DOI:10.13203/j.whugis20260035 文章编号:1671-8860(2026)05-1069-01

分布式散射体InSAR信号稳健处理方法研究

姚树一 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,湖北 武汉,430079

Research on Robust Processing of Distributed Scatterer InSAR Signals

YAO Shuyi State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

中图分类号:P237 文献标识码:D

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)是一种利用多时相雷达影像中的相位信息获取地表高程、形变等地球物理参数的遥感技术,具有近全天候、全天时、大范围和高精度等优势。在SAR遥感影像中,分布式散射体(distributed scatterer,DS)广泛存在于自然区域以及机场等人工构筑物区域。因此,DS-InSAR技术在地质灾害监测与环境研究等方面具有重要的应用价值。然而,与永久散射体所具有的简洁信号模型和单视处理特性不同,分布式散射体信号特性的刻画依赖于完整的二阶统计量(通常为复协方差或复相干矩阵),并需要在局部空间窗口内实现相关统计推断。这使得DS-InSAR技术对高质量干涉SAR数据的需求更高,同时对理论建模的严密性和方法流程的稳定性也提出了更为严苛的要求。

21世纪以来,随着TerraSAR-X、Sentinel-1等先进星载SAR系统的运行,DS-InSAR理论与技术逐渐摆脱经验依赖,转向以具体的信号模型作为参数估计的依据,形变反演的精度也不断随之提升。其中,满足空间各态历经性的复圆高斯模型是常用的信号假设。2011年,Ferretti等提出SqueeSAR技术,将DS-InSAR过程划分为统计同质像元识别与相位优化两步,不仅可以有效提升相位估计质量,还可与现InSAR流程无缝衔接。SqueeSAR是现代DS-InSAR的核心方法之一,并促生了大量后续改进研究。然而,如何应对真实SAR数据中普遍存在的各种不满足各态历经及复圆高斯假设的非理想情形,始终是制约DS-InSAR技术进一步提升应用价值的关键难题。基于此,该文针对相位非平稳性、统计异质性与信号不符合复圆高斯分布(非高斯性)等干扰与偏离现象,提出了一系列稳健的DS-InSAR统计建模与信号处理方法,并进行了相应的理论推导、算法设计与实验验证,旨在提升DS-InSAR在实际灾害监测与环境研究中的可靠性与应用价值。主要研究内容包括:

1)大梯度形变等因素可能导致局部窗口内出现干涉条纹。这可以视为空间上各个像元相干矩阵元素的幅角(即真实干涉相位)显著不一致,从而使得DS-InSAR信号的空间各态历经性或相位平稳性假设难以满足。针对这种现象,通常需要先估计和补偿干涉条纹,然后再进行相位估计。然而,传统的条纹估计方法仅适用于干涉图序列中的单幅干涉图,无法有效利用冗余干涉连接中的观测信息,在精度和稳健性方面还有改进的空间,因此提出条纹平差法(fringe adjustment,FAD)。该方法通过引入条纹频率的时域三角闭合性约束,并推导和利用条纹频率估计量的多维统计特性,将条纹频率历程的估计构造为附带粗差剔除的加权最小二乘问题,从而增强了估计的稳健性,并显著提升了DS-InSAR技术在大梯度形变区域(如井工开采煤矿采区)的适用性。真实数据实验结果表明,所提出的FAD算法将研究区反演得到的最大形变量由约−180 mm提升至至少约−270 mm,增幅约为50%,显著改善了DS-InSAR技术在剧烈形变区域的监测能力。

2)统计同质像元选取技术通常用于缓解相干矩阵元素的幅度在空间上的不均匀性问题,以确保样本集可以满足空间各态历经性假设。首先,为抑制信号非高斯性对统计同质像元选取所造成的干扰,引入复角中心高斯分布模型,并采用尺度无关的白化二次型统计量作为同质判别的依据,使判别过程更加稳定。同时,针对"统计量估计依赖于已知同质样本,而同质样本判别又依赖于统计量"的相互依赖矛盾,提出二阶统计量迭代更新与掩膜反转相结合的处理方法,避免了对时间维度抽样或局部小窗口统计量的依赖,从而更充分、更严密地挖掘和利用了原始数据的统计特性。融合以上两点创新,提出基于角度结构一致性的自适应滤波方法(angular consistency adaptive filter,ACAF)。该方法能够在复杂的异质场景中,稳定而准确地识别统计同质像元,为后续的相干性估计和相位优化处理提供可靠的样本支持。与传统方法FaSHPS相比,ACAF方法的$F1$分数提升了约73.5%,显著提高了同质像元识别的准确性和稳健性。

3)当信号分布偏离复圆高斯假设时,传统相位优化方法的估计精度将显著下降。为此,提出基于圆形统计中心极限定理的相位优化(central limit theorem for circular statistics-based phase-linking,CLTC-PL)方法。该方法利用纯相位数据,将传统的非线性相位优化问题转化为局部线性的最小二乘估计问题,既能稳健地估计分布式散射体的相位历程,又能解析地给出估计误差的近似协方差。实验结果表明,CLTC-PL在复杂环境中仍能保持较高的相位估计精度,而在非高斯散射区域,该方法可将相位方差降低约30%。

作者简介:姚树一,2025年12月毕业于武汉大学,获工学博士学位(指导教师:Timo Balz教授,Alejandro C. Frery教授),研究方向为分布式散射体InSAR。yaoshuyi@whu.edu.cn

YAO Shuyi.Research on Robust Processing of Distributed Scatterer InSAR Signals[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(5):1069.DOI:10.13203/j.whugis20260035.(姚树一.分布式散射体InSAR信号稳健处理方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(5):1069.DOI:10.13203/j.whugis20260035.)