

# 基于无线传感器网络的卫星遥感观测 非均匀地表重点区域监测系统设计

王欢<sup>1</sup>, 张西霞<sup>1</sup>, 牛宝<sup>2</sup>, 张瑞娟<sup>1</sup>

(1. 西安思源学院 理工学院, 西安 710038;  
2. 西安洋东基础设施建设投资有限公司, 西安 710068)

**摘要:** 卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测数据通常具有复杂性和不确定性, 难以精准确定重点监测区域和获取有用信息, 导致监测范围受限, 监测结果存在较大误差; 因此, 为了给非均匀地表的治理提供数据支持, 利用无线传感器网络优化设计卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测系统; 加设卫星遥感观测图像传感器, 调整无线传感器网络模块, 改装监测数据处理器, 利用调整的系统电路连接硬件元件, 完成硬件系统的优化; 在硬件和数据库的支持下, 从拓扑结构和传输协议等方面, 构建无线传感器网络; 实现高空遥感与无线传感器网络的深度融合, 利用无线传感器网络采集地表卫星遥感观测图像, 获取地表信息, 拓宽监测范围; 并通过滤波、几何纠正等步骤, 实现初始图像的预处理, 并提取图像特征, 根据特征图像的匹配结果, 确定非均匀地表重点区域, 结合地表倾斜角度、地表非均匀程度等指标完成卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测; 经实验测试发现改进系统与传统监测系统相比, 优化设计系统输出地表倾斜角度和地表变形量的监测误差分别减小 $0.28^\circ$ 和 $0.73\text{ m}^3$ , 同时系统监测范围明显扩大。

**关键词:** 无线传感器网络; 卫星遥感观测; 非均匀地表; 重点区域监测

## Design of a Monitoring System for Key Areas of Non-Uniform Surface in Satellite Remote Sensing Observation Based on Wireless Sensor Networks

WANG Huan<sup>1</sup>, ZHANG Xixia<sup>1</sup>, NIU Bao<sup>2</sup>, ZHANG Ruijuan<sup>1</sup>

(1. Institute of Technology, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038 China;

2. Xi'an Fengdong Infrastructure Construction Capital Investment Corporation, Xi'an 710068 China)

**Abstract:** The monitoring data of key areas of uneven surface observed by satellite remote sensing are usually complex and uncertain. It is difficult to accurately determine the key monitoring areas and obtain useful information, resulting in limited monitoring range and large errors in monitoring results. Therefore, in order to provide data support for the treatment of non-uniform surface, wireless sensor network is used to optimize the design of satellite remote sensing observation of non-uniform surface monitoring system in key areas. Add the satellite remote sensing observation image sensor, adjust the wireless sensor network module, refit the monitoring data processor, and use the adjusted system circuit to connect the hardware components to complete the optimization of the hardware system. With the support of hardware and database, wireless sensor networks are constructed from the aspects of topology and transmission protocol. Realize the deep integration of high-altitude remote sensing and wireless sensor networks, and use wireless sensor networks to collect satellite remote sensing images of the earth's surface, obtain surface information, and expand the monitoring range; Through filtering, geometric correction and other steps, the preprocessing of the initial image is realized, and the image features are extracted. According to the matching results of the feature images, the key areas of uneven surface are determined, and the monitoring of the key areas of uneven surface observed by satellite remote sensing is completed combined with the indicators such as the inclination angle of the surface and the degree of uneven surface. The experimental test shows that compared with the traditional monitoring system, the monitoring errors of the optimized design system output surface tilt angle and surface deformation are reduced by  $0.28^\circ$  and  $0.73\text{ m}^3$ , respectively, and the monitoring range of the system is significantly expanded.

**Keywords:** wireless sensor network; satellite remote sensing observation; uneven surface; key area monitoring

## 0 引言

非均匀地表具有形态多样、物质组成不均一等特征, 为生物多样性提供了丰富的生境条件, 也对人类活动产生

了制约和影响。对于研究非均匀地表的形成机制、演化过程以及对人类活动和自然环境的影响具有重要意义<sup>[1]</sup>。为了充分了解非均匀地表形态、结构与动态变化, 给科学决策以及自然灾害预警提供重要依据, 设计并开发了非均匀

收稿日期: 2024-05-07; 修回日期: 2024-06-18。

作者简介: 王欢(1982-), 女, 大学本科, 讲师。

引用格式: 王欢, 张西霞, 牛宝, 等. 基于无线传感器网络的卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(10): 305-312.

地表重点区域监测系统。

受到非均匀地表重点区域在范围方面的限制,采用卫星遥感观测作为主要监测方式。卫星遥感观测,作为一种先进的对地观测技术,具有覆盖范围广、信息获取周期短、受地面条件限制小等优势,满足非均匀地表重点区域的监测要求。因此,为提高监测的有效性,现阶段相关研究学者对监测方法展开了研究,并取得一定的研究成果。例如,文献 [1] 中提出了一种基于时序合并的监测方法,提取区域地表形变信息,完成区域监测。然而基于时序合并的监测方法难以准确捕捉细微的差异,导致对重点区域的形变信息提取不够准确、全面。文献 [2] 中提出基于 PS-InSAR 和随机森林的区域地表监测方法,然而 PS-InSAR 方法的效果很大程度上依赖于所选 PS 点的质量和数量。在非均匀地表区域,难以找到足够数量且分布均匀的 PS 点,从而影响了形变信息的提取和监测结果的准确性。文献 [3] 中提出基于传感器自适应噪声建模的地表监测方法。利用加速度时变信息的标准差在线估计与过程噪声响应的随机游动系数。模拟测算三维变形位移,最终得出反映变形量的监测结果。然而该方法在实际应用中,不同数据源可能受到不同因素的影响,导致数据之间的不一致性增加。文献 [4] 中提出基于相干梯度传感空间载体法的监测方法。分析了相干梯度传感空间载体方法的测量原理,利用样品莫尔条纹技术计算了带有载流子的 CGS 条纹图的相位,根据相位分析结果确定地表区域的监测结果。然而该方法未充分考虑天气等因素的影响,导致图像质量下降,影响了监测效果。

