

刘传领, 陈明, 池涛. 基于 LoRa 无线通信的水产养殖监测系统设计及应用 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(6): 154-160.
LIU Chuanling, CHEN Ming, CHI Tao. Design and application of aquaculture monitoring system based on LoRa wireless communication[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(6): 154-160.

基于 LoRa 无线通信的水产养殖监测系统 系统设计及应用

刘传领, 陈 明, 池 涛

(上海海洋大学 信息学院/农业农村部渔业信息重点实验室, 上海 201306)

摘要:【目的】针对大面积水产养殖环境覆盖面积广、多种水体环境监测因素综合影响的特点, 设计一种可同时监测水体溶解氧、盐度、pH、氨氮和温度 5 种参数的设备。设备可通过远距离无线通信技术实现水质数据远距离无线传输, 并在上位机端可视化平台动态显示监测环境因素。【方法】数据采集终端的控制核心采用 TI 公司具有 16 位总线的 MSP430F149 型微控制器。水质信息通过各传感器采集获取, 氨氮采集终端采用量程为 0~10 mg/L 的 NHN-202A 型氨氮传感器; 溶解氧与温度采集终端采用溶解氧量程为 0~20 mg/L、温度量程为 0~40 ℃ 的 RDO-206 型传感器; pH 采集终端采用量程为 0~14 的 PHG-200 型传感器; 盐度采集终端采用量程为 0~0.5% 的 DDM-202I/C 型传感器。服务器端采用 Linux 系统搭建, 通过 JetBrains 下的 IntelliJ IDEA 开发工具搭建, 使用的编程语言为 Java。线上平台采用 SpringMVC 框架, 数据库连接通过 Hibernate 对象关系映射框架连接操作。监测平台通过 Tomcat 部署在 Linux 系统上, 数据展示界面通过调用可视化库 Echarts 实现。【结果】系统实际所测水体溶解氧含量绝对误差为 0.12 mg/L, 盐度的绝对误差为 0.001%, pH 的绝对误差为 0.017, 温度的绝对误差为 0.05 ℃。单一采集设备功耗测试中, 5 200 mA 电池可持续为终端设备供电 28.5 h, 且线上系统运行稳定。【结论】本研究设备 LoRa 无线通信技术与上位机端数据可视化平台相结合的设计增强了远距离水质监测数据采集的可靠性, 解决了动态实时测量中监测数据长距离传输问题及数据同步上位机端平台展示问题。

关键词: 水产养殖; MSP430F149; LoRa; 水质参数; 动态监测; 远距离传输
中图分类号: S969.39 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2020)06-0154-07

Design and application of aquaculture monitoring system based on LoRa wireless communication

LIU Chuanling, CHEN Ming, CHI Tao
(College of Information Technology, Shanghai Ocean University/Key Laboratory of Fisheries Information,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

Abstract: 【Objective】Aiming at the characteristics of large-scale aquaculture environment covering a wide area and interaction of a variety of water environment monitoring factors, to design a device that can simultaneously monitor five water quality parameters including dissolved oxygen, salinity, pH, ammonia nitrogen and temperature. The device can realize long-distance wireless transmission of water quality data through long-distance wireless communication technology, and dynamically display the monitoring environmental factors on the host computer side visualization platform. 【Method】The control core of the data acquisition terminal adopted 16-bit MSP430F149 microcontroller of TI company. The water quality information

收稿日期:2020-06-21 网络首发时间:2020-09-14 14:13:48
网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20200914.1151.002.html>
作者简介:刘传领(1994—), 男, 硕士研究生, E-mail: 2223981842@qq.com; 通信作者: 陈 明(1966—), 男, 教授, 博士,
E-mail: mchen@shou.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金(61561027); 上海市自然科学基金(16ZR1415100)

