

水体异常高分辨率双向 LSTM 遥测系统设计

贺凯盈¹, 成夏葳², 岳军红¹

(1. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714600)

(2. 自然资源部大地测量数据处理中心, 西安 710054)

摘要: 异常水体富营养化区域由于面积序列变化与水体掩膜图异常, 难以获得高分辨率的异常遥测结果, Kappa 系数较低; 因此, 提出水体异常高分辨率双向 LSTM 遥测系统; 水体异常高分辨率双向 LSTM 遥测系统硬件方面分别设计了遥感影像采集器、遥测仪、电源电路; 系统软件设计中, 利用分段线性回归方程对水体高分辨率遥感光谱影像进行几何校正; 对校正后的遥感影像展开形态学重建运算和区域生长分割, 提取图像中水体区域; 运用双向长短时记忆网络构造反演模型, 基于水质参数的时序性特点, 输出水体水质反演参数; 采用孤立森林算法识别异常水质参数, 输出水体异常高分辨率遥测结果; 实验结果表明: 该系统输出的水体异常遥测结果 Kappa 系数超过了 0.9, 满足了水环境异常的高分辨率监测要求。

关键词: 遥感影像; 几何校正; 水体提取; 双向长短时记忆网络; 水质参数反演; 异常识别

Design of High Resolution Bidirectional LSTM Remote Sensing System for Abnormal Water Regions

HE Kaiying¹, CHENG Xiawei², YUE Junhong¹

(1. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714600, China;

2. Geodetic Data Processing Center of the Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract: Due to changes in area sequence and anomalies in water mask map, it is difficult to obtain high-resolution remote sensing results for water areas with abnormal eutrophication, resulting in low Kappa coefficients. Therefore, a high-resolution bidirectional LSTM telemetry system for water anomalies is proposed. The hardware design of the system includes remote sensing image collectors, telemetry instruments, and power circuits. In system software design, achieve the geometric correction of water high-resolution remote sensing spectral images using piecewise linear regression equations. Perform morphological reconstruction and region growing segmentation on the corrected remote sensing image to extract water regions from the image. Construct an inversion model using bidirectional long short-term memory networks, and output water quality inversion parameters based on the temporal characteristics of water quality parameters. Use the isolation forest algorithm to identify the parameters of abnormal water quality and output the high-resolution telemetry results of water anomalies. Experimental results show that the Kappa coefficient of water anomalies output by the system exceeds 0.9, meeting high-resolution monitoring requirements for water anomalies.

Keywords: remote sensing image; geometric correction; water extraction; Bidirectional LSTM network; water quality parameter inversion; abnormal recognition

0 引言

在人为和自然因素共同作用下, 水资源污染问题不断加重, 导致水质恶化、水体污染事件频发^[1], 对饮用

水安全、水生生态系统以及人类健康构成了严重威胁, 环境保护和水资源管理工作的开展尤为重要^[2]。水体异常监测是环境保护领域中的一个重要环节, 借助现代化技术和手段对水环境进行实时监测, 有助于及时发现水

收稿日期: 2024-11-28; 修回日期: 2025-01-06。

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2020QF007); 国家自然科学基金(62201314)。

作者简介: 贺凯盈(1992-), 男, 硕士, 讲师。

岳军红(1982-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 贺凯盈, 成夏葳, 岳军红. 水体异常高分辨率双向 LSTM 遥测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(5): 89-96.

体污染事件或潜在的环境风险，为相关部门提供及时、准确的决策支持^[3]。因此，水体异常遥测系统的研究越发受到关注。

文献 [4] 提出基于 IGWOPSO-SVM 算法的监测系统，采用传感器组和无线通信模块，实现水体监测数据的采集和传输。再应用改进粒子群算法和灰狼算法优化后的支持向量机模型，评定水体水质等级，实现了对水体异常情况的快速检测。但是，该系统在数据特征选择阶段，选定结果不能充分反映水体的状态或存在冗余特征，导致基于此生成的异常监测结果 Kappa 系数较低。文献 [5] 提出基于 AD9364 的遥测系统，依托于 QPSK（正交相移键控）调制解调算法，建立无线射频收发一体化遥测系统，通过射频芯片采集水体多方面监测数据，观察数据变化特征即可完成全面的遥测分析。但是，AD9364 的射频收发能力，会受到现场环境影响导致接收数据质量较差，从而提升监测结果的误报率。文献 [6] 提出基于机器视觉的智能监测系统，获取水体区域鱼类活动图像，并应用机器视觉技术识别和跟踪鱼类活动行为，由此实现对水体水质异常情况的智能化监测。但是，在复杂背景条件下应用机器视觉技术完成异常监测时，无法准确区分目标行为，导致监测结果可靠性较差。文献 [7] 提出基于 STM32 的监测系统，设计 STM32F103RCT6 单片机和 nRF24L01 无线射频收发芯片，搭建系统硬件模块，实现对水体监测图像的采集。再完成图像处理和异常检测，即可实现对水体异常情况的低成本监测。但是，该系统在监测分析过程中，对异常标签的定义不准确的问题，导致得到的监测结果与实际情况存在偏差。

为了应对水体异常监测面临的挑战，设计水体异常高分辨率双向 LSTM 遥测系统。依托于高分辨率遥测技术的实时监测能力、双向 LSTM 神经网络的预测能力、孤立森林算法的异常分类能力，实现对水体异常事件的实时监测和预警，指导后续水资源管理和环境保护工作的开展。

