

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.035

# 基于无线传感器网络的温室 CO<sub>2</sub> 浓度监控系统

王嘉宁<sup>1,2</sup> 牛新涛<sup>1,2</sup> 徐子明<sup>1,2</sup> 郑传涛<sup>1,2</sup> 王一丁<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学电子科学与工程学院, 长春 130012; 2. 集成光电子学国家重点联合实验室, 长春 130012)

**摘要:** 设计了一种温室二氧化碳(CO<sub>2</sub>)浓度监控系统,该系统由传感器节点、CO<sub>2</sub>浓度调控节点、无线通信网络和上位机软件平台构成。采用红外 CO<sub>2</sub> 测量模块 S300 作为传感器节点的核心模块对温室 CO<sub>2</sub> 浓度进行实时测量,并将采集到的 CO<sub>2</sub> 浓度、温湿度、光照等环境信息通过无线网络传输至上位机软件平台,实现了对温室环境的远程监控。上位机软件平台对采集到的环境参数进行处理、信息网络同步,并通过模糊 PID 算法对温室 CO<sub>2</sub> 浓度进行智能调节。在通信过程中,传感器节点实时采集接收信号强度(RSSI),在保证数据传输质量的同时有效调整无线发射功率以延长节点寿命。在实验室条件下配备了标准浓度的 CO<sub>2</sub> 气体样品对设计的传感器节点性能进行了标定和表征,结果显示,该传感器对 CO<sub>2</sub> 体积分数的检测下限小于  $5 \times 10^{-5}$ ;对体积分数为  $3 \times 10^{-4}$  和  $6.5 \times 10^{-4}$  的 CO<sub>2</sub> 气体样品分别进行了 10 h 的长期测量,相对波动小于 2.6%。将该监测系统在吉林省长春市双阳区奢岭镇国信采摘园进行了现场调控试验,试验温室面积为 640 m<sup>2</sup>,设定温室中 CO<sub>2</sub> 的目标体积分数为  $8 \times 10^{-4}$ ,经调控后温室中 CO<sub>2</sub> 体积分数的波动范围约为  $(8 \pm 0.42) \times 10^{-4}$ 。该 CO<sub>2</sub> 监测系统具有小型化、高性价比、高测量精度等优势,实现了信息的智能化管理与远程同步,以及温室内 CO<sub>2</sub> 浓度的智能调控。

**关键词:** 温室; CO<sub>2</sub> 浓度传感器; 无线通信网络; 监控系统

**中图分类号:** S625.5<sup>+</sup>1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)07-0280-06

## Monitoring System for CO<sub>2</sub> Concentration in Greenhouse Based on Wireless Sensor Network

WANG Jianing<sup>1,2</sup> NIU Xintao<sup>1,2</sup> XU Ziming<sup>1,2</sup> ZHENG Chuantao<sup>1,2</sup> WANG Yiding<sup>1,2</sup>

(1. College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China

2. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Changchun 130012, China)

**Abstract:** A CO<sub>2</sub> concentration monitoring system targeting greenhouse application was designed, which included sensor nodes, CO<sub>2</sub> concentration regulation node, wireless communication and PC terminals. A remote real-time CO<sub>2</sub> concentration measurement was realized by using an infrared CO<sub>2</sub> model S300 as the core model in sensor node. Environmental information derived by sensor nodes was transmitted to the PC software panel based on LabVIEW through wireless sensor networks. Received signal strength indication (RSSI) was sampled in transmission to ensure link quality and extend the service lives of sensor nodes by reasonably adjusting the transmission power. The designed and fabricated sensor node was calibrated and characterized by the standard CO<sub>2</sub> samples distributed under laboratory conditions. The experiment results indicated that the limitation of detection of the selected sensor was lower than  $5 \times 10^{-5}$ . The fluctuations for the long-term stability measurements on a  $3 \times 10^{-4}$  CO<sub>2</sub> sample and a  $6.5 \times 10^{-4}$  CO<sub>2</sub> sample were less than 2.6%. This designed monitoring system was deployed in the Guoxin picking garden in the town of Sheling, Shuangyang District, Changchun City, Jilin Province, and the field experiment was carried out in a solar greenhouse whose area was 640 m<sup>2</sup>. The desired CO<sub>2</sub> concentration in greenhouse was set to  $8 \times 10^{-4}$ , the fluctuation range under controlled CO<sub>2</sub> concentration

