

基于LoRa的水质监测系统设计

吴章浩, 孙玉国*

上海理工大学, 光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2021年12月21日; 录用日期: 2022年2月3日; 发布日期: 2022年2月10日

摘要

本文提出一种基于低功耗广域网LoRa无线网络技术的物联网水质监测系统。以STM32F103ZET6作为水质采集终端的主控制器, SX1278芯片作为通信模块, 构建星型拓扑网络架构, 实现了多节点水体温度、pH值与总溶解固体量(TDS)等水质参数的远程采集。LoRa网关通过TCP/IP协议将水质数据传输到服务器的MySQL数据库, 采用Grafana实时监测数据库各节点水质参数。

关键词

水质监测, LoRa, IoT

Design of Water Quality Monitoring System Based on LoRa

Zhanghao Wu, Yuguo Sun*

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 21st, 2021; accepted: Feb. 3rd, 2022; published: Feb. 10th, 2022

Abstract

In this paper, an IoT water quality monitoring system based on low-power WIDE LoRa wireless network technology is proposed. The STM32F103ZET6 as the main controller of the water quality collection terminal and the SX1278 chip as the communication module, the star topology network architecture is constructed, which realizes the remote collection of water quality parameters such as multi-node water temperature, pH value and total dissolved solids (TDS). The LoRa gateway

*通讯作者。

transmits water quality data to the server's MySQL database through TCP/IP protocol. The system uses Grafana to monitor the water quality parameters of each node in the database in real time.

Keywords

Water Quality Monitoring, LoRa, IoT

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国人口众多,我国的人均水资源只有 2100 立方米,仅为世界人均水平的 28%,全国年平均缺水量 500 多亿立方米。除了缺水,水污染问题也比较突出,大量的生活废水和工业废水直接排入河流中,如果不及时采取相关措施,将会威胁到人们的健康和生态环境,目前我国的水质监测主要采用人员手工取水实验监测,劳动强度大,实时性差。难以对污水排放进行实时的监测和控制,造成下游水质污染,危害生态文明。针对上述问题,学者们提出了将无线通信与物联网技术应用于水质监测领域,实现水质的远程在线监测,目前水质监测主要采用 ZigBee 和 GPRS 技术[1]。2019 年张娜提出一种通过 ZigBee 无线传输技术,将水质参数传输到主机的设计[2]。2020 年顾涵提出了以 CC2630 为控制芯片,构建 ZigBee 组网,数据经 GPRS 网络传输到上位机的水质监测系统[3]。2021 年李秋慧等提出了基于 GPRS DTU 移动通信的远程水质监控船,将水质参数和位置实时传输给上位机,监测水域广,减少人力物力[4]。ZigBee 传输距离为 10~100 m,无法满足大区域监测要求,若通过增加路由节点增加 ZigBee 通信距离,会增加设备的功耗,且实时性和可靠性都会降低。GPRS 通信是按照流量计费,通讯成本高,设备功耗较大。

LoRa 是基于频率较低的 Sub-GHz 以下频段开发的低功耗广域网通信技术,具有远距离、低功耗、低复杂度等特点,在空旷视距的最大传输距离可达 15 km [5]。通过应用 LoRa 技术,可以解决目前水质监测数据传输覆盖半径不足、通信成本高以及功耗高等问题。本文提出了一种基于 LoRa 无线通信和多传感器融合技术的监测系统。系统通过多传感器对水质温度、PH 值及(TDS)进行数据采集,网关轮询唤醒 SX1278 LoRa 模块,接收到 LoRa 模块发送的数据帧。网关通过 4G 网络向指定服务器端口发送数据帧,服务器将数据帧进行解码,根据终端节点 ID 将多传感器采集的数据存入对应的数据库中。Grafana 实时监控本地数据库中终端采集数据,设定预报警度量标准,实现自动报警等功能。水质工作人员可进行水质数据查询与分析,以保证水治理的成效。

