

# 基于 UWB 定位的智能温室三维温湿度检测系统研究

刘艳伟<sup>1,2</sup> 李思雯<sup>1,3</sup> 杨启良<sup>1,2</sup> 何家俊<sup>4</sup>

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500;

2. 昆明理工大学季节性旱区水-土-作物系统云南省野外科学观测研究站, 昆明 650500;

3. 云南省高校特色作物高效用水与绿色生产重点实验室, 昆明 650500; 4. 惠州市赢合科技有限公司, 惠州 516008)

**摘要:**为解决现有无线检测系统无法精准有效反映温室内立体空间的环境变化情况,以及传感器节点定位误差大、硬件成本高等问题,设计了一种基于 UWB(Ultra wide band)定位的智能温室三维温湿度检测系统。系统通过一款自主设计的集成 UWB 定位模块的 STM32F 系统板对各传感器节点进行定位,并搭载 AHT25 型高精度传感器对环境数据进行采集。UWB 主基站使用 4G 网络通信模块将各传感器数据及位置信息发送到上位机,并在 Web 端根据 HTML5 技术实现温室三维温湿度场可视化,完成温室三维温湿度远程检测。系统定位测试试验证明,各传感器节点精度主要集中在 10~30 cm 范围内,部分节点测量位置误差大于 50 cm,各节点最大丢包率为 2.5%,平均丢包率为 1.9%,满足温室测量基本需求,对检测温室热工缺陷区域以及研究植物生长适宜环境有重要意义。

**关键词:** 温室; 三维温湿度; UWB 定位; 智能检测系统; STM32

中图分类号: S126

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)09-0414-09

OSID:



## Design of Intelligent Greenhouse Three-dimensional Temperature and Humidity Detection System Based on UWB Positioning

LIU Yanwei<sup>1,2</sup> LI Siwen<sup>1,3</sup> YANG Qiliang<sup>1,2</sup> HE Jiajun<sup>4</sup>

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. Yunnan Provincial Field Scientific Observation and Research Station on Water - Soil - Crop System in Seasonal Arid Region, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

3. Yunnan Provincial Key Laboratory of High-efficiency Water Use and Green Production of Characteristic Crops in Universities, Kunming 650500, China

4. Huizhou Yinghe Technology Co., Ltd., Huizhou 516008, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of the existing wireless detection system cannot accurately and effectively reflect the environmental changes of the three-dimensional space in the greenhouse, as well as the large positioning error of the sensor node and the high hardware cost, an intelligent greenhouse three-dimensional temperature and humidity detection system was designed based on ultra wide band (UWB) positioning. The system located each sensor node through a self-designed STM32F system board integrating UWB positioning module, and it was equipped with AHT25 high-precision sensor to collect environmental data. The UWB main base station used the 4G network communication module to send the sensor data and location information to the host computer, and visualized the three-dimensional temperature and humidity field of the greenhouse according to HTML5 technology on the Web side to complete the remote detection of the three-dimensional temperature and humidity of the greenhouse. The system positioning test proved that the accuracy of each sensor node was mainly concentrated in the range of 10~30 cm, the measurement position error of some nodes is greater than 50 cm, the maximum packet loss rate of each node was 2.5%, and the average packet loss rate was 1.9%, which met the basic needs

收稿日期: 2022-12-12 修回日期: 2023-05-23

**基金项目:** 云南省基础研究计划面上项目(202101AT070125)、云南省科技厅重点项目(202201AS070034)、昆明理工大学分析测试基金重点项目(2021T20110170)、云南省高校特色作物高效用水与绿色生产重点实验室项目(KKPS201923009)和云南省科技人才与平台计划项目(202305AM070006)

**作者简介:** 刘艳伟(1981—),女,副教授,博士,主要从事节水灌溉理论与新技术研究,E-mail: liuyanwei@kust.edu.cn

**通信作者:** 杨启良(1978—),男,教授,博士,主要从事灌溉排水理论与新技术研究,E-mail: yangqilianglovena@163.com

of greenhouse measurement and is of great significance for detecting greenhouse thermal defect areas and studying the suitable environment for plant growth.

**Key words:** greenhouse; three-dimensional temperature and humidity; UWB positioning; intelligent detection system; STM32

0 引言

传统温室温湿度有线检测系统在实际应用中布线复杂、可靠性低,并且不方便管理。与之相比,无线传感器技术解决了温室环境参数采集和通信上的问题,使温室检测系统逐渐成为以信息网络为基础的精准农业模式,从而加快温室环境检测系统的网络化、数字化和智能化进程。

近些年随着对温室环境监测精准性要求的不断提高,部分学者提出在温室内布置多点传感器以全面监测温室环境数据变化特征。RODRIGUEZ 等<sup>[1]</sup>设计了一种基于无线传感器网络的玫瑰温室精准农业数据监测与预测系统,该系统通过 ZigBee 无线网络将传感器节点采集的温湿度等环境参数上传到数据库,再根据神经网络算法预测此环境下玫瑰的生长状况,并在远程客户端进行显示。邓小蕾等<sup>[2]</sup>设计了一种能够监测土壤水分移动的自动化系统,该系统以 ZigBee 技术实现无线通信,并在温室内多个位置布置土壤水分监测节点,然后通过 GPS 对监测节点进行定位,最后使用 Surfer 8 软件绘制土壤水分等高线分布图,以了解温室土壤水分迁移变化规律。车艳双等<sup>[3]</sup>设计了基于 GPS 以及 PDA 的智能农田采集系统,该系统以 ZigBee 网络组成信息节点,对温室温湿度等环境参数进行测量并实现无线传输,并通过 GPS 差分信息定位方式对传感器节点进行定位,提高了节点定位的精度。

