引文格式:尹谢兵,李梦华,俸彬,等.NCC堆叠的SAR POT方法参数优化及雅弄冰川流速提取[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1705-1718.DOI:10.13203/j.whugis20240303

Citation: YIN Xiebing, LI Menghua, FENG Bin, et al. Parameter Optimization of the SAR POT Method for NCC Stacking and the Yanong Glacier Velocity Extraction[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(8):1705-1718.DOI:10.13203/j.whugis20240303

NCC堆叠的SAR POT方法参数优化及雅弄冰川流速提取

尹谢兵[1] 李梦华[1,2,3] 俸 彬[1] 刘 滢[1] 杨梦诗[4] 唐伯惠[1,2,3]

1 昆明理工大学国土资源工程学院,云南 昆明,650093
2 云南省定量遥感重点实验室(筹),云南 昆明,650093
3 云南省山地灾害天空地一体化智慧监测国际联合实验室,云南 昆明,650093
4 云南大学地球科学学院,云南 昆明,650500

摘 要:山地冰川表面运动特征对于识别冰川链式灾害和研究全球气候变化具有重要意义。基于影像匹配的像素偏移量追踪(pixel offset tracking,POT)方法是提取冰川表面大梯度形变的有效手段,然而POT方法的测量精度与影像分辨率密切相关,周期性获取的Sentinel-1分辨率较低(约5×20 m),在狭长形态的山地冰川上使用小窗口匹配时噪声的影响大,归一化互相关系数(normalized cross-correlation,NCC)峰值低,难以获取可靠的冰川位移。利用时序影像对的NCC堆叠提高NCC峰值,降低噪声的影响,牺牲了一定的时间分辨率来提高POT方法小窗口匹配的精度。通过对比堆叠数、搜索距离、匹配窗口大小等不同参数设置对实验结果的影响,提供POT方法计算位移的最佳参数组合策略。将该方法应用于雅弄冰川表面流速提取,使用2017年10月—12月间Sentinel-1升轨数据集,提取了该时段冰川表面的形变。进行NCC堆叠后,非冰川区域的噪声被很好的抑制,冰川区域显示出了更强的空间覆盖和空间连续。稳定区域速度残差的平均值和方差都得到了不同程度的减小,堆叠NCC计算的速度残差均值比单像对NCC减小到1/2以下,速度残差的标准差减小到原来的1/3,大多数区域都表现出了强信噪比增益。

关键词:像素偏移量追踪;NCC堆叠;山地冰川流速;雅弄冰川

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-09-24

DOI:10.13203/j.whugis20240303 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1705-14

Parameter Optimization of the SAR POT Method for NCC Stacking and the Yanong Glacier Velocity Extraction

YIN Xiebing[1] *LI Menghua*[1,2,3] *FENG Bin*[1] *LIU Ying*[1] *YANG Mengshi*[4] *TANG Bohui*[1,2,3]

1 School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China
2 Yunnan Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing, Kunming 650093, China
3 Yunnan International Joint Laboratory for Integrated Sky-Ground Intelligent Monitoring of Mountain Hazards, Kunming 650093, China
4 School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China

Abstract: **Objective**: The surface movement characteristics of mountain glaciers are crucial for identifying potential glacial chain disasters and studying global climate change. The pixel offset tracking (POT) method based on image matching is an effective method of detecting large-gradient deformations on glacier surfaces. However, the accuracy of the POT method is closely related to image resolution. The Sentinel-1 imagery, acquired at regular intervals, has a relatively low resolution (approximately 5×20 m). In the case of small window matching on narrow mountain glaciers, the method is highly susceptible to noise, which reduces normalized cross-correlation (NCC) peak values and hinder the acquisition of reliable glacier displacement measurements. **Method**: To improve NCC peak values and reduce noise interference, this study utilizes NCC stacking from time-series

基金项目:国家自然科学基金重点项目(42230109);云南省基础研究计划(202301AT070436)。

第一作者:尹谢兵,硕士生,主要研究方向为雷达遥感大梯度形变监测研究。yinxb2021@gmail.com

通信作者:李梦华,副教授。menghuali@kust.edu.cn

image pairs, which enhances the accuracy of the POT method with small window matching, albeit at the expense of some temporal resolution. By comparing the effects of different parameter settings, such as the number of stackings, search distance, and matching window size on the experimental results, the study offers an optimal strategy for parameter selection when calculating displacement using the POT method. **Results:** The settings of parameters like search distance and matching window size in POT calculations significantly influence experimental outcomes. Compared to single-image pair calculations with the same parameter settings, NCC stacking significantly improves the spatial continuity and coverage of the velocity field of the Yanong Glacier. Additionally, the mean and variance of velocity residuals in stable regions are reduced to varying degrees, with most areas exhibiting a strong signal-to-noise ratio gain. **Conclusion:** The settings for the search window and matching window are crucial for ensuring accurate displacement tracking. Larger windows tend to produce better displacement field results but may smooth out the edges and local details of the glacier. Using NCC stacking allows for robust tracking of glacier velocity on smaller windows, achieving coverage comparable to large-template pairwise NCC. This makes NCC stacking the preferred method, especially when the template size is constrained by the area of small-scale glaciers.

Key words: pixel offset tracking; NCC stacking; mountain glacier flow velocity; the Yanong Glacier

青藏高原上分布着大量的山地冰川,号称亚洲水塔、地球第三极,是全球气候变化的敏感指示计[1]。在全球气候变暖背景下,青藏高原有着增暖放大效应,高海拔冰川快速融化,冰川运动加速,冰湖数量、面积不断增加,冰崩、冰湖溃决等冰冻圈链式灾害日益频发。2018年雅鲁藏布江左岸色东普沟上游发生冰崩,堵塞雅鲁藏布江河道,形成冰崩-碎屑流-堰塞湖-溃决洪水灾害链[2]。精确获取山地冰川表面运动特征,评估冰川稳定性,对于识别冰川链式灾害、研究全球气候变化具有重要意义[3]。

青藏高原高海拔山地冰川人员难以到达,利用全球导航卫星系统、机载激光雷达、花杆测量等地面测量手段获取数据成本高昂,难以大规模应用。光学遥感可以通过图像匹配的方式量测冰川位移,但是受云层遮挡和光照条件的影响大,冰川表面容易发生过饱和,难以识别有效特征,位移测量准度低。星载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)可以全天时、全天候大范围获取影像,测量地表形变[4-5]。通常使用的雷达干涉测量方法只适用于厘米级至毫米级的微小形变测量,在动辄发生数米位移的冰川应用中会产生严重的失相干导致无法测量。基于SAR影像的像素偏移追踪(pixel offset tracking,POT)技术广泛应用于大梯度快速形变的测量中[6-9],在格陵兰岛、南极地区和阿拉斯加育空的大型冰川流速测量、冰川跃动机制反演与冰川动力学研究中都取得了良好的效果[10-13]。

POT方法的形变测量精度与影像分辨率密切相关。相比于极地冰川,青藏高原山地冰川面积小、分布零散、运动特征复杂,亟需高分辨率遥感影像来提取冰川表面运动特征。青藏高原地形复杂、气候多变,高分辨率光学影像数据受云雾的影响难以周期获取,同时也缺乏高分辨率SAR影像,免费且周期性获取的Sentinel-1分辨率较低(5×20 m),难以提取可靠的山地冰川流速。

为了改进POT精度,学者们进行了大量的研究工作。文献[14]建议在互相关匹配之前对SAR图像进行空间高通滤波;文献[15]开发了一种技术来局部优化图像分区的模板大小;文献[16]利用自聚焦对SAR图像平均以增强表面纹理特征,这些对原始图像的处理方法都为了在小表面特征上获取更好的跟踪结果。先前的研究也常用偏移场后处理技术(平滑、检测异常值、中值滤波器)对冗余偏移场处理获得鲁棒的偏移场。文献[17]提出了一种多图像、多模块算法,其中使用不同配置(即模板大小、卷积滤波器等)下的模板对生成多个归一化互相关系数(normalized cross-correlation,NCC),并从每个单像对NCC中获得偏移向量群体,从群体中投票选出最佳的偏移向量。类似地,文献[18]提出了一种多配对图像相关技术,该技术利用配对NCC为每个像素位置生成多个偏移量,然后利用开发的指标对偏移量堆进行汇总。还有一些学者通过融合多元数据来提高POT的精度,文献[19]通过联合星载SAR和地基SAR两种数据来提高POT的精度;文献[20]提出了以数字高程模型辅助偏移量跟踪的技术,将地形产生的偏移量也考虑在内,削弱了地形误差。之前的研究工作或侧重于图像的预处理,或侧重于偏移场的后处理,从单像对NCC中获取所有信息,并使用NCC场的峰值来估计偏移量[21]。但对于信噪比(signal-to-noise ratio,SNR)较低的