2. 水质监测系统总体设计

基于 LoRa 无线传输技术的水质监测系统主要由监测节点集群、服务器和监控端 3 部分组成。系统整体结构如图 1 所示。水质监测节点集群只要由水质采集终端和网关构成。水质采集终端主要包括水质温度、pH 和 TDS 传感器和 SX1278 LoRa 模块,通过 LoRa 模块将传感器采集的数据定时发送到网关。网关是星型拓扑网络架构[6]的中心,将多个水质采集终端上传的数据打包发送给服务器。服务器主要负责对网关进行管理,处理网关上传的数据,将处理后的数据按照监测终端 ID 存入对应数据库中。用户通过本地电脑登录监控端,通过 Grafana 软件对水质数据进行实时监控,评估水质状态。对可能出现重大污染情况进行预警和应急评估。

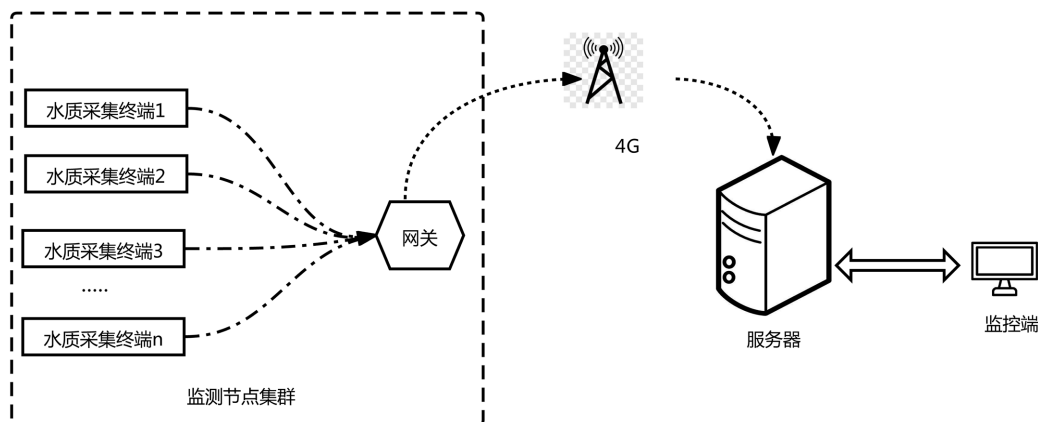


Figure 1. Overall system architecture
图 1. 系统整体架构

3. 水质监测终端节点硬件设计

水质采集终端硬件如图 2 所示, 采集终端节点由主控单元、传感器模块、LoRa 射频模块和电源模块组成。其中微控制器采用 STM32F103ZET6, 其在 1.8 V 内核电源关闭的待机模式只有 2.1 μA 的电流, 满足该系统低功耗的设计方案[7]。整个采集终端的能量消耗主要取决于系统的工作周期, 周期内完成传感器数据的采集, 微控制器的处理和射频模块发送数据[8]。硬件设计过程中主要对射频模块采取轮询唤醒的工作模式, 节省采集终端的能量损耗。

