

天空地水一体化水利遥感应用体系研究

马广恩

福建水利电力职业技术学院, 福建 永安 366000

DOI: 10.61369/SSSD.2025200012

摘 要：以“十四五”水利高质量发展目标为导向，针对政府数字化转型中遥感数据服务的供需矛盾，本研究构建天空地水一体化水利遥感应用体系。通过整合“天-空-地-水”多源监测技术，搭建卫星数据接收基站、无人机巡检系统、水体智能监测平台及动态数据底座，研发水质参数定量反演模型，形成多体制、多源信息的卫星数据获取与应用体系。本文从项目背景、体系架构、技术方案、阶段性成果及技术创新方面，阐述该体系研究进展，为水利水务数字化治理提供技术支撑。

关 键 词：水利遥感；天空地水一体化；多源数据融合；水质反演模型；遥感监测

Research on the "Space-Air-Ground-Water" Integrated Remote Sensing Application System for Water Conservancy

Ma Guang'en

Fujian College of Water Conservancy and Electric Power, Yong'an, Fujian 366000

Abstract： Guided by the high-quality water conservancy development goals of the "14th Five-Year Plan", and addressing the supply-demand contradiction of remote sensing data services in the digital transformation of governments, this study constructs an integrated air-space-ground-water remote sensing application system for water conservancy. By integrating the "air-space-ground-water" multi-source monitoring technologies, it builds satellite data receiving base stations, UAV inspection systems, water body intelligent monitoring platforms and dynamic data bases, and develops quantitative inversion models for water quality parameters, thus forming a multi-system and multi-source information satellite data acquisition and application system. This paper expounds on the research progress of this system from the aspects of project background, system architecture, technical scheme, phased achievements and technological innovation, so as to provide technical support for the digital governance of water conservancy and water affairs.

Keywords： hydrographic remote sensing; sky-air-ground-water integration; multi-source data fusion; water quality parameter inversion model; remote sensing monitoring of water conservancy

一、研究背景

当前航空航天遥感技术快速发展、全球竞争加剧，我国正处从航天大国向强国迈进关键阶段。其凭大范围、快速、动态、客观监测优势，成为“天-空-地”立体监测预警体系核心手段，对提升城市治理与水利现代化管理至关重要，现已迈入高空间、高时间、高光谱多维度观测新时代，呈智能化、量化、精细化趋势，实现从单要素监测到大数据分析、被动监测到主动预警的转变。

“十四五”是水利生态立体遥感跨越发展战略窗口期，传统水利监测因覆盖有限、数据滞后、维度单一，难满足水资源管理、水生态保护、水灾害预警需求。本研究依托上海信息技术研究中心高分数据与中国水利水电科学研究院力量，开展天空地水

一体化水利遥感应用体系研究，通过多源数据处理与智能解析突破定性到定量技术瓶颈，为水安全、水资源、水生态保障提供支撑。

二、天空地水一体化体系架构与技术内涵

天空地水一体化水利遥感应用体系，融合“天、空、地、水”四维监测技术，形成“大尺度全局-中小尺度高精度-点位精准实时-水中水下自动化”多层级网络，实现水利要素全尺度、全要素、全周期监测。

“天”维度以卫星、北斗为核心监测大尺度流域等信息；“空”维度靠无人机等开展中小尺度动态监测；“地”维度用地面站点测雨情等；“水”维度借技术装备实现水中水下要素自动化监测。

基金项目：

1. 福建省水利厅：天空地水一体化水利遥感应用体系研究 ([350001]FJMZB[GK]2024001-2)

2. 三明市科技局：三明市土地利用时空序列分析 (2022-S-52)

体系核心目标是构建国产卫星数据生态圈，搭智能管理平台，研发反演模型，推动遥感数据智能解析与水利场景应用。

三、核心技术方案设计

（一）面向水域特征的遥感多源数据汇聚

多光谱遥感是水域监测核心手段，可捕捉多光谱波段信息。随着航天技术发展，国产卫星分辨率显著提升，“吉林一号”实现米级/亚米级观测，内蒙古一号幅宽超150km，日获200万km²高清影像，提供0.5m全色、2m多光谱产品。

气象卫星补充时间维度，“葵花8号”10分钟一观测，16波段成像仅提升云图质量；“葵花9号”优化性能，亚洲区域5km/2km、日本本土1km数据10分钟更新，支撑灾害水利响应。本研究整合多源数据，构建卫星遥感数据生态圈，实现水域数据汇聚^[2]。

（二）卫星遥感实验室建设

依托丰富的卫星资源，结合水利类、遥感和测绘类、大数据类专业群的科研力量，本研究建立了卫星遥感实验室。实验室以水利遥感机理与方法、遥感灾情评估、遥感监测监管为核心研究方向，开展水利科研课题攻关，重点围绕水质遥感反演、洪涝灾害遥感评估、水利工程遥感监测等领域进行技术研发，为遥感技术在水利场景的应用提供了科研与实验平台。