收稿日期: 2016-11-08 修回日期: 2016-12-27

**基金项目:** “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B03、2013BAK06B04)、国家自然科学基金项目(61307124、11404129)、吉林省科技发展计划项目(20120707、20140307014SF)、长春市科技发展计划项目(11GH01、14KG022)和集成光电子学国家重点实验室开放课题项目(IOSKL2012ZZ12)

**作者简介:** 王嘉宁(1987—),男,博士生,主要从事红外光电检测技术研究,E-mail: 18604409177@163.com

**通信作者:** 郑传涛(1982—),男,副教授,博士生导师,主要从事红外激光光谱学与传感器研究,E-mail: zhengchuantao@jlu.edu.cn

was nearly  $(8 \pm 0.42) \times 10^{-4}$ . The designed sensor node had advantages, including miniaturization, cost-effective and high precision, which realized intelligent management, remote synchronization of greenhouse factors and smart regulation of CO<sub>2</sub> concentration in greenhouse.

**Key words:** greenhouse; CO<sub>2</sub> concentration sensor; wireless sensor network; monitoring system

## 引言

随着近年来我国设施园艺的快速发展,截止2015年,我国温室总面积已突破208万hm<sup>2</sup>,其中北方设施蔬菜耕种面积已超过125万hm<sup>2</sup>[1-2]。与此同时,随着信息技术的发展,传统农业逐步向精细化农业过渡。其中,传感器、无线网络、信息处理、决策服务等智能化技术正逐步运用于温室大棚的有效管理之中[3]。尤其是近年来国内外物联网通信技术的发展和运用,有效降低了温室内信息传递的复杂性,促进了温室智能化管理的发展进程[4-6]。GUTIERREZ等[7]设计了以实时监控的温室环境信息为基础的自动灌溉系统。JEONGHWAN等[8-9]研制了环境参数监测系统平台,并将其应用于室外及温室环境。在无线传感器网络测量中,除多节点观测外,ROLDÁN等[10]采用无人机(UAV)加载传感器的方式,对温室内气体分布进行测量。然而,相对于温湿度、光照度等环境参数,温室CO<sub>2</sub>浓度参数的实时精确测量对精细化农业种植及智能灌溉具有更重要的意义。季宇寒等[11]采用无线传感器网络对温室环境参数进行了采集,建立了基于支持向量机的光合速率预测模型,并针对CO<sub>2</sub>气肥优化调控进行了相应研究。蒋毅琼等[12]设计了基于JN5139的温室CO<sub>2</sub>气肥调控系统,并在日光温室内(2.5 × 1.0 × 2.5) m<sup>3</sup>的薄膜密闭空间内进行调控试验,验证了调控系统的有效性。为实现基于物联网无线传感器网络的温室环境信息智能化管理,本文分别从应用层、中间层和物理层3个层面进行相应的设计。所设计的温室智能化监控系统主要由传感器节点、CO<sub>2</sub>气肥补充节点、无线通信网络及基于LabVIEW的上位机软件平台组成。

## 1 基于无线传感器网络(WSN)的温室监测系统

### 1.1 监控系统总体设计

所需测量的温室环境信息主要有温湿度、光照度、二氧化碳浓度。所设计的温室环境监测系统的总体结构如图1所示。该监测系统主要分为:采集温室环境数据及接收控制信号进行决策性灌溉的物理层、传输温室环境数据及节点调控信息的中间层以及实现数据实时显示、存储、共享并基于模糊PID

算法得出最佳调控参数的应用层。通过基于无线通信的传感器节点获取相应信息,并通过无线网络将信息传送至终端。由终端的上位机软件完成数据的实时显示、储存、同步等功能。

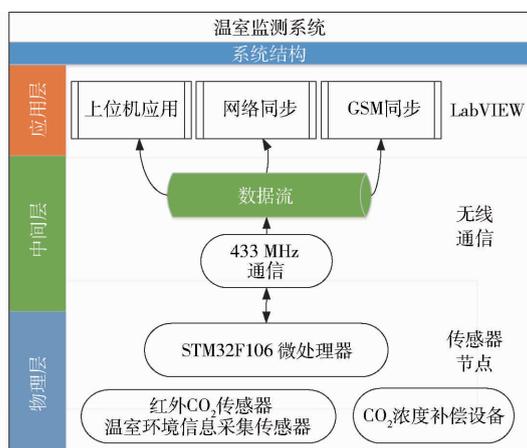


图1 温室环境监测系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of environmental monitoring system for greenhouse