1 水体异常高分辨率遥测系统结构及原理，画出结构原理图

本文设计的水体异常遥测系统包含 4 个子系统，具体原理结构如图 1 所示。

根据图 1 可知，本文设计的水体异常遥测系统的运行原理为通过数据管理子系统管理遥感影像采集器采集的无人机高光谱遥感数据，通过遥测仪完成高分辨率水体遥感影像数据交互、存储和管理。在数据处理子系统中，应用分段线性回归思想对数据管理子系统的水体遥感影像进行几何校正处理。通过形态学重建运算分割出影像中水体区域的边缘轮廓，定义区域生长准则，获

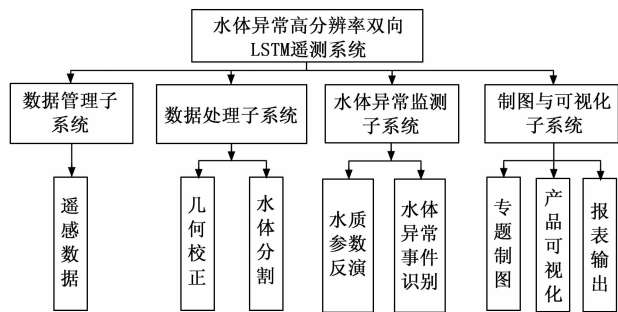


图 1 系统开发结构原理图

得水体区域生长分割结果。通过水体异常监测子系统，针对数据处理子系统分割出的水体区域遥感图像展开反演分析，得到重要水质参数（pH 值、溶解氧含量、化学需氧量、高锰酸盐指数）。利用双向长短时记忆网络构造参数反演模型。应用孤立森林算法识别参数反演模型输出水质参数中的异常数据，获得水体异常事件遥感监测结果。通过制图与可视化子系统将水体异常事件遥感监测结果—图像或表格等可视化方式展示。

2 水体异常高分辨率遥测系统硬件设计

2.1 遥感影像采集器设计

遥感影像采集器是由无人机飞行平台和高光谱遥感测绘设备组成的。为了实现对特殊地形水体区域遥感影像的灵活采集^[8]，选择国产的 ZS-02 型无人机作为飞行平台，其具有垂直起降功能，可以在任何复杂地形环境中安全作业。此外，无人机平台各项设计指标，如表 1 所示。

表 1 无人机平台设计指标

指标	设定值
起降方式	垂直起降
载荷能力	50~80 kg
续航时间	4~6 h
抗风等级	6 级
准备时间	<30 min
最大巡航速度	160 km/h
经济巡航速度	90 km/h

以无人机平台为主体，在下方安装 HySpex 400-2 500 nm 高光谱相机，即可建立完整的遥感影像采集器，控制无人机在水体区域上空飞行，飞行过程中相机将会自动采集高分辨率遥感影像。

考虑到遥感图像的完整性要求，在遥感影像采集器设计过程中，准备 5 个 HySpex 400-2 500 nm 高光谱相机通过组合并行连接方式，安装到无人机下方，代替原始单相机采样的工作模式。为了避免遥感影像采集器工作过程中各个相机之间互相干扰^[9]，设计倾斜组合拍摄方法：在组合 5 个高光谱相机时，控制相机 1 和相机 3

发生相对倾斜, 相机 2 和相机 4 发生等量倾斜, 而第 5 个相机则不发生倾斜, 直接垂直向下拍摄水体区域遥感影像。为了确保遥感影像采集器实时获取图像符合预期要求, 遥感影像采集器在无人机上安装了一个定位定姿系统^[10], 获取当前位置数据作为初始值, 按照提前规划好的路线进行实时导航, 快速拍摄水体区域遥感光谱图像。

2.2 遥测仪设计

遥测仪是基于单片机设计的硬件设备, 具有数据处理、数据存储、数据双向传输等功能, 可以帮助遥感影像采集器与监测计算机之间完成数据交互^[11]。考虑现场通信要求, 选择 P89LPC932 单片机作为核心部件, 搭配充电控制器、显示屏及键盘、带时钟的存储器等部件, 组成图 2 所示的遥测仪架构。

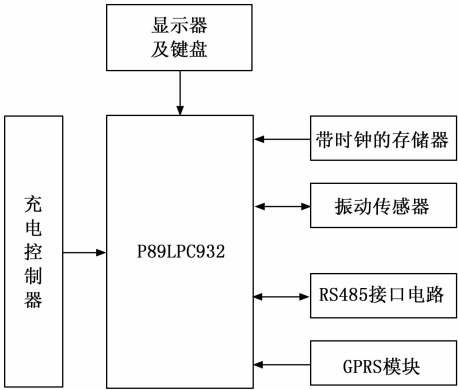


图 2 遥测仪组成结构

图 2 所示的遥测器组成结构中, 充电控制器主要负责连接遥测仪与充电电源, 为遥测仪提供电力, 确保其在目标环境下能够持续工作。为了方便存储和管理高分辨率水体遥感影像, 防止影像延时不同导致部分时序数据丢失, 在常规存储器 FM3116 上创新性地添加一个时钟部件, 保证遥感影像数据在双向通信过程中不丢失的同时, 通过时钟可以设定遥感影像采集器和 GPRS 通信模块的工作时间间隔, 保证双方通信效率。