无线传感器网络是一种分布式传感网络,其末梢由能够感知和检查外部世界的传感器构成。利用无线传感器网络对卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测系统进行优化设计,实现高空遥感与无线传感器网络的深度融合,获取更为全面、精确的地表信息,克服卫星遥感数据的复杂性和不确定性,提高信息获取的准确性。因此,基于上述研究,为提高非均匀地表重点区域监测结果的准确性,给非均匀地表的治理提供可靠的数据支持,利用无线传感器网络优化设计卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测系统。在硬件和数据库的支持下,为适应卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测数据的复杂性和不确定性,将高空遥感与无线传感器网络深度融合,确保所获取数据源的多样化和准确性。随后,通过滤波、几何纠正等步骤对图像进行预处理,以有效去除噪声和畸变,提高图像的质量。并提取特征,使得系统能够自动识别和确定非均匀地表重点区域。最终,在确定非均匀地表重点区域后,结合地表倾斜角度、地表非均匀程度等指标,完成非均匀地表重点区域监测,获取有用信息。

### 1 卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测硬件系统设计

优化设计的卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测系统由硬件、数据库和软件 3 个部分组成,通过合理的硬件

架构和优质的部件选择,确保系统能够长时间稳定运行,满足用户的功能需求与性能期望。系统数据库设计的目的在于构建一个优化、高效且稳定的数据存储和管理机制。而系统软件设计旨在构建无线传感器网络,实现高空遥感与无线传感器网络的深度融合,提高信息获取的准确性。并根据特征图像的匹配结果,确定非均匀地表重点区域。由此,依据相应指标完成精准的卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测。其系统整体构架如图 1 所示。

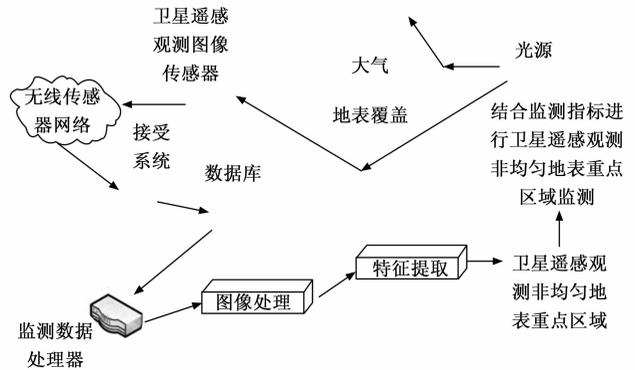


图 1 卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测系统构架

#### 1.1 卫星遥感观测图像传感器

卫星遥感观测图像传感器是卫星遥感观测技术的运行元件,同时也为无线传感器网络的构建提供支持。为实现卫星遥感观测图像的采集功能,选择 CMOS 类型的图像传感器作为卫星遥感观测传感器,该传感器由像素单元阵列和辅助电路两部分组成,具体内部组成结构如图 2 所示。

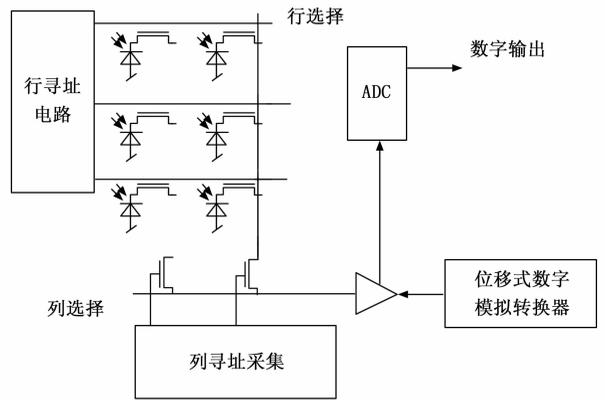


图 2 卫星遥感观测图像传感器内部组成结构图

图 2 中,像素单元阵列能够实现光电转换功能,即能够将采集到的光学信号转换为电信号,并通过电信号的排列、连接输出图像信号,而辅助电路主要用来生成驱动信号、处理光电信号等。在卫星遥感观测图像传感器设计过程中,通过光电二极管和 MOS 场效应管阵列的叠加、连接,构成积分电路,以此作为像素单元阵列的基本组成元素<sup>[2]</sup>,满足系统卫星遥感观测图像的采集需求。

#### 1.2 无线传感器网络模块

无线传感器网络由传感器节点、网关节点、路由节点

等部分组成, 其中传感器节点包括卫星遥感观测图像传感器以及非均匀地表区域安装的位移传感器等, 以用于获取更为全面、精确的地表信息, 精准确定非均匀地表区域。网关节点负责网络的建立与运营, 网关节点的内部组成框架如图 3 所示。

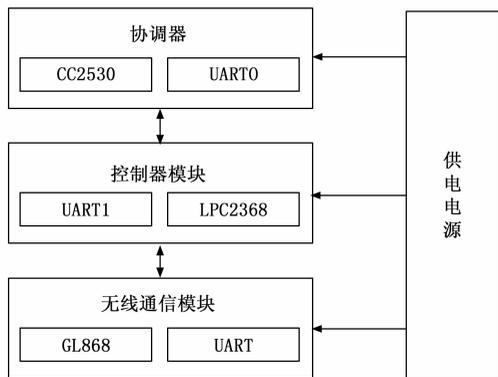


图 3 无线传感器网络网关节点组成框架图

选用 LPC2368 微处理器芯片作为控制器模块的核心, 其职能在于协调器与 GPRS 网络之间的信息交互。利用协调器来实现无线传感器网络节点的双向通信。而 GPRS 无线通信模块则选用了集成的 GL868-DUAL 模块, 它支持 AT 指令集, 确保网关与远程控制中心之间的通信畅通无阻<sup>[4]</sup>。此外, 为了加强路由由节点与协调器之间的无线通信能力, 添加了功率放大器芯片 CC2591。在电路设计过程中, 需要特别注意通过串联一个 100 Ω 电阻将 CC2530 芯片与 CC2591 芯片的相关引脚连接, 以确保该模块的正常工作。装备了 CC2591 功率放大器芯片的节点在开放环境中, 其理论传输距离可达到 500~800 m, 显著扩展了节点间的传输距离与网络覆盖范围, 从而有效解决了非均匀重点区域环境中节点间传输距离短的问题。