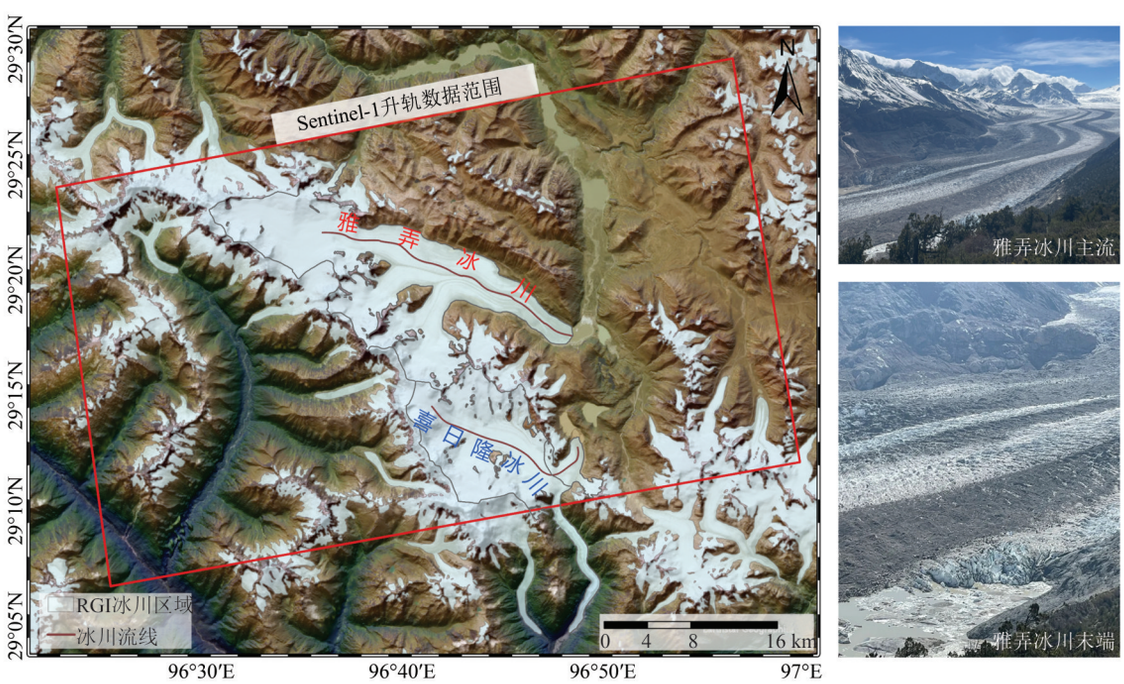
NCC，当NCC匹配峰中噪声占主导位置时，位移峰值可能会出现在错误的位置。本文使用了一种提高SAR非相干偏移跟踪性能的方法，首先从图像时间序列创建成对NCC时间序列，然后对NCC堆叠平均以进行偏移估计[22]。通过利用NCC的全部信息来降低位移噪声并提高SNR，从而使NCC的跟踪更加稳健。该概念也常被平均互相关、集成跟踪、集成相关或集成匹配等不同术语来表示，已被用于粒子图像测速[23-24]、医学图像跟踪[25-26]和光学图像冰瀑布跟踪[27]。本文将该方法称为互相关堆叠(NCC Stacked)，它最能代表该方法的核心操作。

本文的目标是探究NCC堆叠的SAR POT方法的参数优化及其对雅弄冰川流速测量的改进，使用2017年10月—12月间Sentinel-1升轨数据集，提取了藏东南地区雅弄和喜日隆冰川的位移。通过对比堆叠数、搜索距离、匹配窗口大小等不同参数设置对实验结果的影响，探讨了POT参设设置对冰川速度提取的影响，分析对比NCC堆叠相对于单像对NCC在位移估计中的稳健性。利用来自多个图像对的时间冗余信息，以提高POT测量山地小规模冰川的能力。

1　研究区概况与研究数据

1.1　研究区域

雅弄冰川位于念青唐古拉山脉东部，是青藏高原最大的终止湖冰川(图1)。据第二次中国冰川清查记录，雅弄冰川面积约154 km^2，主干长度约30 km。该地区气候主要受印度夏季风控制，是青藏高原最温暖、最湿润的地区[28]。根据欧洲中期天气预报中心再分析数据(1979—2019年)，该地区年平均气温约为－4.6 ℃，夏季和冬季平均气温分别约为5.0 ℃和－14.4 ℃。年总降水量约1 800 mm，春、夏季降水量平均分别在615 mm和576 mm左右，占年总降水量的67%，该地区冰川属于春夏堆积型。



注：RGI (Randolph glacier inventory)：伦道夫冰川清单。

图1　研究区域和Sentinel-1升轨数据覆盖范围

Fig. 1　The Study Area and Sentinel-1 Up-Orbit Data Coverage

1.2　实验数据来源

欧洲空间局所提供的Sentinel-1数据使用C波段的SAR仪器，能够全天候(白天、夜晚、有云和无云)获取高分辨率的雷达图像。该卫星系统包括Sentinel-1A和Sentinel-1B两颗卫星，它们沿着相同的轨道运行，相隔180°，能够提高地面覆盖频率和数据更新率，将重访周期从12 d缩短至6 d，具有4种成像模式，即干涉宽模式、波模式、条带模式和超宽模式。冰川多处于高原山地地区，卫星不同轨道成像受到地形因素的影响对不同坡向地形的位移探测能力差异明显。卫星的右侧视成像致使升轨数据从西边扫描地表，有助于东坡向形变的获取[29]。雅弄冰川冰流方向大致为自西向东，本文选取2017-10-13—2017-12-24期间采集的7景Sentinel-1升轨数据，具体参数如表1所示。

表1 Sentinel-1卫星数据参数

Table 1 Sentinel-1 Satellite Data Parameters

卫星	采集时间	传感器参数				
		轨道	轨道号	入射角/(°)	方位角/(°)	波段
Sentinel-1	2017-10-13、2017-10-25、2017-11-06、2017-11-18、2017-11-30、2017-12-12、2017-12-24	升轨	129	33.78	−13.11	C

2 研究方法

2.1 POT方法

作为SAR干涉测量的替代方法,POT可以通过估计两幅图像的相似性来准确、稳健地测量它们之间的相对位移[30-31]。其工作流程如图2所示,红色框突出显示了该技术的核心操作,通过在频域(傅里叶)或空间域[21]计算的NCC来实现一对图像模板之间的相似性度量。空间域的NCC系数可以写成:

$$\mathrm{NCC}_{RS}=\frac{\sum_{x=1}^{N_x}\sum_{y=1}^{N_y}\left[\left(R(x,y)-\bar{R}\right)\cdot\left(S(x-\Delta x,y-\Delta y)-\bar{S}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{x=1}^{N_x}\sum_{y=1}^{N_y}\left(R(x,y)-\bar{R}\right)^2}\sqrt{\sum_{x=1}^{N_x}\sum_{y=1}^{N_y}\left(S(x-\Delta x,y-\Delta y)-\bar{S}\right)}} \tag{1}$$

$$\bar{R}=\frac{1}{N_x\times N_y}\sum_{x=1}^{N_x}\sum_{y=1}^{N_y}R(x,y) \tag{2}$$

$$\bar{S}=\frac{1}{N_x\times N_y}\sum_{x=1}^{N_x}\sum_{y=1}^{N_y}S(x-\Delta x,y-\Delta y) \tag{3}$$

式中,R是参考图像模板;S是搜索图像模板;$N_x\times N_y$是匹配窗口大小;Δx和Δy是S相对于R在x和y方向的位移。

图像匹配技术都只提供$[\Delta x\ \Delta y]^{\mathrm{T}}$的整数像素值[32]。在实际计算中,精确跟踪需要亚像素精度,首先可以通过使用连续函数(如多项式函数或高斯函数)拟合NCC峰值,然后找到拟合函数最大值的位置来q确定位移[22]。在本文中,使用了高斯函数$g(x,y)$来拟合NCC峰值。拟合成功时,使用峰值位置$\vec{p}_{\mathrm{fit}}=(x_{0,\mathrm{fit}},y_{0,\mathrm{fit}})$。一旦峰值位置确定,就可以通过测量从NCC中心$\vec{c}=(x_c,y_c)$到峰值的偏移来估算偏移矢量$\vec{D}=(D_x,D_y)$,$\vec{D}=\vec{p}-\vec{c}$,得到的偏移矢量场可以通过以下公式转换为速度场:

$$\vec{v}=\vec{D}/T \tag{4}$$

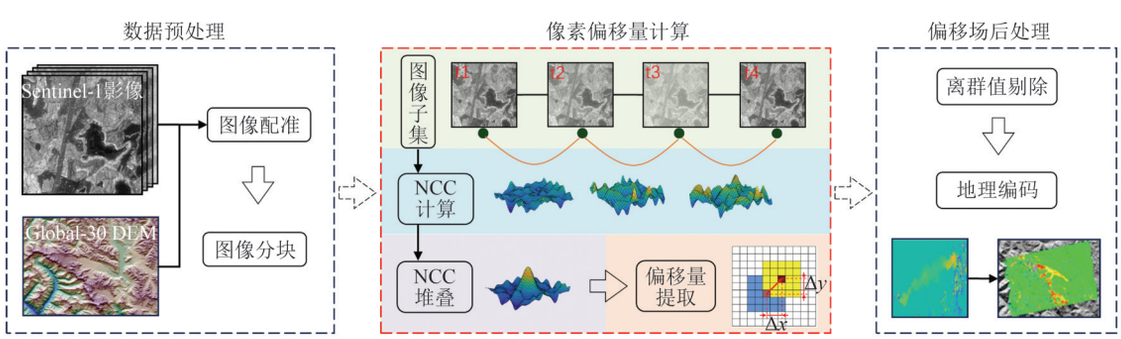


图2 POT方法处理流程图

Fig. 2 Processing Flowchart of POT Method

2.2 NCC堆叠处理

为了更好地解释NCC中的噪声信号,将空间域的NCC转化到频率域表示:

$$\hat{\gamma}=F(\mathrm{NCC})=\frac{\hat{R}^{*}\cdot\hat{S}}{\sqrt{E\{|\hat{R}|^2\}\cdot E\{|\hat{S}|^2\}}} \tag{5}$$

式中,$*$是复数共轭相乘;$\hat{R}=F(R)$是参考模板R的傅里叶变换;$E\{|\hat{R}|^2\}$和$E\{|\hat{S}|^2\}$是两个匹配模板的总能量。

