

A Wireless Multi-Parameter Soil Monitoring System Based on STM32

Yuhe Shi

Guangxi Agricultural Engineering Vocational Technical College, Chongzuo, Guangxi, 532100, China

Abstract

Addressing the prominent issues of traditional agricultural soil parameter monitoring systems, such as complex wiring, limited coverage, and high risk of failure, this paper proposes a wireless multi-parameter soil monitoring system solution based on STM32. The system is built on a distributed communication network using LoRa wireless communication technology, employing a multi-hop relay transmission mechanism. It consists of two components: monitoring nodes and a gateway. Wireless transmission utilizes a combination of adaptive routing algorithms and data transmission relay mechanisms, forming a distributed network architecture that enhances data transmission reliability and coverage. The system enables real-time collection and high-reliability wireless transmission of four parameters: soil moisture, temperature, pH value, and conductivity. This solution offers advantages such as reliable communication, flexible deployment, and low power consumption, providing high-reliability data support for agricultural soil monitoring and management.

Keywords

STM32; LoRa; multi-hop relay; adaptive routing; distributed networking

基于 STM32 的土壤多参数无线监测系统

石宇禾

广西农业工程职业技术学院, 中国·广西 崇左 532100

摘要

针对传统农田土壤参数监测系统布线复杂、覆盖范围小及故障风险高等突出问题,本文提出了一种基于STM32的土壤多参数无线监测系统方案。系统基于LoRa无线通信技术构建分布式通信网络,通过多跳中继传输机制,系统由监测节点和网关两部分组成,无线传输采用自适应路由算法和数据传输中继相结合机制,形成了分布式网络架构,提升了数据传输的可靠性与覆盖范围。实现了对土壤湿度、温度、pH值、电导率等四项参数的实时采集和高可靠无线传输。本方案具有通信可靠、部署灵活、功耗低等优势,为农业土壤监测与管理提供了高可靠的数据支撑。

关键词

STM32; LoRa; 多跳中继; 自适应路由; 分布式组网

1 引言

农业现代化对数字化、智能化、精准化、高可靠的农田土壤监测提出了高要求。但是,传统主机式无线或有线架构的土壤监测系统仍然存在扩展性差、成本高、覆盖范围小等问题。同时也存在少数网关故障即可导致区域内监测节点失效这一突出问题。为解决传统监测方案的痛点,本研究设计了基于STM32的土壤多参数无线监测系统。本系统的核心在于利用LoRa低功耗、长距离通信技术结合分布式组网^[1-2],构建自组网自愈网络。采用无线多跳中继与自适应路由机制,克服了传统方案在可靠性、覆盖范围、能耗方面的痛点,为农田土壤参数监测提供了技术新方案。

【作者简介】石宇禾(1996-),女,壮族,中国广西人,本科,助理工程师,从事信息技术、自动化研究。

2 系统总体设计

2.1 系统架构

本系统由监测节点层、网关层与云平台层构成。其中,监测节点层部署于监测区域,负责土壤温度、湿度、电导率(EC)和pH值的高精度采集、本地预处理及存储,并集成LoRa模块,支持与网关或邻近节点直接通信及多跳中继转发。网关层作为区域数据枢纽,汇聚节点层数据,进行协议转换,并通过4G/5G网络上传至云平台,同时转发云平台指令至目标节点。云平台层提供数据存储、分析处理、可视化展示、设备管理及异常预警功能。

监测节点首先按预设周期唤醒并采集土壤参数。随后评估最优网关链路质量(基于RSSI),若信号良好,则直连,若直连失败或信号弱,节点将请求中继,邻居节点收到请求后检查目标ID与跳数,若非目标且跳数不大于3,则更新