### 1.3 监测数据处理器

优化设计系统中使用的监测数据处理器融合了多种功能模块, 其核心为先进的 Cortex-M3 架构, 通过采用哈佛结构, 提升了运算效率。主控元件选用了 STM32F103ZET6 芯片, 该芯片上配置了丰富的 UART、I2C、SPI、DMA 等常用外部设备接口, 以满足不同设备的连接需求<sup>[5]</sup>。

### 1.4 系统电路设计

系统中的电路包括外部晶振电路、复位电路、天线及巴伦匹配电路、扩展引脚接口电路、供电电源等部分组成, 在外部晶振的电路设计中, 高速外部时钟与 CC2530 芯片连接, 同时外接两个 27 pf 的负载电容。此外, 为提升性能, 晶振应尽可能靠近 CC2530 芯片, 并加粗与芯片之间的布线<sup>[6]</sup>。另外, 天线与巴伦匹配电路对于无线传感器网络的通信通路运行性能至关重要, 它们不仅影响通信距离, 还直接关系到功耗表现。天线及巴伦匹配电路的设计结果如图 4 所示。

系统采用了具备 SMA 接口的杆状天线, 并将其 1 号引

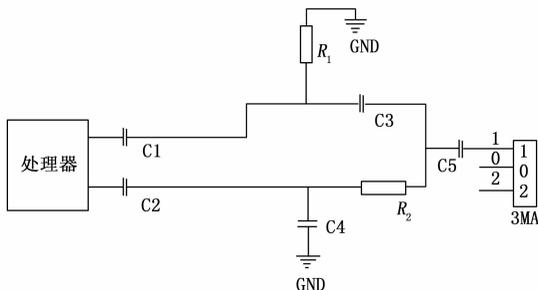


图 4 天线及巴伦匹配电路图

脚与芯片 CC2530 的 RF\_P 引脚和 RF\_N 引脚进行了连接。这样的设计确保了天线能够有效地与芯片进行通信, 从而保障了无线通信的稳定性和可靠性<sup>[7]</sup>。最终将系统的所有电路进行连接, 完成卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测系统电路的优化设计。

## 2 非均匀地表重点区域监测系统数据库设计

在卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测系统中, 数据库作为整个系统运行的数据支持, 对监测功能的实现效果起到关键作用。优化设计监测系统的优化设计需要遵循一致性、完整性、安全性等原则, 系统数据库的总体结构如图 5 所示。

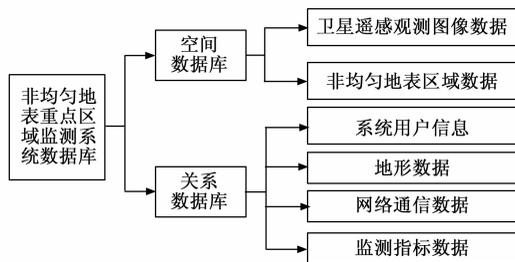


图 5 重点区域监测系统数据库总体架构图

从图 5 中可以看出, 优化设计系统中构建的数据库由卫星遥感观测数据库表、地表监测数据库表、无线传感器网络数据库表等部分组成, 以卫星遥感观测数据库表为例, 该表的构建结果如表 1 所示。

表 1 卫星遥感观测数据库表

字段名称	字段说明	存储类型	是否为空
Satellite number	卫星编号	int	否
Remote sensing image address	遥感影像地址	varchar	否
Spatial reference identifier	空间参照标识符	int	是
Maximum Zoom	最大缩放	int	否
Remote sensing image format	遥感影像格式	varchar	否
Remote sensing image size	遥感影像大小	int	否
Observation data volume	观测数据量	int	否

按照表 1 所示的方式, 可以得出数据库中其他数据库表的构建结果, 根据数据之间的逻辑关系, 实现数据库表

之间的连接，完成系统数据库的构建与优化<sup>[8]</sup>。

### 3 卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测系统软件设计

在硬件系统和数据库的支持下，对卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测系统的软件功能进行优化设计，软件功能设计的最终目的是根据卫星遥感观测技术收集数据，通过无线传感器网络将观测数据传输给系统终端，有效克服卫星遥感数据的复杂性和不确定性，提高信息获取的准确性。通过对数据的分析，确定任意时刻非均匀地表重点区域在时间和空间方面的变化情况，并将变化程度数据作为系统的监测结果进行可视化输出，完成卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测。

#### 3.1 构建无线传感器网络

为有效克服卫星遥感数据的复杂性和不确定性，提高信息获取的准确性，实现高空遥感与无线传感器网络的深度融合，采集地表卫星遥感观测图像，获取更为全面、精确的地表信息，并保证卫星遥感观测数据能够及时、准确地传输给系统终端，同时实现非均匀地表重点区域监测数据的安全传输，以安装的传感器设备为对象，构建无线传感器网络<sup>[9]</sup>。无线传感器网络内部拓扑结构的构建结果如图 6 所示。

