

基于 ZigBee 和 TCP/IP 的盐碱地田间监控系统研究

汪凤珠 赵 博 王 辉 刘阳春 李 阳 王丽丽

(中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 为实现现代信息技术在盐碱地良性管理领域的技术应用,解决当前盐碱地管理中缺乏监测数据、无法有效进行改良效果评估的问题,设计了田间智能化信息化采集与控制系统,实现了暗管水质信息监测、田间气候监测、病虫害监测、作物长势监测和自动灌溉控制,构建了用于田间数据传输的 ZigBee 无线传感器网络,并依据山东东营农业高新技术园区的区域特点,综合考虑信号传输的鲁棒性和时效性,提出了 ZigBee 网络节点部署的全局优化方案。同时,应用 TCP/IP 协议,设计了盐碱地综合治理信息采集软件和远程信息云服务平台,实现了盐碱地资源的全方位信息监测。试验表明,系统能够满足盐碱地信息监测和田间灌溉水肥一体化自动控制的功能需求,且所设计网络数据传输的综合丢包率低于 1%。

关键词: 盐碱地; 治理; 无线传感器网络; 节点部署; 远程监控; 云服务

中图分类号: S24; S287 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0207-07

Design and Experiment of Field Monitoring System in Alkaline Land Based on ZigBee and TCP/IP

WANG Fengzhu ZHAO Bo WANG Hui LIU Yangchun LI Yang WANG Lili

(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to promote the application of modern information technology in the field of management of saline-alkali land and get an effective mean for evaluating improved effect on soil, a real-time information collection and control system was designed, including online underwater pipe monitoring subsystem, field microclimate monitoring subsystem, pest diagnosis subsystem, crop growth monitoring subsystem, and automation irrigation subsystem. And ZigBee multi-hop ad-hoc network was constructed for field data transmission. Based on the regional characteristics of Dongying Agricultural High Technology Zone, a cost function was defined in the comprehensive consideration of maximum network connectivity, robustness and timelines. And then, a global optimization deployment scheme for ZigBee network nodes was proposed with the maximum connectivity of the network. Meanwhile, a local data collection software with LabVIEW and the remote cloud service platform under Brower/Server structure were all achieved. The communication between local control software and remote server was achieved through TCP/IP, where the communication reliability was guaranteed by the mechanism of offline detection and reconnection. A large amount of monitoring data can be accumulated in the remote server, providing data support for the treatment of saline soil in the future. The system was put into use, the test showed that the system met the functional requirements of data monitoring and automation control for irrigation and fertilization, where monitoring data can be shown on the website in real-time and control commands can reach the correct actuator through the website quickly. Meanwhile, the communication test showed that the packet loss rate of the designed ZigBee network data transmission was less than 1%.

Key words: alkaline land; treatment; wireless sensor network; node deployment; remote monitoring and control; cloud service

收稿日期: 2019-04-19 修回日期: 2019-05-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701104)

作者简介: 汪凤珠(1988—),女,工程师,主要从事自动控制与智能检测研究,E-mail: wangfengzhu1@126.com

通信作者: 王辉(1980—),男,研究员,博士,主要从事图像处理和智能农业装备研究,E-mail: wanghui@caams.org.cn

0 引言

盐碱地是我国重要的土地资源,据第二次全国土壤普查资料统计,我国具有农业发展潜力的盐碱化耕地达 0.13 亿 hm^2 , 占全国耕地总面积 10% 以上。合理开发利用盐碱地资源,对保障我国粮食安全、促进农业可持续发展、改善生态环境以及推动区域经济社会协调发展具有重要意义^[1]。

国内外学者在盐碱地改良技术与治理模式方面进行了大量的研究,取得了显著成果,为改善土壤性质、促进农作物生长发挥了重要作用^[2-4]。但是,现代化信息技术在盐碱地实时动态监测方面的相关研究却较少,盐碱地治理存在监测数据不足、改良效果评估困难等问题。