跳数并转发该数据包。网关则负责汇聚接收到的数据，封装后经 4G/5G 网络上传至云平台。

2.2 系统核心功能

系统实现土壤多参数感知、LoRa 分布式自组网、智能路由与网络自愈、低功耗、远程可视化几大核心功能。

监测节点集成专用土壤传感器探头，测量土壤温度、湿度、电导率 (EC) 和 pH 值。探头输出模拟信号经 STM32 内置 ADC 采集转换。通过校正与数字滤波算法保障数据精度及可靠性。基于 LoRa 技术构建节点层网络，工作于免许可频段 (如 470MHz)。支持扩频因子与带宽自适应调整，采用唯一 ID 标识节点与网关，构建支持多跳中继的去中心化网络。节点实时监测邻近网关及邻居节点链路状态 (基于 RSSI 与丢包率)，动态选择最优传输路径 (直连或中继)。当直连不可达时，通过邻居节点进行多跳中继。系统具备故障检测与快速路径切换、拓扑重构自愈能力。而主控 STM32 交互空隙处于深度休眠，按周期唤醒执行任务，传感器与 LoRa 模块分时供电，通信间隙 LoRa 深度休眠。数据最终实现远程可视化管理。

3 硬件设计

系统硬件由分布式监测节点和网关构成，注重硬件可靠性设计。

3.1 监测节点设计

监测节点硬件架构核心模块包括 STM32L 系列 MCU，满足数据处理与低功耗需求。集成一体化防腐土壤探头，负责测量温度、湿度、EC、pH 值，输出模拟信号供主控 ADC 采集。LoRa 用 SX1276 芯片，实现长距离、低功耗无线通信。最后，电源采用锂电池和太阳能结合，搭配高效超低静态电流降压 DC-DC 转换器，确保休眠时整机维持低功耗状态。

3.2 网关设计

网关硬件架构核心模块包括：主控模块采用低功耗系列的 STM32L 系列 MCU，处理多路数据与协议栈。通信模块 LoRa 模块 SX1276 (网关模式，支持多信道监听)^[1] 和 4G 模块移远 EC20 LTE Cat4 模块 (支持 TCP/IP, PPP)。存储模块则配备 SD 卡槽，用于网络异常时数据缓存。电源模块则由太阳能 + 锂电池混合供电。

4 软件设计

系统基于 FreeRTOS 实时操作系统构建模块化多任务架构。

4.1 监测节点软件设计

核心任务流程有传感器采集按周期唤醒，初始化并读取土壤传感器数据 (ADC 采集模拟信号)。执行预处理 (滤波、

校正、单位转换)，存储数据并触发后续任务。数据处理任务负责提取数据，封装为结构化帧。对敏感信息进行加密，计算校验码，压入发送队列。无线通信任务在路由决策阶段，系统查询邻居表，若最优网关的 RSSI > -110dBm，则采用直连发送，否则广播中继请求。在数据转发环节，当接收到非目标数据包时，系统会校验其跳数是否小于 3，且本监测节点到目标网关的 RSSI > -100dBm，若满足条件则执行随机退避 (0-100ms) 后进行转发。此外，系统应用速率自适应 (ADR) 机制，根据网关反馈的信噪比 (SNR) 动态切换扩频因子 (SF7-SF12) 与带宽。电源管理采用模式切换策略，在任务间隙切入睡眠模式，通过控制各传感器、接口模块的供电，仅在需要时上电，定期 ADC 采样电池电压，触发低电量预警。

4.2 网关软件设计

网关软件基于 FreeRTOS 实时操作系统构建多任务架构，核心包括 LoRa 数据汇聚、4G/5G 远程通信、数据处理及容灾存储四大模块。LoRa 配置为多信道监听，接收并校验节点数据包，对需确认的数据发送 ACK，最终数据存入接收队列。数据处理任务负责解析数据包，提取节点 ID、传感器数据、状态信息等，转换为云平台兼容格式，同时响应云平台下发的指令。4G/5G 负责建立与云平台连接，可靠传输数据及指令，实现断线重连和失败重传机制。而本地存储任务则在网络异常时缓存数据至本地存储，网络恢复后优先上传，并定期清理时间超限的数据，优化存储机制。

5 通信协议与组网策略

5.1 LoRa 通信协议栈设计

系统设计轻量级专用协议栈，包含物理层、数据链路层和应用层。物理层工作于免许可频段，支持关键参数 (扩频因子 SF、带宽 BW) 自适应调整，发射功率可调。数据链路层 (MAC 层) 采用 TDMA 与 CSMA/CA 混合机制^[4]。网关周期性广播信标帧进行同步和时隙分配。节点在分配时隙或退避后发送数据。支持 ACK 确认。网关定期或按需广播路由更新帧。通用帧格式如表 1 所示。应用层协议定义紧凑功能码消息类型，主要消息类型及其功能如表 2 所示。