考虑到 P89LPC932 单片机上只存在一个串口, 通过该串口连接 GPRS 模块的通信接口, 可以实现遥测仪与遥感影像采集器之间的数据传输。而 RS485 接口电路的布置, 可以控制遥测仪与上位机之间实现进行通信。

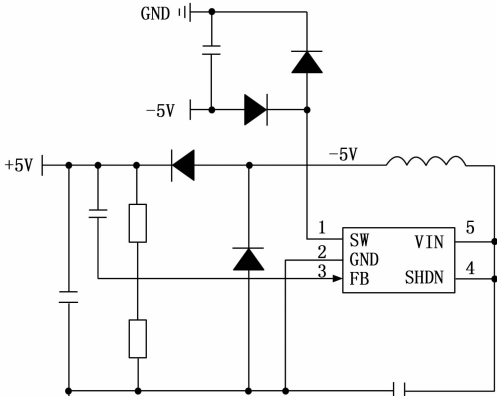
最后, 在遥测仪上添加一个静态功耗极低的振动传感器, 可以在设备遇到破坏时发出报警信息^[12], 避免遥测仪在野外环境中遭受人为破坏, 保证系统遥测工作的安全进行。

2.3 电源电路设计

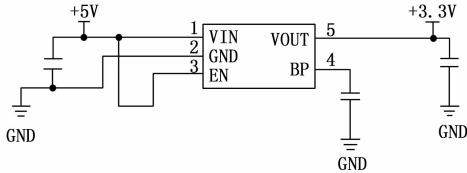
水体异常高分辨率双向 LSTM 遥测系统硬件结构

中的电源电路, 主要承担着为遥测仪和监测计算机供电的任务^[13]。面向遥测系统计算机, 选用 LT1615 芯片构造图 3 (a) 所示的电源电路, 其可以在供电过程中控制电压发生 $\pm 5\text{ V}$ 的变化, 确保系统在不同工作场景下稳定运行。

而面向遥测仪设计的电源电路如图 3 (b) 所示, 其是以 RT9193 芯片为核心的, 可以向 P89LPC932 单片机提供 3.3 V 电压, 满足遥测仪日常工作需求。



(a) LT1615 芯片



(b) RT9193 芯片

图 3 芯片电路示意图

同时, 在两类电源电路中, 均添加了低 ESR 特性的陶瓷电容器、陶瓷电容器 C36、陶瓷电容器 C37, 最大程度消除了供电过程中出现的高频噪声, 优化电路工作性能。

3 水体异常高分辨率遥测系统软件设计

水体异常高分辨率遥测系统软件实现流程如图 4 所示。

如图 4 所示, 水体异常高分辨率遥测系统算法设计分为几何校正、水体分割、参数反演、异常监测 4 个关键步骤, 以下进行详述。

3.1 遥感影像几何校正

在平台位置误差和信号接收误差的共同影响下, 高分辨率遥感影像出现形变问题, 为后续水体异常遥测分析增加了干扰。对此, 应用分段线性回归思想^[14], 对水体遥感图像进行几何校正处理。

针对水体遥感监测图像进行划分, 将原始图像分作多个大小相同的区间, 获取图像区间内实测数据和遥感图像像素值, 并对两类数据进行配对, 求出二者中最大值、最小值和平均值。利用线性回归公式, 对每个区间

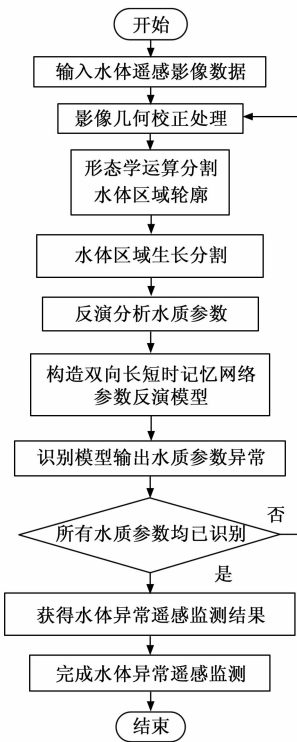


图 4 软件实现流程图

内图像像素展开校正处理^[15]，该操作主要包含两种情况，分别是当前像素值小于像素平均值和当前像素值大于像素平均值。

在水体遥感影像任意分区内，随机选中一个像素点，通过公式 (1) 可以实现像素值几何校正：

$$\begin{cases} I < \bar{I}, & \hat{I} = \alpha * I + \beta \\ I > \bar{I}, & \hat{I} = \alpha' * I + \beta' \\ I = \bar{I}, & \hat{I} = \bar{I} \\ I = 0, & \hat{I} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中， I 表示遥感图像分区目标点像素值， $\bar{I}$ 表示分区像素平均值， $\hat{I}$ 表示几何校正后像素值， $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$ 表示回归系数。

遥感影像几何校正公式中，回归系数取值结果可以表示为：

$$\begin{cases} \alpha = \bar{M} - \frac{\bar{I}(\bar{M} - M')}{\bar{I} - I'} \\ \beta = \frac{\bar{M} - M'}{\bar{I} - I'} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \alpha' = \bar{M} - \frac{\bar{I}(\bar{M} - M'')}{\bar{I} - I''} \\ \beta' = \frac{\bar{M} - M''}{\bar{I} - I''} \end{cases} \quad (3)$$