以上温室环境多节点检测系统有效显示了温室内环境数据变化趋势,提升了环境数据的可靠性和精准性。但此类温室检测系统的检测节点主要是分布在二维平面中,而温室内的温湿度在空间范围内流动变化快,并且受温室内设备(排风扇、遮阳布等)以及植物冠层等影响在垂直方向出现分层分布状态,平面内温湿度数据无法准确有效反映温室内温湿度变化特征。为进一步推动温室内温湿度变化规律的研究,对常见的定位技术特点进行了广泛研究。目前常见的定位技术主要包括 GPS 定位技术、蓝牙定位技术、Wi-Fi 定位技术、UWB(Ultra wide band)定位技术、超声波定位技术、射频识别(RFID)技术、红外线定位技术、ZigBee 定位技术等<sup>[4]</sup>。实际应用中温室多节点检测系统需要对各传感器节点进行定位,温室内密闭环境的多径效应,以及植物密

布的复杂环境和灯光、冷雾等设备都会对信号的传输产生影响,传统定位方式已无法满足传感器节点日益提升的高精度定位需要。UWB 采用极窄脉冲实现无线通信,与其他无线通信方式的定位原理相比有着较大不同。极窄脉冲时间分辨率较高,能精准分辨多径反射信号。UWB 定位方法穿透能力好、抗多径效应强,具备很高的安全性和低功耗特点,可进行一维、二维和三维高精度定位,并且还可实现室内移动物体的定位<sup>[5]</sup>。

基于上述温室温湿度检测技术发展现状,以及在检测过程中出现的节点定位精度低、三维温湿度检测手段缺乏等问题,本文设计一种基于 UWB 定位的温室三维温湿度检测系统。该系统实现包括检测温室内三维温湿度的下位机、传感器节点空间定位的方案、远程数据监测与管理的 PC 端监测软件和温室三维温湿度数据可视化的 HTML5 技术方案。结合 UWB 室内定位技术、传感器技术、4G 网络通信技术、C#编程和 Web 前端开发等技术,实现温室三维温湿度的智能检测以及三维空间温湿度可视化。

1 系统总体设计

智能温室三维温湿度检测系统由下位机检测端、上位机监测端 2 部分组成。下位机检测部分主要实现温室内环境参数的测量以及传输,主要包括各传感器检测节点、UWB 定位系统以及 4G 通信模块,其中 UWB 标签与多个传感器绑定共同构成传感器节点,根据温室高度确定每个标签对应温湿度传感器数量,本文研究以每个标签对应 3 个传感器,每个传感器之间间隔 1 m 为例。在 UWB 定位系统中含有 4 个基站,可实现各标签位置的高精度三维定位,UWB 主基站接收到各 UWB 标签和基站传输的位置信息以及传感器数据后,使用 4G 通信网络与远程终端实现数据交互。

上位机监测部分主要是实现环境数据的远程显示,上位机读取 4G 通信模块传输的环境参数以及位置信息后,将其储存在相应数据库中,登录 PC 端软件即可实现数据的查看和管理等,并在 Web 端实现温湿度数据的三维可视化显示。系统总体结构如图 1 所示。

2 系统硬件设计

温室三维温湿度立体检测系统硬件部分主要包

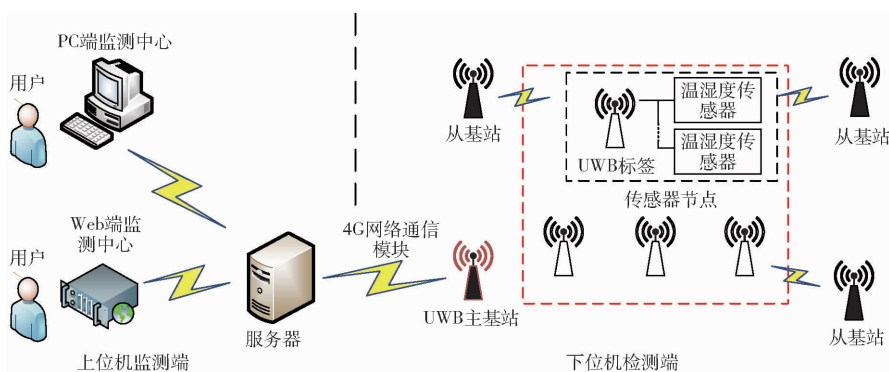


图 1 系统结构图

Fig. 1 System structure

括各传感器检测节点、UWB 定位系统以及 4G 通信模块,以主基站为坐标原点建立坐标系,在系统初始工作时,传感器检测节点及其顶端装有的 UWB 定位系统标签同时进入工作状态,UWB 定位系统通过对标签的空间三维位置测量,进而得出传感器节点上各传感器的三维位置。传感器节点上各传感器将温室环境数据采集完成后,将数据发送到 UWB 标签,同时 UWB 基站收集各标签信号时间戳,最后将定位数据以及传感器信息数据统一汇总到 UWB 主基站。UWB 主基站对数据进行统一处理后,通过 4G 无线通信模块将传感器数据以及对应空间位置传输到 PC 端,进而对数据进一步处理、储存以及显示。硬件结构如图 2 所示。

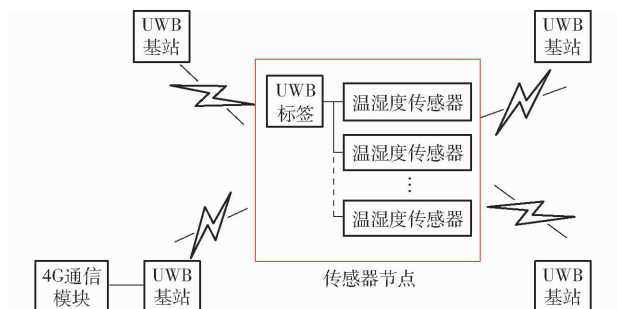


图 2 硬件结构框图

Fig. 2 Block diagram of hardware

## 2.1 传感器节点硬件设计

传感器节点硬件设计主要分为 5 部分:MCU、锂电池电源、LED 显示模块、高精度温湿度传感器以及 UWB 信号发射模块(UWB 标签)。传感器节点硬件设计框图如图 3 所示。