POT跟踪依赖于NCC峰值的明确识别,这要求模板对包含丰富的可跟踪特征。但在冰川的应用中,妨碍偏移估计的噪声由时间上不相关的内容添加到NCC场中,例如不连续的散斑、非刚性平移的特征(例如冰裂缝、扭曲的表面)和冰川表面水的多相态变化(例如积雪/水/冰之间的转化)。从偏移跟踪的角度看,图像模板及其傅里叶变换可视为由信号$\hat{s}$和噪声$\hat{n}$组成:

$$\hat{R}=\hat{s}_R+\hat{n}_R,\hat{S}=\hat{s}_S+\hat{n}_S \tag{6}$$

信号$\hat{s}$对应相关内容(即$\hat{s}_R=\hat{s}_S$),它产生

NCC位移信号,而噪声 $\hat{n}$ 则代表非相关内容[22],则式(5)可写为:

$$\hat{\gamma}=\frac{\hat{s}_R^*\hat{s}_S+\hat{s}_R^*\hat{n}_S+\hat{n}_R^*\hat{s}_S+\hat{n}_R^*\hat{n}_S}{\sqrt{E\{|\hat{R}|^2\}\cdot E\{|\hat{S}|^2\}}} \tag{7}$$

将 $\hat{\gamma}$ 分解为4个基本互相关,即1个位移自相关 $\hat{s}_R^*\hat{s}_S$ 和3个信号与噪声之间的互相关($\hat{s}_R^*\hat{n}_S$、$\hat{n}_R^*\hat{s}_S$ 和 $\hat{n}_R^*\hat{n}_S$)。由于一个影像模板中的噪声与另一个影像模板中的噪声或信号无关,可以将后3个分量视为对 $\hat{\gamma}$ 噪声的贡献分量。

为了获得可靠的偏移估计,可以使用图像时间序列创建单像对NCC,然后进行NCC堆叠以抑制噪声。在这个堆叠中,每个单像对NCC都捕捉了图像对所代表位移的映射。假设每个堆栈内时间序列影像采集期间表面速度保持不变,可以预期所有单像对NCC记录的偏移量完全相同,因此,可以推测由 $\hat{s}_R^*\hat{s}_S$ 位移信号在所有单像对NCC中产生的峰值都在相同的位置出现,而由 $\hat{s}_R^*\hat{n}_S+\hat{n}_R^*\hat{s}_S+\hat{n}_R^*\hat{n}_S$ 产生的环境噪声场在堆叠中随机分布,堆叠平均后随着堆叠数的增加,位移线性信号将被放大,噪声信号会趋于零。

图2中红色框表示了一个时间序列子集内的NCC堆叠操作。假设收集的每个时间序列子集由 $N_i(i=1,2,\cdots,K)$ 个图像组成,那么可以创建一个由 N_i-a 个单像对NCC组成的子堆栈。假设所有时间序列子集内冰川表面速度相同,可以在空间域中对单像对NCC进行堆叠,计算跟踪偏移的平均NCC如下:

$$\bar{\gamma}=\sum_{j=1}^{N_i-a}\gamma_{i,j}/(N_i-a) \tag{8}$$

式中,$\gamma_{i,j}$ 指空间域的NCC信号。尤其是季节性速度变化,或所谓的阶段平均速度场[24],可以用式(8)来解决,即把一年中几个月的堆叠平均到季节中,可以得到冰川稳健的季节性流速变化。

2.3　速度场评估

1) 速度残差指标。偏移跟踪的准确性可以通过检查稳定地表上的速度残差来评估,假设该稳定区域的像素偏移跟踪计算速度等于零,为此,将选定稳定区域内的残差指标定义为:

$$R_{\text{mean}}=\sum_1^n v_{\text{stable}}/N_{\text{stable}} \tag{9}$$

$$R_{\text{RMSE}}=\sqrt{\sum_1^n(v_{\text{stable}}-\bar{v}_{\text{stable}})^2}/N_{\text{stable}} \tag{10}$$

式中,v_{stable} 表示稳定区域的POT所计算的速度值;$\bar{v}_{\text{stable}}$ 是其平均值;N_{stable} 是计算的位移像元个数;R_{RMSE} 是该区域速度的均方根误差。

2) SNR增益指标。稳健的跟踪可以用SNR值来表征。为了评估NCC堆叠所获得的速度场置信度的提高情况,可通过以下方法计算SNR增益:

$$\text{SNR}_{\text{gain}}=\text{SNR}_{\text{NCC堆叠}}-\text{SNR}_{\text{NCC}} \tag{11}$$

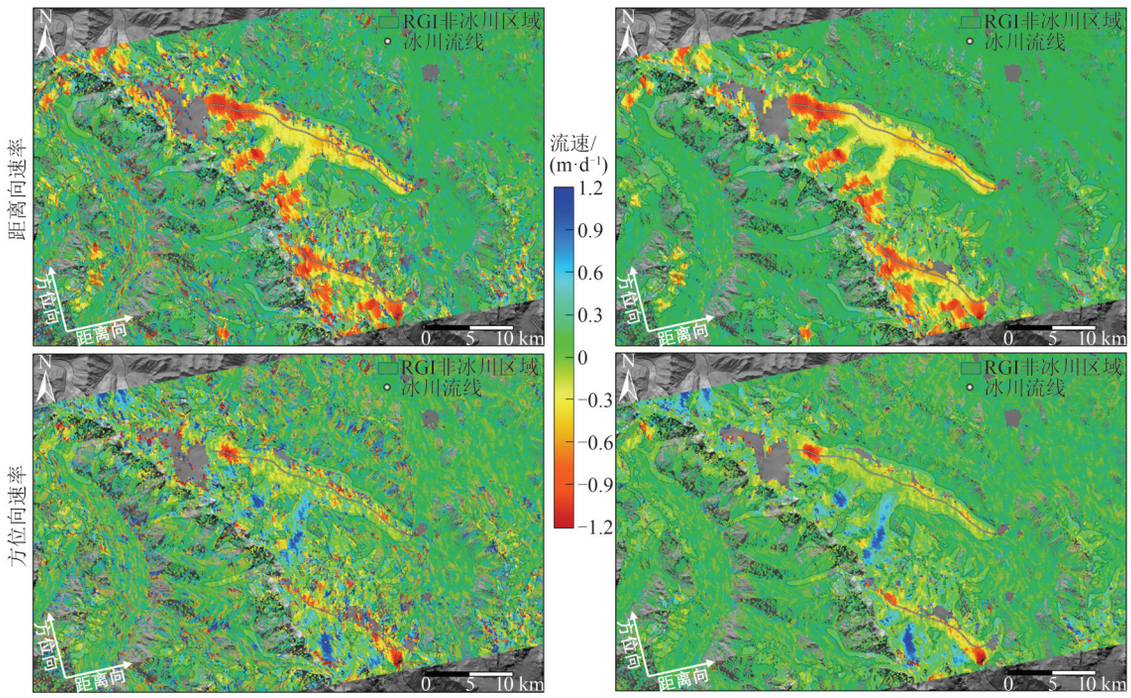
利用SNR增益可以反映速度场中每个模板位置的SNR变化。具体来说,SNR增益大于0表示置信度增加,而小于0则表示置信度降低。

3　结果与分析

3.1　基于NCC堆叠的雅弄冰川表面速度场对比

使用单像对NCC和NCC堆叠生成的距离向和方位向速度场空间分布如图3所示,有一部分少量空白是删除了无法成功匹配的点造成的,另一部分(分布在西面山坡居多)是SAR影像的侧视成像导致朝向卫星那面山坡上形成了叠掩。在距离向冰川区域流速图中,从NCC流速图中可以看出,雅弄冰川中部区域靠近山体边缘和冰川前端的流速场上有许多噪点(颜色红蓝相间),这说明使用单像对NCC速度估计失败。当应用NCC堆叠时,这些噪声全部消失,并且在喜日隆冰川上,NCC堆叠在消除噪声的同时,得到了更大的空间覆盖。对于非冰川区域,理论上来说该区域速度应该为零,但从单像对NCC计算的流速场上来看,匹配错误的点在整个区域都有分布,尤其是在研究区域西部的峡谷地带。而从NCC堆叠计算的流速场,非冰川区域匹配错误的点大大减少,匹配质量得到了极大的改进。

在方位向冰川区域流速图中,从NCC流速图中可以看出,在雅弄冰川后端堆积区和中部平流区存在大量噪声,由于SAR影像方位向分辨率远低于距离向,可以看出方位向的NCC计算的流速质量远低于距离向。此外,在喜日隆冰川区域,单像对NCC计算的流速场存在大量空隙,并且在冰川直流汇合处和冰川前端部分都得到了错误的计算结果。然而在NCC堆叠计算的冰流速图中,冰川后端堆积区域的速度由于SNR小于0而被剔除,它不会像NCC计算的流速图中那样被错误地保留,因此整个冰川中部平流区域都被成功跟踪。而在喜日隆冰川上,不仅POT错误跟踪的像素数量大大降低,而且对冰川支流汇合区破碎易变化表面的识别跟踪能力增加,速度场未覆盖区域仅收缩到冰川前端部分。对于非冰川区域,单像对NCC计算的流速在整个非冰川覆盖范围



(a) NCC (b) NCC堆叠(3)

