

基于多源遥感影像的南极 Lambert 流域冰川运动速度提取与精度验证

刘爽^{1,2}, 童小华^{1,2}

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 同济大学 空间信息科学与可持续发展应用中心, 上海 200092)

摘要: 冰川运动速度是计算极地物质平衡和对冰盖和冰架数值模拟的重要参数. 针对传统冰川运动速度提取算法的不足和局限, 基于差分干涉技术 (DInSAR) 和多孔径干涉技术 (MAI) 开展二维冰川运动速度的提取研究. 将该算法应用于南极 Lambert 流域冰川运动速度的提取, 得到了研究区域高精度的二维冰川运动速度场, 将采用偏移量跟踪算法提取的冰川运动速度和本文提取的冰川运动速度进行了对比分析和精度评价; 结合研究区域已有历史观测数据, 分析全球气候变化背景下 Lambert 流域冰川的动态变化. 研究结果表明, 基于 DInSAR 和 MAI 的冰川运动速度提取算法优于偏移量跟踪算法; 近 20 年的冰川运动速度时间序列数据显示 Lambert 流域的冰川运动速度基本处于稳定状态.

关键词: 冰川运动速度; 差分干涉技术; 多孔径干涉技术; Lambert 冰川; 精度验证

中图分类号: TP751.1

文献标志码: A

Estimation and Evaluation of Ice Surface Velocity of Lambert Drainage of East Antarctica by Using Multi-Source Remote Sensing Datasets

LIU Shuang^{1, 2}, TONG Xiaohua^{1, 2}

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Center for Spatial Information Science and Sustainable Development Application, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Ice surface velocity is one of the essential parameters for evaluating the mass balance and numerical simulation. In this paper, the research is mainly focused on the estimation of the ice surface velocity by combining the differential interferometry method and the multi-aperture

interferometry method. The two-dimensional ice surface velocity of Lambert Drainage was estimated by employing the proposed method. A comparison between the estimated ice surface velocity and those obtained by using the offset tracking method and historical products was performed to analyze the dynamic characters. The results show that the proposed method is superior to the offset tracking method, and the glaciers in Lambert drainage is stable during the past 20 years.

Key words: ice flow velocity; differential interferometric synthetic aperture radar; multiple aperture interferometry; Lambert Glaciers; accuracy evaluation

冰川运动速度是冰川运动的重要指标, 是计算极地物质平衡^[1-5]、冰盖与冰架数值模拟的重要参数. 传统的冰川运动速度提取技术如花杆测量、GPS 等^[6-11] 仅能获取局部区域的离散观测数据. 光学遥感易受极地极夜、太阳辐射、云雾及影像过饱和等约束. 合成孔径雷达 (SAR) 采用主动式的微波成像模式, 可以实现全天时、全天候的对地观测^[4, 12-13], 在冰川运动速度提取中占据着重要的地位^[14-15], 是目前冰川运动速度提取的主要手段.

传统的差分干涉技术能够获取雷达视线向的高精度地表形变, 但是对影像方位向的地表运动不敏感. 为了弥补传统差分干涉雷达 (DInSAR) 技术在方位向地表形变提取中的不足和局限, 2006 年 Bechor 等^[16] 提出了多孔径干涉测量技术 (MAI), 用于方位向地表形变位移的提取. 由于其能够获取高精度的方位向地表位移, 因此广泛应用于地震、滑坡等灾害的变形监测^[17-18]. 已有的研究表明, MAI 提取

收稿日期: 2017-04-21

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划 (2012CB957701); 国家杰出青年科学基金 (41325005)

第一作者: 刘爽 (1983—), 男, 工学博士, 主要研究方向为 InSAR/DInSAR 数据处理理论与方法、极地遥感及全球气候变化理论与方法, E-mail: shushuangliu@163.com

通讯作者: 童小华 (1971—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为空间数据处理与质量控制、遥感与地理信息系统集成的理论与方法, E-mail: tongxhtj@yeah.net

的方位向的地表位移优于偏移量跟踪算法获取的方位向地表形变,但是 MAI 算法无法获取影像距离向的地表位移。因此,本文采用 DInSAR 和 MAI 算法开展高精度冰川运动速度的提取及精度验证研究,并结合多源遥感影像数据获取的冰川运动速度分析全球气候变化背景下 Lambert 流域冰川运动速度的动态变化。

1 DInSAR 和 MAI 冰川运动速度提取

综合考虑 DInSAR 和 MAI 在地表形变提取中的优越性及存在的不足,采用 DInSAR 技术提取距离向的冰川运动速度,利用 MAI 获取方位向的冰川运动速度,然后构建冰川运动速度的偏差改正模型,并利用研究区域的岩石点对 DInSAR 和 MAI 提取的冰川运动速度进行偏差改正和精度评估研究,最后结合研究区域已有的研究成果,开展 Lambert 流域冰川运动速度的动态分析。