MCU 微处理器选择 STMicroelectronics 公司生产的 STM32F103C8T6 型 32 位标准 RISC 微控制器, 该处理器拥有 Cortex - M3 高性能内核, 采用 LQFP48 协议封装。STM32F103C8T6 的工作频率高达 72 MHz, 内部含有 20 K  $\times$  8 bit 的 SRAM 和 128 K  $\times$  8 bit 的 Flash 存储器, 能够发挥出 ARM 内核的性能<sup>[6]</sup>, 同时拥有 12 个 DMA 通道, 每个 DMA

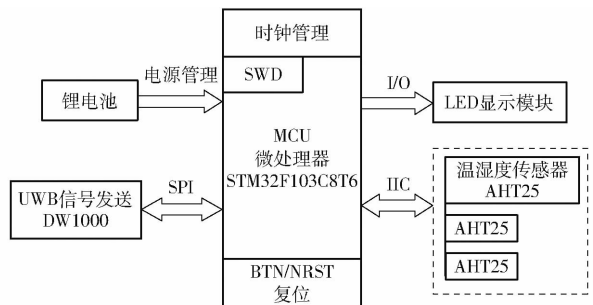


图3 传感器节点硬件设计框图

Fig. 3 Sensor node hardware design block diagram

通道均可独立管理外部设备到储存器之间数据的双向传输、存储器之间的数据双向传输,可有效提升数据传输速度,节省大量 CPU 资源<sup>[7]</sup>。

传感器节点终端设备上装有垂直分布的 3 个高精度温湿度传感器,实现各传感器 Z 轴定位,选用奥松电子生产的 AHT25 型传感器,该传感器测量范围较大,并且具备标准间距的插销方式连接器。同时 AHT25 型传感器表面覆盖有一层 IP67 高透过滤膜,可防止外界沙尘和雨水进入传感器内部,同时配置有 AF02 过滤帽,能有效减小灰尘对过滤膜孔隙的堵塞,防止湿度测量精度降低,因此 AHT25 型传感器在恶劣环境下运行时,依然能够具备较高的稳定性和精准性。AHT25 型传感器采用 IIC 协议,IIC 总线即 SDA、SCL 集成电路总线,是飞利浦公司发明的一种双向、二线制性质的同步串行总线<sup>[8]</sup>。IIC 采用同步通信,即根据时钟信号,每次发送数据量仅为一帧,发送的信息位数不受限制,通信效率高,要求在传输过程中保持精确的同步时钟;通信传输方式为半双工通信,即在同一工作时刻,只能从发送数据或接收数据 2 种状态中选择一种数据传输方式。在传感器节点中,MCU 与 2~4 个 AHT25 型传感器相连接,因此 AHT25 型传感器的 IIC 连接中,采用一主多从的通信方式,即一个主设备(MCU),多个从设备(AHT25 型传感器)。传感器节点实物图如图 4 所示。

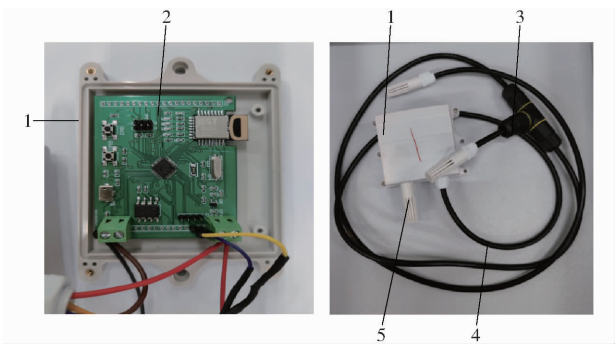


图 4 传感器节点实物图

Fig. 4 Sensor node physical diagram

1. 传感器外壳 2. STM32F 最小系统电路板 3. 连接器 4. IIC 总线 5. AHT25 型传感器

2.2 UWB 基站硬件设计

UWB 基站分为普通定位基站以及主基站,普通基站的功能主要是接收 UWB 标签信号时间戳,主基站在接收信号时间戳的同时对传感器节点数据进行接收和储存,并将数据分析处理后,通过 4G 网络通信模块将传感器数据及位置信息发送到上位机。与 UWB 标签相比,UWB 主基站微处理器也是 STM32F103C8T6,但添加了数据存储模块、4G 网络通信模块,减少了温湿度传感器模块。UWB 主基站硬件结构示意图如图 5 所示。UWB 主基站实物图如图 6 所示。