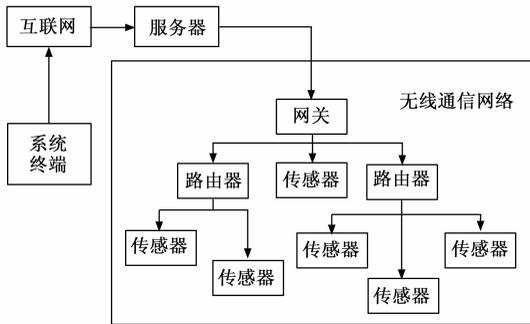


图 6 无线传感器网络内部拓扑结构图

从图 6 中可以直观地看出，构建的无线传感器网络由传感器节点、汇聚节点和管理节点等部分组成，传感节点负责收集数据，随后通过短距离无线通讯模块将原始数据传送给簇头节点<sup>[10]</sup>。最终，汇聚节点会对整个监测区域的原始数据进行整合处理，再将综合后的数据统一发送至远程的监控中心。无线传感器网络中任意两个传感器节点之间的空间距离需满足如下条件：

$$d(i, j) \leq r_i + r_j \quad (1)$$

式中， $r_i$  和  $r_j$  分别为无线传感器网络中第  $i$  和  $j$  个传感器的感知范围， $d(i, j)$  为  $i$  和  $j$  传感器之间的距离。构建的无线传感器网络设置 MODBUS 协议作为路由协议，它采用主从异步串行通信方式，在实际网络运行过程中，系统上电后，所有网络节点处于监听状态，监听服务器的查询命令。当主机的查询命令发送至各网络节点时，每个网络节点具有唯一的地址码，只有对应地址码的网络节点才接收完查询

命令其余的数据<sup>[11]</sup>。通过构建的无线传感器网络，为非均匀地表卫星遥感观测数据的传输提供支持。

#### 3.2 利用无线传感器网络采集地表卫星遥感观测图像

在构建的无线传感器网络环境下，利用网络环境中的卫星遥感图像传感器设备，以非均匀地表为观测对象，采集遥感观测图像<sup>[12]</sup>。非均匀地表图像的卫星遥感观测原理如图 7 所示。

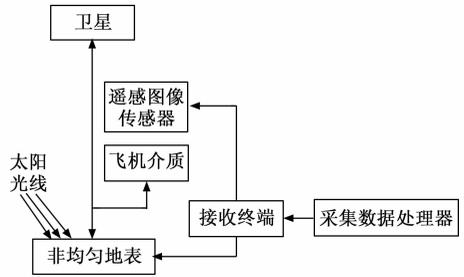


图 7 卫星遥感观测原理图

卫星遥感观测利用卫星搭载的传感器捕捉地表反射或发射的电磁波信号，通过接收、记录和解析这些信号，提取出地表信息。这一原理涉及电磁波与地物的相互作用，以及信号传输、接收与解析的复杂过程。非均匀地表的卫星遥感观测横、纵向采集表示为：

$$I(x, y) = \begin{cases} \gamma \cdot \kappa_{remote\ sense} x_{surface} \cos\theta \cdot E \\ \gamma \cdot \kappa_{remote\ sense} y_{surface} \sin\theta \cdot E \end{cases} \quad (2)$$

其中： $\kappa_{remote\ sense}$  为卫星遥感观测参数， $\gamma$  为辐射度， $E$  为非均匀地表反射能量， $\theta$  卫星遥感观测图像传感器的观测角度， $(x_{surface}, y_{surface})$  为非均匀地表的实际位置数据<sup>[13]</sup>。根据卫星的驱动工作，得出非均匀地表区域内所有位置的遥感观测结果，初始采集图像通过构建的无线传感器网络传输至系统终端，系统终端实际接收的卫星遥感观测图像为：

$$I_{remote\ sense}(x, y) = I(x, y) \times \kappa_{net} \quad (3)$$

式中， $\kappa_{net}$  为无线传感器网络的传输系数。重复上述操作即可完成卫星遥感观测图像的采集工作。

#### 3.3 非均匀地表卫星遥感观测图像预处理

为保证非均匀地表卫星遥感观测图像的采集质量，降低大气环境对遥感观测信号产生的负面影响，需要对初始采集的卫星遥感观测图像进行预处理，具体包括：滤波去噪、几何纠正和图像增强等步骤<sup>[14]</sup>。优化设计系统中，卫星遥感观测图像的滤波去噪处理过程可以量化表示为：

$$I_{filtering}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(I_{max}(x) - I_{min}(y))^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

式中， $\sigma$  为卫星遥感观测图像的标准差。公式 (3) 表示的是高斯滤波去噪方式，满足图像细节保存要求。另外，图像几何纠正是指对遥感图像进行几何变换，以消除因传感器、地形起伏和大气折射等因素导致的图像几何畸变，使图像与实际地面坐标系统相一致的过程<sup>[15]</sup>。通过卫星遥感观测图像传感器的标定，可以得出传感器在水平和竖直方向上的偏差量，那么初始采集观测图像的几何纠正结果为：

$$I_{\text{correct}}(x, y) = \begin{cases} I_{\text{filtering}}(x) + \Delta x \\ I_{\text{filtering}}(y) + \Delta y \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为传感器的水平偏差和竖直偏差, 根据偏差方向决定偏差量的正负属性, 从而确定卫星遥感图像的机构和纠正方向。在此基础上, 采用直方图均衡化的方式对观测图像进行增强处理, 处理结果如下:

$$I_{\text{enhance}}(x, y) = \sum_{g=1}^{n_c} \frac{n_{I_{\text{correct}}(x, y)}(g)}{N_p} \quad (6)$$

其中:  $n_{I_{\text{correct}}(x, y)}(g)$  为经几何纠正后图像  $I_{\text{correct}}(x, y)$  灰度级为  $g$  的像素数,  $N_p$  表示的是卫星遥感图像中包含的所有像素点数量,  $n_c$  为观测图像中包含的灰度等级数量<sup>[16]</sup>。重复上述操作, 对初始采集卫星遥感观测图像中的所有像素进行预处理, 得出满足系统监测要求的卫星遥感观测图像预处理结果。