式中， $\bar{M}$ 表示水体区域实测数据平均值， M', M'' 表示实测数据最小值和最大值， I', I'' 表示图像最小像素值和最大像素值。

利用公式 (1) 逐个对分区内像素点进行计算，实

现分区遥感影像几何校正，再按照同样的操作方式处理其他影像分区，即可得到几何校正后的水体高分辨率遥感影像。

3.2 基于几何校正遥感影像的水体区域分割

面向校正处理后的遥感影像，展开形态学重建运算，分割出影像中水体区域的边缘轮廓^[16]。将几何校正后的遥感图像设为掩模图像，并通过形态学腐蚀运算生成一个图像标记。结合开重建运算和闭重建运算思想^[17]，求出原始图像对应的形态学重构滤波图像为：

$$A' = Q \chi_B \oplus B\beta - P \chi_B \otimes B\alpha \quad (4)$$

式中， A' 表示形态学重构滤波图像， Q 表示形态学开重建运算图像， P 表示形态学腐蚀运算图像， c 表示掩模图像， B 表示结构元素， χ 表示标记图像， $\oplus$ 表示开运算符号， $\otimes$ 表示闭运算符号。

为了保留水体遥感影像中的细节边缘信息，采用多结构元素替换公式 (4) 中的结构元素，最终可以推导出形态学边缘检测图像为：

$$A'' = Q \chi_{A'} \oplus \hat{B}\beta' - P \chi_{A'} \otimes \hat{B}\alpha' \quad (5)$$

式中， A'' 表示形态学边缘检测图像， $\hat{B}$ 表示多结构元素。

通过形态学运算获取遥感图像边缘信息后，初步确定水体区域轮廓。随后，获取图像目标轮廓内区域各个像素点灰度值，找到多个灰度值较大的像素点作为种子点，通过区域生长准则实现水体区域分割^[18]。

定义区域生长准则为种子点与邻域邻接点之间灰度差值小于 2，得到区域生长过程。若生长准则条件可以将邻域邻接点纳入生长区域，再针对新生长节点重复执行区域生长准则，直到满足生长截止条件^[19]，区域生长结果如图 5 所示。

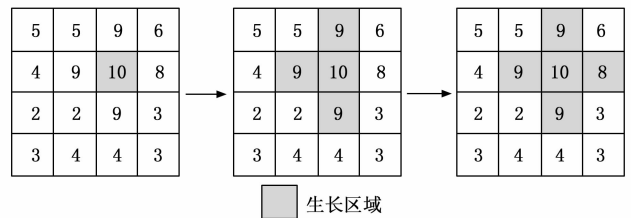


图 5 区域生长示意图

依托于图 5 所示的区域生长原理，对边缘检测图像进一步处理，即可输出水体区域生长分割结果。

3.3 考虑水体区域分割结果的双向 LSTM 水质参数反演

针对水体区域遥感图像展开反演分析，得到重要水质参数 (pH 值、溶解氧含量、化学需氧量、高锰酸盐指数)^[20]，是推导水体异常事件遥测结果的核心环节。在这一阶段，考虑到水质参数与高分辨率遥感图像各波段光谱值之间的关联性较低，为了得到高质量的水质参数反演结果，引入双向长短时记忆网络^[21]，构造具有

较强非线性映射能力和自适应学习能力的反演模型, 如图 6 所示。

如图 6 所示, 在网络输入层布置 7 个输入单元, 负责导入遥感图像水体区域 6 个波段光谱反射数据, 以及前一时刻的水质参数反演结果。通过前向长短时记忆神经网络、后向长短时记忆神经网络, 对历史时刻光谱数据和对应的水质参数展开双向学习^[22], 建立二者之间的映射关系。将这一映射关系保留到双向 LSTM 反演模型中, 对当前输入的光谱数据和前一时刻水质参数数据进行分析, 即可根据实时采集的高分辨率遥感光谱信息推导出水质参数值。

水质参数反演模型中的双向 LSTM 网络, 主要包含遗忘门、输入门、输出门 3 个重要结构^[23], 各门结构计算过程分别可以表示为:

$$\eta_t = A''\sigma(\bar{\omega}_t[v_{t-1}, x_t] + b_t) \tag{6}$$

$$g_t = A''\sigma(\bar{\omega}_t[v_{t-1}, x_t] + \bar{b}_t) \tag{7}$$

$$u_t = A''\sigma(\bar{\omega}_t[v_{t-1}, x_t] + \bar{b}_t) \tag{8}$$

式中, t 表示运算时刻, η 表示输入门运算结果, g 表示遗忘门运算结果, u 表示输出门运算结果, σ 表示 sigmoid 函数, v 表示上一时刻单元输出, x 表示当前时刻输入, $\bar{\omega}, \bar{\omega}, \bar{\omega}$ 表示门结构计算所需的权重参数, $b, \bar{b}, \bar{b}$ 表示偏置项。

综合考虑遗忘门和输入门输出结果, 可以更新当前时刻记忆单元状态, 输出水体遥感图像包含的水质参数信息:

$$\rho_t = g_t \times \rho_{t-1} + \eta_t \times \rho'_t \tag{9}$$

式中, ρ 表示记忆单元状态, ρ' 表示候选单元状态。

3.4 水质参数反演结果下水体异常事件遥感监测

从水体水质参数反演结果入手, 应用孤立森林算法

识别水质参数中的异常数据, 由此得出水体异常事件遥感监测结果。在孤立森林构造阶段, 采用随机采样方法从水质参数反演结果中随机抓取部分样本数据, 组成子采样集合, 充当树的根节点^[24]。随后, 在子采样集中随机选择一个维度, 划分集合内所有样本数据, 构造出左子树和右子树。再重复上述数据划分策略, 生成多个左、右子树, 直到数据无法继续分类, 即可形成一个孤立森林。