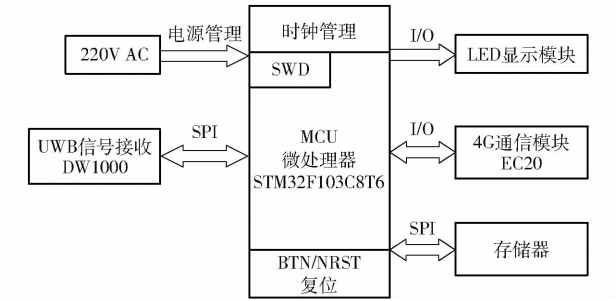


图 5 UWB 主基站硬件结构示意图

Fig. 5 Schematic of hardware structure of UWB main base station

在温室内,由于空间密闭,多径效应严重,同时受到温室内照明、喷灌等设备的影响,UWB 信号传播介质容易改变,且存在一定的非视距影响。UWB

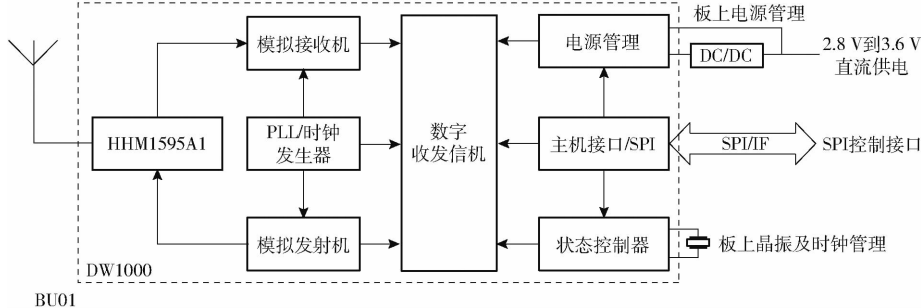


图 7 BU01 内部概览图

Fig. 7 BU01 internal overview diagram

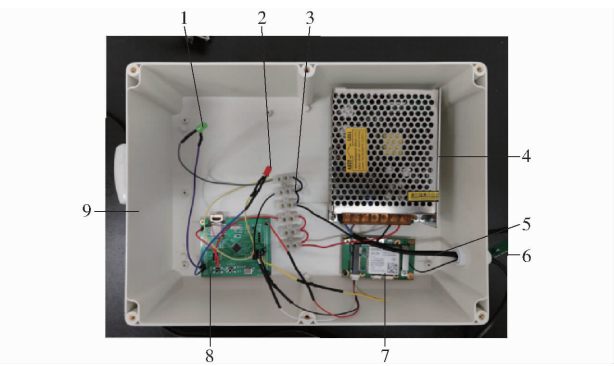


图 6 UWB 主基站实物图

Fig. 6 Physical diagram of UWB main base station

1. UWB 工作指示灯 2. 电源指示灯 3. 接线柱 4. 电压转换器 5. 电源线 6. EC20 主天线 7. EC20 模块 8. STM32F 最小系统电路板 9. 主基站外壳

定位系统通过 TDOA 定位方法测量 UWB 信号从标签到 2 个基站之间传播时间的差值,得到标签到 2 个基站之间的固定距离差,利用多个基站接收到信号的时间差来确定移动目标的位置。根据待测标签的脉冲信号到各基站的时间差来拟合双曲线<sup>[9-10]</sup>,待测标签广播一次数据,只需基站之间保持时钟同步即可。再利用 Chan 算法对 TDOA 定位结果进行分析得出标签位置,实现监控环境参数<sup>[11]</sup>。

UWB 定位系统采用深圳安信可科技有限公司生产的 BU01 模块,信号收发器采用荷兰 DECAWAVE 公司生产的 DW1000 芯片,DW1000 芯片属于低功耗射频收发器,内部集成全部基本电路,其遵循 IEEE802.15.4-2011 UWB 标准。UWB 定位的精度处于厘米级别,采用极窄脉冲通信技术,因此具有极高的时间分辨率,可有效减小定位误差。BU01 模块使用 3.5~6.5 GHz 之间的 4 个信道,支持多种数据传输速率(100 kb/s、850 kb/s 以及 6.8 Mb/s),能有效处理多径效应,能够实现高反射密闭区域内的定位计算。其内部功能如图 7 所示。

2.3 4G 通信模块

UWB 主基站通过 4G 模块将传感器数据以及位置信息发送到上位机,在系统中采用的 4G 网络模

块是 EC20 R2.1 Mini PCIe - C 模块。采用 Mini PCIe 接口 (PCI Express Mini Card 1.2 标准), 电压范围为 3.0 ~ 3.6 V, 支持射频带宽范围为 1.4 ~ 20 MHz, 上下行根据频道选择具有不同的最大速率, LTE - FDD: 150 Mb/s (上行) ~ 50 Mb/s (下行), LTE - TDD: 130 ~ 35 Mb/s。EC20 支持下行 MIMO 操作, 可增加天线数量, 保证通信质量。同时兼容 GSM/GPRS 网络, 当 3G/4G 网络缺乏时可正常工作。

3 系统软件设计

3.1 UWB 标签程序设计

UWB 标签及传感器节点嵌入式程序开发选用 Keil Software 公司设计的 Keil u Vision5 软件, Keil 支持 STM32 全系列单片机的 C 语言开发, 其使用简单、操作简捷。Keil 具备包括 IDE (uVision5)、库管理、μVision 调试器、C 编译器、宏汇编、安装包以及链接器等在内的 C 语言完整开发方案<sup>[12]</sup>。UWB 标签及传感器节点的程序设计流程如图 8 所示。