1.1 数据预处理

为了提高数据处理的效率和减小数据后处理带来的拼接和镶嵌误差,首先对同一轨道相邻的多景欧洲遥感卫星(ERS-1/2)数据进行拼接和镶嵌,然后对拼接之后的原始数据进行成像处理,获取拼接之后的单视复数(SLC)影像数据。

1.2 距离向冰川运动速度提取

基于 DInSAR 的基本原理,干涉相位 $\Delta\varphi_{\text{int}}$ 由地表地形相位 $\Delta\varphi_{\text{topo}}$ 、形变信息 $\Delta\varphi_{\text{disp}}$ 、平地相位 $\Delta\varphi_{\text{flat}}$ 、大气延迟相位 $\Delta\varphi_{\text{atom}}$ 以及系统热噪声产生的随机相位 $\Delta\varphi_{\text{noise}}$ 等组成,如下所示:

$$\Delta\varphi_{\text{int}} = \Delta\varphi_{\text{topo}} + \Delta\varphi_{\text{flat}} + \Delta\varphi_{\text{disp}} + \Delta\varphi_{\text{atom}} + \Delta\varphi_{\text{noise}} \quad (1)$$

为了获取仅含地表形变信息的差分干涉相位,必须对干涉相位进行差分干涉处理,消除干涉相位中的地形相位,获取雷达视线向的地表形变。同时,考虑卫星的入射角,获取距离向的地表形变位移场。本文选取卫星精密星历轨道数据(PPR)及数字高程模型(DEM),采用“二轨法”对干涉像对进行差分干涉处理,消除干涉相位中的地形相位,开展距离向冰川运动速度提取。

1.3 方位向冰川运动速度提取

为获取方位向高精度的地表形变位移场,2006 年 Bechor 等^[16]提出了多孔径干涉技术,其基本原理如下。

假设地面物体沿着卫星的方位向具有位移 x ,

则其在前视向和后视向干涉图中的干涉相位(如图 1 所示)分别为

$$\begin{cases} \varphi_{\text{forward}} = -\frac{4\pi}{\lambda}x \sin\left(\theta + \frac{\alpha}{4}\right) \\ \varphi_{\text{backward}} = -\frac{4\pi}{\lambda}x \sin\left(\theta - \frac{\alpha}{4}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: φ_{forward} 、 $\varphi_{\text{backward}}$ 分别为前视向和后视向的干涉相位; θ 为雷达视线方向与飞行方向的夹角; α 为雷达视线方向的偏角。

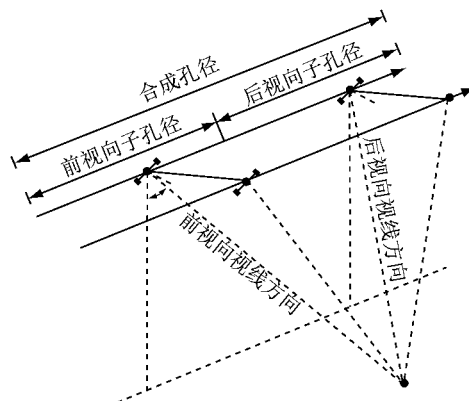


图 1 MAI 基本原理示意图

Fig. 1 Principle of multiple aperture interferometry

对前视向和后视向干涉相位进行差分处理,则可以消除两者中共同的地形相位、平地相位的影响,获取仅反映方位向地表位移的 MAI 干涉相位 φ_{MAI} 。

$$\varphi_{\text{MAI}} = \varphi_{\text{forward}} - \varphi_{\text{backward}} = -\frac{4\pi x}{\lambda} 2\sin\frac{\alpha}{4} \cos\theta \quad (3)$$

由于 α 和 θ 均非常小,同时 $\alpha \approx \lambda/l$ (l 为 SAR 天线的长度),则方位向地表位移所引起的 MAI 干涉相位可以表达为

$$\varphi_{\text{MAI}} \approx \frac{2\pi x}{\lambda} \alpha = \frac{2\pi x}{l} \quad (4)$$