图3 使用单像对NCC和NCC堆叠生成的冰川速度场空间分布

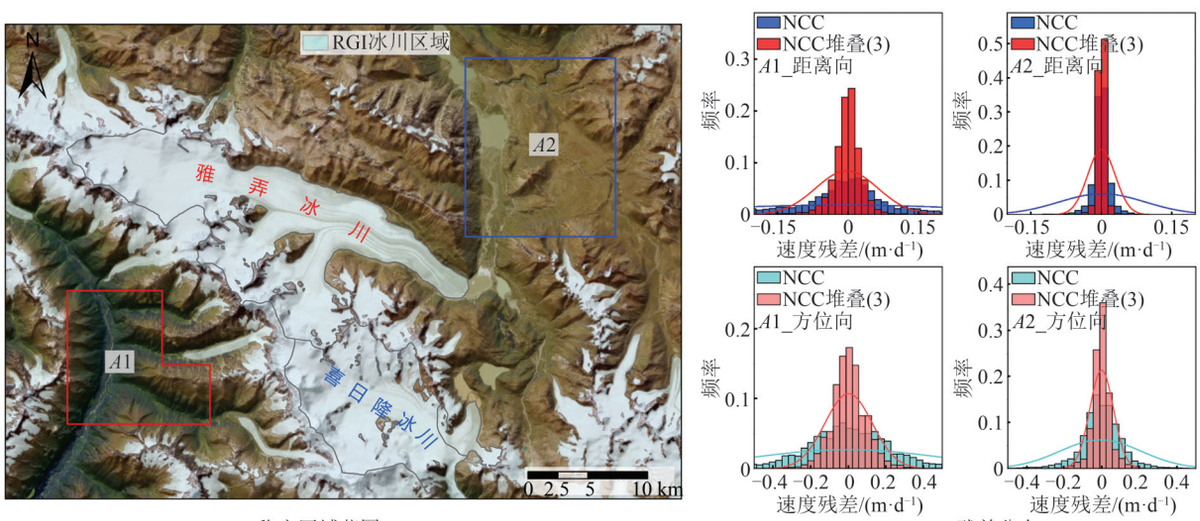
Fig. 3 Spatial Distribution of Glacier Velocity Field Generated Using Single Image Pair NCC and NCC Stacked

都有很大的噪声表现。相反,NCC堆叠会削弱大量的随机噪声,不相关随机分布的噪声在堆叠中被平滑,正如计算的流速场那样,大部分非冰川区域的流速都向0附近收缩。

3.2 基于NCC堆叠的雅弄冰川表面速度残差对比

通过对图4(a)中*A*1和*A*2稳定区域单个NCC和堆叠数为3的NCC估计位移的统计分析,获得了速度残差的分布直方图(图4(b))。统计分析表明,单像对NCC结果比堆叠数为3的NCC结果显示出离散的分布和更大的残差值,在其他相同的参数情况下,它们的分布都趋于正态分布,NCC计算的稳定区域速度残差远小于单像对NCC计算的结果。

表2计算了稳定区域距离向和方位向的速度残差指标。在*A*1区域距离向速度场中,NCC堆叠计算的R_{mean}比单像对NCC减小到1/8,在方位向上的R_{mean}减小到1/2,R_{std}减小到原来的1/3。同样在*A*2区域,R_{mean}和R_{std}都有不同程度的减小。无论在距离向还是方位向,NCC堆叠都极大提升了速度场跟踪的准确性。



(a) 稳定区域范围 (b) 残差分布

图4 稳定区域速度场残差统计

Fig. 4 Residual Statistics of Velocity Field in Stable Region

表 2　稳定区域速度场的残差指标/m

Table 2　Residual Index of Velocity Field in Stable Region/m

稳定区域	A1区域				A2区域			
	距离向		方位向		距离向		方位向	
	NCC	NCC堆叠(3)	NCC	NCC堆叠(3)	NCC	NCC堆叠(3)	NCC	NCC堆叠(3)
R_{mean}	−0.016	−0.002	−0.004	0.002	0.002	0.000 1	−0.007	−0.001
R_{std}	0.299	0.066	0.495	0.126	0.091	0.029	0.216	0.063

3.3　基于NCC堆叠的雅弄冰川表面SNR增益

图 5 展示了堆叠 NCC 与单像对 NCC 相比，在全部位移估计范围内的 SNR 增益。在大多数区域，SNR 都会增加。对于稳定的山体和植被覆盖区域，发现了大面积的 SNR 增益（红色）。图 3 所示的速度场结果显示，单像对计算的这些非冰川区域的速度场噪声较大，存在许多误差间隙，而堆叠 NCC 结果则显示空间覆盖范围扩大，且速度大小和方向在空间上更加连续。在冰川和非冰川的小部分地区存在 SNR 下降的区域（蓝色），对应在图 3 中速度图没有明显改善的区域，可能是因为该区域已经可以通过单像对 NCC 得到很好的跟踪结果（如图 5 中 *P*2 位置），也可能是因为该区域无论是通过配对结果还是 NCC 堆叠结果都无法跟踪（如图 5 中喜日隆冰川终点区域）。分析图 5 可以发现，对于可追踪性较好的区域（如雅弄冰川第二支流和主流交汇区的部分区域），SNR 会略微降低，因为覆盖范围内最好的单像对 NCC 已经代表了 NCC 堆叠中的最高 SNR，对其叠加平均反而会降低 SNR。

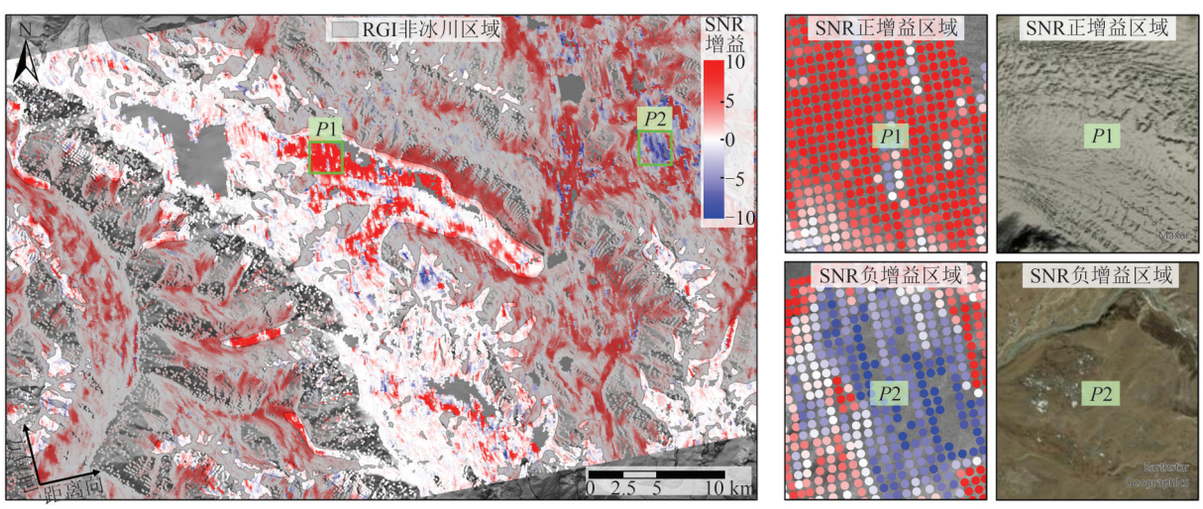


图 5　信噪比增益图

Fig. 5　Signal-to-Noise Ratio Gain Graph

4　讨　论

4.1　NCC堆叠的性能改进

为了进一步探究 NCC 堆叠对不同匹配窗口大小 POT 位移场估计改进其背后的机制，随机选择位于冰川上的点来绘制不同堆叠数和不同匹配窗口的 NCC 互相关 2D 曲面（图 6）。具有 16×24 和 32×48 小匹配窗口的单像对 NCC 计算的互相关系数曲面有许多峰值，位移信号和噪声信号的峰值并不能清晰地区分，64×96 的大窗口中能得到较为平滑的互相关系数曲面，位移信号峰值唯一，但和周围的噪声值比较接近，此时很容易被噪声影响，不具有鲁棒性。总体而言，随着匹配窗口的增加，抗噪声的能力越来越强，但这是以牺牲空间分辨率为前提的。本文分别测试了堆叠数为 3 和 5 的 NCC 堆叠方法，在 16×24 和 32×48 小窗口中，当堆叠数为 3 时，位移峰值就已经清晰可见，且随着堆叠数的增加，随机噪声信号被平均后逐渐趋于一个很小的值，位移信号越来越突出，也就是 SNR 呈增长趋势。

实际应用中，堆叠数为 3 时就能得到较为稳健的冰川流速，当研究冰川的季节性变化时，要合适地选择堆叠大小，一味地增加堆叠数并不是一个良好的策略。一方面增加堆叠数会覆盖掉大量的时间周期内的变化，这在研究冰川涌动中