在孤立森林内, 利用二叉搜索树结构展开递归分割^[25], 孤立与绝大部分样本存在较大差异的样本点, 并将该样本点标注为异常样本, 具体分割原理如图 7 所示。

如图 7 所示, 在整个数据空间内完成 8 次分割处理, 即可实现异常样本的有效分割。二叉搜索树递归分割过程中, 每个样本点的异常得分可以表示为:

$$l(z, \phi) = 2^{-E(\tau(z))/r(\phi)} \tag{10}$$

式中, l 表示异常得分, z 表示输入的水质参数, ϕ 表示子采样集中参数总量, τ 表示标准化搜索的路径长度, E 表示孤立森林的期望路径长度, r 表示二叉树中失败搜索的路径长度。

将公式 (10) 给出的异常得分计算结果, 应用到异常水质参数划分过程中, 定义公式 (11) 所示的判断规则:

$$\begin{cases} E(\tau(z)) \rightarrow 0, & l \rightarrow 1 \\ E(\tau(z)) \rightarrow \phi - 1, & l \rightarrow 0 \end{cases} \tag{11}$$

如公式 (11) 所示, 当异常得分计算结果为 0 时, 可以判断当前水质参数属于正常样本, 若异常得分为 1, 则可以确定水质参数属于异常样本。由异常水质参数可以直接推断出水体异常事件, 作为系统最终输出的

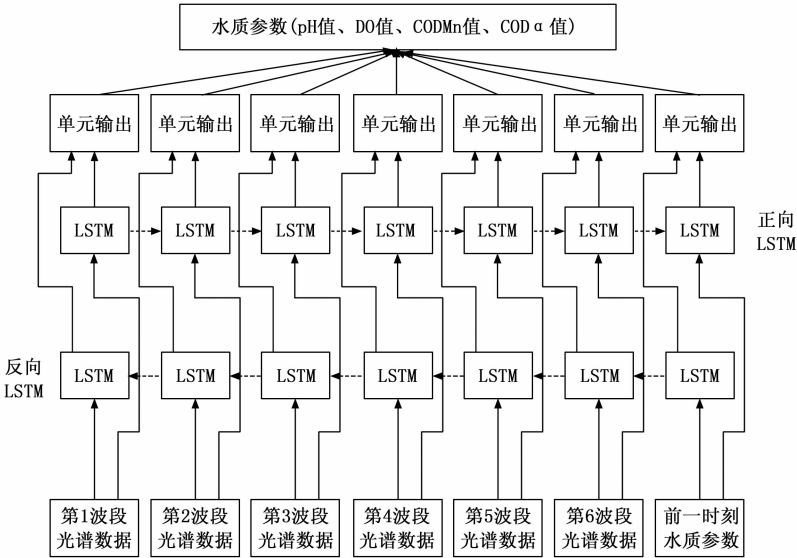


图 6 基于双向 LSTM 的水质参数反演模型

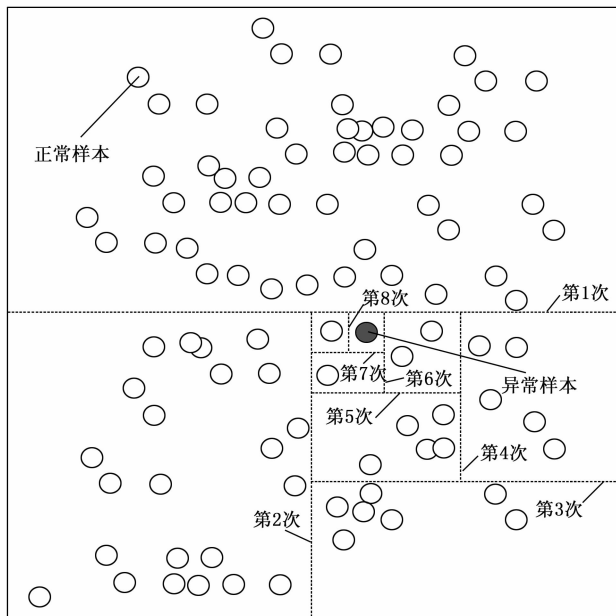


图 7 异常样本分割示意图

遥测结果。

4 实验结果与分析

选择青岛近海一带水体作为研究对象，自 2007 年以来，该区域每年夏天都会迎来浒苔的“绿潮”侵袭，浒苔本身无毒，可食用，且含有多种活性成分，如活性多糖、蛋白质、氨基酸以及膳食纤维等，具有良好的食用和药用价值。然而，当浒苔在海洋中大量繁殖并形成规模时，会抑制其他水生植物对溶解氧的吸收，对海洋生态系统造成破坏。在青岛浒苔灾害防治工作开展过程中，应用水体异常高分辨率双向 LSTM 遥测系统，对水体异常情况进行准确监测，验证本文所设计系统的各项功能和性能，检验该系统是否能够在实际应用中发挥预期效果。