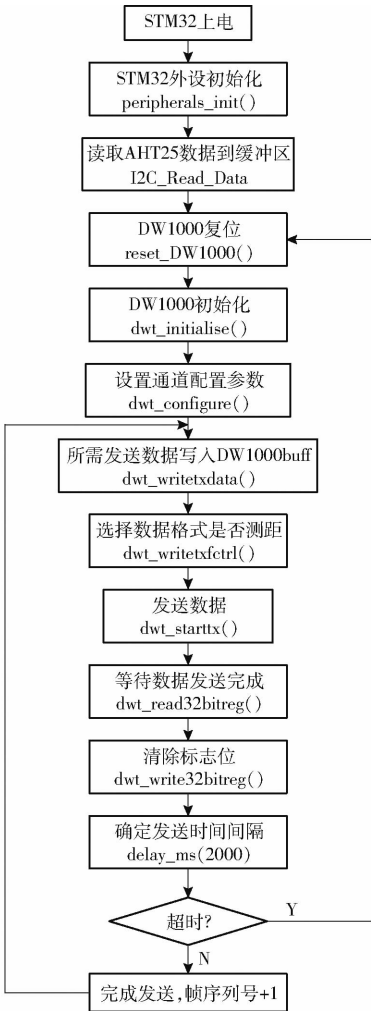


图 8 UWB 标签程序设计流程图

Fig. 8 UWB label programming flowchart

UWB 基站的软件主要实现接收 UWB 标签信

息, 并将信息打包通过 4G 模块发送到主站的功能。UWB 基站程序设计流程如图 9 所示。

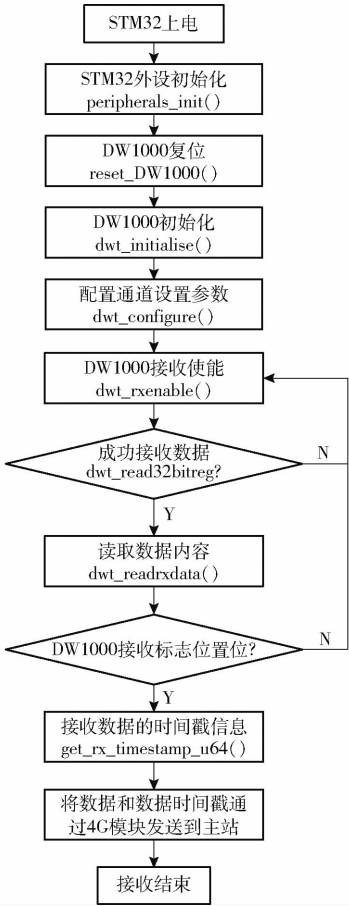


图 9 UWB 基站程序设计流程图

Fig. 9 UWB base station programming flowchart

3.2 PC 远程端监测中心总体设计

本系统软件采用 C# 语言和 Microsoft Visual Studio 2012 开发平台为基础进行开发设计。

3.2.1 远程端监测中心

远程端监测中心 (上位机软件) 主要是将温室 内温湿度数据在 PC 端进行显示, 包括各传感器节 点处实时温湿度数据, 以及历史温湿度数据曲线等。 当温室 内温湿度数据在设定值范围之外时, 远程端 监控中心发出警告, 提醒管理员进行处理, 远程端监 测中心功能规划图如图 10 所示。

3.2.2 监测平台界面设计

监测平台界面设计包括 MySQL 数据库设计、登 录模块、主界面、用户管理界面、数据管理模块、远程 监控模块 6 部分。

(1) MySQL 数据库设计

远程端监测中心在运行过程中会产生大量数 据, 这些数据对于温室的建造和植物的生长管理及 研究有重大意义, 将这些数据存放在数据库中, 可方 便随时查看调用。SQL Server 数据库属于一种关系 数据库智能管理系统 (RDBMS), 是目前全球使用最

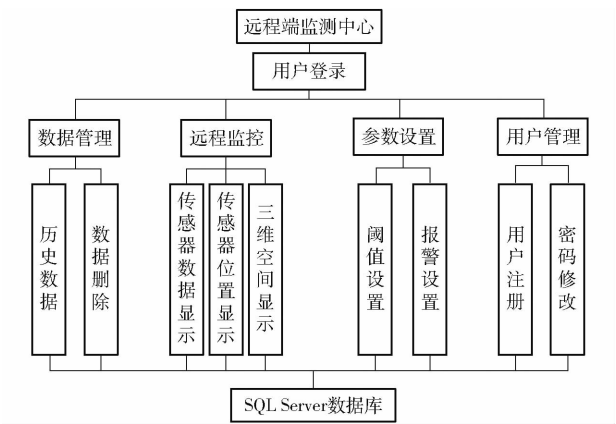


图 10 远程端监测中心功能规划框图

Fig. 10 Functional planning block diagram of remote monitoring center

广泛的数据库之一,其使用便捷、功能强大、响应速度快,在 SQL Server 中具备一系列分析报告工具,为数据库的建立和数据的备份、拷贝等提供强力保障<sup>[13-14]</sup>。

根据远程端监测中心的功能,将需要储存的数据分为 3 大类,分别为:温室环境参数数据库、用户信息数据库以及植物生长参数数据库。

(2)数据管理模块

在数据管理界面,主要分为温室大棚选择区、数据显示区以及功能区。

(3)远程监控模块

在软件的远程监控模块中,主要含有 3 种功能:实时监测、历史曲线以及异常数据显示功能。

4 试验结果与分析

4.1 系统测试

4.1.1 试验场地准备

试验在昆明理工大学智慧农业教学科研基地进行,基地温室为拱圆形双层塑料大棚,长 21 m、宽 6 m。首先在温室内部署一套完整的下位机检测平台,包括 220 V 交流电铺设以及悬挂架搭设等辅助准备。UWB 定位系统选择 3 个定位基站 1 个主基站,数据采集部分共布置 8 个传感器节点(网格格式分布,间距 1.5 m × 1.5 m),其中每个传感器节点上含有 3 个 AHT25 型温湿度传感器,单个传感器节点上 AHT25 型传感器间距为 1 m。采集终端部署情况如图 11 所示。主基站及传感器分布示意图如图 12 所示(以主基站为坐标原点建立坐标系,X、Y、Z 分别表示在温室中的实际长、宽、高。1-1~8-3 表示传感器)。

4.1.2 数据传输显示功能测试

下位机通过 4G 网络通信模块将数据发送到

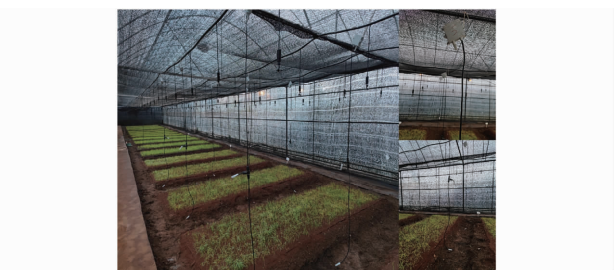


图 11 采集终端部署图

Fig. 11 Acquisition terminal deployment diagram

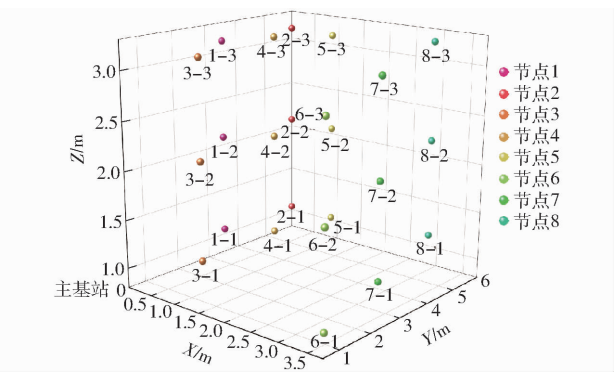


图 12 主基站及传感器分布示意图

Fig. 12 Schematic of distribution of main base station and sensors

Web 端和远程端监测中心,在对系统数据传输功能检测前,可先通过 4G 网络调试助手观察 UWB 主基站与 4G 网络通信模块的连接情况以及传感器数据的发送情况。节点信息用节点-传感器编号、温度、相对湿度、X、Y、Z、日期、时间表达,以节点 3 为例。服务端接收数据界面如图 13 所示。