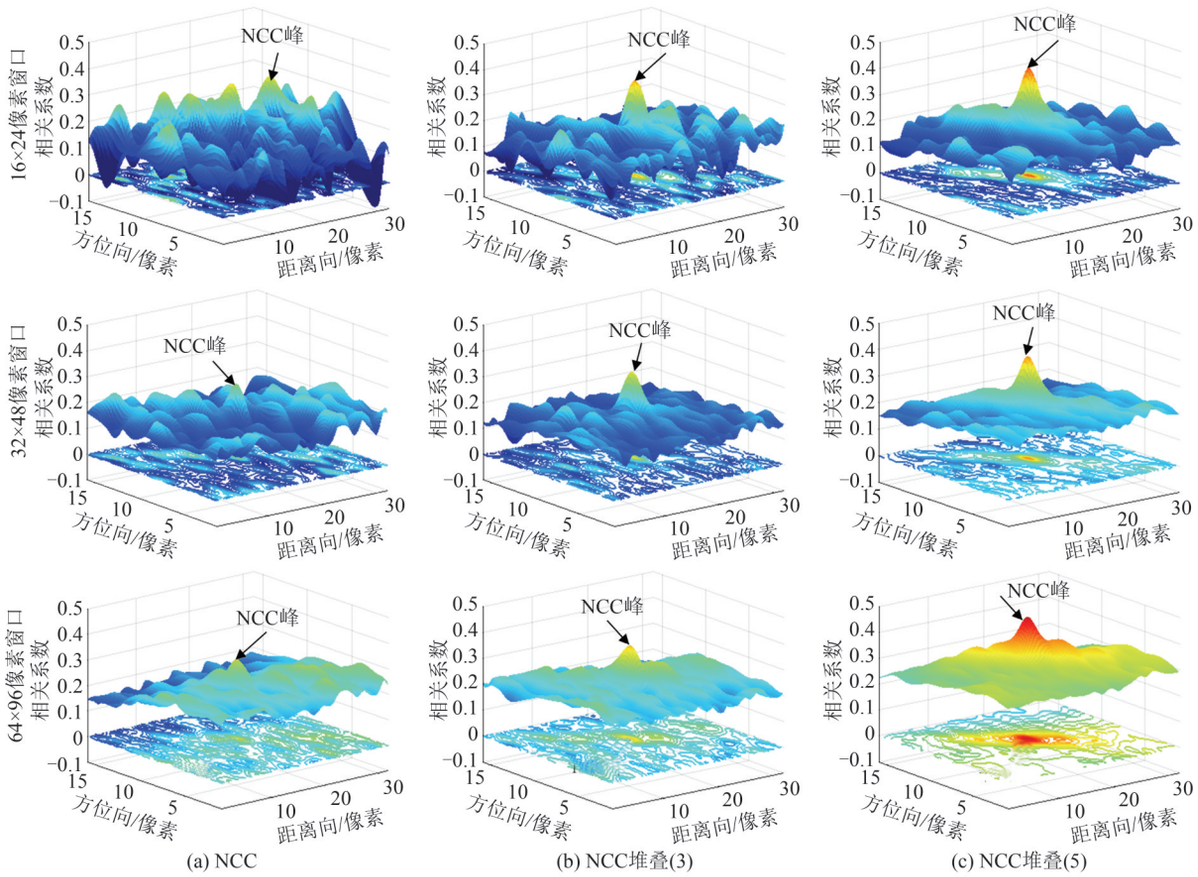


图6 不同堆叠数和匹配窗口计算的NCC互相关曲面

Fig. 6 NCC Cross-Correlation Surfaces Calculated with Different Stacking Numbers and Matching Windows

是极为重要的;另一方面在一些季节性的冰川中,冰川流速的季节性差异较大,当增大堆叠数时,堆叠内NCC跨越了较长时间,并不能保证速度线性不变性这一前提假设,此时由于位移峰值位置的扰动而造成NCC位移峰的运动模糊。

当然也可以使用更大的窗口(如96×128、128×192和192×256)来提高模板匹配的相干性,它们必然会提供更好的速度场覆盖范围以及更小的噪声。事实上,使用的窗口越大,就越有可能得到包括冰区和非冰区的子图像。混合像元区域的互相关算法会趋向于收敛到与无冰部分相对应的解决方案一致,因为无冰部分大多为裸露的山体岩石,它们通常包含比覆冰部分更明显、更稳定的纹理特征。但在小规模山地冰川地区,这种无冰部分的位移结果会覆盖掉冰川部分的流速,因此大窗口好的结果并不代表着冰川流速场的正确映射,它巨大的窗口覆盖范围平滑了冰流局部流速的差异。根据上述结果,使用NCC堆叠在32×48和64×96之间的像素窗口内计算位移是首选方案,因为它能更好地保留小结构,同时保持足够的相关性。

4.2 NCC堆叠POT方法参数对形变估计的影响

4.2.1 堆叠数和搜索距离的影响

图7显示了在不同堆叠数和不同搜索距离(即1×4像素和4×16像素)下距离向和方位向冰川的流速。可以看出,1×4像素(方位向×距离向)的小搜索距离在雅弄冰川大部分区域都无法捕捉到冰川位移,2×8像素的搜索距离只有在冰川后端快速滑动区域无法捕捉位移,因为这些位置的冰川位移大于相关函数算法计算的距离,因此,必须根据冰川的位移调整搜索距离。

由于冰川流速事先并不知晓,而且地表位移与图像之间的时间基线几乎呈线性增长,因此搜索距离根据时间基线确定。表3总结了使用Sentinel-1(14×2.4 m分辨率)捕捉山地冰川流速所需的方位向和距离向搜索距离(像素),这取决于所用图像之间的时间基线,并考虑到大多数山地冰川的地表流速不足600 m/a。

4.2.2 堆叠和匹配窗口大小的影响

匹配窗口是位移估计中最重要的参数,在32×48像素和64×96像素大小的匹配窗口下获得的雅弄冰川表面距离向和方位向流速如图8所示。对于32×48像素的窗口,单像对NCC计算的流速空间

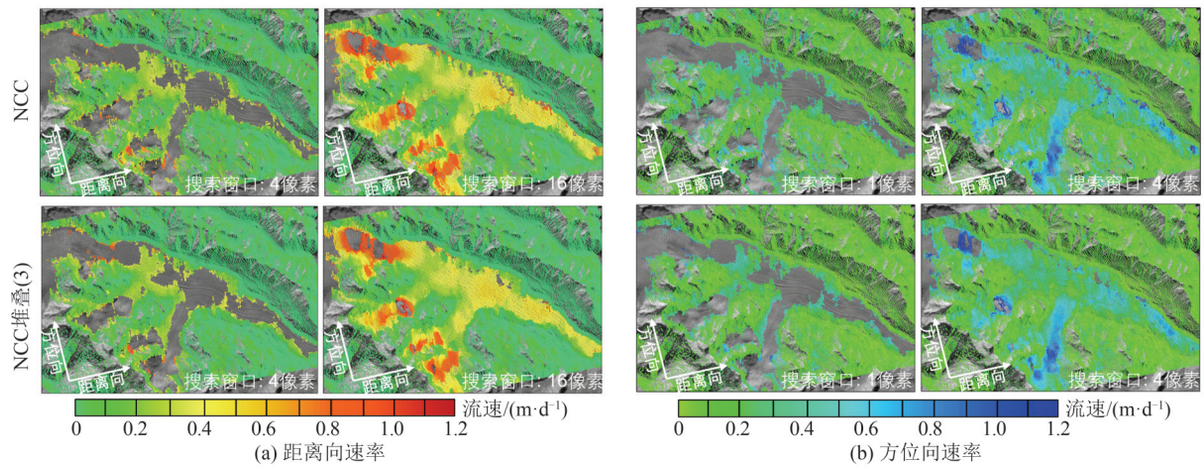


图 7　不同堆叠数和搜索距离分别计算的冰川速率图

Fig. 7　Glacier Velocity Calculated for Different Stacking Numbers and Search Distances

表 3　利用 Sentinel-1 捕捉 600 m/a 所需的搜索距离

Table 3　Search Distance Required to Capture 600 m/a

时间基线/d	方位向搜索距离/像素	距离向搜索距离/像素
16	2	11
32	4	22
64	8	44

分布质量非常差,尤其在冰川覆盖区域成功跟踪的像素占比不足 70%。对于窗口尺寸 64×96 像素的匹配模板大小,成功跟踪区域的百分比始终高于 90%,能明显解译冰川的位移,相对于 32×48 像素窗口,匹配错误的区域大大减少,速度跟踪的空间连续性有了很大提升。

使用 NCC 堆叠大小为 3 的测试结果同样显示在图 8 中。NCC 堆叠在相同窗口下得到的速度场结果相对于单像对 NCC 有了显著提升,使用 32×48 像素的匹配窗口大小得到的结果已经接近单个成对 NCC 64×96 窗口大小的结果。这表明使用 NCC 互相关堆叠技术在同样的小窗口区域能够得到更稳健的冰川表面流速,这在山地冰川中极其重要,山地冰川流速较为缓慢,牺牲时间分辨率换取空间分辨率,得到更为精确的冰川表面流速。

