

遥感技术在长城保护巡查中的应用

李文渊

榆林市长城保护中心 陕西 榆林 719000

摘要：针对传统长城人工巡查效率低、盲区多、主观性强，难以适配现代化精准保护需求的问题，本文整合光学、SAR、LiDAR 多源遥感技术，构建天空地一体化监测体系。重点探究其在长城资源建档、损毁监测、形变预警、智能巡查中的应用路径，分析当前技术解译精度不足、数据融合度低等短板，提出算法优化、模型迭代、体系完善等改进策略，为长城智慧化、常态化保护巡查提供技术支撑与实践参考。

关键词：遥感技术；长城保护巡查；应用

引言：长城作为世界级文化遗产，长期受自然风化、极端天气及人为活动多重破坏，遗存保护形势严峻。传统人工巡查模式存在诸多局限，无法实现长城全域、动态、精准化保护管控。为破解长城巡查保护难题，推动文物保护数字化转型，本文依托遥感技术核心原理，搭建适配长城地貌与损毁特征的监测体系，系统探究多源遥感技术的落地应用场景，剖析现存技术与管理问题，优化应用方案，助力长城遗产长效保护。

1 长城保护巡查与遥感技术基础理论

1.1 长城损毁与巡查核心需求

(1) 长城主要损毁类型包括自然风化、水土流失、坍塌和人为破坏。自然风化表现为长期风蚀、冻融循环导致的砖石酥碱与剥落；水土流失集中于夯土墙体，由雨水冲刷引发裂缝与掏蚀；坍塌多为突发性结构失效，与地震、强降雨等极端事件相关；人为破坏涉及取砖、取土、耕种及旅游踩踏等行为^[1]。(2) 传统人工巡查的局限性明显：效率低，依赖步行目视检查，难以实现高频次覆盖；可达性差，偏远段落及陡峭山脊处巡查困难；主观性强，巡查记录因人而异，缺乏统一量化标准；隐蔽损毁难以发现，如墙体内部空鼓、微小形变等肉眼无法识别。(3) 现代化长城保护巡查提出精准化、常态化、全域化需求。精准化要求量化识别损毁位置、类型与程度；常态化强调建立周期性监测机制，实现动态跟踪；全域化需覆盖全线墙体及周边环境，消除巡查盲区。

1.2 遥感技术核心原理与类型

(1) 遥感成像基于传感器接收地物反射或发射的电磁波信息，通过不同波段的反射率差异识别地物类型与状态。地物信息提取依赖光谱特征、空间纹理及

几何形态等解译标志，结合影像分类与变化分析实现目标识别。(2) 光学遥感依托可见光—近红外波段获取高分辨率影像，色彩直观但受天气和光照影响大；SAR 遥感利用微波穿透云层，对表面粗糙度和介电特性敏感，可全天候工作并具备形变探测能力；无人机 LiDAR 通过主动发射激光获取高精度三维点云，穿透植被，精确刻画墙体微地形。(3) 多源遥感数据各具优势：光学遥感分辨率可达亚米级，适用于表面损毁判读；SAR 适用于形变监测与多云雨区域；LiDAR 精度达厘米级，最适配夯土墙体精细建模。三者协同互补，支撑长城全域保护需求。

1.3 遥感技术适配长城保护的技术体系

(1) 天空地一体化遥感监测体系由卫星遥感、无人机遥感和地面观测三层构成。卫星提供大范围周期性覆盖，无人机聚焦重点段落高精度详查，地面传感器与巡查验证互补，形成立体监测网络。(2) 核心技术流程包括影像预处理（辐射定标、几何校正、大气校正）、多源影像融合（光学与 SAR、LiDAR 数据配准与融合）及遥感解译（人工判读与深度学习自动分类结合）。(3) 长城遗存信息提取通过光谱指数、纹理特征与形态参数识别墙体与附属设施；变化检测利用多时相影像比对，提取损毁区域并量化变化幅度，实现异常自动预警，为长城保护提供及时、准确的空间信息支撑。

2 遥感技术在长城保护巡查中的具体应用

2.1 长城全域遗存资源普查与底数建档

(1) 基于高分辨率光学遥感影像（空间分辨率优于 0.5 米）和无人机航拍数据，采用面向对象分类与深度学习语义分割相结合的方法，提取长城墙体、敌台、烽燧、关堡等遗存的平面轮廓、走向及空间范围。针对夯