1.4 冰川运动速度偏差建模与补偿

受大气延迟误差、外部 DEM 误差及基线误差的影响,方位向和距离向的冰川运动速度不可避免含有残余地形相位和线性相位趋势项,为了提高方位向和距离向的冰川运动速度的估算精度,提出基于二次多项式的偏差补偿模型:

$$\begin{cases} v_{r,\text{range}} = v_{d,\text{range}} + v_{o,\text{range}} + ax_{r,\text{range}} + by_{r,\text{range}} + \\ \quad cx_{r,\text{range}}y_{r,\text{range}} \\ v_{r,\text{azimuth}} = v_{m,\text{azimuth}} + v_{o,\text{azimuth}} + dx_{r,\text{azimuth}} + \\ \quad ey_{r,\text{azimuth}} + fx_{r,\text{azimuth}}y_{r,\text{azimuth}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $v_{r,\text{range}}$ 、 $v_{r,\text{azimuth}}$ 分别为基准点在距离向和方位向的冰川运动速度; $v_{d,\text{range}}$ 、 $v_{m,\text{azimuth}}$ 分别为 DInSAR

和 MAI 估计的距离向和方位向的冰川运动速度; $v_{o, range}$ 、 $v_{o, azimuth}$ 分别为距离向和方位向的冰川运动速度的系统偏差; $(x_{r, range}, y_{r, range})$ 与 $(x_{m, azimuth}, y_{m, azimuth})$ 分别为基准点在 SAR 影像的距离-多普勒坐标系下的坐标; a, b, c, d, e, f 为多项式偏差补偿模型的系数. 受极端环境条件的约束, 本文选取岩石点作为基准点进行偏差补偿模型系数的求解.

2 研究区域及实验数据

Lambert 流域位于 Amery 冰架的上游区域(图 2), 主要由 Lambert 冰川、Mellor 冰川及 Fisher 冰

川组成, 其中 Lambert 冰川被认为是世界上最大的冰川, 有 100 km 宽, 400 km 长, 冰厚度约 2 500 m, 是南极内陆物质注入海洋的主要通道.

考虑由于冰川运动导致的 SAR 影像间的影像失相关, 采用 ERS-1/2 卫星串行模式的 SAR 影像数据开展冰川运动速度的提取研究, 本文的实验数据如表 1 所示. 此外, 为了对 Lambert 流域的冰川运动状态进行动态分析, 本文对 2013—2014 年的 Landsat 8 陆地成像仪(OLI)获取的遥感影像数据采用偏移量跟踪算法进行处理, 提取二维冰川运动速度场, 数据的基本信息如表 1 所示.

表 1 研究区域的遥感影像数据

Tab. 1 Datasets of the area studied

序号	卫星	轨道/视向	获取时间	影像分辨率/ (m×m)	卫星基线/m	
					垂直基线	水平基线
1	ERS-1	升轨/右视	1996-02-17	4.0×7.9	178	90
2	ERS-2	升轨/右视	1996-02-18	4.0×7.9	178	90

序号	卫星	行号	列号	获取时间		时间间隔/d
				参考影像	匹配影像	
3	Landsat 8	124	113	2013-11-11	2013-12-13	32
4	Landsat 8	126	112	2013-11-25	2013-12-27	32
5	Landsat 8	127	112	2014-12-05	2014-12-21	16
6	Landsat 8	129	112	2014-11-01	2015-03-09	128
7	Landsat 8	130	111	2013-11-05	2014-11-24	384
8	Landsat 8	130	112	2013-11-05	2014-02-09	96

从表 1 可以看出, ERS-1/2 的影像的方位向分辨率为 4.0 m, 距离向分辨率为 7.9 m. 其中干涉像对分别于 1996 年 2 月 17 日和 1996 年 2 月 18 日获取, 垂直基线为 178 m. 研究区域共有 12 景 Landsat 8 遥感影像, 其获取日期为 2013 年 11 月到 2015 年 3 月, 共 6 个像对, 平均时间间隔为 115 d, 最短时间间隔为 16 d, 最长时间间隔为 384 d.

此外, 为了消除干涉相位中的地形相位, 获取仅含地表冰川运动所引起的差分干涉相位, 选取基于南极 ERS-1 雷达测高和美国冰、云和陆地高程卫星激光测高数据获取的南极 DEM 数据^[19]进行地形相位的模拟和差分干涉数据处理, 该 DEM 数据的空间分辨率为 1 km, 在接地线处的垂直精度为 5 m.

3 实验结果分析与精度验证

3.1 Lambert 流域冰川运动速度

为了提取 Lambert 流域的冰川运动速度, 首先采用基于 DEM 数据的 SAR 影像配准算法, 实现 SAR 影像的配准精度优于 0.02 个像素. 然后对配准之后的影像进行差分干涉处理, 获取由于冰川运动

所产生的差分干涉相位, 如图 2a 所示, 并采用最小网络费用流(MCF)相位解缠算法^[20]对差分干涉相位进行相位解缠, 采用岩石点利用本文提出的偏差改正模型进行补偿, 最后考虑卫星的入射角及时间间隔将获取的解缠相位转换为距离向的地表冰川运动速度场(如图 2b 所示).