was collected by various sensors. Ammonia nitrogen collection terminal adopted NHN-202A ammonia nitrogen sensor with test range of 0–10 mg/L. Dissolved oxygen and temperature acquisition terminal adopted RDO-206 sensor with dissolved oxygen range of 0–20 mg/L and temperature range of 0–40 °C. pH collection terminal adopted PHG-200 sensor with test range of 0–14. Salinity collection terminal adopted DDM-202I/C sensor with test range of 0–0.5%. The server side was built using Linux system and built by the IntelliJ IDEA development tool under JetBrains. The programming language was Java. The online platform used the SpringMVC framework, and the database connection was operated through the HiBernate object-relational mapping framework. The monitoring platform was deployed on the Linux system through Tomcat. The data display interface was realized by calling the visualization library Echarts. 【Result】 The absolute error of dissolved oxygen content measured by the system was 0.12 mg/L, while those of salinity, pH and temperature were 0.001%, 0.017, and 0.05 °C, respectively. In the power consumption test of single acquisition device, 5 200 mA battery could continuously supply power to the terminal device for 28.5 h, and the online system was stable. 【Conclusion】 The combination of LoRa wireless communication technology and the data visualization platform on the host computer side in the device enhances the reliability of the long-distance water quality monitoring, and solves the problems of long-distance transmission of monitoring data in dynamic real-time measurement and display of data synchronization on the host computer platform.

Key words: aquaculture; MSP430F149; LoRa; water quality parameter; dynamic monitoring; long-distance transmission

大面积水产养殖发展迅速, 信息化、数字化、智慧化监测技术手段的研发与应用对实现优质、高效、安全、环保的养殖目标尤为重要^[1-2]。在针对溶解氧、酸碱度、温度、盐度、氨氮等水体环境关键因子构建基于物联网技术的水体环境在线实时监测系统的研究方面, 黄建清等^[3]在水产养殖水质监测系统开发中通过 nRF905 射频芯片实现水质数据的传输, 使中短程无线数据传输创新性在水产养殖中得到实际应用; 李鑫星等^[4]针对 ZigBee 多跳通信的特点提出了一种基于 JN5139 的 ZigBee 无线模块, 实现对溶解氧、pH、电导率和温度的监测。多跳通信的远距离数据传输会增大数据的丢失概率。金光等^[5]对 ZigBee 与 LoRaWAN 的网络拓扑复杂度、能耗、部署 3 部分进行了对比分析, 在拓扑结构方面 ZigBee 为多跳路由将数据传输到汇聚节点建立簇树形的无线传感网, LoRaWAN 网络节点单跳即可覆盖终端节点从而建立星型低功耗广域网, 得出 LoRa 在大范围覆盖通信场景优于 ZigBee。林永君等^[6]发展了水产养殖数据监测领域的无线通信方式, 将基于商业化的 GPRS 无线通信媒介应用到了监测领域, 借助互联网对现场设备信息进行远程监控; 但 GPRS 通信依赖于电信运营商, 若监测目的地离运营商基站较远, GPRS 信号差或无信号的情况下实际通信质量较低, 导致通信丢包率高甚至无法完成正常通讯需求^[7]。

针对大面积水产养殖中水质监测所面临的节

点分布广且分散, 偏远郊野地带商用通信信号较差的问题, 本文结合 LoRa 无线通信距离远的特点, 设计了一款实现低功耗远距离无线传输的多水质因素监测系统, 并开发了在线监测平台, 在覆盖较大规模目标监测水域面积的前提下实现对目标监测水体温度、溶解氧、pH、氨氮和盐度 5 种关键环境理化因素的在线监测。文中对系统采集终端的误差进行了比对及对系统整体水质因素采集进行了整体测试, 以期为水质环境监测的相关研究提供新的参考。

1 设备总体架构设计

水质监测设备主要包括数据采集模块、通信接口电路、控制核心、LoRa 无线发送模块、远程 LoRa 无线接收模块和上位机端可视化平台等。在水质数据采集端, 分别使用溶解氧/温度传感器、酸碱度传感器、氨氮传感器、盐度传感器实现对水质多重因素的采集。各节点采集的数据通过 RS485 总线经由通信接口电路传送至控制核心进行下一步处理。由于水体环境比较复杂, 通信线路面临多种形式的干扰源, 以通信接口电路的形式实现电路保护。数据传输单元 (Data transfer unit, DTU) 把采集到的数据通过 LoRa 无线数据通信方式向外发送, 远程接收模块实现对采集数据的接收, 至此完成一个水质数据采集发送与远程接收端的收发周期。系统整体框架图见图 1。