土墙体与周边裸土光谱混叠问题,引入形态学运算与纹理特征增强,结合短波红外波段区分土质墙体与自然地表,提升边界勾绘精度,实现全线遗存位置的精准锁定与几何参数(长度、宽度、面积)自动量测。(2)将提取的遗存矢量数据与高精度DEM(数字高程模型)叠加,完成长城沿线坡度、坡向、高程带及汇水区等地形因子匹配分析,明确遗存分布与地形条件的空间关联规律。通过三维地形场景还原,辅助判读墙体走向合理性及险要段落防御功能布局,同时分析地形对墙体保存状况的潜在影响(如坡面径流冲刷方向),为每条长城段落建立地形—遗存一体化空间档案^[2]。(3)按照“一线一档”“一段一表”原则,构建长城文物资源数字化档案数据库。数据库采用地理信息系统与关系型数据库集成架构,统一存储遗存空间位置、几何形态、多期影像切片、地形参数、保护等级、历史修缮记录及环境背景信息,实现多源数据一体化集成、可视化查询与版本管理,为后续监测、巡查与保护决策提供标准化、可追溯的空间数据底板。

2.2 长城损毁动态监测与风险识别

(1)采用多时相高分辨率光学遥感与SAR影像时序对比方法,建立基于归一化差异植被指数、土壤亮度指数及纹理差异联合分析的变化检测模型,自动识别墙体边界退缩、夯土体量缩减、顶部塌陷等损毁特征。通过辐射归一化与季相校正消除虚假变化,设定变化幅度与空间聚集度双阈值,精准提取真实损毁区域并量化变化程度。(2)针对自然风化,利用热红外遥感反演墙体表面温度场,识别冻融交替下夯土微裂隙发育区;针对水土流失,基于DEM汇水分析结合雨季前后影像差异,标定冲沟发育位置及墙体根部掏蚀范围;针对植被侵蚀,利用多光谱数据计算植被覆盖度与优势种分布,评估深根系植物对墙体结构的潜在危害,形成自然损毁因子分级专题图^[3]。(3)利用亚米级光学影像地物光谱特征与雷达后向散射系数变化,自动标记保护范围和建设控制地带内的新增人工地物。通过设定光谱异常和几何形态突变判别规则,识别私搭乱建、违规开垦、道路碾压及施工堆土等行为。结合GIS空间叠置分析判定破坏行为所处管控分区,生成违法图斑清单并附带坐标与影像证据。

2.3 长城形变监测与隐患预警

(1)星载InSAR利用不同时相雷达回波相位差反演地表沿视线向毫米级形变。针对长城墙体呈线状分布、周边植被导致相干性降低的问题,采用永久散射体干涉测量(PS-InSAR)技术,筛选墙体本体及邻近稳

定地物上的高相干散射点,获取长时间序列形变速率与累积位移量,实现墙体沉降和侧向滑移的高精度定量监测。(2)基于InSAR形变速率场与累积位移量结果,叠加墙体结构特征、地质条件及地震活动性等多源数据,采用空间聚类与异常值检测方法识别形变异常区域。将沉降速率超过设定阈值或位移梯度突变的高风险段标记为隐患区域,结合实地验证进行空间圈定,形成隐患点分布图与单体形变风险档案。(3)依据形变速率等级、损毁类型严重程度和文物等级三个维度,建立红、橙、黄三级风险分级预警机制。红色区域启动紧急现场核查与抢险加固,橙色区域加密监测并列入修缮计划,黄色区域保持常规监测。预警结果以专题图和风险清单形式定期推送至各级文物管理部门。

2.4 长城保护巡查智能化作业落地

(1)基于遥感变化检测结果、InSAR形变异常区分布和历史巡查记录,利用网络分析算法与多约束条件路径优化模型,自动生成覆盖隐患点、高危段落和巡查盲区的最优巡查路线方案。路线成果导入移动巡查终端,辅助巡查人员按风险优先级科学调度,减少盲目徒步与重复走访,有效提升一线作业效率与目标针对性。(2)针对全国重点文物保护段落和开放游览密集区,建立“季度卫星广域普测+月度无人机重点详查+极端天气后即时加密”的分层常态化巡检模式。卫星影像负责全线覆盖筛查与宏观态势判断,无人机负责重点段落高精度三维建模与多角度高清取证,三层数据互为补充、交叉验证,形成时间连续、空间完整的分级巡查工作闭环^[4]。(3)搭建巡查数据实时回传与动态更新平台,终端采集的现场信息通过移动网络即时上传,与同期遥感结果进行时空交叉比对校验,形成“遥感发现—系统派单—现场核实—问题处置—结果反馈”全流程闭环管理。基于综合监测数据自动生成保护态势分析报告,为年度修缮计划编制、保护资金分配和抢险加固应急决策提供科学、动态的数据支撑。

3 遥感技术在长城保护巡查应用现存问题、优化策略与展望

3.1 遥感技术长城巡查应用现存问题

(1)复杂地形下遥感影像解译精度不足,易受植被、云雾干扰。长城多分布于山脊、陡坡等复杂地貌区,光学影像常因云覆盖、阴影遮挡导致墙体信息缺失或失真;植被茂密段落的夯土墙体被林木冠层掩盖,光学与SAR均难以穿透获取真实地表信息,直接影响解译完整性与判读可靠性。(2)多源遥感数据融合度低,数据利用率有待提升。光学、SAR、LiDAR等数据获取机

