磊, 李震, 周建民, 田帮森. 2014. SAR 监测冰川变化研究进展. *地球科学进展*, 29(9): 985-994) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.09.0985]
- The IMBIE Team. 2020. Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018. *Nature*, 579(7798): 233-239 [DOI: 10.1038/s41586-019-1855-2]
- Johannessen O M, Babiker M and Miles M W. 2013. Unprecedented retreat in a 50-Year observational record for Petermann glacier, North Greenland. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 6(5): 259-265
- Joughin I, Howat I, Alley R B, Ekstrom G, Fahnestock M, Moon T, Nettles M, Truffer M and Tsai V C. 2008. Ice-front variation and tidewater behavior on Helheim and Kangerdlugssuaq Glaciers, Greenland. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113 (F1): F01004 [DOI: 10.1029/2007JF000837]
- Joughin I, Smith B E and Howat I. 2018a. Greenland Ice Mapping Project: Ice flow velocity variation at sub-monthly to decadal timescales. *The Cryosphere*, 12(7): 2211-2227 [DOI: 10.5194/tc-12-2211-2018]
- Joughin I, Smith B E and Howat I M. 2018b. A complete map of Greenland ice velocity derived from satellite data collected over 20 years. *Journal of Glaciology*, 64(243): 1-11 [DOI: 10.1017/jog.2017.73]
- Kaushik S, Joshi P K and Singh T. 2019. Development of glacier mapping in Indian Himalaya: A review of approaches. *International Journal of Remote Sensing*, 40(17): 6607-6634 [DOI: 10.1080/01431161.2019.1582114]
- Lemos A, Shepherd A, McMillan M, Hogg A E, Hatton E and Joughin I. 2018. Ice velocity of Jakobshavn Isbræ, Petermann Glacier, Nioghalvfjærdsfjorden, and Zachariæ Isstrøm, 2015-2017, Sentinelfrom 1-a/b SAR imagery. *The Cryosphere*, 12(6): 2087-2097 [DOI: 10.5194/tc-12-2087-2018]
- Li F, Wang Z L, Zhang Y, Zhang S K and Zhu T T. 2018. Amery ice shelf frontal position automatic detection from sentinel-1 SAR imagery. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(12): 2012-2022. (李斐, 王振领, 张宇, 张胜凯, 朱婷婷. 2018. 基于 Sentinel-1 SAR 的埃默里冰架前端位置自动检测研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 43(12): 2012-2022) [DOI: 10.13203/j.whugis20180171]
- Li J, Li Z W, Wu L X, Xu B, Hu J, Zhou Y S and Miao Z L. 2018. Deriving a time series of 3D glacier motion to investigate interactions of a large mountain glacial system with its glacial lake: use of synthetic aperture radar pixel offset-small baseline subset technique. *Journal of Hydrology*, 559: 596-608 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.02.067]
- Li X, Che T and Li X W. 2020. *Remote Sensing of Cryosphere*. Beijing: Science Press: 38-40 (李新, 车涛, 李新武. 2020. 冰冻圈遥感学. 北京: 科学出版社: 38-40)
- Luckman A, Quincey D and Bevan S. 2007. The potential of satellite radar interferometry and feature tracking for monitoring flow rates of Himalayan glaciers. *Remote Sensing of Environment*, 111 (2/3): 172-181 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.05.019]
- Nick F M, Luckman A, Vieli A, Van Der Veen C J, Van As D, Van De Wal R S W, Pattyn F, Hubbard A L and Floricioiu D. 2012. The response of Petermann Glacier, Greenland, to large calving events, and its future stability in the context of atmospheric and oceanic warming. *Journal of Glaciology*, 58(208): 229-239 [DOI: 10.3189/2012JoG11J242]
- Ouchi K. 2013. Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics. *Remote Sensing*, 5(2): 716-807 [DOI: 10.3390/rs5020716]
- Pearce W, Holmberg K, Hellsten I and Nerlich B. 2014. Climate change on twitter: topics, communities and conversations about the 2013 IPCC Working Group 1 Report. *PLoS One*, 9(4): e94785 [DOI: 10.1371/journal.pone.0094785]
- Rückamp M, Neckel N, Berger S, Humbert A and Helm V. 2019. Calving induced speedup of petermann glacier. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(1): 216-228 [DOI: 10.1029/2018JF004775]
- Rignot E and Kanagaratnam P. 2006. Changes in the velocity structure of the Greenland ice sheet. *Science*, 311(5763): 986-990 [DOI: 10.1126/science.1121381]
- Rignot E, Velicogna I, Van Den Broeke M R, Monaghan A and Lenaerts J T M. 2011. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophysical Research Letters*, 38(5): L05503 [DOI: 10.1029/2011GL046583]
- Rott H. 2009. Advances in interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in earth system science. *Progress in Physical Geogra-*

