

无人机与卫星遥感协同的区域土地资源精细化调查技术

殷鑫

宁夏回族自治区土地和矿业权集中审批服务中心

DOI:10.32629/gmsm.v9i2.2462

[摘要] 针对黄河中游台塬区县域土地资源强空间异质与快速时序波动的调查难题,本文提出一种无人机与卫星遥感协同的区域土地资源精细化调查技术。以宁夏贺兰县为研究区,构建了任务编排、数据获取、融合处理与信息提取四层联动的协同调查架构。卫星Sentinel-2多光谱与SAR数据承担广域时序监测,无人机多光谱影像实现重点斑块厘米级补测。通过跨尺度几何配准、光谱—纹理特征融合及随机森林模型,实现了耕地、草地、盐碱地、建设用地的协同识别。精度验证表明,总体精度达92.5%,Kappa系数0.91,优于单一卫星或无人机方案。成果已应用于撂荒耕地定位与盐碱地扩张监测,可为县级土地资源精细化管理提供技术支撑。

[关键词] 卫星遥感; 无人机; 多源协同; 多尺度融合; 土地资源调查

中图分类号: P283.8 **文献标识码:** A

A Technique for Detailed Regional Land Resource Surveys Combining UAV and Satellite Remote Sensing

Xin Yin

Land and Mining Rights Centralized Examination and Approval Service Center of Ningxia Hui Autonomous Region

[Abstract] To address strong spatial heterogeneity and rapid temporal fluctuations of land resources in county-level areas of the Taiyuan Plateau, this paper proposes a combined UAV and satellite remote sensing technique. Using Helan County, Ningxia as the study area, a four-layer collaborative survey framework is established. Sentinel-2 and SAR data enable wide-area monitoring, while UAV multispectral imagery provides centimetre-level surveys of key patches. Through feature fusion and random forest modelling, the method achieves 92.5% overall accuracy (Kappa 0.91) in identifying arable land, grassland, saline-alkali land, and construction land, supporting refined county-level land management.

[Key words] Satellite remote sensing; Unmanned aerial vehicles (UAVs); Multi-source collaboration; Multi-scale fusion; Land resource survey

引言

县域土地资源调查是国土空间规划与耕地保护的基础性工作。黄河中游台塬区受自然与人为双重驱动,耕地细碎化、盐碱斑块镶嵌、建设用地扩张等现象突出,传统单一遥感手段难以兼顾广域监测与局部精细刻画^[1]。卫星遥感虽具备时序覆盖优势,但受混合像元效应制约,边界刻画偏粗;无人机遥感虽能获取厘米级纹理,但大范围作业成本高、时效受限^[2]。卫星与无人机协同遥感可有效兼顾宏观覆盖与微观精细观测,在土地利用精细化调查中优势显著^[3]。因此,探索卫星宏观监测与无人机微观补测的协同机制,成为提升调查精度与效率的关键。本文面向贺兰县沿黄灌区土地资源调查需求,设计协同技术架构与数据采集方案,构建多源融合处理与信息提取流程,通过精度验证与对比分析论证协同效能,并结合管理应用案例展示其实践价值。

1 无人机与卫星遥感协同调查技术方案设计

1.1 协同调查技术架构设计

鉴于黄河中游台塬区县域土地要素强空间异质与快速时序波动,本研究构建任务编排、数据获取、融合处理与信息提取四层联动的协同调查技术架构,见图1。卫星光学多光谱及SAR负责广域连续采集,定位疑似变化并建立背景基线,无人机搭载RGB与多光谱在重点斑块实施厘米级补测。任务编排层依托变化阈值与生育期知识库驱动重访,整合卫星预警、执法清单与地面报障形成触发条件。数据获取层统一采集传感器元数据与质量标识,边缘端完成航片拼接与辐射校准,卫星端接入正射与大气校正产品。融合处理层开展跨尺度几何共配准与分辨率匹配,结合地物先验与标注样本构建特征并管理时空索引。信息提取层输出土地资源类型识别、细碎地块边界刻画与疑似违规占地判别