制各异,时空基准与分辨率不统一,现有融合方法多停留在几何层面对齐层面,缺乏光谱—结构—形变特征的深层协同挖掘,大量数据处于“采而不用”或“用而不深”状态。(3)智能化自动识别模型适配性不足,人工干预占比高。现有深度学习模型多基于通用遥感样本库训练,对长城墙体形态多变、材质差异大、背景复杂等特性适应能力弱,误检漏检率偏高,解译结果仍需大量人工复核修正,自动化作业链条尚未真正打通。

3.2 技术优化与应用改进策略

(1) 优化影像预处理与融合算法,提升复杂场景识别精度。引入辐射传输模型校正大气及地形阴影影响,发展光学与 SAR 数据特征级与决策级融合策略,结合时序云掩膜技术填补缺失信息,增强植被覆盖区和阴影段落的墙体信号复原能力。(2) 结合 U-net 深度学习算法优化长城损毁智能提取模型。构建长城专用标注样本库,涵盖不同材质、地貌、损毁类型的墙体影像,采用数据增强与迁移学习提升模型泛化能力,设计多尺度特征融合模块增强对小尺寸损毁目标的敏感度,降低误检漏检率。(3) 构建遥感、无人机、人工巡查联动的一体化作业体系。明确三者的协同分工与数据流转机制:卫星遥感负责广域筛查发现问题,无人机负责重点区域详查取证,人工巡查负责现场核实与处置反馈,形成“发现—聚焦—确认—处置”的高效联动闭环^[5]。

3.3 行业管理与推广优化建议

(1) 完善长城遥感监测数据标准化管理规范。统一数据采集标准、处理流程、产品格式与质量控制体系,建立数据分级分类管理机制,明确不同层级保护单位的数据权限与更新频次要求,为规模化应用奠定制度基础。(2) 推进长城遥感监测技术规模化、常态化推广应用。制定分阶段推广路线图,优先在国家级重点段落部署示范工程,形成可复制的技术方案与运维模式,逐步扩展至省级及以下保护段落,纳入各级文物部门年度工作计划与经费预算体系。(3) 搭建长城保护遥感监测共享服务平台。集成多源遥感数据、监测产品、预警信息及巡查记录,面向文物部门、科研机构和社会公众提供分级共享服务,实现数据资源统一管理和成果高效流转,支撑跨区域协同保护决策。

3.4 研究总结与未来展望

(1) 全文研究成果表明,遥感技术已在长城遗存普查建档、损毁动态监测、形变隐患识别和巡查智能化作业等方面展现出显著应用价值,有效弥补了传统人工巡查手段的不足,为长城保护提供了从宏观到微观、从静态到动态的全方位技术支持。(2) 人工智能、大数据与遥感技术的深度融合将推动长城保护向智慧化方向发展。基于海量多源监测数据构建数字孪生模型,实现墙体保存状况的实时感知、损毁趋势的智能预测与保护方案的模拟优化,逐步从“发现即处置”的事后模式转向“预判即干预”的主动保护模式。(3) 长城文化遗产长效遥感保护机制将趋于制度化、常态化与协同化。未来需构建国家—省—市三级联动的遥感监测体系,建立定期普查与动态监测相结合的工作制度,同时加强跨区域、跨部门的数据共享与协同联动,形成覆盖全线、责任明晰、运转高效的长城遗产遥感保护长效机制。

结束语

本文系统探究了多源遥感技术在长城保护巡查中的核心应用价值,有效弥补了传统巡查模式的短板,实现了长城遗存普查、损毁监测、隐患预警的智能化升级。同时梳理了技术应用现存痛点,提出针对性优化与推广策略。未来,需深化遥感、人工智能与大数据融合,搭建数字孪生监测体系,构建多级联动长效保护机制,推动长城文物保护从被动处置转向主动预判。

参考文献

- [1] 刘涵薇,陈富龙,廖亚奥.明长城(北京段)遥感动态监测与影响驱动分析[J].自然资源遥感,2023,35(04):255-263.
- [2] 刘雨婧.基于遥感技术的明长城南山防线壕堑研究[J].文物保护与考古科学,2025,37(01):148-153.
- [3] 何海英,陈彩芬,陈富龙,等.张家口明长城景观廊道 Sentinel-1 影像 SBAS 形变监测示范研究[J].国土资源遥感,2022,34(02):196-204.
- [4] 高鸿宾,魏惠平,李沐心.基于低空遥感的明长城附燧遗址普查与保护巡查[J].航天返回与遥感,2023,43(01):112-120.
- [5] 王佳琪.多源遥感技术在长城文化遗产巡查保护中的综合应用[J].地理空间信息,2024,22(07):89-92.