- phy: Earth and Environment, 33(6): 769-791 [DOI: 10.1177/0309133309350263]
- Scambos T A, Dutkiewicz M J, Wilson J C and Bindschadler R A. 1992. Application of image cross-correlation to the measurement of glacier velocity using satellite image data. *Remote Sensing of Environment*, 42(3): 177-186 [DOI: 10.1016/0034-4257(92)90101-O]
- Solgaard A, Kusk A, Boncori J P M, Dall J, Mankoff K D, Ahlstrøm A P, Andersen S B, Citterio M, Karlsson N B, Kjeldsen K K, Korsgaard N J, Larsen S H and Fausto R S. 2021. Greenland ice velocity maps from the PROMICE project. *Earth System Science Data*, 13(7): 3491-3512 [DOI: 10.5194/essd-13-3491-2021]
- Strozzi T, Luckman A, Murray T, Wegmuller U and Werner C L. 2002. Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2384-2391 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.805079]
- Trusel L D, Das S B, Osman M B, Evans M J, Smith B E, Fettweis X, McConnell J R, Noël B P Y and Van Den Broeke M R. 2018. Non-linear rise in Greenland runoff in response to post-industrial Arctic warming. *Nature*, 564(7734): 104-108 [DOI: 10.1038/s41586-018-0752-4]
- Whillans I M and Tseng Y H. 1995. Automatic tracking of crevasses on satellite images. *Cold Regions Science and Technology*, 23(2): 201-214 [DOI: 10.1016/0165-232X(94)00009-M]
- Wu S S, Yao Z J, Jiang L G and Liu Z F. 2015. Method review of modern glacier volume change. *Advances in Earth Science*, 30(2): 237-246. (吴珊珊, 姚治君, 姜丽光, 刘兆飞. 2015. 现代冰川体积变化研究方法综述. *地球科学进展*, 30(2): 237-246) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2015.02.0237]
- Zhou J M, Zhang X, Liu Z P and Li Z. 2021. Extraction and analysis of mountain glacier movement from GF-1 satellite data. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(2): 530-538 (周建民, 张鑫, 刘志平, 李震. 2021. 高分一号山地冰川运动速度提取与分析. *遥感学报*, 25(2): 530-538) [DOI: 10.11834/jrs.20219080]

Time-series surface velocity extraction of Petermann Glacier based on Sentinel-1 pixel offset-tracking and iterative SVD

JU Qi, LI Gang, LI Chaoyue, FENG Xiaoman, CHEN Xiao, YANG Zhibin, CHEN Zhuoqi

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

Abstract: Monitoring the Greenland glacier flow velocity is essential for the quantitative estimation of ice sheet material loss, the assessment of the impact of global climate change on ice sheet dynamics, and the evaluation of Greenland's contribution to current sea-level rises. The offset-tracking technique is the main method for deriving glacier velocity by using the intensity information of SAR or optical images. Intensity offset tracking is less sensitive to decorrelation than the InSAR method and can be applied to images with long temporal intervals. However, glacier avalanche, ice avalanche, snowfall, and melting - freezing cycles on glaciers still cause changes in the scattering characteristics of the surface, resulting in changes of the SAR image intensity, leading to a loss of correlation in matching between images, especially in summer. To provide more accurate glacier flow velocity field, this research proposes a novel data processing strategy of processing Sentinel-1 SAR data and takes the famous Petermann outlet glacier in Greenland as an example to extract its glacier velocity based on image tracking. Noise and errors in tracking images formed by single pairs of Sentinel-1 images are removed through morphological opening operation, connectivity analysis, adaptive median filtering, etc. Meanwhile, annual and monthly Greenland ice flow velocity products are employed to select datum by taking its low-speed area as reference. We also introduce flow direction of the annual or seasonal glacier flow to filter out wrong matchings. Similar to the small-baseline analysis of the InSAR technique, redundant observation of tracking pairs with 6-, 12-, and 18-day intervals are then applied to the Singular Value Decomposition (SVD) method to solve the time series of glacier velocity and to avoid the possible rank deficit. SVD is iteratively performed to remove the observed coarse error that could not be eliminated in the previous processing by checking residuals of the observation after each iteration. We obtain the time-series glacier velocity for the Petermann Glacier from the year 2018 to 2020 with a temporal resolution of 6 days. Compared with the published glacier velocity products, our derived results are less noisy, more continuous, smoother, and cover more area than the CPOM product, which employs the same data source. Compared with the PROMICE product produced from multitrack SAR, data show that we share similar accuracy and effective data coverage, but the results of this research have higher resolution and are less noisy, especially in summer. We conclude that the proposed algorithm can effectively eliminate the anomalous matching of single offset-tracking pair for forming high spatial and temporal resolution glacier flow velocity time series with redundant matching pairs by using an iterative SVD method, which is essential for monitoring glacier flow velocity for the Greenland Ice Sheet with satellite SAR images.

Key words: remote sensing, greenland ice sheet, glacier velocity, SAR, Sentinel-1, offset-tracking, singular value decomposition

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)