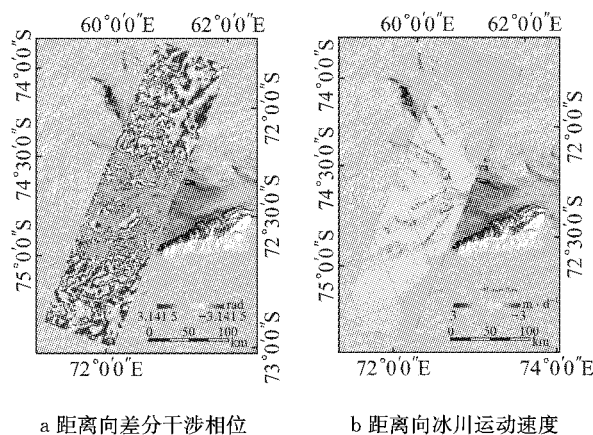


图 2 距离向差分干涉相位及冰川运动速度

Fig. 2 Differential interferogram and ice flow velocity in the range direction estimated by using the DInSAR method

为了获取方位向的冰川运动速度,首先采用分频算法对 SAR 干涉像对进行分频处理,获取前视向和后视向 SLC 影像数据. 然后对配准后的影像进行干涉处理,获取前视向和后视向的干涉相位,对前视向和后视向的干涉相位进行方位向的差分处理可以获取仅含有方位向地表位移的 MAI 干涉相位,如图 3a 所示,采用 MCF 算法对 MAI 干涉相位进行相位解缠处理,并对方位向的解缠相位采用岩石点进行偏差改正和补偿,获取方位向的冰川运动速度场,如图 3b 所示.

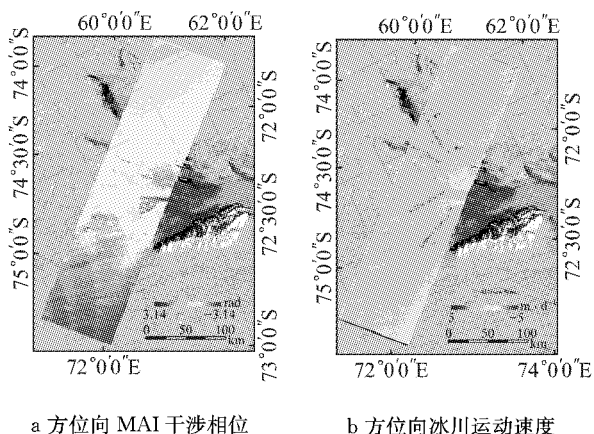


图 3 方位向 MAI 干涉相位及冰川运动速度

Fig. 3 MAI interferogram and the estimated ice flow velocity in the azimuth direction by using the MAI method

为了对 DInSAR 和 MAI 算法提取的冰川运动速度进行验证,对研究区域 2013—2014 年间的 Landsat 8 的 15 m 分辨率的全色波段影像采用偏移量跟踪算法进行处理和分析,获取研究区域的二维冰川运动速度. 其中匹配窗口的大小为 32 像素×32 像素,行方向和列方向的采样间隔为 10 像素,并采用信噪比为 0.95 剔除误匹配点. 考虑影像之间的时间间隔,同时对多景影像的处理结果进行拼接镶嵌,获取研究区域偏移量跟踪算法提取的二维冰川运动速度,如图 4 所示.

从图 4 可以看出,偏移量跟踪算法可以有效地提取研究区域的二维冰川运动速度,其提取的冰川运动速度的空间分辨率为 150 m. 对比 DInSAR 与 MAI 提取的距离向和方位向的冰川运动速度(图 2b 和图 3b),可以发现,两者之间基本一致,只是由于影像数据获取的季节不同,仅在局部区域存在细微的差异. 同时,假设岩石点处的冰川运动速度为 $0 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,并采用岩石点为基准,分别从偏移量跟踪算法

和本文算法获取的冰川运动速度场中提取研究区域的岩石基准点处的冰川运动速度,计算其标准差. 研究表明,采用 DInSAR 和 MAI 算法提取的冰川运动速度距离向精度为 $0.01 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,方位向精度为 $0.07 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,而偏移量跟踪算法获取的冰川运动速度在距离向和方位向的精度分别为 $0.16 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.13 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,因此本文采用 DInSAR 与 MAI 算法的冰川运动速度提取算法的精度优于传统的偏移量跟踪算法.