等专题产品,通过OGC服务对接县级自然资源数据库,形成调查到管理的闭环。

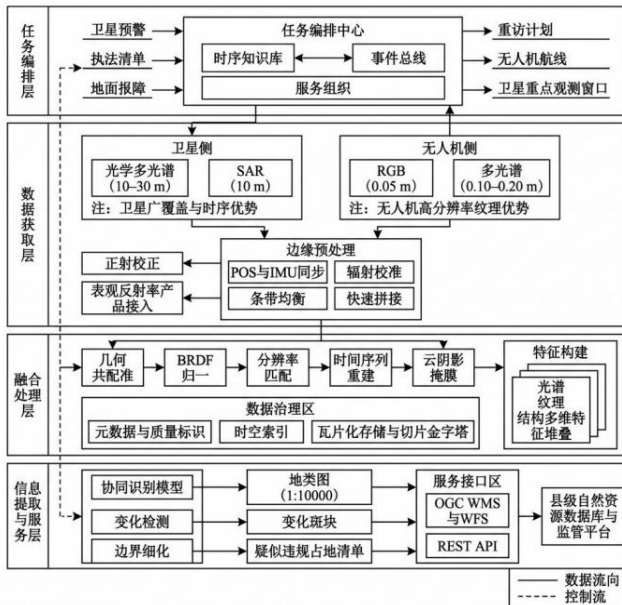


图1 无人机与卫星遥感协同调查技术架构图

1.2 研究区数据采集方案制定

宁夏贺兰县位于贺兰山与银川平原过渡地带,耕地沿黄灌区带状分布,山前扇缘保有草地,平原微洼与弃耕区见盐碱斑块,建设用地在金贵镇及交通廊道两侧集聚。面向协同采集,选用 Sentinel-2 L2A,分辨率 10 m,复访 5 d,优先获取 5至 9月生育期与 3至 4月、10至 11月裸地期,云量阈值小于 20%。无人机搭载多光谱相机,把耕地边缘与盐碱集中区作为重点,飞行高度 100 m,目标 0.1 m,重叠 80%与 70%,并进行 POS与辐射标定。为指导参数设置,引入地面分辨率关系式:

$$GSD = \frac{H \times p}{f} \tag{1}$$

其中,GSD为地面分辨率,单位为m per pixel,H为相对高度,单位为m,p为像元尺寸,单位为m,f为焦距,单位为m。依此把0.1 m与100 m约束转化为焦距与像元尺寸组合,用于航摄设定。

2 无人机与卫星遥感协同数据处理与信息提取

2.1 多源遥感数据预处理

面向贺兰县多地类并发变化的协同识别需求,本研究把 Sentinel-2 L2A与无人机多光谱数据纳入统一投影与观测窗口,构建可在县域尺度稳定运行的标准化预处理链路。卫星端在L2A基础上运用6S正演模型按太阳几何、气溶胶与水汽参数校正大气影响,并结合外业GCPs完成几何纠偏与地形改正,使反射率与地理定位在时间与空间上具备可比较性。无人机端依托POS和IMU辅助定位,选用基于特征点的匹配算法构建同名点集,经束平差获取外方位元素,配合1 m DSM开展正射校正与无缝拼接,同时实施辐射标定与条带均衡,从而把厘米级纹理信息稳定纳入栅格序列。跨源配准以Sentinel-2的RPC为几何约束,选取稳

定目标提取跨尺度控制点,采用鲁棒估计剔除粗差并以三次卷积重采样,把误差控制在0.5像素以内,为后续时序叠置提供几何一致性基线。为对配准质量进行量化并服务跨期特征分析,采用基于平面残差的均方根误差,计算式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - x_i')^2 + (y_i - y_i')^2]} \tag{2}$$

其中,n为控制点样本数,xi与yi表示参考影像中第i个控制点的平面坐标,xi'与yi'表示待配准影像对应点的平面坐标,RMSE以像素为单位,数值越小代表配准精度越高。结合5至11月有效观测,流程同步执行云与阴影掩膜、空洞修补与质量标识编码,并在空间维度完成分辨率对齐与投影统一,把多源数据以统一语义入库,服务于土地类型协同识别与细碎地块边界刻画。