### 3.4 提取卫星遥感观测非均匀地表图像特征

以卫星遥感观测非均匀地表图像的采集与预处理结果为处理对象, 提取图像特征, 以为后续非均匀地表重点区域的确定提供可靠的输入支撑。提取的特征分量包括: 亮度、地表反射率、峭度等, 其中亮度特征分量的提取结果为:

$$\tau_{\text{brightness}} = \frac{0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B}{I_{\text{enhance}}} \quad (7)$$

式中,  $R$ 、 $G$  和  $B$  分别为观测图像中的红、绿、蓝颜色分量。另外地表反射率和峭度特征分量的提取结果如下:

$$\begin{cases} \tau_{\text{reflectivity}} = \frac{\tau_{\text{brightness}} - \tau_{\text{brightness-min}}}{\tau_{\text{brightness-max}} - \tau_{\text{brightness-min}}} \times (\mu_{\text{max}} - \mu_{\text{min}}) + \mu_{\text{min}} \\ \tau_{\text{kurtosis}} = \frac{\sum_{i=1}^N (I_{\text{enhance}}(x, y) - \bar{I})^4}{(N-1)\bar{I}^4} \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $\tau_{\text{brightness}}$  为亮度特征,  $\tau_{\text{reflectivity}}$  为地表反射率特征,  $\mu_{\text{max}}$  和  $\mu_{\text{min}}$  分别为地表反射率值的最大值和最小值,  $\bar{I}$  为观测图像均值。按照上述方式可以得出所有卫星遥感观测图像特征分量的提取结果, 采用加权融合的方式, 得出图像综合特征的提取结果<sup>[17]</sup>。加权融合通过对不同来源或特征的数据赋予不同的权重, 进而实现信息的综合与优化, 最终得出的综合图像特征提取结果为:

$$\tau = \sum_{i=1}^{n_t} \tau_i \cdot \bar{w}_i \quad (9)$$

式中,  $\tau_i$  和  $\bar{w}_i$  分别为提取的第  $i$  个特征分量及其权重值, 其中,  $\tau_i$  可表示亮度  $\tau_{\text{brightness}}$ 、地表反射率  $\tau_{\text{reflectivity}}$ 、峭度  $\tau_{\text{kurtosis}}$  特征的分量。  $n_t$  为特征分量的提取数量。由此, 根据公式 (9), 即可得出卫星遥感观测非均匀地表图像特征的提取结果。

### 3.5 识别卫星遥感观测非均匀地表重点区域

接下来, 基于上述特征提取结果, 采用特征匹配的方式, 确定卫星遥感观测图像中非均匀地表的重点区域, 根据重点区域的定义, 设置非均匀地表重点区域的标准特征为  $\tau_{\text{keynote}}$ 。那么, 卫星遥感观测非均匀地表重点区域的识别过程为:

$$s = \frac{\tau_{\text{keynote}} \cdot \tau}{\|\tau_{\text{keynote}}\| \cdot \|\tau\|} \quad (10)$$

将提取的遥感图像综合特征和设置的标准特征代入公式 (10) 中, 若计算得出  $s$  的值高于阈值  $s_0$ , 证明当前卫星遥感图像对应非均匀地表处于重点区域, 否则认为当前图像中不包含重点区域<sup>[18]</sup>。采集的卫星遥感观测图像可能存在部分重点区域, 此时根据特征匹配结果, 对遥感观测图像进行分割, 从而得出非均匀地表重点区域的识别结果。

### 3.6 实现卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测

基于上述卫星遥感观测非均匀地表重点区域识别结果, 根据高空遥感与无线传感器网络的深度融合获取的地表信息, 设置非均匀地表重点区域面积、地表倾斜角度、地表变形量、地表非均匀程度、沉降、位移等指标作为系统监测指标, 完成星遥感观测非均匀地表重点区域监测。其中地表重点区域面积指标的表示为:

$$S_{\text{keynote}} = n_p(s) \times \frac{1}{\kappa_{\text{mapping}}} \quad (11)$$

式中,  $n_p(s)$  为非均匀地表中的重点区域识别图像中的像素点数量,  $\kappa_{\text{mapping}}$  为卫星遥感观测图像的映射系数。另外地表倾斜角度、地表变形量和地表非均匀程度指标的计算公式为:

$$\begin{cases} \tan \vartheta = \frac{y(i) - y(i-1)}{x(i) - x(i-1)} \\ W = \sum_{i=1}^U |x(i) - x(i-1)| + |y(i) - y(i-1)| \\ \psi = \frac{S_{\text{keynote}}}{S_{\text{surface}}}, (x(i), y(i)), (x(i-1), y(i-1)) \in U \end{cases} \quad (12)$$

其中:  $U$  为识别出的非均匀地表中的重点区域,  $(x(i), y(i))$  和  $(x(i-1), y(i-1))$  分别为重点区域中的两个相邻像素,  $S_{\text{surface}}$  为非均匀地表面积。根据卫星遥感观测图像的实时采集结果, 将相关数据代入到公式 (11) 中, 即可得出非均匀地表重点区域监测指标的实时计算结果, 同理可以得出其他监测指标的计算结果<sup>[19]</sup>。最终通过无线传感器网络将监测结果上传至系统的输出终端, 完成系统的卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测功能。

## 4 系统测试

为了测试优化设计基于无线传感器网络的卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测系统的监测精度和监测范围, 设计系统测试实验。此次实验将系统硬件、数据库和软件功能看作一个整体, 应用优化设计的监测系统得出非均匀地表重点区域内的指标监测结果, 将监测结果数据与区域范围内的实际指标进行对比, 根据两者之间的差异, 得出系统监测精度性能的测试结果。在系统监测范围测试过程中, 获取非均匀地表重点区域内的所有监测结果数据进行统计, 将其与监测目标区域面积进行对比, 得出反映系统监测范围的测试结果。