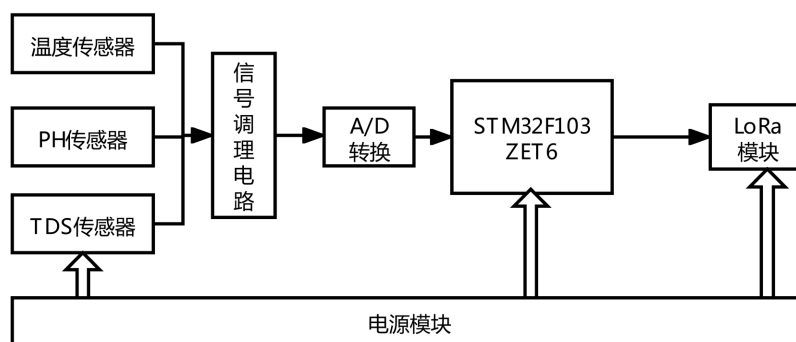


Figure 2. Diagram of the terminal hardware structure diagram
图 2. 采集终端硬件结构示意图

3.1. 微控制器模块

微控制器使用 STM32F103ZET6, 该芯片采用 Cortex-M3 内核, CPU 最高速度达 72 MHz。该产品系列具有 16 KB~1 MB Flash、多种控制外设、USB 全速接口和 CAN [9]。其在 1.8 V 内核电源关闭的待机模式只有 2.1 μA 的电流, 满足该系统低功耗的设计方案。利用芯片强大的存储和计算能力, 设置 PA6、PA7、PA8 并发对水质传感器进行 A/D 采集, 计算出水质 PH 值、温度和 TDS 值, 将数据打包后通过串口发送至射频模块。

3.2. 传感器模块

传感器模块主要包括传感器和信号调理电路, 在实际的应用过程中, 根据传感器的使用环境、成本、可靠性和功耗等技术因素进行选型。本系统中目前主要接入温度、pH 和 TDS 三种传感器。

本系统选用美信公司的 DS18B20 热电阻温度传感器, 具有体积小, 精度高和硬件开销小的特点, 系统中选用不锈钢封装的防水性对水体温度进行测量。

pH 传感器采用上海雷磁公司的 E-201-C 型 PH 复合电极, PH 检测范围为 0~14, 测量精度高且稳定性强。复合电极是将 PH 指示电极和参比电极组合在一起, 通过电极电动势随氢离子活跃度变化而发生变化偏移来输出毫伏(mV)级的电压信号, 选用精密双路运算放大器 TLC4502 芯片, 将 PH 电极毫伏级电压放大 3 倍, 转化为 0~3.3 V 输出电压, 以达到微控制器 A/D 采集的电压。

系统选用 MW-TDS110 在线式水质 TDS 检测传感器, 可用于检测水中总溶解性固体(TDS)的含量, 以判断水的洁净或污染程度。TDS 的测量单位为 mg/L, 它表示 1 L 水中溶解有多少 mg 溶解性固体, TDS 值越高, 表示水中含有的溶解物越多。

三种水质传感器选型及详细参数见表 1 所示。

Table 1. Terminal sensors
表 1. 采集终端传感器

监控指标	传感器型号	量程	精度
温度	DS18B20	-55~+125℃	±0.5℃
pH	E-201-C	0.0~14.0 pH	±0.01 Ph (25℃)
TDS	MW-TDS110	0.0~1000.0 ppm	±0.5 F.S. (25℃)

3.3. LoRa 模块

LoRa 模块电路原理图如图 3 所示, 通信模块芯片选取 Semtech 公司开发的 SX1278 射频芯片, SX1278 采用 LoRa®长距离调制解调器, 可提供超长距离扩频通信和高抗干扰能力, 同时最大限度地降低电流消耗。SX1278 实现了超过-148 dBm 的高灵敏度, 发射功率最大可达+20 dBm。在同等的发射功率下低频的传输距离更远, 覆盖范围更大, 可以弥补 WiFi、蓝牙、ZigBee 等低功耗局域网技术的不足。与微在使用 LoRa 模块时, 可利用 AT 指令配置 LoRa 模块的基本参数, 设置其工作频率为 470 MHz, 微控制器通过 UART 接口与 LoRa 模块进行数据传输。