ZigBee 网络具有组网灵活、可扩展性强、低复杂性、低成本等优点,对移动网络没有完全覆盖的

农田区域,可以提供很好的信息监测补充手段。本文以山东省省东营市农业高新技术产业示范区为设计背景,结合应用最广泛的盐碱地暗管改碱治理模式,通过在田间地块部署 ZigBee 无线自组网实现信息感知。同时,通过 Internet 网络和 TCP/IP 协议,实现与盐碱地综合治理相适应的基于 B/S 架构的远程信息集成服务平台,为盐碱地提供宏观、全方位的信息监测。并基于长期的数据累积,利用大数据与云计算技术,掌握水土盐的演变规律,为盐碱地治理模式选择、改良效果评价、区域种植结构和精准变量灌溉施肥提供数据支撑和技术支持。

1 系统总体架构

盐碱地田间信息监控系统基于 3 层网络架构实现^[5-9],总体组成如图 1 所示。

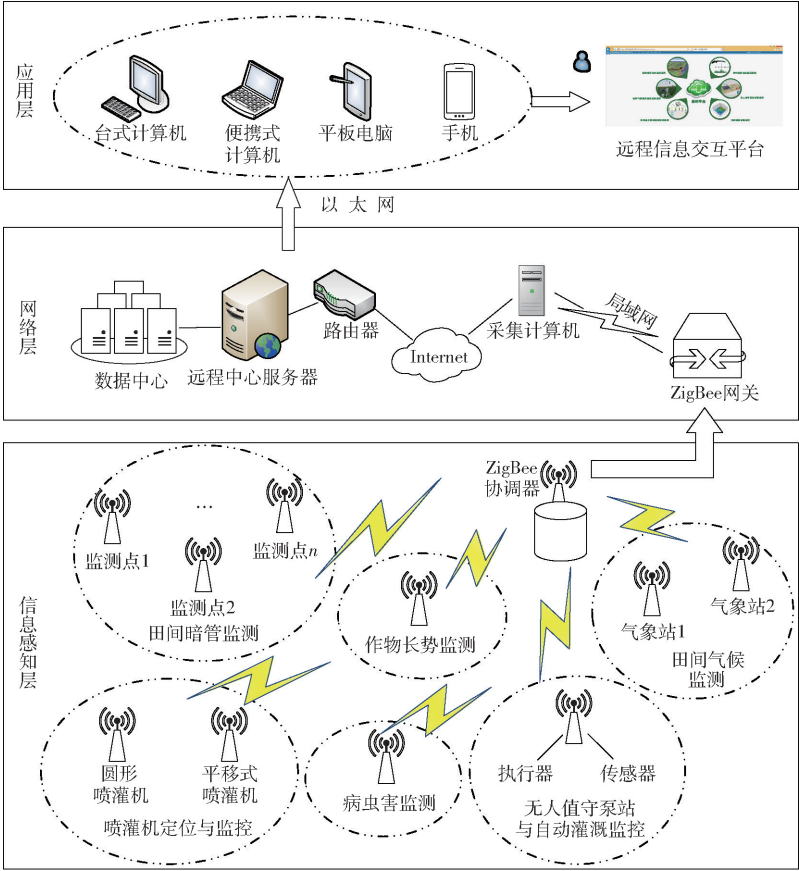


图 1 系统总体架构
Fig. 1 General framework of system

图 1 针对本文研究的盐碱地应用场合,信息感知层主要由田间暗管监测子系统、田间气候监测子系统、病虫害监测子系统、作物长势监测子系统、无人值守泵站与自动灌溉监控子系统、喷灌机定位与监控子系统等组成。各个子系统通过 ZigBee 多跳低功耗自组网实现信号采集和信号交互。网络层主要由 ZigBee 网关、采集计算机、以太网和远程中心

服务器组成。ZigBee 网关通过以太网将数据传输到采集计算机。由中控计算机完成 ZigBee 网络和远程中心服务器端的双向 TCP/IP 数据交换。远程中心服务器获取数据后,进行处理、分析和显示,通过浏览器方式可供远程用户访问和查看。应用层主要面向用户使用。

系统通过安装的监测传感器、定位模块、图像采

集单元和近红外光谱探头,实时获取地下水水位、地下水水质、田间作物长势、地块气候数据、病虫害信息、喷灌机作业轨迹等的实时动态变化趋势和三维分布信息,为农业生产指导、盐碱地改造技术和规模化推广提供重要的数据支撑。同时,系统可以远程操作完成田间灌溉自动施肥施药控制和精准水位控制,实现水盐一体自动精准灌溉^[10-12]。