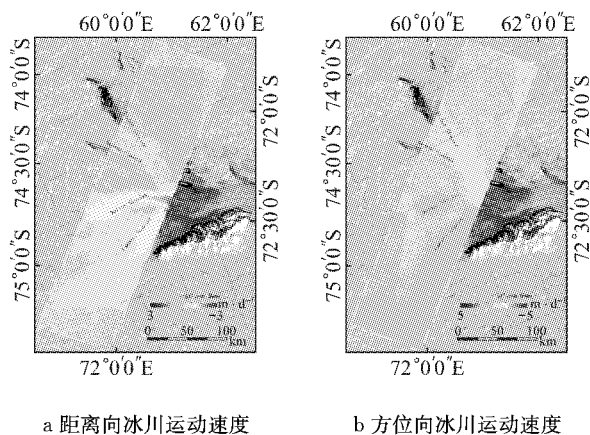


图 4 偏移量跟踪算法的距离向和方位向冰川运动速度

Fig. 4 Two dimensional ice flow velocity obtained from Landsat 8 images using the offset tracking method

3.2 冰川运动速度精度评价与动态分析

由于研究区域缺少必要的同步地面观测数据,此外,研究区域的已有成果与本文的结果之间存在数据源及时间的差异,因此本文假设岩石点处的冰川运动速度为 $0 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,并作为基准数据开展冰川运动速度的精度评价.

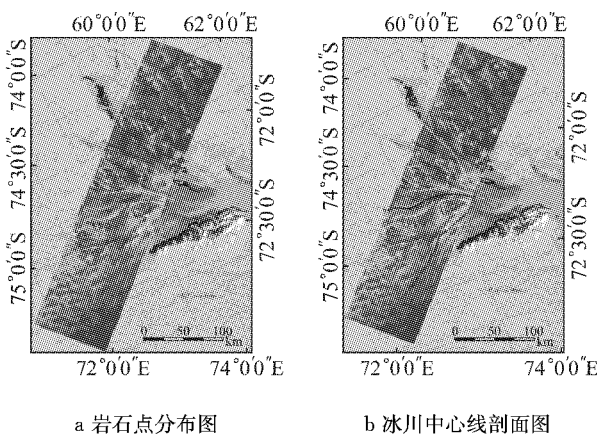


图 5 研究区域岩石点的分布图及剖面位置示意图

Fig. 5 Location and profiles of rock points

本文首先基于 SAR 强度影像进行岩石点的识别与选取,然后利用南极的中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据的镶嵌影像对选取的岩石点进行进一步的检核,最后利用岩石点附近冰川运动速度接近于 $0 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 的窗口区域计算均值和标准差,对残差大于 3 倍标准差的岩石点进行剔除.最后采用选取的 30 个岩石基准点(如图 5a 所示)对 DInSAR 和 MAI 的结果进行精度评估,其中距离向冰川运动速度的精度为 $0.10 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,方位向冰川运动速度的精度为 $0.07 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$.

此外,为了分析全球气候变化背景下,Lambert 流域的冰川运动速度的变化特征,将本文获取的 Lambert 冰川、Mellor 冰川和 Fisher 冰川沿冰川运动中轴线的距离向和方位向冰川运动速度(如图 5b 所示),与 Jezek^[21] 利用偏移量跟踪算法对 1997 和 2000 年卫星南极制图项目(RAMP)期间获取的 Radarsat-1 数据进行处理而获取的冰川运动速度和 Rignot 等^[22-23] 利用 Speckle 跟踪算法对 2007—2009 年国际极地年(IPY)期间获取的多源 SAR 影像数据处理而获取的冰川运动速度进行对比分析,结果如图 6、图 7 和图 8 所示.