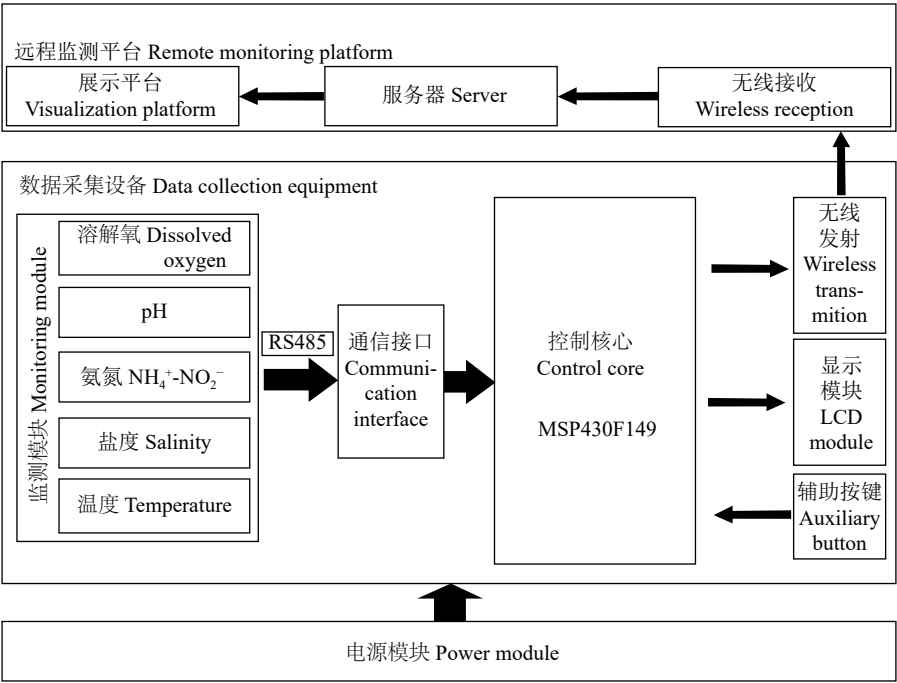


图 1 监测系统结构图
Fig. 1 Structure diagram of monitoring system

2 系统设计

2.1 主控单元

系统水质数据采集终端的控制核心采用 TI 公司具有 16 位总线的 MSP430F149 型微控制器^[8-10]。该芯片包括 60 kb 闪存、256 字节 FLASH、2 kb RAM，以及基本时钟模块、看门狗定时器、带 3 个捕获/比较寄存器和 PWM 输出的 16 位定时器、带 7 个捕获/比较寄存器和 PWM 输出的 16 位定时器、2 个具有中断功能的 8 位并行端口、4 个 8 位并行

端口、模拟比较器、12 位 A/D 转换器、2 个串行通信接口等模块。基本最小控制电路见图 2。

2.2 数据采集终端

通过查阅文献^[11-13]，本系统的水质数据采集采用了对水质温度、溶解氧、pH、盐度、氨氮 5 个关键因子进行监测的 4 个传感器，各传感器型号、量程及精度如表 1 所示。