2 ZigBee 网络方案

2.1 ZigBee 网络组成

根据不同网络功能,ZigBee 网络节点^[13-15]可分为中心协调器、中继路由器和终端采集节点。其中,中心协调器是 ZigBee 网络的中心节点,主要负责组建和管理 ZigBee 网络,其作为 ZigBee 网络中的第 1 个节点,网络地址为 0;路由器节点主要对网络中传输的数据进行多跳中继路由转发;终端节点主要负责现场农田数字化信息的采集、处理以及进行本节点数据的发送和接收。

2.2 ZigBee 网络部署

2.2.1 项目区布局

整个规划区占地面积约 300 000 m²,由 3 个地块构成,东部地块的东西距离为 130 m,中部地块的东西距离为 231 m,西部地块的东西距离为 248 m。3 个地块的南北距离均为 500 m。东部地块布设了单跨距离为 55 m 的双跨型平移喷灌机,形成 64 667 m²的有效喷灌面积。中部地块和西部地块以两个地块的几何中心为圆点布设了跨度为 244 m 的四跨型圆形喷灌机,形成 186 667 m²的田间喷灌面积。具体如图 2 所示。

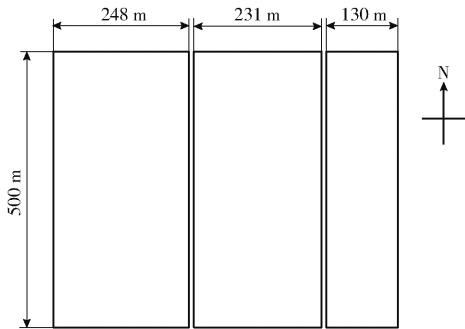


图 2 项目区布局示意图

Fig. 2 Layout of project area

2.2.2 节点布设

系统采用多跳路由转发机制构建的 ZigBee 网状拓扑结构,组网更加灵活,并突破单点传输最大通信距离的限制。同时,为了避免多层立体网络结构带来的系统复杂性和信号时延,将规划区节点部署的空间模型简化为双层平面网络结构。通过合理放置天线,减少不同高程差对射频信号的衰减,使泵站

与中控室布设的节点处于同一水平平面结构上,3 个地块布设节点处于另一平面结构上。两个不同平面层的数据通信通过布设在泵站周围的 2 个路由节点进行中继,2 个路由节点相互形成冗余节点配置,保证双层平面结构间的数据可靠传输。

对于相同平面结构上的节点部署^[16-19],假定网络中无异构节点,每个节点的性能相同,节点的通信覆盖范围抽象成以节点为圆心,半径为 d_c 的圆形区域。

在平面部署区域上,建立二维坐标系 XOY ,确定 ZigBee 网络节点集中节点 $n_i(x_i, y_i)$ 与 $n_j(x_j, y_j)$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 间距离 $d(n_i, n_j)$ 为

$$d(n_i, n_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

定义节点的网络深度 $d_{ep}(n_i)$ 为

$$d_{ep}(n_i) = \begin{cases} \min(d_{ep}(n_i), d_{ep}(n_j) + 1) & (d_{ep}(n_i) \geq 0) \\ d_{ep}(n_j) + 1 & (d_{ep}(n_i) < 0) \end{cases} \quad \text{s. t. } d(n_i, n_j) < d_s \quad (2)$$

式中 d_s ——网络单跳传输的可靠通信距离

其中,ZigBee 协调器网络深度为 0,其他网络节点初始深度为 -1。

确定现有 ZigBee 网络中的孤立节点集合 $S = (n_s(x_s, y_s) | d_{ep}(n_s) < 0)$,定义孤立边界点 $n_{sl}(x_{sl}, y_{sl})$ 为集合 S 中最接近信号覆盖区的点,即

$$\begin{cases} d(n_{sl}, n_{il}) = \min(d(n_s, n_i)) \\ \text{s. t. } \begin{cases} n_s \in S \\ n_i \in (N \cap \bar{S}) \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中 N ——ZigBee 网络节点集