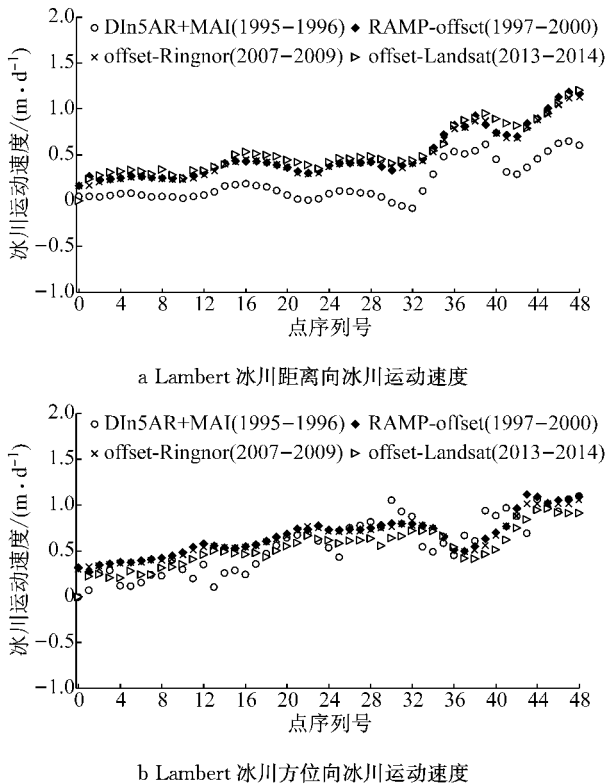


图 6 Lambert 冰川运动速度对比分析
Fig.6 Ice flow velocity along the profile of Lambert Glaciers

从图 6 可以看出,沿着冰川运动方向,Lambert 冰川的冰川运动速度逐渐增加.在距离向,前端冰川的运动速度为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,而末梢冰川运动速度的最大值为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$;而在方位向,冰川运动速度从 $0.3 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 逐渐增加到 $1.2 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$.从长时间序列的数据看,在过去的 20 年间,Lambert 冰川在距离向的冰川运动速度呈现缓慢的加速趋势,相对于 1995—1996 年度而言,Lambert 冰川运动速度平均增加了 $0.5 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$.而方位向的冰川运动速度基本保持一致.

从图 7 可以看出,在距离向,Mellor 冰川沿着冰川运动方向运动速度由 $0.5 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 逐渐增加到 $2 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$;而在方位向,冰川的运动速度先减速,然后逐渐加速到 $0.5 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,再减速一直到冰川的末梢.从时间序列上看,在过去的 20 年间,Mellor 冰川的运动速度基本保持不变,但是在方位向,冰川的运动速度则有轻微的减速.

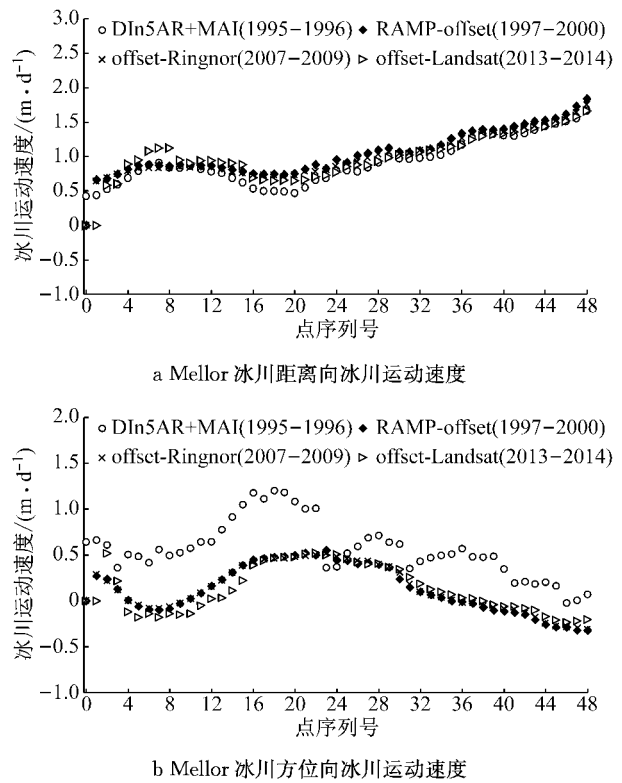


图 7 Mellor 冰川运动速度对比分析
Fig.7 Ice flow velocity along the profile of Mellor Glaciers

从图 8 可以看出,Fisher 冰川的冰川运动速度基本稳定,沿着冰川运动方向,距离向和方位向的冰川运动速度均呈现轻微的加速,距离向冰川运动速度的最大值为 $1.0 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,而方位向冰川运动速度

的最大值为 $0.8 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. 从时间序列上分析,可以发现在过去的 20 年间, Fisher 冰川的运动速度整体上保持稳定,但是有轻微的减速的趋势.