2.2 土地资源类型协同识别模型构建

围绕贺兰县耕地、盐碱地、草地与建设用地在时序与尺度上的差异,本研究把卫星光谱与无人机纹理进行互补融合,构建随机森林协同识别模型。卫星端在统一观测窗口提取NDVI、NDWI、NDSI等指数,并把5—11月多时相栅格堆叠,统计极值与分位数以表征生育期与裸地期的差异。无人机端依托厘米级影像计算GLCM对比度、熵、同质性与相关性,叠加多尺度窗口统计与边缘梯度,并从多光谱通道生成UAV NDVI与土壤亮度指数,把地块边界与盐斑纹理纳入特征组。

样本构建把县级自然资源数据库地类、无人机航片判读成果及外业核查点进行一致性比对,剔除时相冲突样本,并以乡镇为空间块实施分层抽样以降低空间泄漏。模型训练把光谱、时序与纹理特征联合输入随机森林,以袋外误差与空间块交叉验证评估,网格搜索优化树数量与特征子集规模,并约束最大深度以抑制过拟合。为兼顾地块完整性与像元细节,把像元级概率场按对象单元加权汇总,权重由无人机边界置信度与纹理一致性给定,从而形成面向管理的土地类型识别结果。

2.3 精细化土地资源信息提取与制图

围绕贺兰县细碎土地格局的表达需求,本研究以像元级概率场为先验约束,构建对象单元的协同分割与边界校核流程。无人机边缘特征引导分割生长, Sentinel-2时序光谱特征判定对象同质性,从而生成耕地、草地、盐碱地及建设用地的初始对象。针对狭长镶嵌地块,设定最小制图单元为400 m²,采用形态学开闭运算合并细碎斑块,并沿无人机高置信度线状纹理吸附校正边界以减少锯齿与错位。进一步实施拓扑一致性检核,自动甄别并修补重叠、缝隙与悬挂线,将道路与河渠作为不可穿越约束写入矢量化流程。对象属性字段按县级自然资源数据库规范编码,包含地类代码、数据来源、观测时段及置信度分级,无人机影像的纹理一致性指数转化为边界可靠度标签。基于1比10000比例尺制作贺兰县土地资源精细化分布图,采用四色分级符号表达四类地物,乡镇界、主要道路及骨干沟道弱化表达以提升判读效率。面积占比统计结果如下,耕地45%,草地25%,盐碱地15%,建设用地15%。制图成品以WGS84投影入库,通过WMTS与WFS双通道服

务发布,同时输出GeoPackage及标准样式文件,便于县级自然资源一张图系统快速调用与叠加显示。

3 协同调查技术效果评估与应用分析

3.1 土地资源调查精度验证

面向协同识别在县域尺度的可靠性评判,研究在贺兰县布设500个实地验证点,按乡镇分块覆盖耕地、草地、盐碱地与建设用地,核实时相限定在5至11月有效观测窗口,并把无人机航片判读与外业记录作为真值。依靠一致的投影与配准基线,把协同识别结果与真值逐点对比,计算总体精度与Kappa,同时给出各类用户精度与生产者精度,见表1。为降低空间泄漏与样本偏倚,抽样环节采用分层随机策略并排除了同源采集影像,混淆诊断则结合地块边缘纹理与时序光谱进行归因。评估结果显示总体精度92.5%,Kappa 0.91,耕地、草地与盐碱地的用户精度分别为95.8%、90.5%、88.1,生产者精度保持在相近区间,表明协同流程在细碎地块与盐斑镶嵌场景下具备稳定识别能力。

表1 协同调查技术土地资源识别精度表

地类	样本数	用户精度/%	生产者精度/%	F1/%	主要混淆来源
耕地	200	95.8	94.0	94.9	与道路硬化地与设施用地边缘混淆
草地	120	90.5	89.2	89.8	与撂荒耕地及疏草盐渍区混淆
盐碱地	80	88.1	86.7	87.4	与裸地翻耕前地表及干涸内床混淆
建设用地	100	93.2	95.0	94.1	与硬化院落与乡镇道路及料场边缘混淆