其中, $n_{il}(x_{il}, y_{il})$ 为非孤立节点集中与节点 n_{sl} 距离最近的节点。

定义节点间连通性函数 $C_t(n_i, n_j)$ 为

$$C_t(n_i, n_j) = \begin{cases} 1 & (d(n_i, n_j) < d_s) \\ 0 & (d(n_i, n_j) \geq d_s) \end{cases} \quad (4)$$

在 n_{sl} 的有效通信范围内, n_{sl} 选取中继路由节点 n_{sr} 的优化部署区域解集 Z 为

$$\begin{cases} Z = \max \left(\sum_{i=1}^k C_t(n_{sr}, n_i) \right) \\ \text{s. t. } \begin{cases} d(n_{sr}, n_{sl}) < d_s \\ n_i \in (N \cap \bar{S}) \\ n_i \in \{n_i | d(n_i, n_{sl}) < 2d_s\} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中 k ——满足 n_i 约束集的节点数量

当 n_{sr} 使用 Z 区域内的节点时,ZigBee 网络能获得最佳的连通效果。

在优化区域 Z 中,综合考虑 ZigBee 网络的传输

可靠性、传输延时和负载均衡性,定义通信代价函数 $g(n_j)$ 为

$$\begin{cases} g(n_j) = 2d^2(n_{sl}, n_j) + \min(d_{ep}(n_i)) \cdot \\ \sum_{i=1}^k \frac{d^2(n_i, n_j)}{d_{ep}(n_i)} \\ \text{s. t. } \begin{cases} n_j \in Z \\ n_i \in (N \cap \bar{S}) \\ n_i \in \{n_i | d(n_i, n_{sl}) < 2d_s\} \end{cases} \end{cases}$$

(6)

则 $g(n_j)$ 取得的局部极小值解即是 n_{sr} 的最优配置点。

若式(5)中 n_i 的约束集为空集,则按照

$$\begin{cases} d(n_p, n_{sl}) = 0.8d_s \\ y_p = \frac{y_{il} - y_{sl}}{x_{il} - x_{sl}}(x_p - x_{sl}) + y_{sl} \end{cases}$$

(7)

增加路由由节点 n_p 后,返回重新寻找 ZigBee 网络中的新孤立边界点 $n_{sl'}$ 。依此循环,直至网络中不再存在孤立节点。

基于上述方法,本文从提高数据传输的鲁棒性角度考虑,设定网络单跳传输的可靠通信距离 d_s 为 200 m,对东营市农业高新技术产业示范区项目规划区的 ZigBee 网络进行全局节点部署,得到最优节点配置方案如图 3 所示。

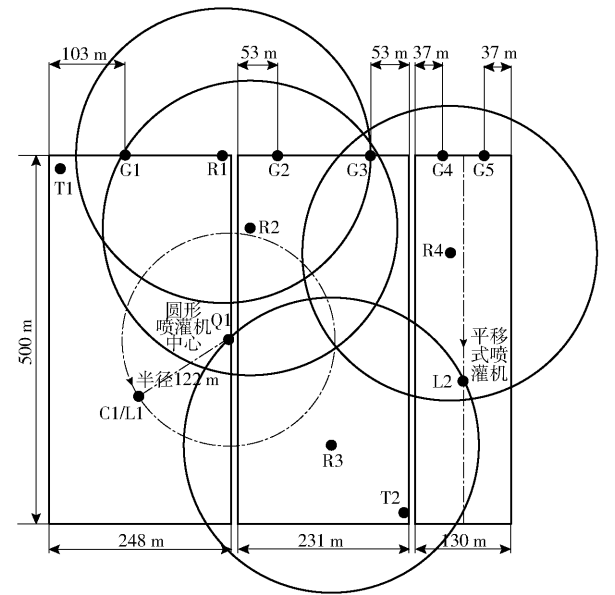


图 3 ZigBee 网络全局节点配置方案

Fig. 3 ZigBee nodes deployment scheme of system

图 3 节点 G、T、C、L、Q 为达到规划区监测和控制功能所需配置的室外 ZigBee 节点。其中,田间暗管监测节点 G1 ~ G5 基本处于一条水平线上,分别位于渗水管道 5、15、22、27、30 的末端,用于传输相应监测点管道水体的流量、盐度、pH 值等信息。田间气象监测节点 T1、T2 位于项目区布置的 2 个田间小气候监测站内,用于传输气象监测信息。作物长