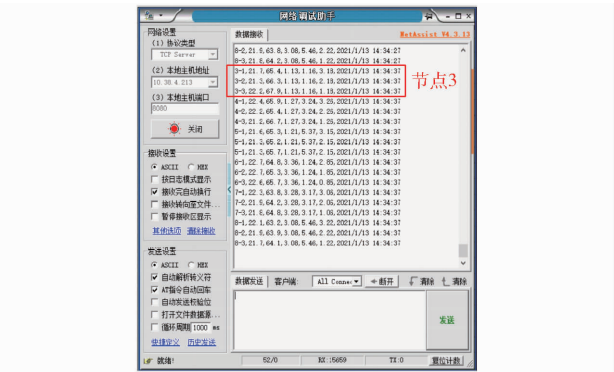


图 13 4G 网络调试助手调试界面

Fig. 13 Debugging interface of 4G network debugging assistant

通过测试可以看出服务器端准确接收 4G 网络通信模块发送的数据帧,其格式准确。表明系统下位机的 4G 网络通信模块稳定、可靠,能够实现系统的远程无线传输功能。

4.1.3 软件监测功能测试

打开远程端监测中心软件,在登录界面登录管理员账号,分别测试远程监测以及数据管理功能。

(1) 远程监测功能

实时监测界面测试结果如图 14 所示,警报界面如图 15 所示,异常数据界面测试结果如图 16 所示,历史曲线界面测试结果如图 17 所示。



图 14 实时监测界面测试结果

Fig. 14 Real-time monitoring interface test results

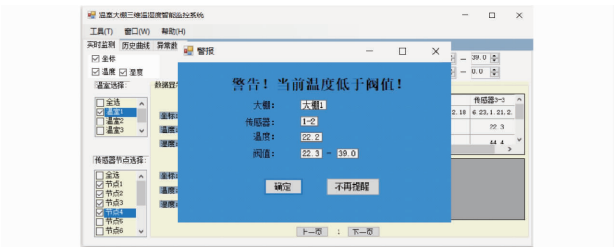


图 15 警报界面

Fig. 15 Alerts interface

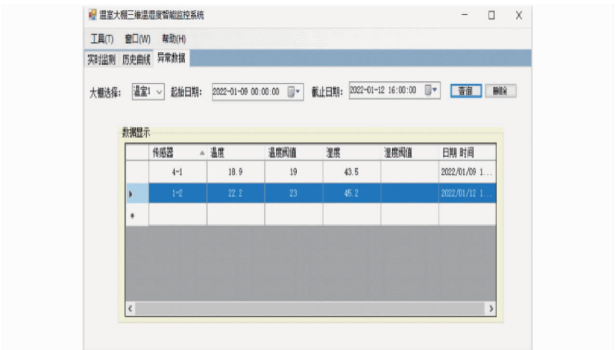


图 16 异常数据界面测试结果

Fig. 16 Abnormal data interface test results

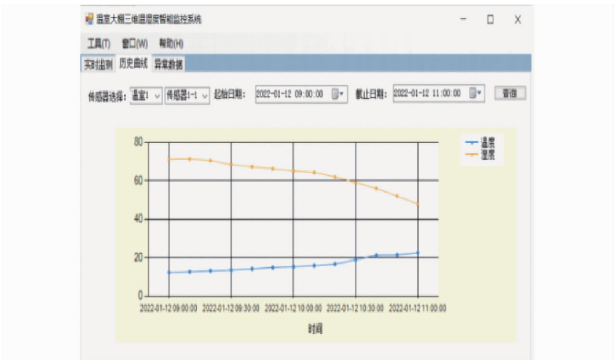


图 17 历史曲线界面测试结果

Fig. 17 Historical curve interface test results

(2) 数据管理功能

在数据显示区可以看到温室大棚环境参数数据库中的信息已经通过 DataGridView 控件进行显示,

表格列标题及表格数据均准确无误,说明通过该数据管理窗口可以实现历史数据查询功能。数据管理界面测试结果如图 18 所示。



图 18 数据管理界面测试结果

Fig. 18 Data management interface test results

通过对该软件的登录、远程监测、数据管理等功能的测试,可以查询实时监测数据、显示历史曲线及异常数据等。表明该系统远程端监控中心很好地实现了数据的显示和存储等功能,满足系统上位机软件的常规需求。

4.2 系统定位精准性测试

系统定位精准性测试于 2022 年 1 月 13 日 14:00—17:00 期间在昆明理工大学智慧农业教学科研基地进行,试验期间关闭喷雾、通风等设备,温室内平均温度为 14.5℃,平均相对湿度为 54.3%。使用米尺、尼龙线等测量各节点位置,以 3 次测量数据的平均值为节点实际位置,各节点以频率 5 s/次,发射 1 000 次真实数据,以 PC 端监测软件接收各节点测量数据,通过 Matlab 的 norm 函数对节点测量位置与实际位置之间的距离进行计算,将定位误差分为[0 cm,10 cm]、(10 cm,30 cm]、(30 cm,50 cm] 3 个区间,各节点定位精度如表 1 所示。