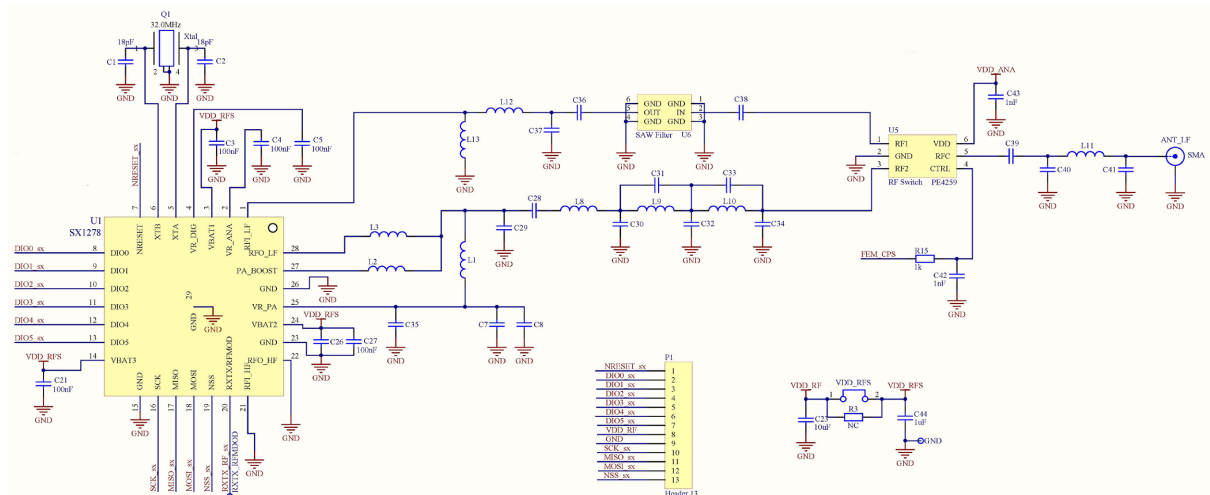


Figure 3. Schematic diagram of the LoRa module
图 3. LoRa 模块原理图

3.4. 电源模块

考虑到水质采集终端工作在室外环境下, 电源模块采用 YISENNENG 公司的 44,800 mAh 的磷酸铁锂电池供电。该电池有 24 V、12 V、5 V 三种输出电压, 将锂电池电压通过 LT1129-3.3 降压电路转换为 3.3 V, 为处理器模块和无线通信模块供电。电源模块电路如图 4 所示。

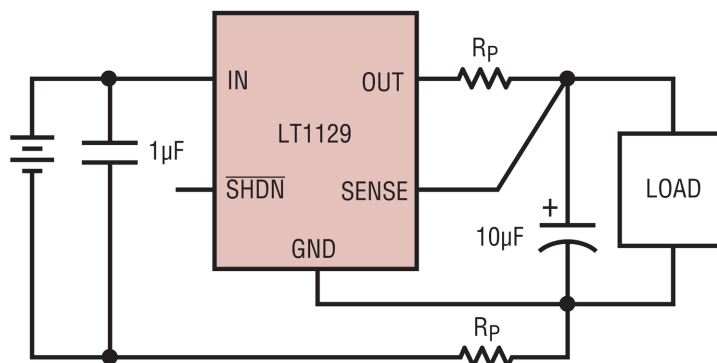


Figure 4. Buck circuit
图 4. 降压电路

4. 系统软件设计

系统软件设计包括水质采集终端软件、LoRa 传输层软件和服务器应用层软件设计。

4.1. 水质采集终端软件设计

采集终端启动后完成系统外设初始化预检, 之后整个系统进入到低功耗休眠模式, 内核时钟停止, 处理器内核自身, 存储器系统, 有关控制器及内部总线停止工作[10], 这些器件的动态功耗会降低, 只要出现任何使能的中断, CPU 内核就会从睡眠模式中唤醒。设置 PA0 管脚上升沿信号触发外部中断。当 PA0 管脚接收到 LoRa 模块 AUX 引脚拉低 5 ms 后拉高的上升沿信号, 触发 MCU 的外部中断, 采集终端重新启动完成数据的采集和发送, 然后再次进入休眠模式, 等待 AUX 引脚上升沿信号再次触发中断。

4.2. LoRa 传输层软件设计

LoRa 模块将采集终端采集的数据发送到网关, 网关通过 TCP/IP 协议将数据帧发送到服务器固定端口, 服务器对收到的数据进行解析, 数据帧中要包括网关和采集终端信息帧和水质数据帧。采集终端与网关数据帧格式如表 2 所示。网关上传至服务器数据帧如表 3 所示。

