

基于哨兵 1/2 冰川流速监测及基于哨兵-1 的冰川表面融化 监测

李刚¹, 陈卓奇¹, 江利明², Andrew Hooper³, 林琚⁴

1, 中山大学测绘科学与技术学院, 珠海, 中国

2, 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉, 中国

3, COMET, School of Earth and Environment, University of Leeds, UK

4, 江西师范大学地理与环境学院, 南昌, 中国

第一部分, 基于哨兵-2 的高亚洲冰川流速监测

哨兵 2 星座提供了 5 日对地观测重访周期, 相比陆地卫星可以提供更高时间分辨率的冰川流速场信息。本研究处理了覆盖 ‘喀喇昆仑-帕米尔异常’ 的区域及周边的高亚洲西部的哨兵-2 影像并提取了准月尺度的冰川流速场。每一景的哨兵-2 影像都与其后 (无云) 的后三次获取影像进行了偏移量估计以保证冗余观测。研究对哨兵-2 的 MSI 传感器间的亚像素拼接误差进行了处理, 而后参考基本流速场的大小与方向对偏移量估计的粗差进行了滤除。研究采用迭代 SVD 算法用于解算冰川流速, 并根据残差进一步提出错误偏移量值。根据本研究提取的 2017 年 10 月至 2021 年 9 月间的流速场时序, 大量跃动冰川的跃动起始或及结束被观测到。受益于高时间分辨率流速场, 我们注意到有两种完全不同的冰川跃动形态。第一种形态的冰川跃动周期仅包含数年, 且不存在季节性抖动。Rimo 冰川南支是该类型代表, 其在我们的研究时段内经历了完整的跃动期, 最大流速超过了 10 米/日。另外一种跃动冰川与普通冰川类似, 呈现强烈的季节性变化, 并伴随冰川前缘地推进。西帕米尔的 Gando 冰川是其中的代表。

第二部分, 双极化哨兵-1 影像监测的格陵兰冰盖表面融化

本研究首先针对哨兵-1 影像入射角变化较大的特点提出了一种基于准同时升降轨道的后向散射系数与极化特征的归一化算法。研究涵盖了 EW 模式的 GRD 格式影像与 IW 模式的 GRD 与 SLC 格式影像。其中 GRD 格式提供后向散射系数, SLC 格式用于极化分解获取极化特征 (Alpha 与 Entropy)。对比准同时升降轨道影像, 我们提出的算法相较传统余弦平方法在 HH 通道有较大的精度提升, 而对 HV 的改善则较小。

首先, 研究根据哨兵-1 影像特征及海拔等信息将冰川分为不同的雷达冰川带 (RGZ, Radar Glacier Zones), 而后对各 RGZ 采用 SAR 影像各类特征参考 MODIS-

LST（地表温度）与 AWS（自动气象站）数据以随机森林法进行冻融判别。仅采用双极化影像后向散射系数的分类精度为 80%，而仅采用极化分解特征的精度约为 74%；尽管后者精度较差，但在裸冰带这一对后向散射系数不敏感的冰川带上显示出较好的冻融监测精度。将两类特征合并后冻融监测精度提升至 83%，kappa 系数为 0.61。对哨兵-1 数据的分析表明冻融监测结果与近期的极端暖化事件造成的格陵兰冰盖剧烈融化相符。后续研究需要增强对各极化参数的物理变化机制解释，优化冻融监测模型，提升冻融监测精度以提升 SAR 影像利用率。

第三部分 融合哨兵-1 与哨兵-2 影像的格陵兰冰盖流速监测

本研究针对格陵兰冰盖流速差异巨大的特点发展了不同的流速提取策略。首先，对冰盖低流速与中流速区域，我们发展了基于哨兵-1 卫星 6 或 12 日间隔影像的 DD-InSAR 技术。该技术采用了斜距向偏移量估计场对 D-InSAR 干涉图再差分以降低干涉相位梯度，提升相位解缠准确性。实验表明，在格陵兰冰盖的最大监测能力由传统 D-InSAR 的 1.4m/6 日提升至 3.6m/6 日。对 burst 间由方位向运动造成的相位跳变则有方位向偏移量估计场进行估算与消除。我们还发展了由单方向 D-InSAR 反演三维流速的算法。基于升降轨影像（LOS 方向不同）的检校表明对大部以东西流向为主的冰川其反演效果较好，而对于如 Petermann 或 N79 这类与卫星飞行方向近似的冰川则较差。

此外对于高流速区域，由于失相干问题，因此本研究结合了哨兵-1 与哨兵-2 影像的偏移量结果。我们发展了一套两步加权连通分量内最小二乘方法提取并合并全季节冰盖流速。误差传播表明哨兵-1 的偏移量估计精度约为 0.4m 而哨兵-2 约为 2.5 米。我们对 Petermann, N79 (Nioghalvfjerdingsfjorden, Zachariae Isstrom, and Storstrommen), Jakobshavn Isbrae, and Kangerlussuaq 这四条格陵兰大型入海冰川构建了 6 日流速产品，并与美国冰雪数据中心的 NSIDC-0766 产品进行了对比。本研究的产品表现出了更好的时空连续性，特别是在夏季的覆盖率远高于 NSIDC-0766 产品。