表 1 节点定位精度测试

| Tab.1 Node positioning accuracy test |              |               |               | %   |
|--------------------------------------|--------------|---------------|---------------|-----|
| 节点<br>标号                             | 定位误差分布       |               |               | 丢包率 |
|                                      | [0 cm,10 cm] | (10 cm,30 cm] | (30 cm,50 cm] |     |
| 节点 1                                 | 23.50        | 74.11         | 0.19          | 2.2 |
| 节点 2                                 | 32.30        | 65.87         | 0.13          | 1.7 |
| 节点 3                                 | 28.70        | 69.63         | 0.07          | 1.6 |
| 节点 4                                 | 26.20        | 71.48         | 0.12          | 2.2 |
| 节点 5                                 | 36.90        | 61.80         | 0.03          | 1.3 |
| 节点 6                                 | 33.50        | 64.95         | 0.04          | 1.5 |
| 节点 7                                 | 34.70        | 63.32         | 0.08          | 1.9 |
| 节点 8                                 | 31.70        | 65.69         | 0.11          | 2.5 |

从表 1 中可以看出,各传感器节点精度主要集中在 10~30 cm 范围内,达到 UWB 定位精度的亚米级标准<sup>[15-17]</sup>,与传统 GPS<sup>[18-19]</sup>、WiFi<sup>[20-21]</sup>、蓝牙<sup>[22]</sup>等定位方式的精度(米级)相比,有较大提升。在系统定位测试过程中,部分节点测量位置误差大

于 50 cm,主要是由于基站间的非精准时钟同步,以及试验开始时人员走动产生遮挡所导致。对数据包丢失率(PLR)进行计算,公式为

$$A = \frac{n}{N} \times 100\%$$

式中 A——数据包丢失率  
n——丢失数据包个数  
N——数据包总数

以节点 1 为例,丢包率为: $[1\,000 - 1\,000 \times (23.5\% + 74.11\% + 0.19\%)] / 1\,000 \times 100\% = 2.2\%$ 。同时,各节点最大丢包率为 2.5%,平均丢包率为 1.9%,满足温室测量基本需求<sup>[23]</sup>。其中,节点 1 和节点 4 因通风扇的运转影响了传感器的精度和稳定性;节点 8 因与主基站之间传输距离过远,数据包容易丢失或损坏,造成丢包率偏高。为尽可能减小丢包率,可以通过重新设计网络拓扑和优化设备配置,有效减少数据包的误差率,从而降低数据包丢失率。

### 4.3 可视化测试

在温室内,检测点通常均匀分布,但通风扇、冷雾机等设备会对环境参数产生较大影响。因此,反距离加权插值算法<sup>[24]</sup>更适用于温室三维温湿度场的可视化。

通过 HTML5 Canvas 实现温室三维温湿度可视化,首先需要建立相应温室模型,然后把温度、相对湿度三维云图添加到温室模型中,模拟 3D 效果,最后添加查询、扫描等功能。试验地点选择昆明理工大学智慧农业教学科研基地温室,试验时间选择 2022 年 1 月 15 日 14:00—17:00,期间温室内平均温度为 18.3℃,平均相对湿度为 57.8%。与单点式检测系统相比,在本系统三维检测效果中可以明显

看出在温室垂直空间内,温度由地面向温室塑料薄膜呈现逐渐升高的趋势,温差最高可达 5℃左右,这主要是由土壤水分蒸发及植物呼吸作用带走热量所导致。在纵向上,温室内温度由温室进口向温室内深处逐渐升高,通过对温室密封性检查,发现温室大门存在宽 20 cm 左右缝隙,由此认为温室进口密封缺陷是带来纵向温差的主要原因。三维可视化效果图如图 19 所示。

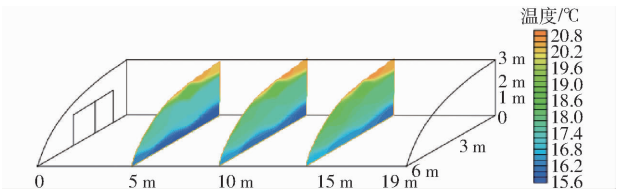


图 19 三维可视化效果图  
Fig. 19 3D visualization

## 5 结论

(1)设计了基于 UWB 定位的智能温室三维温湿度检测系统,通过 UWB 室内定位技术建立无线传感器数据传输网络,在保证传感器数据稳定传输的同时,提高了各传感器节点位置精度,提供了从数据采集到远程监测的完整方案,能够有效实时监测温室内三维温湿度变化。

(2)以 Microsoft Visual Studio 软件设计了上位机远程监测软件,实现了传感器数据的远程监测和历史查询,并通过 HTML5 Canvas 软件在 Web 端对温室温湿度进行了三维可视化。

(3)系统下位机设计了一种集成 DW1000 芯片和 STM32F103C8T6 微处理器的最小系统板,通过测试,该 STM32F 最小系统板能够准确完成各指令,在减小设备体积的同时,降低了系统成本,提升了系统可靠性。

## 参 考 文 献

[1] RODRIGUEZ S, GUALOTUNA T, GRILO C. A system for the monitoring and predicting of data in precision agriculture in a rose greenhouse based on wireless sensor networks[J]. Procedia Computer Science, 2017,121: 306 – 313.

[2] 邓小蕾,李民赞,武佳,等. 集成 GPRS、GPS、ZigBee 的土壤水分移动监测系统[J]. 农业工程学报, 2012,28(9):130 – 135.

DENG Xiaolei, LI Minzan, WU Jia, et al. Development of mobile soil moisture monitoring system integrated with GPRS, GPS and ZigBee[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(9): 130 – 135. (in Chinese)

[3] 车艳双,李民赞,郑立华,等. 基于 GPS 和 PDA 的移动智能农田信息采集系统开发[J]. 农业工程学报, 2010,26(增刊 2):109 – 114.