Table 2. Data frame formats of terminal and gateway

表 2. 采集终端与网关数据帧格式

定义	网关 ID	采集终端 ID	数据长度	有效数据
字节数	4 字节	4 字节	1 字节	17 字节

Table 3. Data format of Gateway-to-server

表 3. 网关与服务器通信数据格式

定义	版本	网关 ID	节点 ID	时间戳	在线情况	入网总数	数据长度	数据
字节数	1 字节	4 字节	4 字节	4 字节	1 字节	2 字节	2 字节	17 字节

网关启动后进入初始化, 通过 TCP/IP 协议与服务器建立连接。连接建立后, 设置网关的工作模式为轮询唤醒模式, 在此模式下设置 10 条唤醒数据, 网关向 LoRa 模块节点周期性的发送唤醒数据, 当一条数据轮询完所有节点后会更换第二条轮询数据, 等到下一个轮询周期再次重复轮询终端节点。唤醒周期为 55 S, 轮询超时时间设置为 5 S, 轮询间隔为 30 min。网关与 LoRa 模块连接成功后, 网关以 1 min 为周期, 发送唤醒数据至 LoRa 模块, 轮询唤醒各个采集终端多通道并行采集和上传水质数据。网关收集数据后, 将整个数据帧重新打包上传至服务器固定端口号。网关以 40 min 为周期, 发送唤醒数据到 LoRa 模块, 轮询唤醒每个水质采集终端 10 次。轮询结束后, 水质采集终端进入休眠状态 30 min, 等待网关再次唤醒水质采集终端。网关工作流程如图 5 所示。

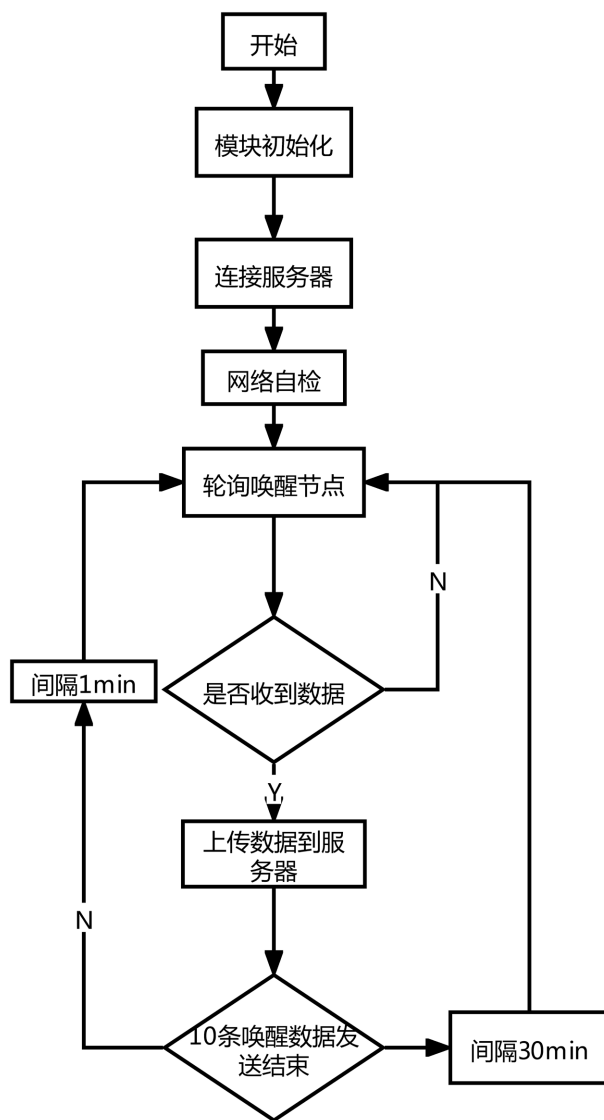


Figure 5. Gateway workflows

图 5. 网关工作流程

4.3. 服务器应用层软件设计

本系统中基于实际的应用场景, 在服务器一键部署 SpringBoot 后台程序, 安装数据库软件 MySQL

和监控软件 Grafana。服务器程序主要用于后台程序自处理, 包括 Socket 网络通信、MyBatis 与数据库 MySQL 的连接、端口上传数据的处理与存储、前端界面的加载等。服务器负责将各终端采集的数据存到各自对应的数据库中, 用户可以通过 Grafana 实时监测终端水质参数变化情况, 也可以对关键参数设置判断条件, 当水质变化超出阈值条件, 触发邮箱或短信报警, 工作人员及时做出应对。