势监测节点 C1 和喷灌机位置监测节点 L1、L2 分别位于 2 个喷灌机移动跨的中部,用于传输作物长势信息、圆形喷灌机位置信息和平移喷灌机位置信息。病虫害监测节点 Q1 位于圆形喷灌区域中心,用于传输项目区的病虫害信息。在此基础上,增加路由节点 R1 ~ R4。

2.2.3 节点地址分配

按照上述节点布设方案,为每个 ZigBee 节点分配 64 位网络地址,如表 1 所示。

表 1 ZigBee 网络节点地址分配
Tab. 1 List of ZigBee address in system

序号	ZigBee 节点用途	ZigBee 节点地址	设备类型
1	ZigBee 网关	00000000H	协调器
2	1.8 m 渗水管 5 监测节点	FEFE0501H	路由器
3	1.8 m 渗水管 15 监测节点	FEFE0502H	路由器
4	1.8 m 渗水管 22 监测节点	FEFE0503H	路由器
5	1.8 m 渗水管 27 监测节点	FEFE0504H	路由器
6	1.8 m 渗水管 30 监测节点	FEFE0505H	路由器
7	室内渗水管监测节点	FEFE0506H	路由器
8	集水管 1 末端监测节点	FEFE0507H	路由器
9	集水管 2 末端监测节点	FEFE0508H	终端节点
10	水池灌溉出水监测节点	FEFE0509H	路由器
11	病虫害监测节点	FEFE1101H	路由器
12	田间气象站 1 监测节点	FEFE0901H	终端节点
13	田间气象站 2 监测节点	FEFE0902H	终端节点
14	圆形喷灌机监控节点	FEFE0101H	路由器
15	平移喷灌机监控节点	FEFE0102H	终端节点
16	无人值守泵站监控节点	FEFE0301H	路由器
17	作物长势采集节点	FEFE0201H	路由器
18	圆形喷灌机定位节点	FEFE0401H	路由器
19	平移喷灌机定位节点	FEFE0402H	路由器

系统利用直接序列扩频(Direct sequence spread spectrum, DSSS)技术,在 2.4 GHz 频段信道 9 上组建 ZigBee 无线通信网络,构建了盐碱地智能无线信号采集和数据传输系统。各个 ZigBee 节点除具有自身网络功能外,还执行相应的数据采集与控制功能。管道 ZigBee 节点负责采集相应监测点流量传感器、电导率传感器和 pH 值传感器输出的 4 ~ 20 mA 模拟信号,并转换成数字信号后,通过 ZigBee 网络传输至 ZigBee 网关节点。病虫害节点、气象站节点、喷灌机节点、作物长势节点和泵站节点将 RS232/RS485 串行接口接收的监测数据,通过 ZigBee 无线网络转发至 ZigBee 网关节点,从而实现目标监控子系统与网关间的信息交互。所有室外部署 ZigBee 节点均采用太阳能供电方式,室内部署

ZigBee 节点均采用市电供电方式。

2.3 ZigBee 网络容错机制

ZigBee 网络中,某个节点的意外故障可能使一片区域内的其他节点成为网络孤立节点,造成大量关键监控数据的丢失。为此,本文设计了 ZigBee 网络故障检测机制和节点冗余保障机制。系统在主要数据采集 ZigBee 节点处引入冗余节点, ZigBee 数据采集节点采用定期主动上报模式发送数据至 ZigBee 网关节点, ZigBee 网关定时轮询接收数据包的发送源地址,将长时间未上传数据的节点设备标志为故障节点,并将故障节点对应的冗余节点从休眠状态唤醒,替代失效节点完成数据采集和传输任务,从而保证了系统的长期稳定运行。

3 数据采集软件设计

LabVIEW 是一种基于图形化编程的集成开发环境,已经在测量与测试系统中得到了广泛应用。本文应用 LabVIEW 2012,基于 TCP/IP 协议编程实现盐碱地综合治理系统上位机数据采集程序。程序利用两路完全独立的 TCP/IP 连接通道,分别实现现场信息感知层 ZigBee 网络数据的采集和与远程中心服务器的数据交互^[20],程序主界面如图 4 所示。