以上 4 种传感器通过 RS485 总线传输采集的数据信号，以连接到采集设备控制核心进行数据的无线传输。图 3 为探测器实物图。

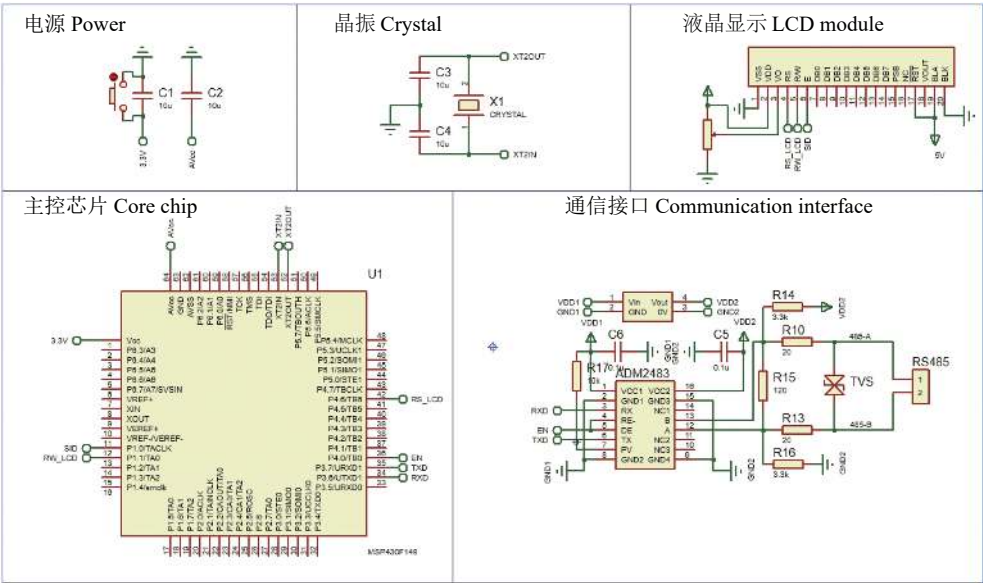


图 2 监测系统控制核心电路
Fig. 2 Control core circuit of monitoring system

表 1 数据采集传感器及相关参数

Table 1 Data acquisition sensors and related parameters

水质因子	型号	量程	精度
Water element	Model	Range	Accuracy
氨氮 NH ₄ ⁺ -NO ₂ ⁻	NHN-202A	0~10 mg·L ⁻¹	±0.2 mg·L ⁻¹
溶解氧	RDO-206	0~20 mg·L ⁻¹	±0.2 mg·L ⁻¹
Dissolved oxygen			
温度 Temperature	RDO-206	0~40 ℃	±0.5 ℃
pH	PHG-200	0~14	±0.01
盐度 Salinity	DDM-202I/C	0~0.5%	±0.007 5%



图 3 各探测传感器实物图

Fig. 3 Physical map of each detecting sensor

2.3 采集设备无线通信设计

具有代表性的无线通信方式主要包括长距离无线广域网代表技术 GPRS、NB-IOT^[14]、LoRa^[15]，短距离无线局域网代表技术 WiFi、Zigbee^[16]。表 2 对各技术从通信频段、传输距离、传输速度方面进行了综合对比。本系统采用 LoRa 无线通信方式进行采集端与汇聚节点间的数据传输。

表 2 无线通信技术对比分析

Table 2 Comparative analysis of wireless communication technology

无线技术	通信频段/Hz	传输距离/m	传输速度/bp·s ⁻¹
Wireless technology	Communication frequency	Transmission distance	Transmission speed
ZigBee	2 400 000 000	10~100	20 000~ 250 000
WiFi	2 450 000 000	300	11 000 000
GPRS	935 000 000~ 960 000 000	20 000	10 000~ 100 000
NB-IOT	800 000 000~ 2 100 000 000	10 000~ 20 000	100 000
LoRa	470 000 000~ 518 000 000	20 000	300~50 000



图 4 网关节点实物图

Fig. 4 Gateway node physical map

2.3.1 网关节点 LoRa 汇聚网关端采用 SX1301 数字基带芯片^[17]，该芯片具备对应 8 个频点的 8 个通道，每个通道支持 SF7 到 SF12 六种速率，LoRa Std 可以对 49 个 LoRa 信号解码，网关容量大，理论上可支持多达 10 000 个终端接入。结合 Mediatek (联发科) 的 MT7688AN 芯片进行数据处理构成汇聚网关。通过采取 LoRaWAN 协议标准实现网络协议转换。本系统网关节点保留了 GPRS 通信方式作为备选，网关节点实物图见图 4。

2.3.2 组网方式及数据格式 文中采用主机轮询方式组网，从机编号为 1、2、3、4、5、6、7、8、9，分别对应 9 个养殖水塘，主机根据从机地址不同分别访问各从机节点。各从机在接收到主机数据传输命令后，对应从机将数据打包开始数据传送。单一节点的数据接收完成后，主机以同样的轮询方式获取其他从机的待传输数据。

数据传输过程中，采用 MODBUS RTU 通信协议。报文传输格式如下。开始：T1-T2-T3-T4，4 位起始符；地址：8 bits，表示设备地址，即主站要访问的从站地址，范围为 0~247；功能：8 bits，表示功能代码占位，主要区分为“读”、“写”功能，即具体读取从站哪块区域的数据以及具体将数据写到从站的哪块区域，不同从站的数据区对应有不同的功能码；数据：N*8 bits，对所发送数据进行整 8 位的分配空间；校验：16 bits，2 个字节的差错校验，即 CRC 校验低位 8 bits，CRC 校验高位 8 bits；终止：T1-T2-T3-T4，4 位结束符。