（三）多模态数据综合智能管理平台开发

为解决多源遥感影像数据的管理与应用难题，本研究搭建了多模态数据综合智能管理平台，实现遥感数据的引接、清洗、处理、分析与共享服务。平台具备三大核心功能：一是数据自动清洗，按照预设规则过滤无效数据，提升数据安全性与可用性；二是数据智能引接，支持多源数据的自动化接入与列表展示，实现数据的统一管理；三是产品发布与服务，可生成遥感影像标准产品、专业分析产品，并根据用户需求提供多元化的数据服务，形成了完全自主化的遥感大数据整合能力^[1]。

（四）水质遥感监测实验与精度验证

为建立水质指标的光谱响应模型，本研究选取不同污染类型的水域作为研究示范区，开展地面光谱测量与水质采样分析实验。水体光谱采集严格遵循《水体可见光-短波红外光谱反射率测量GB/T 36540-2018》规范，在采集光谱数据的同时同步获取水体样本，用于化验pH、溶解氧、浊度、COD等水质参数，为后续模型精度验证提供实测数据支撑^[5]。

（五）水质参数敏感波段选择与遥感反演模型构建

本研究通过分析样本水质数据与遥感影像光谱数据的相关性筛选敏感波段：以单波段及组合辐射值为自变量、实测水质数据为因变量，计算相关系数（ r ），选取 $|r| \geq 0.6$ 的作为反演模型输入。

模型构建阶段，采用多元线性回归结合对数转换后的水质参数与光谱数据提升拟合效果，用决定系数（ R^2 ）与均方根误差（RMSE）评定DNN模型；富营养化评价采用多指标综合营养状态指数法，加权定量评价，比传统方法更科学客观。

以永安市重点水域数据为基础，经多重共线性检验与空间自相关性分析，建立多元线性回归模型，最终形成区域水环境风险分布图^[4]。

四、技术原理与创新特点

（一）水质遥感监测技术原理

遥感技术监测水质的核心是捕捉水体电磁波辐射特性，仅能探测影响该特性的化学物质，分定性（借影像色调、颜色建解译标志）与定量（结合实测数据标定模型反演参数）两类方法。

不同水污染类型遥感特征不同：富营养化水体在彩色红外图像呈红褐色，悬浮泥沙水体在MSS7像片呈浅色调，石油污染在热红外图像为深色调不规则斑块，且不同污染源对影像分辨率、获取周期要求有差异。

大气影响是关键难点，涉及大气散射与吸收、气溶胶时空变化等。本研究引入MODIS波段等效处理等算法，其中高分四号卫星大气校正算法通过分离辐射信号，有效提升数据精度^[7]。

（二）技术创新特点

本研究的技术创新主要体现在三个方面：一是构建了国产卫星遥感数据生态圈，依托200余颗自主卫星实现数据安全自主可控，解决了国外卫星数据依赖问题；二是研发了高智能数据管理平台，实现遥感大数据的自主化整合与多元化服务，满足水利部门的个性化数据需求；三是建立了基于机器学习的水质参数定量反演模型，突破传统监测手段的局限，挖掘出适用于东南地区的水质反演模型，推动了水利遥感从定性到定量的应用转型^[10]。

五、阶段性研究成果

（一）葵花9号卫星数据接收地面基站建成

本研究搭建葵花9号卫星数据接收地面基站，硬件采用3米口径标准网状抛物面天线，工作频率3700-4200MHz（C频段），增益 $\geq 38.3+20\lg(f/3700\text{MHz})$ dBi，可在 -40° 至 60° 室外稳定工作，抗风荷载57m/s、抗雪荷载30mm/h，寿命超10年。

基站软件功能丰富：基于XML数据库触发处理任务并删除过期文件，支持经纬度、Albers等多种地图投影，生成HDF5格式中间产品；按WMO-CGMS算法合成20余种RGB图像产品，应用于天气预报、环境监测等领域。

目前，基站可监测预测温湿度、风速等气象参数，支撑台风、降水研究，还为空气质量监测、热岛效应分析提供数据，也可用于遥感教学培训^[9]。

（二）无人机智能巡检系统部署

基于大疆机场2（DJI Dock2）平台，本研究构建了无人值守的无人机智能巡检系统。该系统机身高度集成，支持快速部署与天气实时感知，搭载的无人机飞行时间达50分钟，最大作业半径10公里，可搭载广角、长焦及红外相机，实现可见光与热成像画面的同步采集。

系统通过 API 接入指挥平台，最快 45 秒即可起飞，已应用于地质灾害监测、变电站巡检及智能安防等任务。依托高精度云端建模平台，系统可对限定区域进行自动化飞行与实景模型重建，为数字化底座建设提供了高精度的地理空间数据^[9]。

