

基于 SBAS-InSAR 技术的滑坡形变监测

李帅飞

青海大学，青海西宁，810016；

摘要：滑坡作为一种常见的地质灾害，对人类社会造成了严重影响。传统的滑坡监测方法存在精度低、监测难度大等问题，而基于合成孔径雷达干涉（InSAR）技术的滑坡监测方法因其高效性和精确性在近年来得到了广泛应用。本文通过回顾 InSAR 技术在滑坡形变监测中的应用，分析其技术优势与不足，并提出未来研究方向。本文的研究对提高滑坡灾害监测精度和预警能力具有重要意义。

关键词：InSAR 技术；滑坡形变；遥感监测；地质灾害；监测精度

DOI:10.69979/3041-0673.25.03.046

引言

滑坡是一种常见的地质灾害，通常由降水、地震或人为活动等因素触发，对人类社会造成严重危害。传统的滑坡监测方法多依赖于地面观测，存在监测周期长、空间覆盖范围有限等问题。而随着遥感技术的发展，尤其是 InSAR 技术的应用，使得滑坡形变的监测得到了极大的改善。

InSAR 技术通过分析不同时间点的雷达影像，提取地表的相位差异，从而获取地表形变信息。相比传统监测手段，InSAR 技术具有高效、精确、无地面接触、可大范围覆盖等优点，因此在滑坡监测中具有广泛的应用前景。

1 InSAR 技术原理

合成孔径雷达干涉（InSAR, Interferometric Synthetic Aperture Radar）技术是一种基于雷达影像干涉效应，通过分析不同时间获取的 SAR 影像来提取地表变形信息的遥感技术。近年来，InSAR 技术在地震监测、火山活动、城市沉降、冰川移动等领域得到了广泛应用。本研究主要使用 SBAS-InSAR 技术进行滑坡形变监测。

1.1 SBAS-InSAR 基本原理

InSAR 技术获取的是地表的高程信息，而要获取地表形变数据，则需要运用合成孔径雷达差分干涉测量（D-InSAR）技术。D-InSAR 技术通过对同一地区进行两次或多次观测，并在初步干涉相位中去除地平相位、地形相位、大气延迟相位和噪声相位，从而获得地面形变信息。然而，D-InSAR 在形变提取过程中容易受到噪声、偶然误差等因素的干扰，这可能会导致通过 D-InSAR 提取的地面形变信息不够精确。因此，时序 InSAR 技术如 SBAS-InSAR 应运而生，并已广泛应用于地面形变监测领

域。

SBAS-InSAR 的基本原理是，通过对研究区域多景 SAR 影像的处理，选择适当的时间和空间基线阈值，将所有 SAR 影像划分为若干小基线集。每个小基线集内，通过与主影像组成干涉对，进行差分干涉分析，利用最小二乘法计算出该小基线集的地表形变。接着，采用奇异值分解(SVD)方法对多个小基线集的结果进行联合求解，以获得目标区域的形变速率和时间序列信息^[1]。

1.2 SBAS-InSAR 基本流程

SBAS-InSAR 技术是一种通过合成孔径雷达（SAR）影像数据提取地表形变信息的方法。其主要分为四个处理流程：连接图生成、干涉处理、SBAS 反演和地理编码^[2]。

1.2.1 连接图生成

连接图生成是 SBAS-InSAR 流程中的首要步骤，旨在通过分析多时相 SAR 影像的空间和时间基线，筛选出最合适的影像对，建立连接图。连接图的核心任务是从原始影像对中选择具有较小时间间隔和空间基线的干涉图对，这对于提高干涉图的质量至关重要。选择合适的影像对有助于减少由于大气效应、轨道误差等因素产生的噪声，并确保干涉结果能够更好地反映真实的地表形变信息。通常，这一步骤依赖于影像的几何校正、时空配准以及基线筛选。

为了构建高质量的连接图，需要确保 SAR 影像具有足够的重叠区域，并且进行预处理，包括几何校正和辐射校正。此外，影像对的选择应满足基线范围的要求，通常较小的空间基线和较短的时间间隔能够保证较高的干涉图质量。

1.2.2 干涉处理

在干涉处理中，采用 SAR 影像对生成干涉图，干涉

图揭示了两幅影像之间的相位差异，反映了地表在拍摄时间段内的变形情况。通过干涉计算，研究者可以获得地表形变的相位信息，进一步进行地形和变形的反演。干涉处理过程中需要进行多项校正工作，主要包括去除大气延迟、轨道误差和其他可能影响相位信息的因素。干涉图的质量直接决定了后续分析的精度。