在水体异常遥测系统开发过程中，选择 Windows XP 作为操作系统，选择微软公司推出的 SQL Server 2005 作为系统数据库，实现对高分辨率遥感光谱图像的存储和管理，为遥测系统的运行提供重要基础。除此之外，SQL Server 2005 还提供了集成服务、分析服务和报表服务，这些功能为系统的数据分析和可视化提供了有力支持。

开发语言方面，选用了 C# 编程语言和 IDL 编程语言，前者负责快速地构建出功能丰富、性能优越的系统应用程序，后者适用于数据分析和图像化应用，主要用来处理 MODIS 数据。采用 DJI Mavic 2 Enterprise Dual 型号的遥感影像采集器，该采集器具有 2000 万像素的分辨率，飞行高度可达到 100 米。拍摄频率为每 15 分钟一次，可涉及可见光+近红外的光谱范围。采用 YSI

ProDSS6.0 多参数水质监测仪，可监测水中的溶解氧 (DO)、PH 值、电导率、浊度、温度等。采用 ENVI+IDL 编程序进行几何校正，OpenCV+Python 软件对校正后的影像进行形态学重建运算，增强水体区域边缘。应用 TensorFlow 框架构建双向 LSTM 模型进行水质参数反演，其中输入层为水体区域的光谱数据，双向 LSTM 层为 2 层，每层 128 个单元，dropout 为 0.2，全连接层为输出水质参数，使用 ReLU 激活函数，Adam 优化器的学习率为 0.001。

在上述系统开发环境中，应用 ArcGIS Engine 开发工具包，开发出包含 4 个子系统的水体异常遥测系统。将新开发得到的水体异常遥测系统应用到青岛浒苔灾害监测工作中，测试其是否能够高效地运行并满足各种复杂的监测需求。

遥测系统运行过程中，通过遥感影像采集器、遥测仪等设备获取青岛浒苔区域高分辨率遥感光谱影像，以某区域为例，该区域的遥感影像水体区域分割结果如图 8 所示。

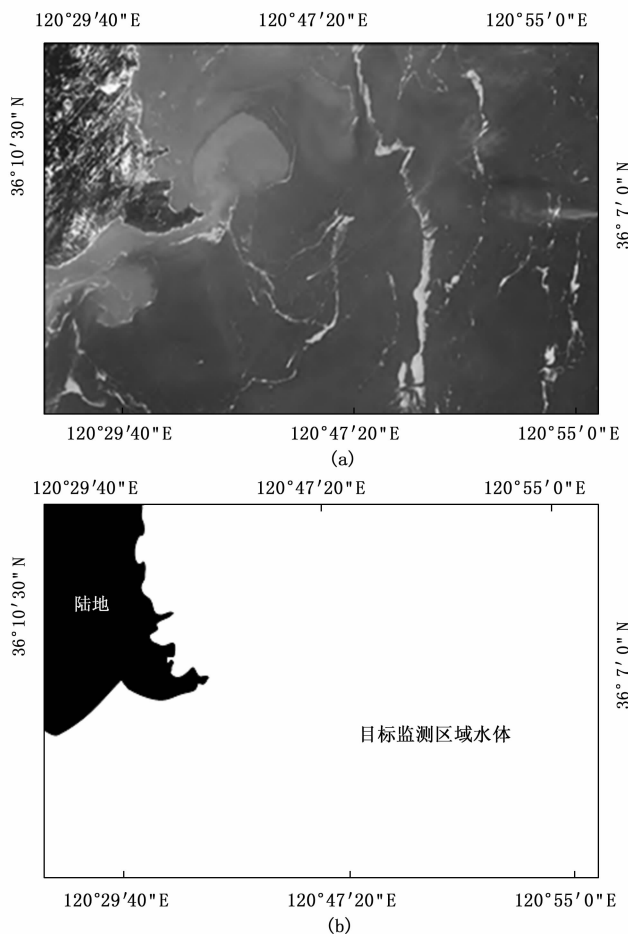


图 8 遥感影像水体区域分割结果

图 8 (a) 为该区域水体在系统可视化界面显示结果，通过系统的水体提取功能，实现目标监测区域水体

和陆地的有效分割, 最终得到图 8 (b) 所示的处理结果。

利用系统中的双向 LSTM 反演模型, 分析水体水质参数时, 模型输入层输入数据如表 2 所示。

表 2 双向 LSTM 反演模型输入层数据

输入层数据	含义
Band_1	0.433~0.453 μm 波段光谱反射率
Band_2	0.450~0.515 μm 波段光谱反射率
Band_3	0.525~0.600 μm 波段光谱反射率
Band_4	0.630~0.680 μm 波段光谱反射率
Band_5	0.845~0.885 μm 波段光谱反射率
Band_6	2.100~2.300 μm 波段光谱反射率
S(t-1)	前一周水质参数

通过双向 LSTM 反演模型的自适应学习, 最终输出目标区域局部分区水体的 pH 值、DO 值、CODMn 值、CODcr 值四项水质参数反演结果, 如图 9 所示。