### 4.1 选择非均匀地表监测对象

此次系统测试实验分别选择无植被和有植被的非均匀

地表区域作为监测对象,其中无植被非均匀地表指的是缺乏植被覆盖且地表特征呈现非均匀分布的区域,这类地表由裸露的土壤、岩石、水体以及其他自然或人为形成的特征构成,此次系统测试实验选择的无植被非均匀地表监测对象为阿拉善沙漠。而有植被非均匀地表指的是地表覆盖植被,且植被覆盖地表地形存在不均匀特征的地表。系统测试实验选择的有植被非均匀地表为大兴安岭区域。在系统测试实验开始之前,采用实地勘探与测算的方式,得出非均匀地表的实际数据,以此作为系统的监测标准数据。

#### 4.2 安装并调试硬件系统及软件开发

根据优化设计卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测硬件系统的设计结果,将传感器、网关、路由器、处理器等设备安装到实验环境中,并对安装的硬件设备进行调试。优化设计系统中的无线传感器网络共包含 12 个无线传感器节点,其中一个为协调器,其他设备作为路由或终端节点,其间距固定为 10 m,配备有太阳能板以及 12 VDC 输出的蓄电池<sup>[20]</sup>。这些节点集成了充电管理电路、摄像头以及设计中的无线传感器节点,共同形成一个综合的监测节点。部署完成后,这些无线传感器节点通过调试构建起一个基础无线传感器网络,并确保所有节点均运行正常。无线传感器网络的调试结果如图 8 所示。



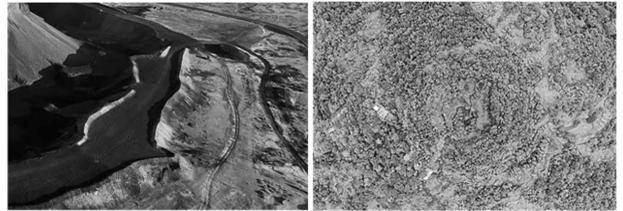
图 8 无线传感器网络调试界面

除了无线传感器网络外,还需要对处理器等其他硬件元件进行调试,在调试操作过程中,首先对处理器进行硬件检测,验证其连接是否正确,并检查是否存在物理损坏。随后,进行软件层面的配置,包括设置处理器的工作参数和初始化相关程序。软件开发中,使用 Python 和 OpenCV 等工具实现图像处理算法,然后进行单元测试,确保各模块之间的协作无误,以及软件质量。在此过程中,若遇到问题,需进行故障定位,通过分析错误日志或利用调试工具来查找问题所在。定位问题后,进行修复,可能涉及代码修改、硬件调整或更换故障部件。最后,再次进行整体测试,根据测试结果对系统进行性能调优,提高系统的稳定性和响应速度,确保处理器性能稳定、功能完整。最后,将系统部署到实际环境中,进行实地测试。使用 Python 脚本从传感器网络收集数据,应用 OpenCV 库进行图像滤波

和几何纠正,再通过特征提取和图像匹配算法确定非均匀地表重点区域,结合监测指标获取信息,完成非均匀地表重点区域监测。

#### 4.3 生成卫星遥感观测数据样本

利用安装并调试完成的卫星遥感观测传感器,生成数据样本数据。卫星遥感数据样本包括栅格格式的归一化植被指数和增强型植被指数,其空间分辨率为 250 m。此产品基于卫星每 16 天周期扫描到的光谱信息,经过合成优化而成。由于观测传感器分别搭载在两个卫星上,尽管它们的运行周期和轨迹一致,但采样时间存在 8 天的差异。因此,必须对两个卫星的输出数据进行进一步的融合优化处理,随后方可进行输出。在选择无植被和有植被非均匀地表环境中,生成的卫星遥感观测数据样本如图 9 所示。



(a) 无植被非均匀地表

(b) 有植被非均匀地表

图 9 卫星遥感观测数据样本

在卫星驱动下,通过遥感观测图像的实时采集,得出非均匀地表区域内所有观测数据的采集结果。

#### 4.4 描述系统测试实验过程

为保证优化设计基于无线传感器网络的卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测系统的正常运行,主测计算机的配置需求如下:计算机 CPU 处理器应为 Intel (R) Core (TM) 2,主频需达到 2.13 G 以上;内存至少 2 GB,硬盘至少 500 GB;操作系统需为 WinXPpro 及以上兼容版本。在开发系统平台时,需使用 C++ 语言和 VisualStudio8.0。优化设计系统则采用 LTIB 作为开发工具,LTIB 是一个基于 GPL 的开源项目,适用于多种主机平台,包括 PPC、ARM、Coldfire 等,并能为这些平台开发 BSPs,生成目标板所需的 U-boot、内核和文件系统镜像。在调试成功硬件系统的支持下,将生成的卫星遥感观测数据样本输入到软件系统的运行程序中,得出非均匀地表重点区域的监测结果,如图 10 所示。

按照上述方式可以得出有、无植被非均匀地表所有重点区域的监测结果。为体现出优化设计系统在监测功能方面的优势,设置传统的基于时序合并的地表监测系统 and 基于 PS-InSAR 和随机森林的区域地表监测系统作为实验的对比系统,利用相同的开发工具完成对比系统的开发并得出监测结果数据。

#### 4.5 设置系统测试指标

此次系统测试实验从监测精度和监测范围两个方面进行测试,监测精度的测试指标为地表倾斜角度监测误差和地表变形量监测误差,上述指标的数值结果如下:

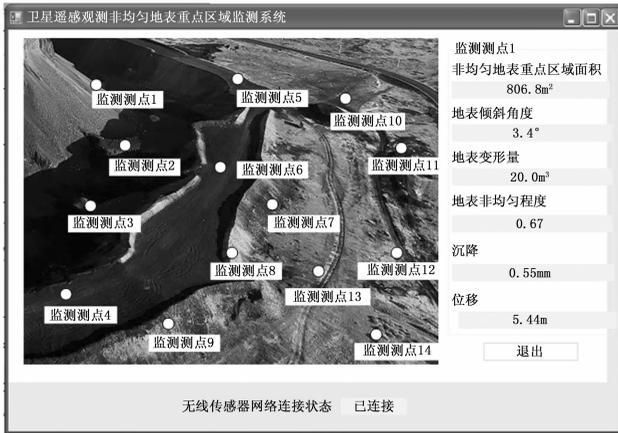


图 10 非均匀地表重点区域监测系统输出界面

$$\begin{cases} \epsilon_{\vartheta} = |\vartheta - \vartheta_{\text{reality}}| \\ \epsilon_W = |W - W_{\text{reality}}| \end{cases} \quad (13)$$

其中:  $\vartheta$  和  $W$  分别为系统输出的地表倾斜角度和地表变形量的监测结果,  $\vartheta_{\text{reality}}$  和  $W_{\text{reality}}$  对应的是地表倾斜角度和地表变形量的实际值。另外, 监测范围的测试指标为监测面积, 该指标的测试结果为:

$$S_{\text{monitor}} = \pi r_{\text{monitor}}^2 \quad (14)$$

式中,  $r_{\text{monitor}}$  为系统的监测半径。最终计算得出卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测误差越小, 证明对应系统的监测精度越高, 监测面积取值越大, 说明对应系统的监测范围越大。

## 4.6 系统测试实验结果与分析

### 4.6.1 系统有效性验证

由于非均匀地表重点区域确定的准确性将会直接影响后续的监测结果, 因此为验证所设计系统的有效性, 以 Sentinel 系列数据集作为测试数据, 从中随机选取 100 幅图像数据, 利用该系统进行非均匀地表重点区域确定, 使用 Kappa 系数对其确定准确性进行衡量, 越接近 1 说明确定准确性越高。则所设计系统所确定的结果如图 11 所示。

根据图 11 结果可知, 采用所设计系统对 100 幅图像数据进行识别, 其 Kappa 系数结果始终高于预期, 更接近于 1。

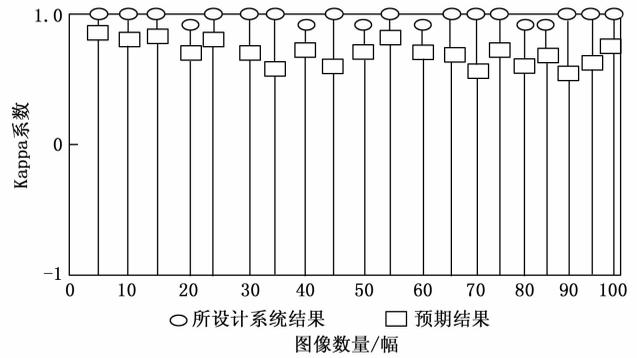


图 11 非均匀地表重点区域确定 Kappa 系数结果

由此说明, 所设计系统具有有效性, 可精准完成对卫星遥感观测非均匀地表重点区域的确定, 为后续监测提供可靠的支撑。

### 4.6.2 系统性能测试

通过相关数据的统计, 得出卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测精度的测试结果, 如表 2 所示。

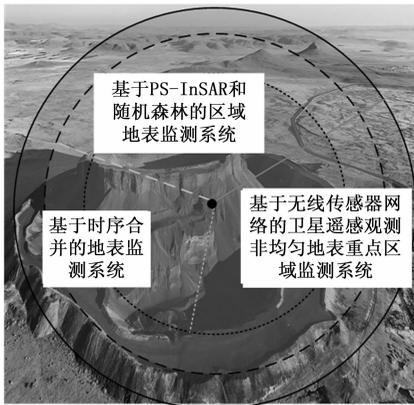
将表 2 中的数据代入到公式 (13) 中, 计算得出 3 个监测系统地表倾斜角度监测误差的平均值分别为 0.48、0.20 和 0.06°, 而平均地表变形量监测误差的测试结果分别为 1.00、0.64 和 0.09 m³。相比于基于时序合并的地表监测系统、基于 PS-InSAR 和随机森林的区域地表监测系统, 所设计系统的各个指标监测误差较低, 由此说明, 所设计系统具有较好的监测性能, 可精准完成对卫星遥感观测非均匀地表重点区域的监测, 为非均匀地表的治理提供可靠的数据支持。

为进一步验证所设计系统的效果, 通过相关数据的统计, 对上述 3 个系统的监测范围进行了测试对比, 其结果如图 12 所示。

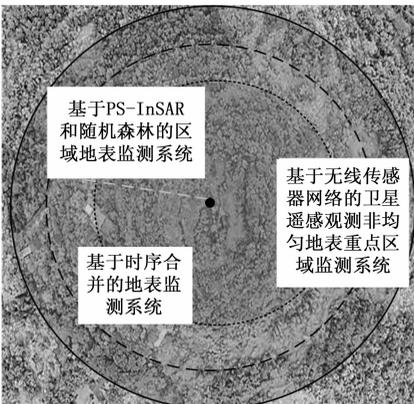
从图 12 中可以直观看出, 与两种传统监测系统相比, 所提出的优化设计系统监测面积更大, 不仅覆盖了传统系统所能触及的区域, 而且还大大扩展了监测的边界, 从而实现了更为广泛的地表覆盖, 使其在监测范围方面具有明显优势。由此, 综合上述结果可说明, 优化设计系统不仅提