干涉图生成依赖于影像的几何配准和辐射校正，确保不同影像之间的空间一致性。在此基础上，需要精确测量影像对之间的基线和时间间隔，以便生成具有高质量的干涉图。此外，大气延迟和轨道误差的校正在此过程中也十分重要，以消除噪声并提高干涉结果的可靠性。

1.2.3 SBAS 反演

SBAS 反演是该技术的核心环节，主要通过分析多个干涉图序列中的相位变化来提取地表的形变信息。SBAS 方法采用小基线子集的策略，利用多个干涉图的相位信息进行时空滤波，能够有效分离出长期趋势性形变和突发性的地表形变事件。通过反演，可以提取出地表的垂直变形速度、水平位移等信息。SBAS 反演能够在高时空分辨率下进行地表形变监测，尤其适用于对大范围地区的长期形变监测。

为了进行精确的 SBAS 反演，必须确保干涉图的质量达到较高水平，特别是减少大气延迟、轨道误差等影响。此外，影像的时空基线配置至关重要，合适的影像选择有助于提高反演结果的精度和稳定性。通过采用小基线子集，反演能够提取更为精细的形变信息，并有效减少噪声的影响。

1.2.4 地理编码

地理编码是 SBAS-InSAR 分析流程中的最后一步，旨在将反演结果从影像坐标系统转换为实际的地理坐标系统，如 WGS84 或 UTM 投影系统。地理编码过程涉及投影变换、坐标配准等操作，确保形变数据能够准确地映射到实际地理空间中，便于进行后续的地理信息系统（GIS）分析和应用。在地理编码阶段，研究者还需要考虑地球曲率、卫星轨道信息等因素，以确保结果的地理精度。

2 InSAR 技术在滑坡监测中的应用现状

InSAR 技术在滑坡监测中的最大优势在于其高精度、广域覆盖和非接触式的测量方式。相较于传统的地面测量方法，InSAR 能够在大范围内获取地表的高精度变形数据，尤其适用于难以接近的滑坡区域。通过反复获取不同时间的雷达影像，InSAR 能够实时、连续地监测地

表变形，并提供厘米级甚至毫米级的空间分辨率，确保了对滑坡的细致监控。此外，InSAR 对于天气条件的适应性强，尤其在多雨、雾霾等天气影响下，依然能提供稳定的数据支持，具有显著的监测优势。

在滑坡监测领域，InSAR 技术已经成功应用于多个国家的滑坡监控项目。例如，在中国的山区，InSAR 被用于实时监测滑坡发生的预兆，特别是在那些地质复杂、交通不便的地区，提供了有效的变形监测数据。通过与地面观测手段结合，InSAR 能够对滑坡的活动范围、变形速率等进行长期跟踪分析，为滑坡的预测和防治提供数据支持。对于一些特殊的滑坡类型，如缓慢发生的深层滑坡，InSAR 能够准确捕捉到微小的地表位移，为滑坡灾害的预警提供重要依据。与此同时，随着遥感技术的不断发展，InSAR 的分辨率和数据处理能力也在不断提升，使得滑坡监测的精度和效率不断提高，成为地质灾害防治工作中的有力工具。

其中，SBAS-InSAR 技术在滑坡监测中的应用日益广泛，已成为研究和监测滑坡活动的重要工具。传统的滑坡监测方法主要依赖现场调查和地面测量，然而这些方法在空间覆盖范围、监测频率和实时性上存在一定局限性。与之相比，SBAS-InSAR 技术利用卫星雷达数据，通过多时相数据的差分处理，能够精确地获取大范围、长期时间序列的地表形变信息，克服了传统地面监测方法的不足。其主要优势在于可以对滑坡区域进行高精度的空间变形监测，特别是在难以接近或受限的地区，如山地和交通不便的地方。此外，SBAS-InSAR 技术具有较高的时间分辨率，能够实时跟踪滑坡活动的演变趋势，为滑坡灾害的预警提供有力支撑。通过分析雷达影像中反映的地表形变，可以识别滑坡体的位置、形态及其变形速率，为滑坡的动态变化过程提供详细的量化数据。在实际应用中，SBAS-InSAR 技术已成功应用于多个滑坡区的监测，显示出其在滑坡早期预警、灾害评估及防治措施制定方面的重要价值。随着卫星影像分辨率和技术处理能力的不断提升，未来 SBAS-InSAR 技术将在滑坡监测领域的应用前景将更加广阔。

综上所述，InSAR 技术在滑坡监测中的应用优势明显，其高精度、广泛适用性和实时监控能力使其成为现代滑坡监测的重要技术手段。随着技术的不断进步，InSAR 在滑坡监测中的应用前景将更加广阔。