2.3.3 数据发送与远程接收 监测终端数据的采集与发送。系统通过各传感器设备采集水质数据后，按照数据帧的格式传输到 LoRa 发送模块，LoRa 模块发送前一直处于待机状态，在初始化 Tx 模块后，将 FifoPtrAddr 设置为 FifoTxPtrBase，并把 PayloadLength 写入 FIFO(RegFifo)。然后方可将待发送数据 (Payload) 写入 FIFO，通过发送 Tx 模式请求切换到发送状态将数据通过 LoRa 调制成信号帧发送出去，等到发送完成后，会产生 TxDone 中断，同时再次切换为待机状态，完成一个发送流程^[18]。发送流程如图 5a 所示。

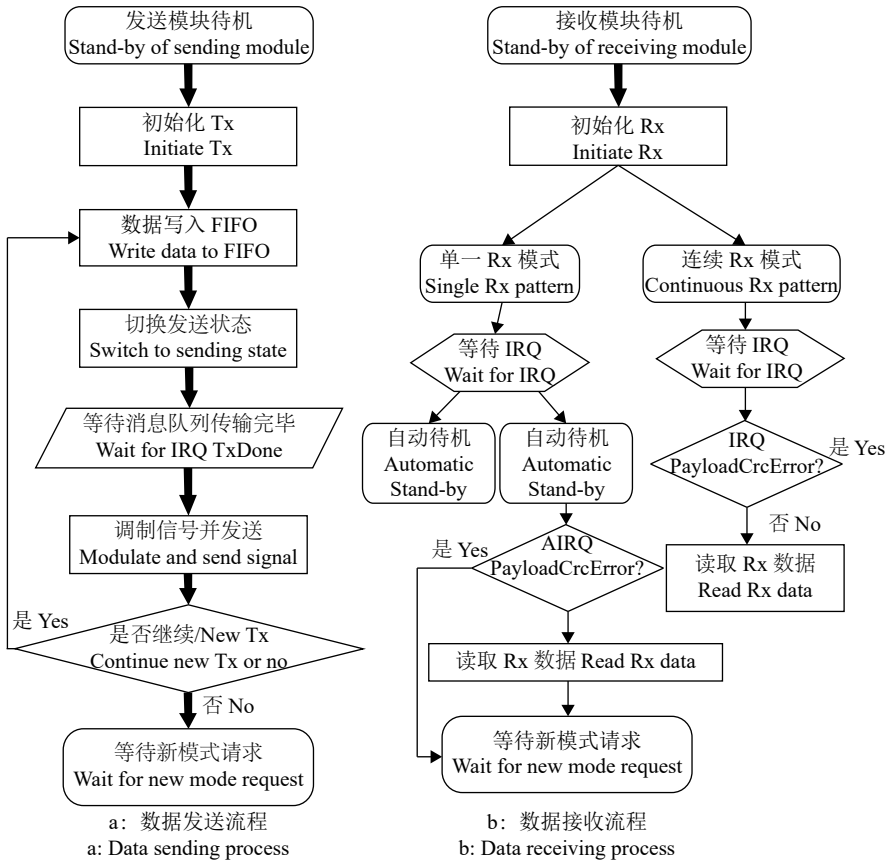


图 5 数据收发流程
Fig. 5 Data sending and receiving processes

远程无线接收端的数据接收。该监测系统采取连续接收模式，LoRa 调制解调器首先会持续地扫描信道搜索前导码，如果检测到，LoRa 会在收到数据之前对该前导码进行检测及跟踪，然后继续等待检测下一前导码。如果前导码长度超过 RegPreambleMsb 和 RegPreambleLsb 设定的预计值（按照符号周期测量），则前导码会被丢弃，并重新开始搜索前导码，但这种场景不会产生中断标志。与单一 Rx 模式相反，在连续 Rx 模式下，当产生 RxTimeout 中断时，设备不会进入待机模式，这时用户必须在设备继续等待有效前导码的同时直接清除中断信号。接下来开始数据包接收，在睡眠或待机模式下，选择 RxCOUNT 模式；在收到有效报头 Header 后，紧接着会产生 RxDone 中断。芯片一直处于 RxCOUNT 模式，等待下一个 LoRa 数据包；检查 PayloadCrcError 标志，以验证数据包的完整性。如果数据包被正确接受，则可以读取 FIFO；之后不断判断是否有新的数据包待接收。接收流程图如图 5b 所示。