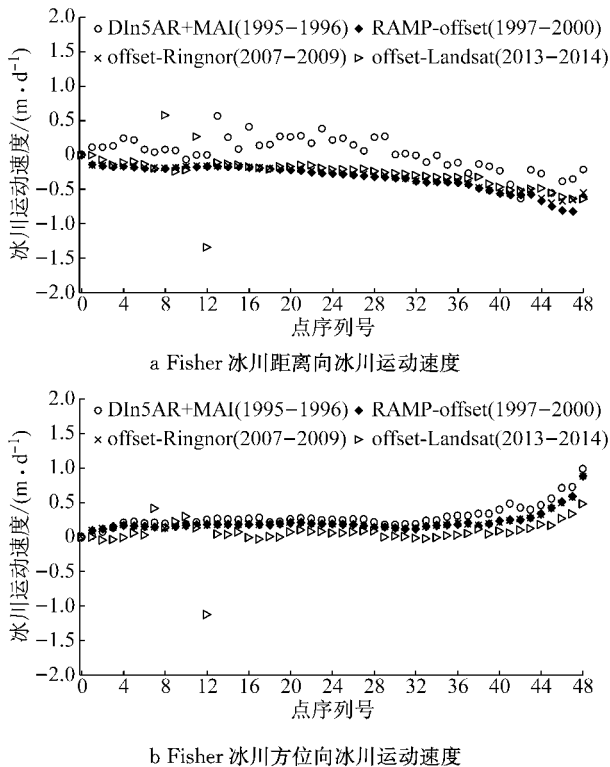


图 8 Fisher 冰川运动速度对比分析

Fig.8 Ice flow velocity along the profile of Fisher Glaciers

4 结论

本文基于 DInSAR 和 MAI 技术在冰川运动速度提取中的优越性,提出了利用 DInSAR 和 MAI 方法的冰川运动速度提取算法,并将该算法应用于 Lambert 流域冰川运动速度的提取和冰川运动的时间序列特征分析. 研究表明:

(1) DInSAR 和 MAI 可以相互补充,能够应用于二维冰川运动速度场的提取,其中 DInSAR 提取的距离向冰川运动速度的精度为 $0.10 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$; MAI 提取的方位向的冰川运动速度的精度为 $0.07 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 优于传统的偏移量跟踪算法获取的冰川运动速度.

(2) 通过对 Landsat 8 数据采用偏移量跟踪算法获取的冰川运动速度及研究区域已有的研究成果进行对比,对 Lambert 流域冰川的运动特征及响应进行分析. 研究表明,在过去的 20 年间, Lambert 流域的冰川运动速度基本保持稳定,但是 Lambert 冰川具有轻微的加速,而 Mellor 冰川与

Fisher 冰川有轻微的减速.

参考文献:

- [1] 王清华, 宁津生, 任贾文, 等. 东南极 Amery 冰架与陆地冰分界线的重新划定及验证[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(6): 591.
WANG Qinghua, NING Jinsheng, REN Jiawen, *et al.* Re- definition and validation of the grounding line of Amery ice shelf, East Antarctica [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(6): 591.
- [2] 温家洪, JEZEK K C, CSATHÓ B M, 等. 南极 Lambert, Mellor 和 Fisher 冰川的物质平衡及 Amery 冰架底部物质通量的估算[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2007, 37(9): 1192.
WEN Jiahong, JEZEK K C, CSATHÓ B M, *et al.* Mass budgets of the Lambert, Mellor and Fisher Glaciers and basal fluxes beneath their flowbands on Amery Ice Shelf [J]. Science in China Series D (Earth Sciences), 2007, 37(9): 1192.
- [3] FRICKER H A, WARNER R C, ALLISON I. Mass balance of the Lambert Glacier—Amery Ice Shelf system, East Antarctica: a comparison of computed balance fluxes and measured fluxes [J]. Journal of Glaciology, 2000, 46 (155): 561.
- [4] JOUGHIN I, SMITH B E, ABDALATI W. Glaciological advances made with interferometric synthetic aperture radar [J]. Journal of Glaciology, 2010, 56(200): 1026.
- [5] HANNA E, NAVARRO F J, PATTYN F, *et al.* Ice-sheet mass balance and climate change [J]. Nature, 2013, 498 (7452): 51.
- [6] 张小红, 鄂栋臣. 用 PPP 技术确定南极 Amery 冰架的三维运动速度[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30 (10): 909.
ZHANG Xiaohong, E Dongchen. Dynamic parameters determination of Amery Ice Shelf using PPP [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30 (10): 909.
- [7] 艾松涛, 王泽民, 鄂栋臣, 等. 利用 GPS 的北极冰川运动监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37 (11): 1337.
AI Songtao, WANG Zemin, E Dongcheng, *et al.* Surface movement research of arctic glaciers using GPS method [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(11): 1337.
- [8] 陈军, 柯长青. 南极冰盖表面冰流速研究综述[J]. 极地研究, 2015, 27(1): 115.
CHEN Jun, KE Changqing. Research progress on ice velocity of Antarctic ice sheet [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2015, 27(1): 115.
- [9] FREZZOTTI M, CAPRA A, VITTUARI L. Comparison between glacier ice velocities inferred from GPS and sequential satellite images [J]. Annals of Glaciology, 1998, 27: 54.
- [10] MANSON R, COLEMAN R, MORGAN P, *et al.* Ice velocities of the Lambert Glacier from static GPS observations [J]. Earth Planets and Space, 2000, 52(11): 1031.
- [11] ZHANG S K, E D C, WANG Z M. Ice velocities on the front of