表 2 非均匀地表重点区域监测精度测试数据表

测点 编号	非均匀地表重点区域 实际数据		基于时序合并的 地表监测系统		基于 PS-InSAR 和随机森林的 区域地表监测系统		基于无线传感器网络的卫星遥感 观测非均匀地表重点区域监测系统	
	地表倾斜 角度/(°)	地表变形量 /m³	地表倾斜角度 /(°)	地表变形量 /m³	地表倾斜角度 /(°)	地表变形量 /m³	地表倾斜角度 /(°)	地表变形量 /m³
1	3.5	20	4.0	21.5	3.8	20.5	3.4	20.0
2	2.3	43	1.7	44.2	2.0	43.7	2.2	43.1
3	1.8	26	2.5	25.5	2.0	26.4	1.8	26.2
4	0.6	34	1.1	35.3	0.8	34.8	0.5	34.0
5	0.9	29	1.2	29.9	1.0	29.6	0.9	29.1
6	2.7	24	2.3	25.2	2.5	24.7	2.6	24.1
7	1.4	15	1.0	15.6	1.2	15.5	1.3	15.2
8	1.5	9	1.1	8.2	1.4	9.9	1.5	9.0



(a) 无植被非均匀地表



(b) 有植被非均匀地表

图 12 系统监测范围测试对比结果

高了监测的精准度，还显著扩大了监测范围，使得更多关键区域得以被纳入监测视野。为相关领域的决策和行动提供有力保障，可在未来的地表监测领域中发挥更为重要的作用。

## 5 结束语

随着全球气候变化和环境问题的日益严重，对非均匀地表重点区域的监测需求日益迫切，通过卫星遥感观测非均匀地表重点区域监测系统的优化设计，能够更好地满足这一需求，为地球科学研究和实际应用提供更加可靠、高效的技术支持。在此次研究中，通过无线传感器网络的应用，不仅为数据的实时采集与传输提供支持，同时也为监测系统提供了覆盖广泛、响应迅速的信息感知能力。通过监测系统的优化不仅有助于更准确地掌握地表变化动态，为资源管理和环境保护提供科学依据，同时也能够提升灾害预警和应急响应的能力，保障人民生命财产安全。

## 参考文献:

- [1] 陶威, 贾洪果, 亢邈远, 等. 基于时序合并的 PS-InSAR 方法在雄县及周边区域地表形变监测中的应用 [J]. 测绘通报, 2023 (1): 101-106.
- [2] 司新毅, 谢新民, 李盛. 基于 PS-InSAR 和随机森林的天津区

- 域地形表变监测 [J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43 (7): 692-695.
- [3] JING C, HUANG G, LI X, et al. GNSS/accelerometer integrated deformation monitoring algorithm based on sensors adaptive noise modeling [J]. Measurement, 2023; 113179.
- [4] LI J, ZHONG Q, XIE H, et al. Coherent gradient sensing spatial carrier method and its application for in-situ dynamic deformation monitoring in laser repair process [J]. Experimental Mechanics, 2023; 1-19.
- [5] 李勇, 贺鑫, 李培现, 等. 煤矿地表塌陷区天眼巡查监测系统设计与应用 [J]. 煤炭工程, 2022, 54 (12): 157-163.
- [6] 朱俊清, 赵学儒, 马涛, 等. 基于卫星遥感的路域地质灾害监测方法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2023, 53 (6): 1861-1872.
- [7] 肖鹰, 曾志丹, 张艳. 基于云计算下现代生态农业物联网监控系统的设计 [J]. 农机化研究, 2023, 45 (11): 117-121.
- [8] 张迪, 程懋松, 戴志敏, 等. 基于 LoRa 的  $\gamma$  辐射监测系统设计与应用 [J]. 核技术, 2023, 46 (9): 39-48.
- [9] 王雪丽, 王卫红, 王立娟, 等. 基于 SBAS-InSAR 升降轨融合的尾矿库地表形变监测 [J]. 化工矿物与加工, 2023, 52 (4): 43-48.
- [10] 田雨情, 刘国林, 高腾飞, 等. 基于 SBAS-InSAR 与 Prophet 模型的引黄济青沿线地表形变监测与预测 [J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43 (12): 1288-1293.
- [11] 王利娟, 李恒凯, 肖松松. 基于 SBAS-InSAR 的稀土矿区地表扰动监测 [J]. 稀土, 2022, 43 (03): 67-76.
- [12] 陈媛媛, 朱晨玮, 郑加柱, 等. 基于 PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 的地面沉降监测分析——以长江南京段沿江区域为例 [J]. 人民长江, 2023, 54 (8): 160-165.
- [13] 王勇, 陈岩, 王沛, 等. 升降轨融合的施工区域 InSAR 地表形变监测 [J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43 (5): 487-490.
- [14] 孙健. 基于多时期遥感影像监测高速铁路隧道工程洞顶植被生长动态变化研究 [J]. 铁道标准设计, 2023, 67 (3): 172-176.
- [15] 李华蓉, 戴双璘. 基于 InSAR 的重庆东港地区地表形变监测 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2023, 42 (5): 78-84.
- [16] 李敏, 唐争气, 李艳, 等. 基于 D-InSAR 的盐矿地表形变监测与分析 [J]. 中国矿业, 2023, 32 (4): 45-50.
- [17] 任瑶瑶, 刘国林, 牛冲, 等. 基于 MSBAS InSAR 技术的沧州市地表形变监测与分析 [J]. 地球物理学进展, 2023, 38 (2): 588-599.
- [18] 王润泽, 费敏, 梁世川, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术监测西安市地表形变特征 [J]. 测绘通报, 2023 (1): 173-178.
- [19] 王国权, 鲍艳. 基于区域参考框架的 GNSS 滑坡监测 [J]. 测绘学报, 2022, 51 (10): 2107-2116.
- [20] 刘泽洲, 卢才武, 章赛, 等. 基于多阈值目标提取的时序 InSAR 矿区地表沉降监测研究 [J]. 中国矿业, 2022, 31 (8): 79-85.