图 4 采集程序主界面

Fig. 4 Main monitoring interface

LabVIEW 软件采用基于断网重连的可靠 TCP 连接策略,其流程如图 5 所示。当 TCP 操作出现错误时,如 TCP 对等端关闭网络连接、网络不畅和 TCP 网络操作超时等,软件将关闭原有 TCP 连接资源,2 s 后重新尝试连接 TCP 服务器,直至通信网络正常。

LabVIEW 软件与 ZigBee 网关节点的数据通信流程如图 6 所示。软件实时地从 TCP 接收队列获取各田间子系统上传的监测数据,解析处理后进行存储显示,并上传数据至远程服务器。

4 系统测试

4.1 系统平台

监控系统测试基于设计的盐碱地综合治理云服

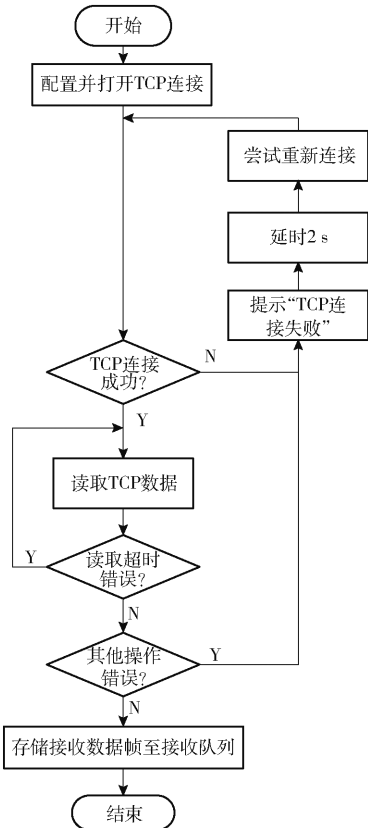


图 5 TCP 连接流程图

Fig. 5 Flow chart of TCP connection

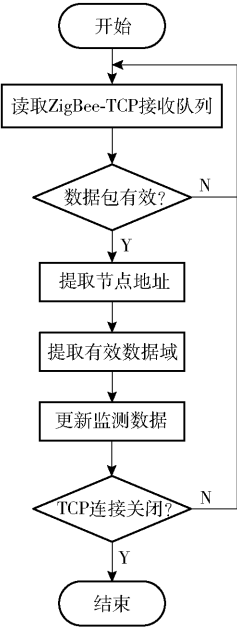


图 6 LabVIEW 软件与 ZigBee 网关的通信流程图

Fig. 6 Communication between LabVIEW and ZigBee coordinator

务平台实现,平台前端网页主要由田间暗管实时监测页面、田间气候及病虫害监测页面、田间水土环境实时监测页面、作物长势信息监测页面、无人值守泵站管理页面和田间数据采集系统页面等组成。平台采用 B/S 体系结构,主要事务逻辑和数据处理在服务器后端实现,用户界面全部通过浏览器实现,平台

前端界面如图 7 所示。



图 7 盐碱地综合治理与高效利用云服务平台界面
Fig.7 Cloud service platform of monitoring system
in alkaline land

4.2 功能测试

将所设计的整套监控系统在东营市农业高新技术产业示范区进行测试。现场使用数据表明,各个子系统的监测数据能实时稳定地上传至远程服务器,并通过浏览器以图形化界面展示,用户通过浏览器下发的控制指令能正确地到达相应的田间子监控系统,实现远程泵站控制和喷灌机控制,达到了预期的功能需求,并验证了所设计系统的可行性和稳定性。

4.3 丢包率测试

系统 ZigBee 网关节点部署于泵站中控系统内,同时设定各个 ZigBee 采集节点的数据更新频率为 0.5 Hz,通过分析 1 h 内远程 Web 服务器上存储的数据库数据,得到 ZigBee 网络各个室外功能节点的丢包率如表 2 所示。