2.4 服务器端设计

为满足系统远程监测需求，参考文献 [19-21] 开发了服务器端的监测平台。依据权限不同，平台提供 2 个进入系统的端口，用户登录时可以选择以普通用户或管理员身份登录。管理员可以进入系统

用户管理页面，功能包括已注册会员的增删改查等。普通用户直接进入数据可视化平台，实现对水体环境关键因素的实时监察。服务器端采用 Linux 系统搭建，通过 JetBrains 下的 IntelliJ IDEA 开发工具创建，编程语言为 Java。该线上平台采用 SpringMVC 框架，数据库连接通过 HiBernate 对象关系映射框架连接操作，通过 Tomcat 部署在 Linux 系统上。数据展示界面通过调用开源可视化库 Echarts 实现，其中包括对中国气象平台应用程序接口 (Application programming interface, API) 的调用，实现平台的天气预报功能。图 6 为服务器云平台的架构。

3 现场部署与系统试验

作为大面积水产养殖水质环境因素监测设备这一应用实例，为了进一步验证系统整体的实际应用效果，水质参数在线监测系统于 2019 年 5 月开始在杨进浜水产养殖基地部署进行水质环境因素监测，截至 2020 年 6 月已经正常完成了 13 个月有余的时间。图 7 为设备实际部署的位置情况。

3.1 系统整体运行测试

本文给出了 2019 年 10 月 4 日 13:00—16:00 对 1 号水塘水体水文数据的实际采集情况与误差

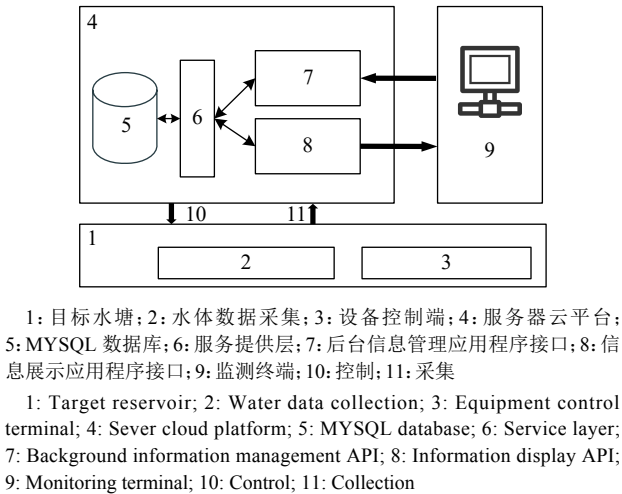


图 6 服务器云平台的架构

Fig. 6 Architecture of server cloud platform



1~5: 采集节点 1~5

1-5: Collection node 1-5

图 7 采集节点设备部署

Fig. 7 Collection node equipment deployment

分析。数据采集周期为 10 min, 监测时段内系统运行状态正常。图 8 为单一采集终端实物及电路封装图。

为分析本系统采集数据的精度, 采用 HANNA 公司研发的 HI98319 型电导 EC 法盐度测定仪、



a: 采集节点实物图

b: 电路封装

a: Physical map of collection node

b: Circuit package

图 8 单一采集终端实物图及电路封装

Fig. 8 Physical map of single acquisition end and circuit package

HI9146 型饱和和溶解氧测定仪、HI98121 型手持酸度 pH-氧化还原 ORP-温度测定仪分别测出水体的盐度、溶解氧、pH、温度 4 个要素, 与本系统设备实际所测数据进行误差分析。如图 9 所示, 在所测时段内, 水质数据采集系统实际所测水体溶解氧含量的绝对误差为 0.12 mg/L, 盐度的绝对误差为 0.001%, pH 的绝对误差为 0.017, 温度的绝对误差为 0.05 ℃。

3.2 系统线上平台的测试

根据实际需求, 本系统的监测平台如图 10 所示, 主要功能包括但不限于:

- 1) 对汇聚网关节点接收到的数据包进行数据合法性检验, 应答空中入网请求, 提取有效传感器数据信息传输到终端监测模块, 进行数据绘图处理。
- 2) 网络气象服务。实时校验系统与传输节点间时间, 并提供满足基地所处区域最近 7 天天气的监测端服务需求。
- 3) 终端监测功能。对数据获取模块经过校验后的