CHE Yanshuang, LI Minzan, ZHENG Lihua, et al. Development of a movable farm-data acquisition system with PDA and GPS [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(Supp. 2):109 – 114. (in Chinese)

[4] 曹子腾,郭阳,赵正旭,等. 室内定位技术研究综述[J]. 计算机技术与发展, 2020,30(6):202 – 206.

CAO Ziteng, GUO Yang, ZHAO Zhengxu, et al. Survey of indoor positioning[J]. Computer Technology and Development, 2020, 30(6):202 – 206. (in Chinese)

[5] SEHYUN J, JUN B P, SUNG H C. Membership management and positioning method of multiple objects using UWB communication[J]. Procedia Computer Science, 2016,79: 640 – 648.

[6] ZHAO L, QU S C, ZHANG W G. Design of multi-channel data collector for highway tunnel lighting based on STM32 and Modbus protocol[J]. Optik, 2020,213: 164388.

- [7] 杨伟,肖义平. 基于 STM32F103C8T6 单片机的 LCD 显示系统设计[J]. 网络安全与数据治理, 2014,33(20):29–31,34.  
YANG Wei, XIAO Yiping. LCD display system design based on MCU STM32F103C8T6 [J]. Cyber Security and Data Governance, 2014, 33(20):29–31, 34. (in Chinese)
- [8] 李强,霍淑珍,郑伟. 基于 IIC 通信的 PCA9685 在舵机控制中的应用[J]. 科技创新与应用, 2018(28):173–174.
- [9] 赵红梅,赵杰磊. 超宽带室内定位算法综述[J]. 电信科学, 2018,34(9):130–142.  
ZHAO Hongmei, ZHAO Jielei. An overview of ultra-wideband indoor positioning algorithms[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(9):130–142. (in Chinese)
- [10] 林相泽,王祥,林彩鑫,等. 基于超宽带的温室农用车辆定位信息采集与优化[J]. 农业机械学报, 2018,49(10):23–29,45.  
LIN Xiangze, WANG Xiang, LIN Caixin, et al. Location information collection and optimization for agricultural vehicle based on UWB[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):23–29, 45. (in Chinese)
- [11] 钱兆毅. 货车基础制动装置铆接位置空间定位应用研究[D]. 成都:西南交通大学, 2020.  
QIAN Zhaoyi. Research on application of riveting position spatial positioning of wagon base brake device [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [12] 王海燕,杨艳华. Proteus 和 Keil 软件在单片机实验教学中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2012,31(5):88–91.  
WANG Haiyan, YANG Yanhua. Application of Proteus and Keil in MCU experiment teaching[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2012, 31(5):88–91. (in Chinese)
- [13] DAMIAN K, KRZYSZTOF K. Performance of the precise point positioning method along with the development of GPS, GLONASS and Galileo systems[J]. Measurement, 2020, 164: 108009.
- [14] AHMED A, GHADA S, ABDELLATIF I, et al. Using bluetooth low energy for positioning systems within overcrowded environments: a real in-field evaluation[J]. Computers and Electrical Engineering, 2021, 93: 107314.
- [15] 周振南,胡洪. GPS/UWB 室内外无缝定位随机模型研究[J]. 测绘通报, 2021(增刊2):112–115.  
ZHOU Zhenan, HU Hong. Study of a stochastic model for seamless GPS/UWB indoor and outdoor positioning[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(Supp. 2):112–115. (in Chinese)
- [16] 肖荣浩,马旭,李宏伟,等. 基于 UWB 定位的农业机械辅助导航系统设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(3):116–123.  
XIAO Ronghao, MA Xu, LI Hongwei, et al. Design and experiment of agricultural machinery auxiliary navigation system based on UWB positioning[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(3):116–123. (in Chinese)
- [17] DJOSIC S, STOJANOVIC I, JOVANOVIC M, et al. Multi-algorithm UWB-based localization method for mixed LOS/NLOS environments[J]. Computer Communications, 2022, 181: 365–373.
- [18] 全林,薛军琛,胡小工,等. 中国区域 GPS 单频点定位在不同类型磁暴主相期间定位性能分析[J]. 地球物理学报, 2021, 64(9):3030–3047.  
QUAN Lin, XUE Junchen, HU Xiaogong, et al. Performance of GPS single frequency standard point positioning in China during the main phase of different classified geomagnetic storms[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(9):3030–3047. (in Chinese)
- [19] 李静. 基于多传感器信息融合的连续定位研究[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(5):39–43.  
LI Jing. Research on continuous location based on multi-sensor information fusion [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(5):39–43. (in Chinese)
- [20] 王博远,刘学林,蔚保国,等. WiFi 指纹定位中改进的加权 k 近邻算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2019, 46(5):41–47.  
WANG Boyuan, LIU Xuelin, YU Baoguo, et al. Improved weighted k-nearest neighbor algorithm for WiFi fingerprint positioning [J]. Journal of Xidian University, 2019, 46(5):41–47. (in Chinese)
- [21] THEWAN T, SEKSAN C, PRAMOT S, et al. Comparing WiFi RSS filtering for wireless robot location system[J]. Procedia Manufacturing, 2019(30):143–150.
- [22] 张驰,张峰,刘叶楠,等. 基于融合聚类的蓝牙指纹室内定位算法优化[J]. 计算机仿真, 2020, 37(7):314–318.  
ZHANG Chi, ZHANG Feng, LIU Yenan, et al. Optimization of bluetooth fingerprint indoor positioning algorithm based on fusion clustering[J]. Computer Simulation, 2020, 37(7):314–318. (in Chinese)
- [23] 伍冯洁,林佳翰,朱国柱,等. 堆叠式可重用农业物联网智能硬件设计及可靠性研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5):163–169.  
WU Fengjie, LIN Jiahao, ZHU Guozhu, et al. Design and reliability of intelligent hardware for the stacked reusable agricultural internet of things[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5):163–169. (in Chinese)
- [24] LUDWIG R. Areas of influence for IDW-interpolation with isotropic environmental data[J]. CATENA, 1993, 20(1–2):199–205.