3 基于 SBAS-InSAR 技术的滑坡区地表形变监测

本研究在某地区的滑坡地表形变监测项目中，基于

SBAS-InSAR技术,采用Sentinel-1A卫星上升轨道获取的雷达数据,研究区域的雷达视线(Line of Sight, LOS)方向的变形结果显示,图中所示的累计形变量及其年变形速率的负值表示地表形变点沿着远离雷达天线的方向运动。相反,正值则表明地表形变点正向雷达天线靠近。这一分析方法为深入理解地表形变特征提供了重要的定量信息,能够有效揭示潜在的地质活动及地表变化规律。由结果可知,采用升轨数据所提取的区内滑坡分布区地表形变点中,形变点数量最多的区间为0~5 mm/a,共274334个;其次是-5~0 mm/a,共有174933个;位于区间-5~0 mm/a和0~5 mm/a内的形变点数量占形变点总数的94.3%。同时,由SBAS-InSAR技术反演得到的滑坡体地表形变区域多位于滑坡体前缘位置处,在大型冲沟附近也伴有形变量较大的位移运动趋势现象。由野外工作可知,滑坡前缘地形松散,发育多处裂缝,与SBAS-InSAR技术得到的结果即形变较为剧烈的滑坡体区域位置较为吻合,由此表明SBAS-InSAR技术能够有效捕捉到滑坡体活动的关键区域,尤其是在形变较为剧烈的部位。野外实地调查进一步验证了这些形变结果的可靠性,表明该技术在滑坡监测中的应用具有较高的精度和实用性。基于此,SBAS-InSAR技术可作为滑坡活动监测与评估的重要工具,为地质灾害防治提供科学依据。

4 基于InSAR技术的滑坡区地表形变监测的前景展望

基于InSAR技术的滑坡区地表形变监测作为一种新兴的遥感技术,在滑坡灾害监测、预警及防治中展现了巨大的潜力。随着卫星雷达技术的不断进步,InSAR技术已经能够提供更高的空间分辨率和时间分辨率,使得滑坡监测变得更加精准和实时。InSAR通过获取地面目标的雷达反射信号,利用干涉原理计算地表形变,尤其在对大范围、难以到达地区的监测中具有无可比拟的优势。相较于传统的地面监测方法,InSAR能够实现大规模、高频次的地表位移监测,不仅克服了地面调查的局限性,还能实时反映滑坡体的动态变化。通过多时相数据的分析,可以精确识别滑坡的发生、演变过程及其对周围环境的影响,这为滑坡灾害的预测和应对提供了强

有力的技术支持。

然而,尽管InSAR技术在滑坡监测中展现出强大的潜力,但在实际应用中仍面临一定的挑战。首先,雷达信号的散射特性可能受到地表覆盖类型、地形复杂性等因素的影响,从而影响监测结果的精度。特别是在植被茂密或城市化严重的区域,InSAR信号的可靠性可能下降。其次,滑坡体的形变可能具有复杂性和非线性,单一的InSAR数据可能难以全面反映滑坡的多维度变形过程。因此,为了提高监测精度和可靠性,未来的研究需要进一步优化InSAR技术的处理算法,结合其他遥感技术如光学影像、激光雷达等数据,实现多源数据融合。此外,随着卫星技术的快速发展,未来InSAR技术的空间分辨率和时间分辨率将不断提升,能够更精准地捕捉到滑坡活动的微小变化,为滑坡灾害的早期预警和防治提供更加精细化的数据支持。综上所述,基于InSAR技术的滑坡监测不仅具有广阔的应用前景,而且随着技术的进步,其在地质灾害防治中的应用将越来越普遍,成为提升滑坡监测、预警及应急响应能力的重要工具。

5 小结

InSAR技术作为一种重要的地表变形监测手段,已在多个领域取得了显著的应用成果。不同类型的InSAR技术各具特点,适用于不同的应用场景。随着技术的不断进步,InSAR将在更多的领域中发挥重要作用。未来,InSAR技术的精度、时效性以及数据处理能力将进一步提升,为环境监测、灾害预测等方面提供更加可靠的数据支持。

参考文献

- [1] 刘蔚.基于时序InSAR技术的南水北调禹州段沿线稳定性研究[J].水利科技与经济,2022,28(10):53-57+85.
- [2] 蒲虹宇,张立峰,何毅,等.甘肃通渭黄土滑坡二维形变时序监测[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(06):114-124.

作者简介:李帅飞(1998.09—),男,汉族,河北邯郸人,青海大学硕士研究生在读,研究方向:遥感技术应用。