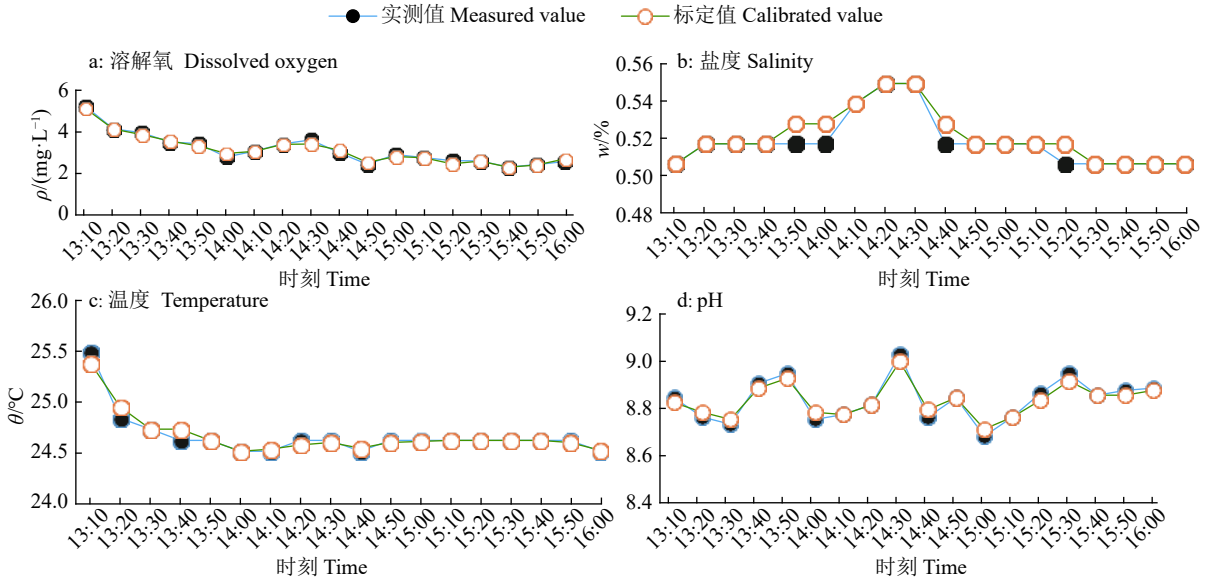


图 9 部分监测时段内各要素数据

Fig. 9 Element data during partial monitoring period

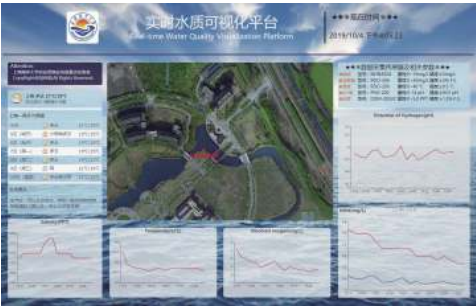


图 10 上位机端可视化平台

Fig. 10 Host computer side visualization platform

有效信息进行进一步处理并对当前水体溶解氧浓度、氨氮浓度、温度、pH、盐度 5 种环境因素进行实时显示。

另外，为测试采集设备用电情况，试验采用 5 200 mA 电池为设备供电，于 10 月 4 日 16:06 放置在水域，开始数据采集测试，设备于 10 月 5 日 20:37 左右电量耗尽而停止工作，持续工作约 28.5 h。

4 结论

本文针对水产养殖的环境因素动态变化，尤其是多种水体环境监测因素综合影响的特点，采用动态自检测技术方案，设计了一种基于 MSP430F149 微控制器的可同时采集水体溶解氧、盐度、pH、氨氮和温度 5 种参数数据的设备。设备通过 LoRa 无线通信技术与上位机端数据可视化平台相结合的设计，增强了远距离水质监测技术的可靠性，解决了动态实时测量中监测数据长距离传输问题及数据同步上位机端平台展示问题。

系统在杨进浜水产养殖基地应用中取得了良好的效果。系统实际所测水体溶解氧含量绝对误差为 0.12 mg/L，盐度的绝对误差为 0.001%，pH 的绝对误差为 0.017，温度的绝对误差为 0.05 ℃，可以达到实际水质监测应用中的需求。单一采集设备功耗测试中，5 200 mA 电池可持续为终端设备供电 28.5 h。