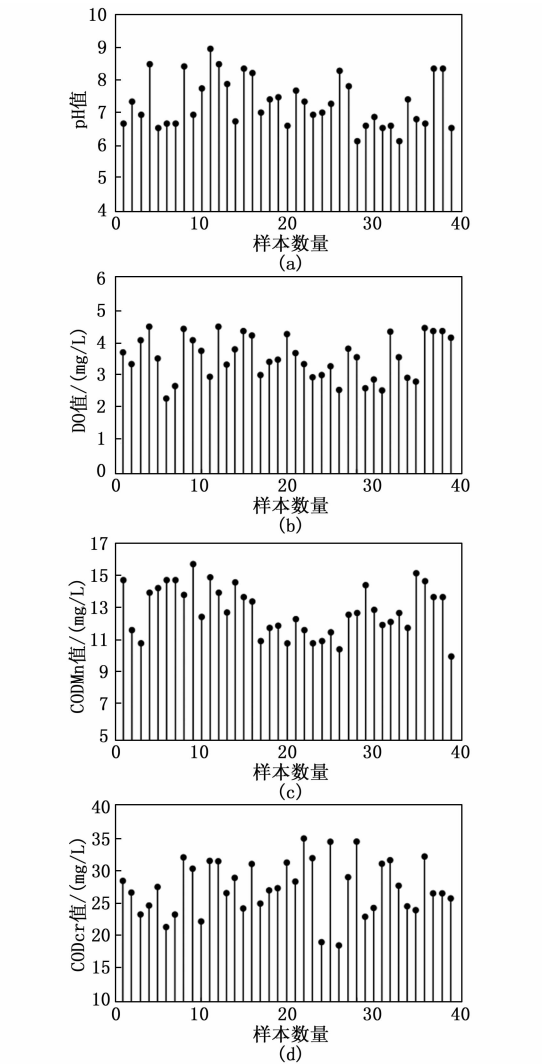


图 9 水质参数反演结果

如图 9 所示, 青岛近海一带水体水质 pH 值保持在 6~

9 之间, 属于正常标准。DO 值变化区间是 2~5 mg/L, CODcr 值变化区间是 15~35 mg/L, 相比标准值都发生了明显降低。最后, CODMn 值取值区间是 9~17 mg/L, 出现了一定程度的增大。

综合水质参数反演结果, 借助孤立森林算法可以推导出除了 pH 值外, 其余三项参数都属于异常样本, 表明该区域水体存在明显的浒苔污染问题。而经过统计分析后, 最终可以绘制出系统遥测结果, 如图 10 所示。

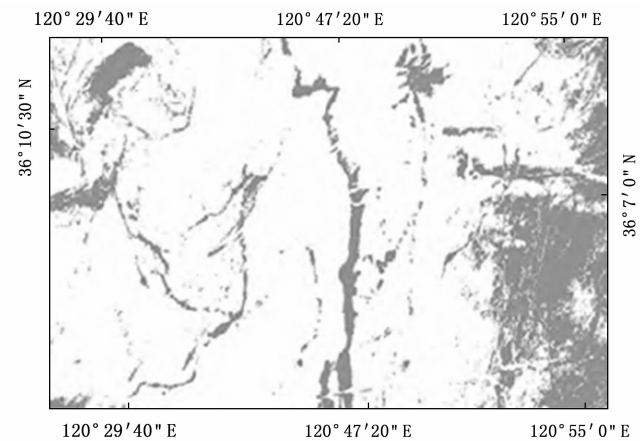


图 10 水体异常遥测结果

从图 10 可以看出, 图中灰色区域代表浒苔污染分布区域, 目标区域水体存在较为严重的浒苔污染问题, 这一遥测结果与现场实测结果基本一致, 证明了系统的可行性。

水体异常遥测区域, 选择 2 000 个测量点, 对比每个测量点系统给出的异常遥测结果和实际异常发生情况, 计算出 Kappa 系数, 以此来反映系统遥测结果的准确程度:

$$K = \frac{P - P'}{1 - P'}$$

(12)

式中, K 表示 Kappa 系数, P 表示系统异常遥测结果总体精度, P' 表示偶然一致性误差。

公式 (12) 中, 总体精度指的是所有样本中被正确分类的样本所占比例, 偶然一致性误差表示如果按样本分布随机分类, 预期的正确率会是多少。这两项指标综合起来, 可以更加客观地评价遥测系统应用性能。根据 Kappa 系数计算结果如图 11 所示。

从图 11 可以看出, 基于双向 LSTM 的水体异常遥测系统应用后, 生成的遥测结果 Kappa 系数大于 0.9, 超过了提前设定的基准值, 证明了该系统的应用性能满足预期设计要求, 将其应用到水体异常监测领域, 有利于指导水环境治理工作的开展。

5 结束语

在水体异常高分辨率双向 LSTM 遥测系统设计过

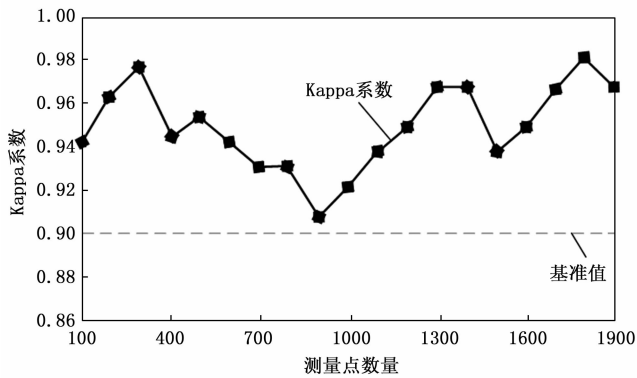


图 11 本文设计系统的遥测结果

程中, 不仅融合了现代遥感技术的先进成果, 还巧妙地引入了双向 LSTM 网络, 以实现在复杂多变的水体环境下, 完成水体异常的高精度监测, 不仅满足了当前水体监测的需求, 也为未来的智能化、自动化水体管理提供了理论参考。下一步研究工作将进一步提升硬件处理器的运算能力, 在保证水体高精度监测的同时, 实现监测实时性。