表 2 ZigBee 网络节点丢包率

Tab.2 Test result of package loss in ZigBee network

编号	ZigBee 节点用途	1 h 内帧数	丢包率/%
G1	1.8 m 渗水管 5 监测节点	1 789	0.61
G2	1.8 m 渗水管 15 监测节点	1 791	0.50
G3	1.8 m 渗水管 22 监测节点	1 794	0.33
G4	1.8 m 渗水管 27 监测节点	1 795	0.28
G5	1.8 m 渗水管 30 监测节点	1 796	0.22
Q1	病虫害监测节点	1 789	0.61
T1	田间气象站 1 监测节点	1 787	0.72
T2	田间气象站 2 监测节点	1 784	0.89
C1	作物长势采集节点	1 788	0.67
L1	圆形喷灌机定位节点	1 787	0.72
L2	平移喷灌机定位节点	1 788	0.67

4.4 传输时延测试

除 T1、T2 外,其他 ZigBee 室外功能节点均采用主动周期汇报式上传数据,而 T1、T2 采用查询-应答式更新数据。考虑到在室外开阔环境下,网络时延与传输跳数关系密切。按照上述 ZigBee 网络配置方案,T1、T2 具有较多的中继跳数,因此以 T1、T2 为代表节点,利用 LabVIEW 软件间隔 2 s 发送气象站的 Modbus 查询指令,分别记录气象数据查询时间 T_c 和气象数据应答时间 T_p ,ZigBee 网关节点与 ZigBee 气象节点之间的网络传输时延计算公式为

$$T_d = \frac{T_p - T_c}{2}$$
 (8)

共进行 100 组测试,实际测试结果表明,T1 节点的平均传输时延为 193 ms,T2 节点的平均传输时延为 226 ms,均能达到系统对现场监测数据的实时性要求。

5 结论

- (1)测试 ZigBee 节点的单跳最大通信距离、动态传输性能以及不同高度差对无线传输性能的影响,并结合东营市农业高新技术产业示范区的区域特点及相关设备的数据传输需求,确定了 ZigBee 网络的节点优化部署方案。
- (2)在项目整个覆盖区域内布署 ZigBee 节点,组建 ZigBee 数据传输网络,确保中控计算机与田间监控各子系统间 ZigBee 通信链路的有效性和可靠性。
- (3)通过 LabVIEW 软件编程,实现数据采集与监控,基于 TCP/IP 协议,实现 ZigBee 无线网关与中心服务器间的数据转换,并及时下发远程平台的控制指令至相应田间子监控系统。
- (4)进行系统整体性能测试,结果表明,所设计的整套监控系统运行稳定,满足预期的信息监测与控制功能需求,且系统数据传输的丢包率低于 1%,最远端两个节点的数据传输时延分别为 193 ms 和 226 ms,满足预期的可靠性、实时性需求。

参 考 文 献

[1] 李彬,王志春,孙志高,等. 中国盐碱地资源与可持续利用研究[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(2):154-158.
LI Bin, WANG Zhichun, SUN Zhigao, et al. Resources and sustainable resource exploitation of salinized land in China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(2): 154-158. (in Chinese)

[2] 郝金标,邢尚军,张建锋,等. 几种重盐碱地土壤改良利用模式的比较[J]. 东北林业大学学报,2003,31(6):99-101.
XI Jinbiao, XING Shangjun, ZHANG Jianfeng, et al. Comparison of several amelioration models for high saline-alkaline soil [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2003, 31(6):99-101. (in Chinese)

[3] 王佳丽,黄贤金,钟太洋,等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报,2011,66(5):673-684.

[4] 田冬,桂丕,李化山,等. 不同改良措施对滨海重度盐碱地的改良效果分析[J]. 西南农业学报,2018,431(11):2366-

2372.