3.2 协同技术与单一遥感技术对比分析

表2 不同遥感技术调查效果对比表

技术方案	精度/%	数据获取时长	复访能力	空间分辨率	单位面积成本	适用场景
协同方案(卫星+无人机)	92.5	7天	卫星5天复访触发加无人机2天补测	10m与0.1m融合	中等	县域执法检查与快速变更核实验
单一卫星方案	85.0	5天	5天稳定复访	10m	低	常态巡查与背景基线构建
单一无人机方案	90.0	10天	按需部署受天气与空域影响	0.1m	高	工矿园区与盐碱集中区专项检查

结合贺兰县细碎地块与盐斑镶嵌的调查语境,需要把协同流程与单一卫星、单一无人机在识别效能、时效与成本上进行对照,以明确技术选型边界,见表2。协同方案依托跨尺度共配准与光谱一纹理融合,在狭长耕地与盐斑交织地段呈现更高分辨能力;单一卫星受10m像元的混合像元效应限制,边界刻画偏粗;单一无人机虽具0.1m纹理优势,但受空域审批与批量处理开销制约,全县域推进效率不足。时效方面,卫星可在5天复访内稳定获取,无人机一般需10天完成补测,协同把预警与补测耦合后常规7天闭环。成本层面,卫星单位面积成本低,无人机高,协

同处于中等水平且在重点斑块获得较高投入产出比。由此建议把协同方案用于县域执法检查与快速变更核实验,把单一卫星用于常态巡查与背景基线构建,把单一无人机用于工矿园区和盐碱集中区的专项精细核查。

3.3 区域土地资源管理应用案例

结合贺兰县沿黄灌区与山前扇缘的利用格局,本研究把协同识别成果与永久基本农田底图、种植备案及灌排网数据叠加,生成两类可操作清单。其一,定位耕地边缘撂荒约200ha,主要分布于金贵镇渠系末端与细碎地块,依据地块完整性与可灌溉性计算复耕优先级,并把航线与时窗下发至无人机端开展复核测绘。其二,识别盐碱地扩张约150ha,集中在平原微洼与弃耕斑块外缘,结合地下水埋深与表面盐壳指数这一无人机多光谱反演指标划分治理分区,提出暗管排盐、客土改良及耐盐品种试验的差异化布局。依托OGC开放地理信息服务接口把对象级成果挂接至县级自然资源一张图,联动执法清单与耕地保护红线,形成预警—补测—核定—处置—复查的闭环,并预留以C波段SAR合成孔径雷达数据补充多云期观测的月尺度动态监测能力。

4 结语

本文面向黄河中游台塬区县域土地资源精细化调查需求,系统构建了无人机与卫星遥感协同的技术方案、数据处理流程与信息提取模型。研究证实,跨尺度几何配准与光谱一纹理特征融合可有效抑制混合像元效应,随机森林协同识别模型在细碎地块与盐斑镶嵌场景下总体精度达92.5%,较单一卫星方案提升7.5个百分点。协同方案以中等成本实现了7天闭环的县域调查能力,在撂荒耕地定位、盐碱地扩张监测中展现出良好可操作性。未来将引入时序深度学习模型与C波段SAR数据,进一步提升多云期动态监测能力,并探索协同成果与国土空间规划“一张图”的深度耦合机制。

[参考文献]

- [1]刘建良,柯昌玉.遥感技术在农村土地资源调查监测中的应用[J].新农村,2025(4):60-62.
- [2]贾秋月,刘文兰.卫星遥感技术在土地资源调查中的应用研究[J].智能城市,2023,9(11):46-48.
- [3]张超,王旭,李刚.卫星与无人机协同的县域土地利用精细调查方法[J].测绘科学,2024,49(6):156-163.

作者简介:

殷鑫(1992—),男,汉族,宁夏银川人,本科,工程师,研究方向:测绘技术与土地资源管理。