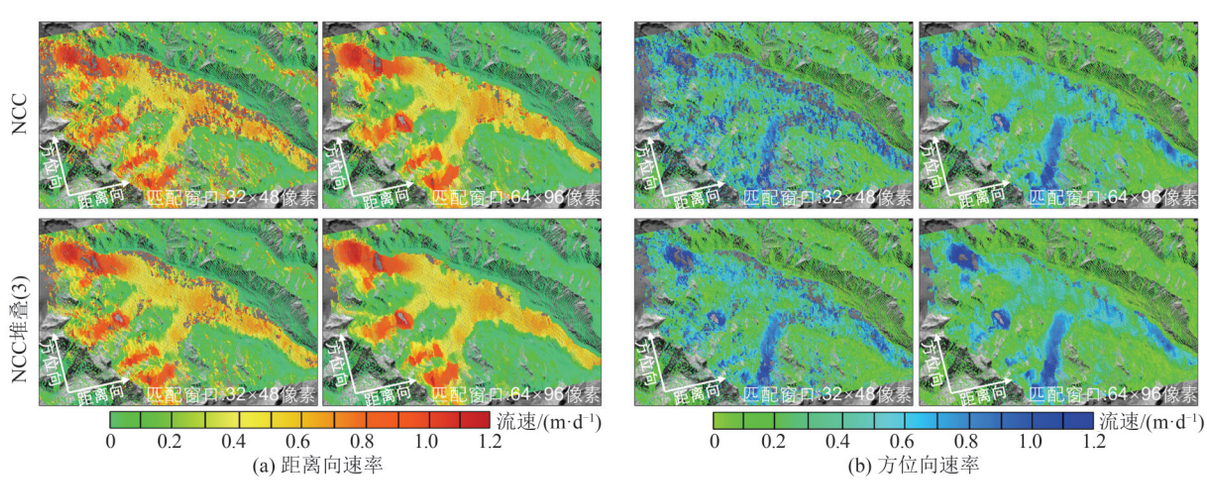


图 8　不同堆叠数和匹配窗口计算的冰川速率图

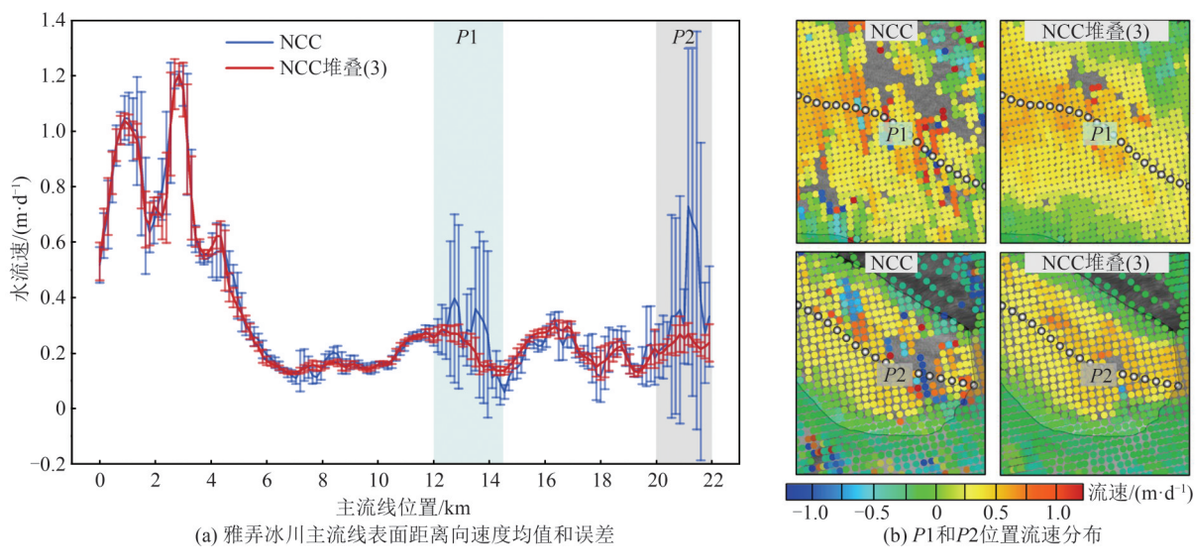
Fig. 8　Glacier Velocity Plots Calculated with Different Stacking Numbers and Matching Windows

4.3　雅弄冰川主流线速度对比分析

单像对 NCC 和 NCC 堆叠(3)计算的雅弄冰川距离向主流线冰流速及误差显示在图 9 中,远离冰川堆积区 0~5 km 处,总共出现了 3 个速度峰值,第一个峰值出现在图 10 中的 *S*1 区域,该区域位于冰川堆积区前沿,大量的积雪被挤压或消融冻结成冰,*S*1 区域的冰川受到沿主流线向下的推力,加速了冰川滑动。在 *S*2 和 *S*3 区域,其地形有一个明显坡度突变,突然下降的地形梯度加速了冰川平滑和蠕滑形变,引起了速度峰值。远离冰川堆积区 6~10 km 是雅弄冰川南侧第一支流汇入区域,向北流动的支流对主流上冰川形成了一

个北侧向挤压力,增加了主流冰川与北侧冰床的滑动摩擦力,导致此区域的冰川速度较为缓慢,最小速度仅为0.16 m/d。

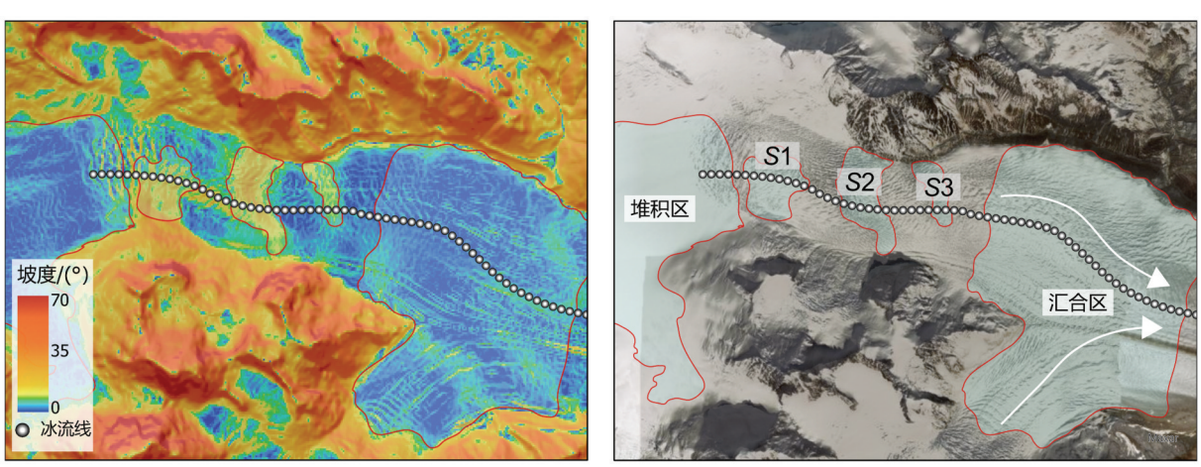
冰川速度场具有空间平滑性,由单像对NCC和NCC堆叠计算的主流线距离向速度误差在图9中分别由蓝色和红色表示,实线代表了冰川主流线上一点周围直径200 m范围内的速度值的均值,误差值是其标准差(为了统计明显,在这里不考虑冰川运动方向,对速度均取了绝对值),可以清晰地看出单像对NCC在*P*1和*P*2位置发生了错误跟踪而导致局部速度误差增大,而NCC堆叠在主流线全部位置都能对冰川表面进行稳健跟踪。局部细节根据右侧*P*1和*P*2位置流速场对比图(图9(b))看出,单像对NCC在这两个位置都得到了许多错误的速度跟踪,并且有许多无法跟踪的空隙;但NCC堆叠不仅减少了流速的错误跟踪,而且增加了速度场覆盖范围。



(a) 雅弄冰川主流线表面距离向速度均值和误差 (b) *P*1和*P*2位置流速分布

图9 雅弄冰川主流线单像对NCC和NCC堆叠计算的距离向速度对比

Fig. 9 Comparison of Range Velocity Calculated from Single Image Pair NCC and NCC Stacking of the Mainstream Line of the Yanong Glacier



(a) 冰川表面坡度 (b) 冰川表面纹理特征

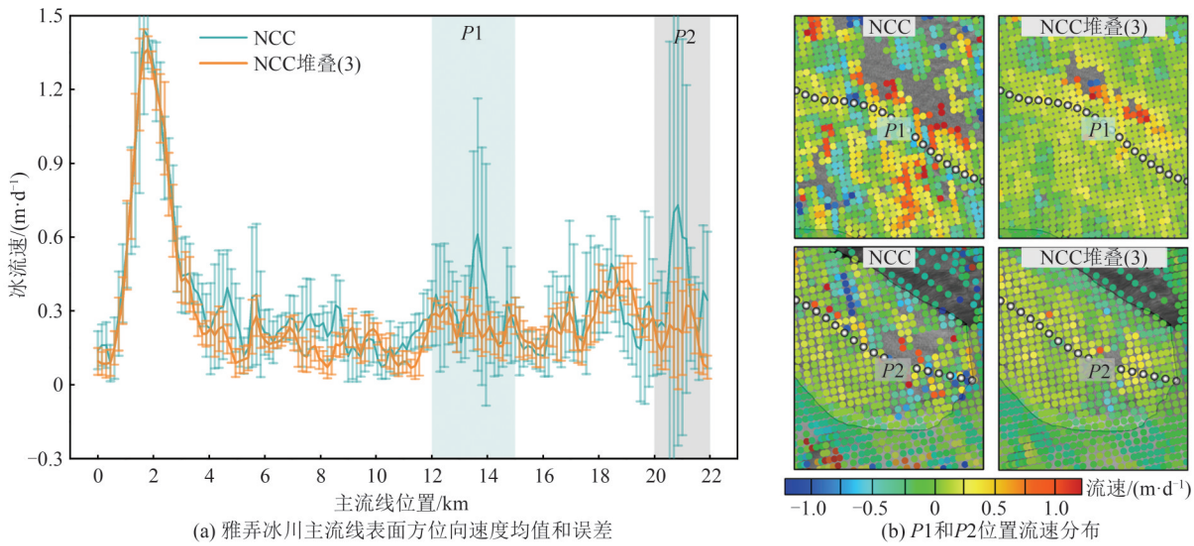
图10 雅弄冰川远离冰川堆积区0~11 km的地形坡度和光学表面纹理

Fig. 10 Topographic Slope and Optical Surface Texture of the Yanong Glacier at 0-11 km away from the Glacial Accumulation Area

雅弄冰川主流线方位向速度及误差显示在图11中,远离冰川堆积区2 km处有一个速度峰值,它是在图10中的*S*1和*S*2区域之前,在这之前有较大且连续的坡度,最重要的是此处主流线冰川运动方向与SAR卫星方位向夹角最小,此时冰川运动速度在方位向的投影最大。

由单像对NCC和NCC堆叠计算的主流方位向线速度误差在图11中分别由青色和橙色表示,可以清晰地看出,在远离冰川堆积区0~3 km之前,它们跟踪的速度场较为相似,但在之后的位置,单像对NCC方法跟踪的速度及局部误差都高于NCC堆叠方法,尤其是在位于冰川支流汇合区和冰川前端消

融区*P*1和*P*2位置,支流汇合区主流受支流汇合挤压,表面易发生非刚性拉裂变形,而前端消融区海拔较低,冰川表面消融剧烈,表面纹理特征随时间而发生改变。在这个区域使用单像对NCC来跟踪位移变化时,表面特征的剧烈变化导致匹配模板的相干系数下降,在NCC中表现为本底噪声的升高。且这两个区域位移速度都比较缓慢,所以在NCC中微弱的位移信号很容易和本底噪声混淆,从而得到错误的结果。而NCC堆叠可以极大限度地降低噪声,加强位移信号,从而正确跟踪冰川表面。