参考文献:

- [1] 顾祝军, 刘 斌, 朱 骊, 等. 基于 GF-1 多光谱影像的河道碍洪物遥感 AI 识别模型 [J]. 测绘通报, 2024, (8): 84-89.
- [2] 夏兴生, 蔡建军, 王林刚, 等. 青海湖两季水体范围时空变化遥感监测 [J]. 遥感技术与应用, 2024, 39 (4): 1026-1038.
- [3] 郭有顺, 许文卿, 张 鹏, 等. 闸控河道水污染物通量在线监测系统建设与应用 [J]. 环境监测管理与技术, 2024, 36 (2): 56-59.
- [4] 蒋 冬, 肖茂华, 张海军, 等. 基于 IGWOPSO-SVM 算法的水质监测及等级评定系统 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44 (4): 638-648.
- [5] 张琦琪, 马游春, 郭 鑫, 等. 基于 AD9364 的高速率通用遥测系统设计 [J]. 电子测量技术, 2022, 45 (24): 43-47.
- [6] XU P, LIU X, LIU J, et al. Survey on machine vision-based intelligent water quality monitoring techniques in water treatment plant: Fish activity behavior recognition-based schemes and applications [J]. Demonstratio Mathematica, 2024, 57 (1): 15-25.
- [7] 刘耀辉, 胡敬芳, 宋 钰, 等. 基于 STM32 的水质重金属监测系统 [J]. 制造业自动化, 2023, 45 (7): 15-21.
- [8] 朱秀芳, 李 原, 郭 锐. 基于孤立森林的水体异常快速发现与识别 [J]. 遥感技术与应用, 2023, 38 (5): 1126-1135.
- [9] 许晟铭. 光学和 SAR 遥感数据在赵村水库水体监测中的应用 [J]. 遥感信息, 2023, 38 (4): 168-176.
- [10] 王报华, 徐林丰, 张金刚, 等. 基于时间触发以太网的遥测通信技术 [J]. 导弹与航天运载技术 (中英文), 2023, (4): 118-122.
- [11] 侯毅凯, 张安兵, 吕如兰, 等. 基于多源数据的河道水质遥感反演研究 [J]. 灌溉排水学报, 2023, 42 (11): 121-130.
- [12] 魏 鑫, 任 雨, 陈曦东, 等. 基于时序 Sentinel-2 数据水体动态变化监测——以河南省为例 [J]. 自然资源遥感, 2024, 36 (2): 268-278.
- [13] 杨凌升, 李 伟, 尤嘉琪, 等. 基于鱼类活动生物电信号高精度计测的水质监测系统 [J]. 计量学报, 2023, 44 (6): 968-974.
- [14] 张 胜, 王永军, 王瑞军, 等. 基于 4G-RTU 的水体 γ 放射性在线监测系统研制 [J]. 核技术, 2024, 47 (1): 80-90.
- [15] 李 航, 范 莉, 徐维新, 等. 基于多源卫星数据的三峡库区水体悬浮物浓度遥感监测 [J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32 (3): 611-625.
- [16] 冯翠杰, 方晨琦, 袁亘宇, 等. 基于无人机高光谱和 BP 神经网络的城市水体污染监测 [J]. 环境工程学报, 2023, 17 (12): 3996-4006.
- [17] 何家辉, 程志君, 郭 波. 联合字典学习与 OCSVM 的遥测数据异常检测方法 [J]. 航空学报, 2023, 44 (13): 207-219.
- [18] 封 雷, 封 丽, 方 芳, 等. 基于改进多层卷积神经网络的水体富营养化遥感监测算法研究 [J]. 计算机科学, 2022, 49 (S2): 388-392.
- [19] 江 雪, 蒋红霞, 潘若云, 等. 基于无人机遥测技术的湿周法计算河流生态需水研究 [J]. 中国农村水利水电, 2023, (4): 62-68.
- [20] 王 妍, 姚 杰, 杨 朴, 等. 北京市黑臭水体治理的动态遥感监测及影响因素分析 [J]. 环境工程学报, 2022, 16 (9): 3092-3101.
- [21] 高金辉, 闫 琼. 基于脉冲激光的河道水位远程监测系统研究 [J]. 电子测量技术, 2022, 45 (12): 26-30.
- [22] 奚采亭, 胡月琪, 席 玥, 等. 基于氨氮实测结果的水质自动监测系统数据质量分析 [J]. 环境工程学报, 2022, 16 (8): 2775-2782.
- [23] 李云梅, 赵 焕, 毕 顺, 等. 基于水体光学分类的二类水体水环境参数遥感监测进展 [J]. 遥感学报, 2022, 26 (1): 19-31.
- [24] 王 茹, 申 茜, 彭红春, 等. 多源高分辨率卫星影像监测黑臭水体的适用性研究 [J]. 遥感学报, 2022, 26 (1): 179-192.
- [25] 高佳欣, 林昱坤, 涂耀仁, 等. 遥感反演技术应用于监测地表水体水质参数的现状与展望 [J]. 遥感信息, 2023, 38 (6): 1-14.