- Amery Ice Shelf, East Antarctica, from static GPS observations [C]// Geoinformatics 2006: GNSS and Integrated Geospatial Applications. [S. l.]: The International Society for Optical Engineering, 2006: 64180Q.
- [12] QUINCEY D J, LUCKMAN A. Progress in satellite remote sensing of ice sheets [J]. *Progress in Physical Geography*, 2009, 33(4): 547.
- [13] ROTT H. Advances in interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in earth system science [J]. *Progress in Physical Geography*, 2009, 33(6): 769.
- [14] 周春霞, 邓方慧, 陈一鸣, 等. 利用 SAR 数据研究南极 Grove 山地区冰流运动特征[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(11): 1428.
ZHOU Chunxia, DENG Fanghui, CHEN Yiming, *et al.* Ice-flow features in the Grove mountains area using SAR Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(11): 1428.
- [15] 李佳, 李志伟, 汪长城, 等. SAR 偏移量跟踪技术估计天山南依内里切克冰川运动[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1226.
LI Jia, LI Zhiwei, WANG Changcheng, *et al.* Using SAR offset-tracking approach to estimate surface motion of the south Inylchek glacier in Tianshan [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1226.
- [16] BECHOR N B D, ZEBKER H A. Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(16): 275.
- [17] HU J, LI Z W, DING X L, *et al.* Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: a review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 133(133): 1.
- [18] JUNG H S, LU Z, WON J S, *et al.* Mapping three-dimensional surface deformation by combining multiple-aperture interferometry and conventional interferometry: application to the June 2007 eruption of Kilauea volcano, Hawaii [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(1): 34.
- [19] BAMBER J L, GOMEZ-DANS J L, GRIGGS J A. A new 1 km digital elevation model of the Antarctic derived from combined satellite radar and laser data. Part 1: data and methods [J]. *Cryosphere*, 2009, 3, 101.
- [20] COSTANTINI M. A novel phase unwrapping method based on network programming [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 1998, 36(3): 813.
- [21] JEZEK K C. RADARSAT-1 Antarctic mapping project: change-detection and surface velocity campaign [J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34(1): 263.
- [22] MOUGINOT J, SCHEUCHL B, RIGNOT E. Mapping of ice motion in Antarctica using synthetic-aperture radar data [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(12): 2753.
- [23] RIGNOT E, MOUGINOT J, SCHEUCHL B. Ice flow of the Antarctic ice sheet [J]. *Science*, 2011, 333(6048): 1427.

~~~~~

(上接第 372 页)

- [6] GAUTHIER LePrince, CHRISTOPHE Changenet, FABRICE Ville, *et al.* Influence of aerated lubricants on gear churning losses-an engineering model [J]. *Tribology Transactions*, 2010, 54(6): 929.
- [7] 王飞. 电动汽车轮边减速器齿轮搅油损失研究与分析[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.  
WANG Fei. Research and analysis of gear churning loss on the wheel-side reducer of electric vehicle [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2015.
- [8] 霍晓强, 吴传虎. 齿轮传动系统搅油损失的试验研究[J]. *机械传动*, 2007, 31(1): 63.  
HUO Xiaoqiang, WU Chuanhu. Experimental investigation of churning loss of gear transmission system [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2007, 31(1): 63.
- [9] 梁文宏, 刘凯, 崔亚辉. 基于有限元分析的斜齿轮搅油功率损失测算及实验验证[J]. *中国机械工程*, 2014, 25(18): 2510.
- LIANG Wenhong, LIU Kai. Analysis and experimental investigation of helix gear churning loss base on finite element analysis [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(18): 2510.
- [10] SEETHARAMAN S, KAHRAMAN A, MOORHEAD M D, *et al.* Oil churning power losses of a gear pair: experiments and model validation [J]. *Journal of Tribology*, 2009, 131(2): 022202.
- [11] 孙中国, 李帝辰, 陈啸, 等. 移动粒子半隐式法在流体机械数值模拟中的应用[J]. *排灌机械工程学报*, 2013, 31(11): 921.  
SUN Zhongguo, LI Dichen, CHEN Xiao, *et al.* Application of moving particle semi-implicit method in mechanical numerical simulation [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(11): 921.
- [12] SHAKIBAEINIA A, JIN Y C. MPS mesh-free particle method for multiphase flows [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2012, 229-232(2): 13.