服务器与网关建立连接后, 实时接收网关上传的数据, 同时完成数据包的解析, 首先判断数据帧长度是否大于 18 个字节, 若小于 18 个字节, 判断为网关上传的测试数据帧, 丢弃当前数据帧。根据数据帧格式, 验证数据帧的有效性, 命令字字段可明确节点是否处于正常工作状态, 如处在非正常工作状态, 丢弃当前数据帧。当数据帧完整且有效时, 开始解析数据帧, 根据上传数据帧中节点的 ID 确定相对应的数据库, 再将时间和水质的参数存入相对应的数据库中。网关上传数据包处理流程如图 6 所示。

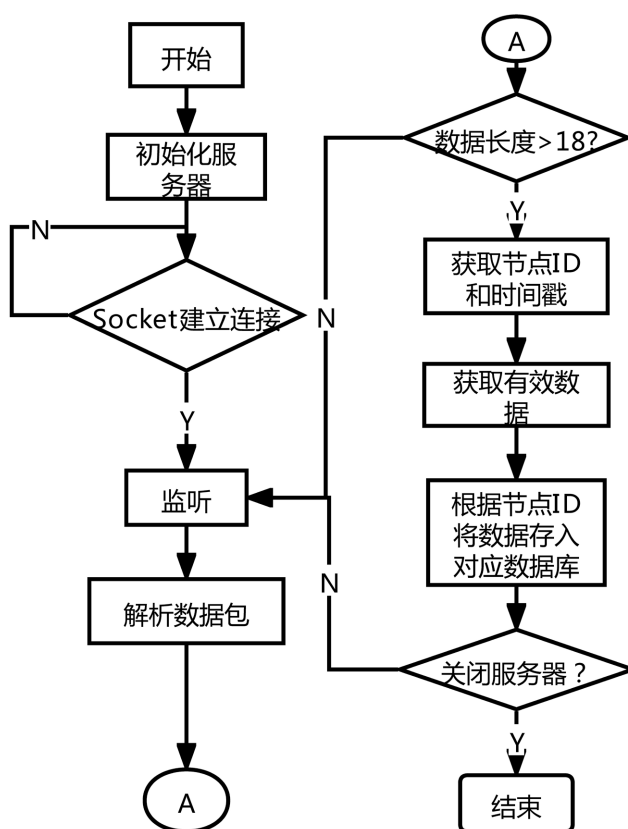


Figure 6. Server data processing
图 6. 服务器数据处理

5. 实验结果与分析

5.1. 室内多节点测试

在室内搭建简易实验平台如图 7 所示, 实现 1 号节点 Liquid 水质监测, 通过串口调试助手模拟 2 号节点 Liquid 水质监测。当整个系统建立连接后, 网关通过 WiFi 将数据传输到服务器的指定端口, 应用层程序将 2 个节点水质参数分别存入相应的数据库。然后在 Grafana 中观察到水质参数各项指标的变化曲线。

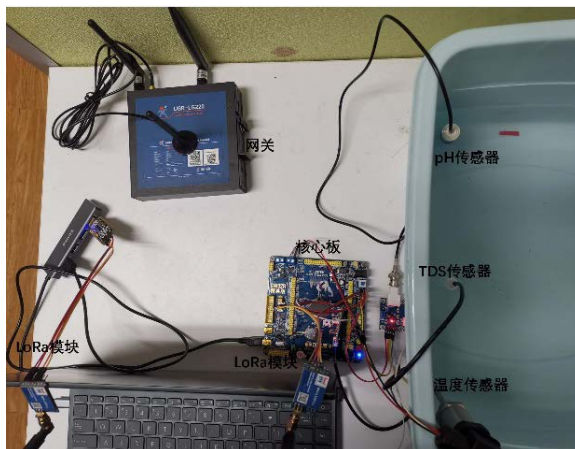


Figure 7. Indoor experimental platform for water quality monitoring
图 7. 水质监测室内实验平台

