

用于广域滑坡识别和监测的 InSAR 对流层大气相位延迟校正方法

Yian Wang^{1,2}, Jie Dong¹, Lu Zhang³, Li Zhang³, Mingsheng Liao³, Jianya Gong³

¹School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan university, China;

²CommSensLab, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain;

³State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, China

摘要：合成孔径雷达干涉测量 (InSAR) 已被广泛用于识别潜在不稳定边坡和监测典型的滑坡。然而，大气相位延迟对 InSAR 滑坡探测和监测结果影响很大。通常情况下，滑坡的检测和边界圈定是通过筛选相干点上的 InSAR 形变速率来实现的，但是由于大气延迟的影响而导致形变速率不准确，从而导致滑坡边界检测精度较差。此外，InSAR 时序形变监测在滑坡机理分析和预警中具有重要意义，同样容易受大气相位延迟的影响。尽管传统的经验性相位高程模型或外部数据辅助的方法可以在一定程度上纠正大气相位延迟，但由于高山峡谷地区的大气折射率分布不均匀，其校正精度依然不高。

为了校正广域高山峡谷区域的 InSAR 对流层大气延迟，我们提出了多时相移动窗口线性模型 (MMLM)。它是一种线性相位高程模型，可根据局部滑动窗口上的多时相解缠相位来估计对流层延迟。所提出的大气校正模型具有以下三个创新点：

- (1) 由于对流层延迟与高程之间的关系在局部区域内可以视为线性。我们求解了局部空间窗口内 SDFP (缓慢去相关滤波相位) 点的线性模型参数，并对估计参数进行全局平滑插值，以确保更好地反演高度空间异质性的的大气相位。
- (2) 湍流大气在空间和时间上均呈现随机变化，但与海拔高度相关的垂直分层大气延迟在时间上呈现季节性趋势。由于丰富的多时相 InSAR 观测数据可以保证局部窗口中线性估计的鲁棒性。因此，我们利用多时相解缠相位来进行参数估计以减轻局部湍流大气对垂直分层大气相位延迟估计的影响。
- (3) 在局部窗口中，传统的线性模型方法对变形信号和相位解缠错误高度敏感，尤其是与局部地形相关的误差。为了解决这一问题，我们迭代的使用估计的形变速率和解缠相位的三角闭合残差作为权重，以抑制局部尺度的滑坡变形和相位解缠错误对参数估计的影响。

首先进行了仿真实验来证明所提出模型的有效性，然后使用两河口水电站库区的降轨和升轨 Sentinel-1 SAR 数据进行了测试。通过与 ERA5、GACOS、时空滤波和传统线性模型的比较来评估 MMLM 模型。我们的主要发现可总结如下：

- (1) MMLM 利用多时相解缠相位对垂直分层大气延迟进行建模估计，减轻了局部湍流相位、局部滑坡变形和局部相位解缠错误对参数估计的影响。
- (2) MMLM 为每个滑动局部窗口内的相位建立经验线性模型，并将参数插值到每个 SDFP 目标，有效的表征了垂直分层大气相位延迟的空间异质性。
- (3) MMLM 与各种对流层延迟校正方法的比较证明了其对单个干涉图、形变速率和时间序列形变的大气相位校正的精度最高。上述方法中，降轨 Sentinel-1 和升轨 Sentinel-1 干涉图经 MMLM 模型校正后，原始解缠相位的标准偏差 (STD) 值分别下降了 35%和 50%以上。
- (4) 利用 MMLM 模型，对两河口全库区的滑坡进行了精细化 InSAR 调查。校正后的形变速率图改善了滑坡灾害的识别和边界圈定，并且其结果已得到无人机图像解译和现场勘察的验证。此外，提取出的精细化时间序列形变，有助于滑坡灾害预警和机理分析。