- TIAN Dong, GUI Pi, LI Huashan, et al. Effect of different measures on improvement of seashore saline alkali land [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(11): 2366–2372. (in Chinese)
- [5] 包志炎,王学斌,张海波,等. 基于物联网和云架构的渠灌闸门智能控制系统[J]. 农业机械学报,2017,48(11):150–157.
BAO Zhiyan, WANG Xuebin, ZHANG Haibo, et al. Intelligent control system of canal irrigation sluice based on Internet of Things and cloud architecture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 150–157. (in Chinese)
- [6] 何勇,聂鹏程,刘飞. 农业物联网与传感仪器研究进展[J]. 农业机械学报,2013,44(10):216–226.
HE Yong, NIE Pengcheng, LIU Fei. Advancement and trend of Internet of Things in agriculture and sensing instrument [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 216–226. (in Chinese)
- [7] 盛平,郭洋洋,李萍萍. 基于 ZigBee 和 3G 技术的设施农业智能测控系统[J]. 农业机械学报,2012,43(12):150–157.
SHENG Ping, GUO Yangyang, LI Pingping. Intelligent measurement and control system of facility agriculture based on ZigBee and 3G [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 150–157. (in Chinese)
- [8] 张波,罗锡文,兰玉彬,等. 基于无线传感器网络的无人机农田信息监测系统[J]. 农业工程学报,2015,31(17):176–182.
ZHANG Bo, LUO Xiwen, LAN Yubin, et al. Agricultural environment monitor system based on UAV and wireless sensor networks [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 176–182. (in Chinese)
- [9] 王卫星,陈华强,姜晟,等. 基于低功耗的发射功率自适应水稻田 WSN 监测系统[J]. 农业机械学报,2018,49(3):150–157.
WANG Weixing, CHEN Huaqiang, JIANG Sheng, et al. WSN monitoring system with adaptive transmitting power based on low-power-consumption in rice fields [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 150–157. (in Chinese)
- [10] 薛涛,杜岳峰,田纪云,等. 基于 ZigBee 技术的棉田滴灌监测与控制系统[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):261–266.
XUE Tao, DU Yuefeng, TIAN Jiyun, et al. Drip irrigation monitoring and control system of cotton based on ZigBee technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 261–266. (in Chinese)
- [11] 周利明,韦崇峰,苑严伟,等. 基于无线传感网络的改碱暗管排盐监控系统[J]. 农业工程学报,2018,34(6):89–97.
ZHOU Liming, WEI Chongfeng, YUAN Yanwei, et al. Monitoring system of subsurface pipe drainage for improving saline-alkaline soil based on wireless sensor network [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 89–97. (in Chinese)
- [12] 沈建伟,李林,魏新华. 丘陵地区蓝莓园智能灌溉决策系统设计[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):379–386.
SHEN Jianwei, LI Lin, WEI Xinhua. Design of intelligent irrigation decision system for blueberry garden in hilly area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 379–386. (in Chinese)
- [13] 闫沫. ZigBee 协议栈的分析与设计[D]. 厦门:厦门大学,2007.
- [14] 李文仲,段朝玉. ZigBee2006 无线网络与无线定位实战[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [15] ZigBeeAlliance, Inc. ZigBee specification: ZigBee document[S]. USA: ZigBee Standards Organization, 2007.
- [16] 卿晓霞,王文章,王波. 基于节点转移的 ZigBee 网络孤立点减免算法[J]. 仪器仪表学报,2010,31(7):1650–1656.
QING Xiaoxia, WANG Wenzhang, WANG Bo. Algorithm of reducing ZigBee network isolated nodes based on node-transporting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(7): 1650–1656. (in Chinese)
- [17] 项新建,郭小青. ZigBee 无线传感器网络节点部署策略研究[J]. 浙江科技学院学报,2011,23(3):189–192.
XIANG Xinjian, GUO Xiaoqing. Research of ZigBee wireless sensor network nodes deployment strategy: application in digital agricultural data acquisition [J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2011, 23(3): 189–192. (in Chinese)
- [18] 刘丽萍,王智,孙优贤. 无线传感器网络中的资源优化[J]. 传感技术学报,2006,19(3):917–925.
LIU Liping, WANG Zhi, SUN Youxian. Resource optimization in wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2006, 19(3): 917–925. (in Chinese)
- [19] 毛剑琳. 无线传感器网络中若干资源优化问题的研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.
- [20] 许顺,佟金,李默. 基于 LabVIEW 的蔬菜切碎机性能测试及工作参数优化[J]. 农业工程学报,2017,33(3):250–256.
XU Shun, TONG Jin, LI Mo. Performance testing of vegetable chopping machine based on LabVIEW and operation parameter optimization [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 250–256. (in Chinese)