Grafana 中具体 1 号节点监控效果如图 8 所示。

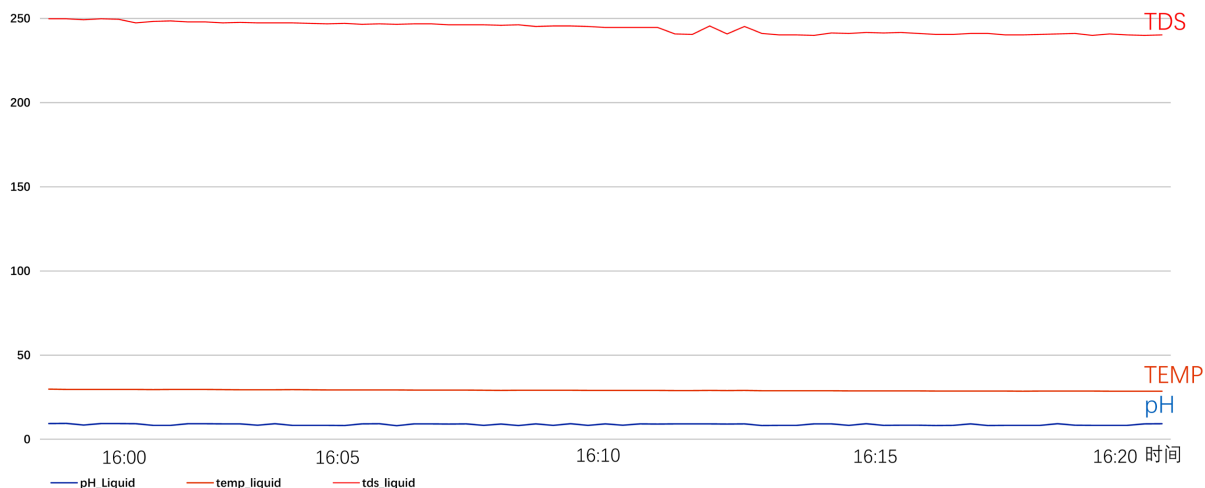


Figure 8. Water quality parameters of node 1
图 8. 1 号节点的水质参数

当系统中出现监控规则之外的数据时, Grafana 会向指定邮箱发送报警信息, 提醒用户节点水质发生异常, 如图 9 所示。

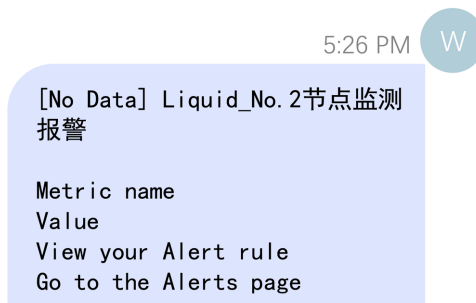


Figure 9. Function of email alarm
图 9. 邮件报警功能

5.2. 室外远距离通信测试

测试环境如图 10 所示, 将水质监测终端节点放置在室外测试环境中, 节点距离网关 2.5 km, 终端将水质参数发送到网关, 网关通过 4G 将数据发送到阿里云服务器, 水质采集终端在周期内完成数据的采集和上传后, 进入 30 min 的休眠状态节省能源, 等待网关唤醒 LoRa 模块继续完成周期性任务, 在云端上通过监测软件 Grafana 可以清楚的看到水质的变化, 如图 11 所示。