（三）水体智能测量监测平台研发

本研究开发了以多功能无人船为核心的水体智能测量监测平台，该平台搭载智能船控系统，自动化程度高、抗扰动能力强，可拓展搭载水质检测仪、侧扫声纳、高精度测深仪、水下摄像头等模块。现阶段，已利用该平台完成河段水下地形数据采集、水下地物探测、水质参数监测及岸线情况调查等工作，获取了溶解氧、浊度、电导率、COD 等关键水质数据，为水利数字化底座建设提供了重要的水中水下监测数据^[9]。

（四）动态数据底座搭建

本研究构建了融合高精度卫星影像与无人机建模的数字动态底座，该底座依托先进的动画引擎，将真实地理信息转化为逼真的虚拟场景，具备实时数据交互与可视化功能。底座可模拟树木、湖泊、建筑等自然与人工地物的动态特征，实现晴天、阴天、雾天等天气状态的精准还原，还能模拟大雨、暴雪、洪水等自然灾害场景。

通过动态数据底座，水利部门可开展水旱灾害防御、水资源管理、水利工程建设等业务的模拟与决策，为数字孪生水利体系的“四预”（预报、预警、预演、预案）功能提供了全面、实时、精准的算据支撑^[9]。

六、应用价值与未来展望

（一）应用价值

天空地水一体化水利遥感应用体系可弥补传统水利监测不足，具显著应用价值：一是借水质遥感反演模型，提升水环境治理智能化，实现大范围水质快速监测与风险预警；二是依托卫星与无人机实时数据，强化水灾害应急响应，为防灾减灾提供决策依据；三是结合动态数据底座与多模态平台，推动水利数字化转型，为数字孪生水利奠基。此外，该体系还可应用于水质监测、水源地保护等具体场景，为水利部门提供全方位数据与服务。

（二）未来展望

本研究下一阶段将从三方面深化该体系建设：一是优化水质参数反演模型，扩大样本范围，结合东南水体特征提精度与适用性；二是拓展多源数据融合，整合异构数据建水利大数据体系；三是推进成果产业化，转化为标准化产品服务，提升水环境治理现代化水平。

七、结语

天空地水一体化水利遥感应用体系，是遥感技术与水利业务深度融合的产物。其阶段性研究成果，验证了多源遥感数据在水利监测中的可行性与有效性。随技术完善，该体系将成水利水务管理重要支撑，为水资源保护、水灾害防御等提供精准方案，助力我国水利事业高质量发展。

参考文献

- [1] 张威, 江岩麓. 水利卫星遥感技术在滦河流域河湖管理中的应用 [J]. 水利技术监督, 2025, (12): 38-41+129.
- [2] 高娟. 基于遥感数据的水利工程水土保持动态监测方法研究 [J]. 水利技术监督, 2025, (11): 61-65.
- [3] 林兆刚, 林生亮, 郑春炎. 无人机遥感技术在水利管理中的应用探讨 [J]. 山东水利, 2025, (08): 60-62.
- [4] 李林宜, 杨云源, 谢文君, 等. 大型水利工程典型水工建筑物与施工阶段遥感智能监测 [J]. 水利信息化, 2025, (03): 41-46.
- [5] 杨海坤, 雍熙, 陈德清, 等. 基于卫星遥感的水利应急监测应用实践 [C]// 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心（水旱灾害防御中心），中国水利企业协会防灾与抢险装备技术分会. 第四届防汛抗旱抢险新技术、新产品应用研讨会论文集. 北京金水信息技术有限公司；水利部信息中心；, 2025: 265-270.
- [6] 孙洪林. 夯实数字孪生水利天空技术装备基础和提升监测感知能力概述 [C]// 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心（水旱灾害防御中心），中国水利企业协会防灾与抢险装备技术分会. 第四届防汛抗旱抢险新技术、新产品应用研讨会论文集. 水利部信息中心；, 2025: 210-215.
- [7] Ahmadian N, Hamilton M, Huang W. Performance Evaluation of Three Deep Learning Models for River ICE Segmentation From Aerial Images[C]//2025 IEEE 20th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM).0[2025-11-26].
- [8] Amirtham L R, Devadas M D. ANALYSIS OF LAND SURFACE TEMPERATURE AND LAND USE/LAND COVER TYPES USING REMOTE SENSING IMAGERY-A CASE IN CHENNAI CITY, INDIA[C]//The Seventh International Conference on Urban.2009.
- [9] Fischler M A, Tenenbaum J M, Wolf H C. Detection of roads and linear structures in low-resolution aerial imagery using a multisource knowledge integration technique[J]. Computer Graphics & Image Processing, 1981, 15(3): 201-223.
- [10] Peng M, Liu Y, Khan A, et al. Crop monitoring using remote sensing land use and land change data: Comparative analysis of deep learning methods using pre-trained CNN models[J]. Big Data Research, 2024, 36(000).