(a) 雅弄冰川主流线表面方位向速度均值和误差　　(b) *P*1和*P*2位置流速分布

图11　雅弄冰川主流线单像对NCC和NCC堆叠计算的方位向速度对比

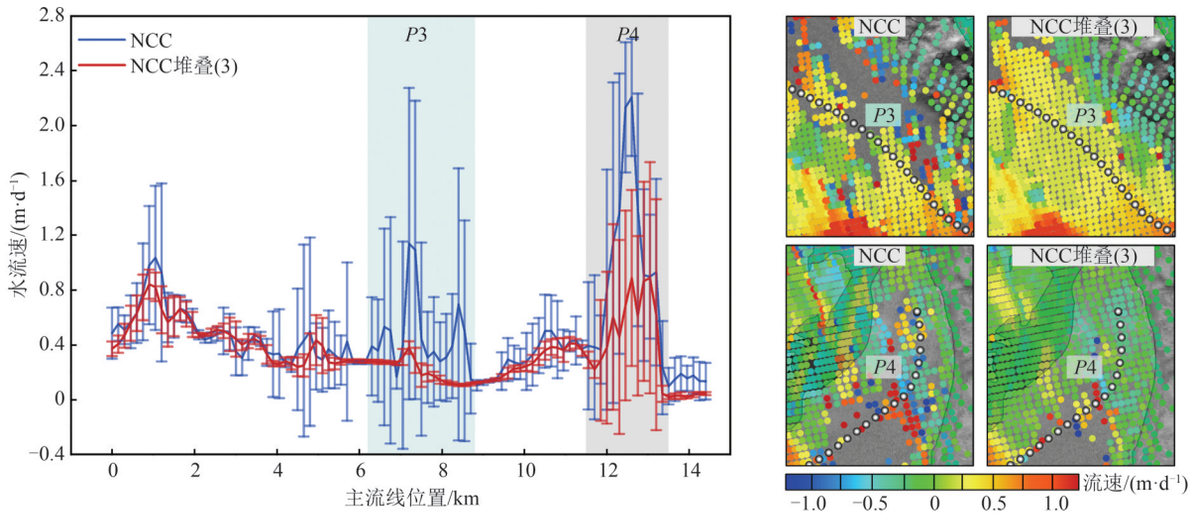
Fig. 11　Comparison of Azimuth Velocity Calculated from Single Image Pair NCC and NCC Stacking of the Mainstream Line of the Yanong Glacier

4.4　喜日隆冰川主流线速度对比分析

图12显示了通过单像对NCC和NCC堆叠计算的喜日隆冰川主流线距离向速度及误差。NCC堆叠对速度场估计的改进是显著的,红色曲线及误差棒都反映出了冰川表面位移被成功跟踪,而单像对NCC计算的蓝色曲线及误差棒在部分区域显示出较大的误差,甚至计算出错误的结果。在*P*3位置,单像对NCC计算出的流速场如图12(b)所示,主流线北侧出现了大量的空隙,主流线附近的许多位移被错误跟踪。从图13中可以看出,*P*3所处的*S*4区域冰川动力学因素复杂,在距喜日隆冰川堆积区5 km处南侧有一个长约1.3 km的冰川支流汇入,水平方向向北挤压主流冰川。在此处北侧凹形山谷中还形成了一个小堆积区,在主流线北侧不断地流入冰川,此时主流线北侧的冰川表面被堆积倾泻而下的积雪覆盖,削弱了表面纹理特征,降低了模板匹配的相干性。然而在NCC堆叠计算的流速场中可以看出,单像对NCC中主流线北侧大范围的空隙区域被全部成功跟踪,并得到了较为连续的冰川流速。在*P*4位置,无论是单像对NCC还是NCC堆叠都无法全部正确跟踪,从图13中的*S*5区域冰川运动情况可知,在距离喜日隆冰川终点3 km处有一个巨大的分流,主流冰川的地形梯度高于分流处的,导致大量的冰川从主流处流出。从图13(b) Sentinel-2光学影像可以看出,在这区域形成了巨大的冰川表面裂缝,这种裂缝在主流和分流右侧山体的剪切下急剧变化,即使NCC堆叠也无法成功跟踪。

在图14中喜日隆冰川主流线方位向速度及误差分布和距离向具有相似性,但NCC堆叠对方位向速度场的改进比距离向要更加明显。在*P*3位置,单像对NCC估计的流速场显示在图13(b)中,不仅在主流线北侧有大量空隙,而且在南侧支流的影响下部分区域也无法跟踪,而NCC堆叠对*P*3处的所有冰川表面都成功跟踪。*P*4位置主流冰川经过分流后,速度大大降低,使用单像对NCC计算速度时,冰川终点处部分区域速度由于SNR过低无法跟踪,NCC堆叠提高了位移信号的显著性,增加了冰川表面模板匹配的SNR,成功计算出空隙区域的速度。

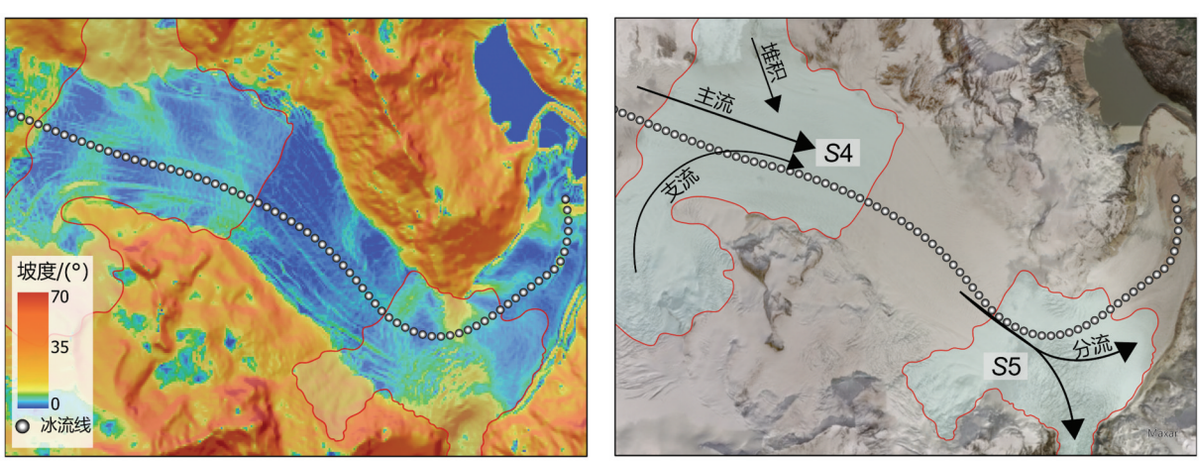
这意味着对于给定的数据集,NCC堆叠具有主要利用图像时间冗余信息来增加成功跟踪冰川表面流速的鲁棒性。尤其是在冰川表面变化剧烈地区或者在非冰川区域被积雪覆盖的地区,通过堆叠能够降低随机噪声并加强位移信号,对于保持一定程度的相干性的图像对,可以预期更高正确



(a) 喜日隆冰川主流线表面距离向速度均值和误差 (b) *P*3和*P*4位置流速分布

图12 喜日隆冰川主流线单像对NCC和NCC堆叠计算的距离向速度对比

Fig. 12 Comparison of Range Velocity Calculated from Single Image Pair NCC and NCC Stacking of the Mainstream Line of the Xirilong Glacier



(a) 冰川表面坡度 (b) 冰川表面纹理特征

图13 喜日隆冰川远离冰川堆积区5～15 km的地形坡度和光学表面纹理

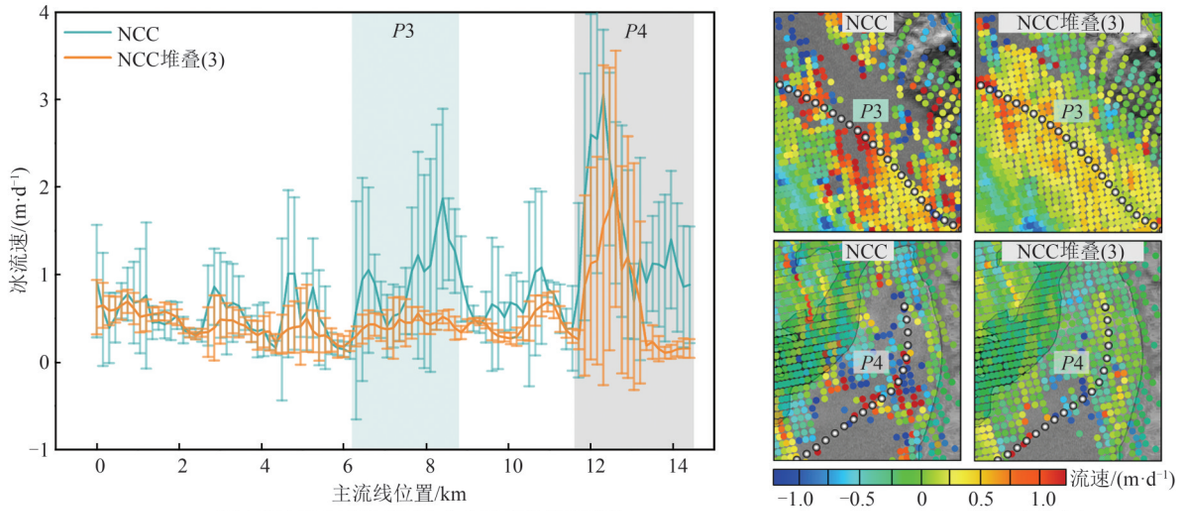
Fig. 13 Topographic Slope and Optical Surface Texture of the Xirilong Glacier at 5-15 km away from the Glacial Accumulation Area