Figure 10. Outdoor pool experiments

图 10. 室外水池实验

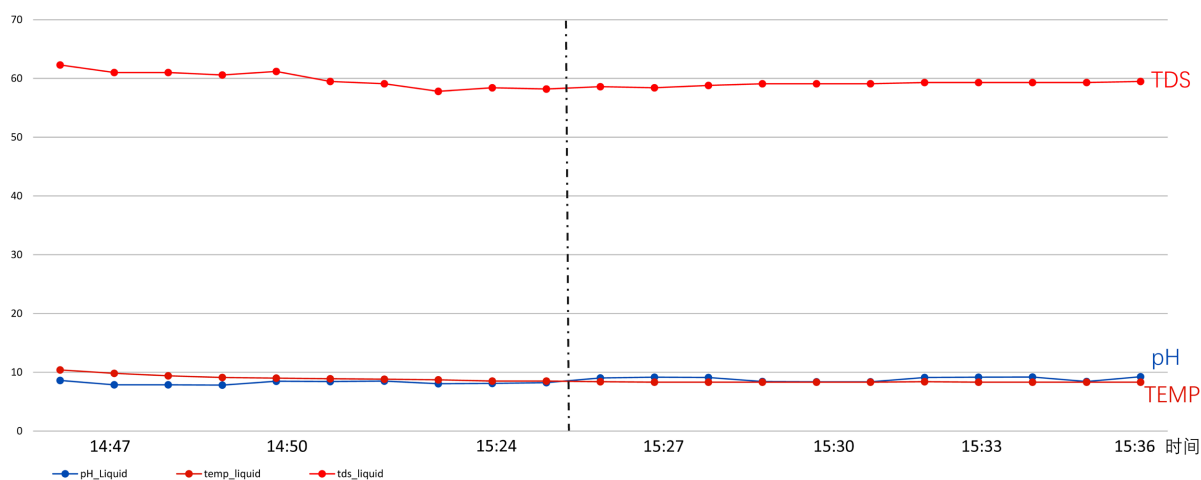


Figure 11. Water quality parameters

图 11. 水质参数变化

6. 总结

本文将低功率广域网 LoRa 技术应用在远程水质监测系统中, 结合多传感器技术、计算机技术和通信技术, 实现了智能、实时、在线水质监测。通过多传感器对水质中温度、pH、TDS 等参数进行周期性、准确、快速的采集, 将采集到的数据通过水质终端 LoRa 模块并上传给远端网关, 网关利用 TCP/IP 通信协议和服务器进行数据通信, 建立了数据库进行数据管理与分析。不仅为环保部门提供合理的水质监测方案, 而且实现了无线智能化和网络化的需求。

参考文献

- [1] Jiao, D.L. and Luo, X. (2018) Water Quality Monitoring System Based on LoRa. *International Conference on Information, Electronic and Communication Engineering (IECE2018)*, Beijing, 28-29 October 2018, 52-57.
- [2] 张娜, 杨永辉. 基于物联网的水质监测系统设计与实现[J]. 现代电子技术, 2019, 42(24): 38-41+45.
- [3] 顾涵, 潘启勇, 张惠国, 夏金威. 一种基于 CC2630 水质监测系统的设计与实现[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(10): 68-72+82.
- [4] 李秋慧, 李洁, 王传敏, 孙洋. 基于 GPRS DTU 的远程可控水质监测船[J]. 电子技术与软件工程, 2021(5): 94-96.
- [5] 胡颖, 徐轶群. 基于窄带物联网通信的海洋水质监测系统设计与实现[J]. 广州航海学院学报, 2021, 29(2): 14-19.
- [6] 赵静, 苏光添. LoRa 无线网络技术分析[J]. 移动通信, 2016, 40(21): 50-57.
- [7] 周斌. 基于物联网技术的水质监测系统设计与实现[J]. 智能城市, 2021, 7(20): 7-8.
- [8] 唐博, 李密生, 李警波, 吴菲. 基于多传感器的牙鲆鱼养殖远程水质监测系统[J]. 河北渔业, 2020(7): 38-40+62.
- [9] 陈玥, 王海峰, 贾建鑫, 康凯. 基于海量异构传感器的物联网水质监测系统[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(5): 1-8+37.
- [10] 郑浩. LoRa 技术在低功耗广域网络中的实现和应用[J]. 信息通信技术, 2017, 11(1): 19-26.