5.2 分布式组网策略

采用邻居发现机制，首先节点上电或周期性广播请求，邻居节点 / 网关回复通告信息，节点据此维护并定期更新邻居表信息。邻居表如表 3 所示。自适应路由算法机制为当节点发送数据时优先选择信号良好且跳数为 0 的网关直连。否则，选择链路质量良好且到网关跳数最小的邻居中继。若无合适路径，则广播请求中继，数据包携带路径记录。数据转发策略为当中继节点对符合条件的非目标数据包，查询路由信息确定下一跳，更新路径记录，加入随机延迟后转发。

表 1 LoRa 数据链路层通用帧格式

字段	Byte len	说明
帧控制	1	数据 00/ 控制 01/ 管理 10、ACK
序列号	1	发送方维护的递增计数器
源地址	2	发送监测节点 ID
目的地址	2	接收监测节点 ID
负载长度	1	负载数据长度 (0-255)
负载	变长	加密数据
FCS	2	帧校验序列 (CRC16)

表 2 应用层主要消息类型及功能

消息类型	值	方向	功能描述
土壤数据	1	节点→网关	携带土壤参数数据
配置请求	2	网关→节点	查询或修改节点参数
配置响应	3	节点→网关	回复成功 / 失败 / 当前值
路由更新	4	网关→节点	广播 / 单播更新路由信息
心跳	5	节点→网关	携带电池和 RSSI 信息
报警	6	节点→网关	主动上报阈值超限报警
ACK 确认	7	双向	针对可靠传输的消息

表 3 邻居表

字段	Byte len	说明
邻居节点 ID	2 字节	邻居的唯一标识
节点类型	1 字节	普通监测节点 / 网关
RSSI	1 字节	接收该邻居信号强度
最小跳数	1 字节	该邻居到最近网关的跳数
时间戳	4 字节	最后通信时间戳 (秒)
链路质量	1 字节	综合 RSSI、丢包率 (0-100)

5.3 网络容错与自愈机制

为应对各种故障，系统设计多重容错策略，监测节点若连续 5 次（可配置）发送给某网关的数据未收到 ACK，则标记网关失效，立即更新邻居表，并切换到使用其他网关

或通过中继路径通信。网关长时间未收到节点信息，则标记疑似失效并尝试查询，无响应则判定失效，更新路由并通知其他监测节点绕行。同时对重要数据（报警、配置、需 ACK 数据），未收到 ACK 时启动有限次重传（带退避）。当检测到网关故障或大面积节点失联时，可触发路由重建过程（网关广播请求或节点发起请求），网络通过重新执行邻居发现和路由计算，在较短时间内恢复通信。

6 结语

本文提出的基于 STM32 的土壤多参数无线监测系统方案，采用专用协议栈与分布式架构构建了去中心化的多跳自组织无线通信机制，解决了传统方案在可靠性、覆盖范围、能耗方面的痛点。方案创新点在于基于邻居发现机制与链路质量评估的自适应路由算法、多跳中继机制及多重容错自愈机制，大大提升了复杂农田环境下的通信覆盖能力与可靠性。超低功耗管理机制保障了长续航的用电保障。实测表明，系统支持大面积复杂农田环境下的土壤电导率、温度、湿度、pH 值等参数的实时采集与可靠传输，端到端数据投递率高，系统自愈能力强，为精准农业的施肥灌溉、土壤墒情监管及预警提供了低功耗、广覆盖、高可靠的技术支持。后续研究将聚焦于无线分布式通信算法及边缘算力的增强。

参考文献

- [1] 段光阳. 分布式自组网无线终端设计与实现[D]. 东北电力大学, 2021. DOI: 10.27008/d.cnki.gdbdc.2021.000266.
- [2] 林辰阳. 无线自组网分布式多信道动态接入关键技术与验证[D]. 电子科技大学, 2024. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2024.001610.
- [3] 李良昊. 多信道 LoRa 无线监测系统同步组网方法研究[D]. 武汉理工大学, 2022. DOI: 10.27381/d.cnki.gwlg.2022.000848.
- [4] 崔佳琦, 杨剑锋, 徐俊, 等. CSMA/CA 在 CSMA/TDMA 混合网络中的性能分析[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(20): 83-88+127.