的跟踪概率。

5 结 语

本文使用NCC堆叠方法来改进山地冰川上的偏移跟踪，根据图像时间序列计算多个成对NCC的堆栈，在跟踪NCC峰值之前对NCC堆栈进行平均。通过对比NCC堆叠数、搜索距离和匹配窗口大小等不同NCC参数设置下的位移跟踪情况，发现NCC堆叠的性能增益在任何NCC参数中都有表现，其中在小匹配窗口中表现了最显著的位移改进，小模板NCC堆叠的正确跟踪率相当于一定大模板单像对NCC的正确跟踪率。在雅弄和喜日隆区域进行NCC堆叠后，非冰川区域的噪声全部得到抑制，冰川区域显示出了更大的空间覆盖和空间连续。稳定区域速度残差的平均值和标准差都得到了不同程度的减小，NCC堆叠计算的速度残差均值比单像对NCC减小到1/2以下，速度残差标准差减小到原来的1/3，大多数区域都表现出了强信噪比增益。

在山地冰川地区，当匹配模板大小受到具有冰川覆盖范围限制时，这使得NCC堆叠可以在较小的窗口上实现堆冰川流速的稳健跟踪。在中国喀喇昆仑山、祁连山和天山等一些山地地区流速缓慢的冰川上，Sentinel-1积累了多年长时间数据，通过NCC堆叠来精确计算这些小冰川的流速，提高了SAR卫星在小规模山地冰川流速提取上的能力，这将为研



(a) 喜日隆冰川主流线表面方位向速度均值和误差　　(b) *P*3和*P*4位置流速分布

图 14　喜日隆冰川主流线单像对NCC和NCC堆叠计算的方位向速度对比

Fig. 14　Comparison of Azimuth Velocity Calculated from Single Image Pair NCC and NCC Stacking of the Mainstream Line of the Xirilong Glacier

究陆地冰川变化和气候变化提供重要的基础数据。

致谢:本文中冰川编目数据由RGI全球冰川轮廓数据集(https://www.glims.org/RGI/)提供,Sentlnel-1数据由阿拉斯加卫星设备(https://search.asf.alaska.edu/)提供,在此表示感谢。

参　考　文　献

[1] IMMERZEEL W W, LUTZ A F, ANDRADE M, et al. Importance and Vulnerability of the World's Water Towers[J]. *Nature*, 2020, 577(7790): 364-369.

[2] LI Y, CUI Y F, HU X, et al. Glacier Retreat in Eastern Himalaya Drives Catastrophic Glacier Hazard Chain[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(8): e2024GL108202.

[3] BASSIS J N, BERG B, CRAWFORD A J, et al. Transition to Marine Ice Cliff Instability Controlled by Ice Thickness Gradients and Velocity[J]. *Science*, 2021, 372(6548): 1342-1344.

[4] MOHR J J, REEH N, MADSEN S N. Three-Dimensional Glacial Flow and Surface Elevation Measured with Radar Interferometry[J]. *Nature*, 1998, 391: 273-276.

[5] JOUGHIN I. Ice-Sheet Velocity Mapping: A Combined Interferometric and Speckle-Tracking Approach [J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34: 195-201.

[6] GOLDSTEIN R M, ENGELHARDT H, KAMB B, et al. Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream[J]. *Science*, 1993, 262(5139): 1525-1530.

[7] MINCHEW B M, SIMONS M, RIEL B, et al. Tidally Induced Variations in Vertical and Horizontal Motion on Rutford Ice Stream, West Antarctica, Inferred from Remotely Sensed Observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2017, 122(1): 167-190.

[8] RIGNOT E J. Fast Recession of a West Antarctic Glacier[J]. *Science*, 1998, 281(5376): 549-551.

[9] 熊俊麟, 范宣梅, 窦向阳, 等. 藏东南然乌湖流域雅弄冰川流速季节性变化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1579-1588.
XIONG Junlin, FAN Xuanmei, DOU Xiangyang, et al. Seasonal Variation of Yalong Glacier's Velocity in Ranwu Lake Basin, Southeast Tibetan Plateau [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1579-1588.

[10] MILLAN R, MOUGINOT J, RABATEL A, et al. Ice Velocity and Thickness of the World's Glaciers[J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15: 124-129.

[11] BOXALL K, CHRISTIE F D W, WILLIS I C, et al. Seasonal Land-Ice-Flow Variability in the Antarctic Peninsula[J]. *The Cryosphere*, 2022, 16(10): 3907-3932.

[12] SAMSONOV S, TIAMPO K, CASSOTTO R. Measuring the State and Temporal Evolution of Glaciers in Alaska and Yukon Using Synthetic-Aperture-Radar-Derived (SAR-Derived) 3D Time Series of Glacier Surface Flow [J]. *Cryosphere Discuss*, 2020, 15(9): 4221-4239.

[13] 周春霞, 邓方慧, 艾松涛, 等. 利用DInSAR的东南极极记录和达尔克冰川冰流速提取与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(8): 940-944.
ZHOU Chunxia, DENG Fanghui, AI Songtao, et al. Determination of Ice-Flow Velocity at the Polar

Record Glacier and Dalk Glacier Using DInSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8): 940-944.

[14] DE LANGE R, LUCKMAN A, MURRAY T. Improvement of Satellite Radar Feature Tracking for Ice Velocity Derivation by Spatial Frequency Filtering [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(7): 2309-2318.

[15] DEBELLA-GILO M, KÄÄB A. Locally Adaptive Template Sizes for Matching Repeat Images of Earth Surface Mass Movements[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 69: 10-28.

[16] LEINSS S, LI S, FREY O. Measuring Glacier Velocity by Autofocusing Temporally Multilooked SAR Time Series[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, Belgium, 2021.

[17] AHN Y, HOWAT I M. Efficient Automated Glacier Surface Velocity Measurement from Repeat Images Using Multi-image/Multichip and Null Exclusion Feature Tracking[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(8): 2838-2846.

[18] LEE S, KIM S, AN H, et al. Ice Velocity Variations of the Cook Ice Shelf, East Antarctica, from 2017 to 2022 from Sentinel-1 SAR Time-Series Offset Tracking[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(12): 3079.

[19] 刘国祥, 张波, 张瑞, 等. 联合卫星SAR和地基SAR的海螺沟冰川动态变化及次生滑坡灾害监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 980-995.
LIU Guoxiang, ZHANG Bo, ZHANG Rui, et al. Monitoring Dynamics of Hailuogou Glacier and the Secondary Landslide Disasters Based on Combination of Satellite SAR and Ground-Based SAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 980-995.

[20] 王群, 范景辉, 周伟, 等. DEM辅助偏移量跟踪技术的山地冰川运动监测研究[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(3): 167-173.
WANG Qun, FAN Jinghui, ZHOU Wei, et al. Research on the DEM-Assisted Offset Tracking Technique Applied to Glaciers Movement Monitoring [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2018, 30(3): 167-173.

[21] HEID T, KÄÄB A. Evaluation of Existing Image Matching Methods for Deriving Glacier Surface Displacements Globally from Optical Satellite Imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 118: 339-355.

[22] LI S Y, LEINSS S, HAJNSEK I. Cross-Correlation Stacking for Robust Offset Tracking Using SAR Image Time-Series[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 4765-4778.

[23] KEANE R D, ADRIAN R J. Theory of Cross-Correlation Analysis of PIV Images[J]. *Applied Scientific Research*, 1992, 49(3): 191-215.

[24] MEINHART C D, WERELEY S T, SANTIAGO J G. A PIV Algorithm for Estimating Time-Averaged Velocity Fields[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2000, 122(2): 285-289.

[25] BOHS L, GEIMAN B, Trahey G. Ensemble Tracking: A New Method for 2D Vector Velocity Measurement[C]//IEEE Ultrasonics Symposium, Seattle, WA, USA, 1995.

[26] BOHS L N, GEIMAN B J, ANDERSON M E, et al. Ensemble Tracking for 2D Vector Velocity Measurement: Experimental and Initial Clinical Results[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1998, 45(4): 912-924.

[27] ALTENA B, KÄÄB A. Ensemble Matching of Repeat Satellite Images Applied to Measure Fast-Changing Ice Flow, Verified with Mountain Climber Trajectories on Khumbu Icefall, Mount Everest[J]. *Journal of Glaciology*, 2020, 66(260): 905-915.

[28] LIU L, JIANG L M, JIANG H J, et al. Accelerated Glacier Mass Loss (2011 - 2016) over the Puruogangri Ice Field in the Inner Tibetan Plateau Revealed by Bistatic InSAR Measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111241.

[29] GUO R, LI S M, CHEN Y N, et al. Identification and Monitoring Landslides in Longitudinal Range-Gorge Region with InSAR Fusion Integrated Visibility Analysis[J]. *Landslides*, 2021, 18(2): 551-568.

[30] SUN L Y, MULLER J P. Evaluation of the Use of Sub-Pixel Offset Tracking Techniques to Monitor Landslides in Densely Vegetated Steeply Sloped Areas [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(8): 659.

[31] PROVOST F, MALET J P, MICHEA D, et al. Terrain Deformation Measurements from Optical Satellite Imagery: On-Line Processing Services for Geohazards Monitoring [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, Belgium, 2021.

[32] STUMPF A, MALET J P, PUISSANT A, et al. 5-Monitoring of Earth Surface Motion and Geomorphologic Processes by Optical Image Correlation [M]. Baghdadi N, Zribi M, eds. Elsevier: Land Surface Remote Sensing: Environment and Risks, 2016: 147-190.