考虑到大面积养殖渔业环境监测的实际需求，为实现监测端长时间持续地工作，下一步将在现有研究的基础上为系统搭载太阳能供电系统，以避免频繁更换供电电源；另外需要在水产养殖中智能控制及通信距离与质量上进行更深层次的研究。

致谢：特此感谢上海海洋大学农业农村部渔业信息重点实验室提供的实验平台以及课题组指导老师们的帮助！

参考文献：

[1] 杨红生, 杨心愿, 林承刚, 等. 着力实现海洋牧场建设的理念、装备、技术、管理现代化[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(7): 732-738.

[2] 赵敏华, 李莉, 呼娜. 基于无线传感器网络的水质监测系统[J]. 计算机工程, 2014, 40(2): 92-96.

[3] 黄建清, 王卫星, 姜晟, 等. 基于无线传感器网络的水产

养殖水质监测系统开发与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 183-190.

[4] 李鑫星, 王聪, 田野, 等. 基于 ZigBee 的多参数水质在线监测系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊1): 168-173.

[5] 金光, 高子航, 江先亮, 等. 基于低功耗广域网的海岛水产养殖环境监测系统研制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 184-191.

[6] 林永君, 杨春来, 常喜茂, 等. 基于 GPRS 的远程监控系统的研究与实现[J]. 化工自动化及仪表, 2011, 38(11): 1367-1370.

[7] WANG Y, QI C, PAN H. Design of remote monitoring system for aquaculture cages based on 3G networks and ARM-Android embedded system[C]//GUO H. Procedia Engineering. Amsterdam: Elsevier Science, 2012, 29: 79-83.

[8] 柴秋子, 陈东晓, 余红, 等. 基于超低功耗单片机和光电传感器的蜜蜂计数监测系统[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 193-198.

[9] 李昕, 曲梦可, 荣誉. 基于 MSP430 单片机的模糊温湿度控制器的设计[J]. 传感技术学报, 2007, 20(4): 805-808.

[10] 丁云凤, 窦银科, 潘曜, 等. 基于 MSP430 南极冰盖冰雪监测站设计与应用[J]. 控制工程, 2018, 25(5): 746-751.

[11] 韩玉冰, 傅泽田, 张小栓, 等. 基于 WSN 的观赏鱼养殖水质环境监测系统研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊1): 392-400.

[12] FEI Z, LI B, YANG S, et al. A survey of multi-objective optimization in wireless sensor networks: Metrics, algorithms, and open problems[J]. IEEE Commun Surv Tut, 2017, 19(1): 550-586.

[13] DING Q, MA D, LI D, et al. Design and implementation of a sensors node oriented water quality monitoring in aquaculture[J]. Sensor Lett, 2010, 8(1): 70-74.

[14] 何灿隆, 沈明霞, 刘龙申, 等. 基于 NB-IoT 的温室温度智能调控系统设计与实现[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(2): 117-124.

[15] 张铮, 曹守启, 朱建平, 等. 面向大面积渔业环境监测的长距离低功耗 LoRa 传感器网络[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 164-171.

[16] WANG L, CHEN X, GU D. Design of water quality monitoring system for aquaculture based on ZigBee[J]. DEStech Trans Comput Sci Eng, 2017.

[17] 万雪芬, 崔剑, 杨义, 等. 地下 LoRa 无线传感器网络的传输测试系统研究[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(3): 118-124.

[18] 曹文熙, 孙兆华, 李彩, 等. 水质监测浮标数据采集和接收系统及其应用[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(5): 1-6.

[19] LEE M W, HONG S H, CHOI H, et al. Real-time remote monitoring of small-scaled biological wastewater treatment plants by a multivariate statistical process control and neural network-based software sensors[J]. Process Biochem, 2008, 43(10): 1107-1113.

[20] ZHU X, LI D, HE D, et al. A remote wireless system for water quality online monitoring in intensive fish culture[J]. Comput Electron Agr, 2010, 71(Sup 1): S3-S9.

[21] 蒋鹏. 基于无线传感器网络的湿地水环境远程实时监测系统关键技术研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(1): 183-186.