### 1.2 无线传感器网络节点

#### 1.2.1 无线传感器网络节点的硬件结构

物理层功能主要由基于物联网数据传输的传感器节点来完成。该传感器节点采用ARM Cortex M3系列单片机(STM32F103R)作为核心微处理器与传感器模块及无线通信模块进行通信。图2为传感器节点的结构框图。采用锂电池独立供电,支持多路传感器分时复用进行数据采集。底板提供Flash芯片(W25Q64BV),并对采集到的数据按要求写入,预留的Uart通信接口可实现节点数据的有线读取,避免因电力不足,无线通信质量不佳等情况引起的数据丢失。考虑到无线通信模块NRF24L01发射功率较低,温室环境植物遮挡严重等因素,采用功率可调射频放大芯片RFX2401C进行功率放大,以确保无线传输在温室环境中能达到所需的发射功率。

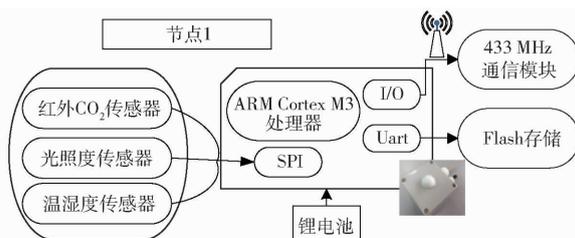


图2 传感器节点结构图

Fig. 2 Structure diagram of sensor node

### 1.2.2 无线传感器网络节点的实现

图3为无线传感器节点的实物照片。传感器节点包括供电电池、CO<sub>2</sub>传感器及相应的电路部分,封装于(8×8×4.5) cm<sup>3</sup>的防水盒中,如图3a所示。为防止温室内高湿度环境对内部红外二氧化碳传感器及测量电路造成影响,在外壁通气孔处采用ePTFE材料制成的防水透气膜进行防水透气处理,如图3b所示。经过防水处理的空气将不会对内部红外二氧化碳传感器的测量造成影响,同时避免了由于温室昼夜温差较大造成的结露现象。温湿度传感器、光照度传感器及无线通信天线露置于壳体外部,以实现温室环境因素的准确测量及数据的无线传输,如图3c中虚线所示。

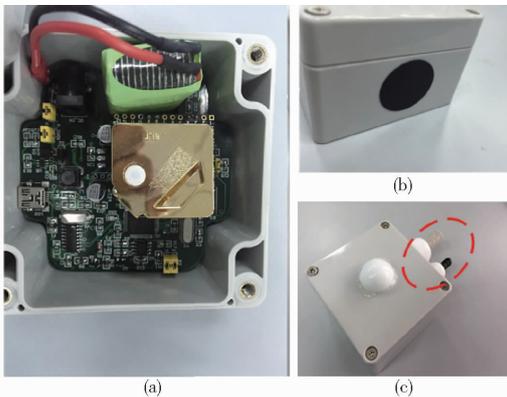


图3 传感器节点实物图

Fig. 3 Photos of sensor node

### 1.2.3 传感器的选择及校正

考虑到温室半封闭环境,白日最低CO<sub>2</sub>体积分数可达 $2 \times 10^{-4}$ 以下,且准确的CO<sub>2</sub>浓度测量直接影响到温室农业的决策性化肥灌溉,传统电化学传感器(如MG811型)具有较高的检测下限( $4 \times 10^{-4}$ )及较大的功耗(1.2 W),不满足密闭温室测量下限的同时无法长时间独立工作,均不适用无线传感器网络中传感器节点的设计需求。同时,由于温室应用环境较为复杂,由化肥和土壤等释放的注入甲烷等其他气体成分极大限制了半导体类CO<sub>2</sub>传感器的可用性。在考虑到性价比的前提下,传感器节点选用基于直接吸收法设计的S300型红外CO<sub>2</sub>传感器对温室内CO<sub>2</sub>浓度进行测量,相比于电化学、半导体传感器等,确保了较高的测量精度及较低的下限。

针对温室环境温湿度变化范围及低成本小型化设计需求,传感器节点选用SHT15型温湿度传感器对室内温湿度进行测量,并进行相应非线性校正以提高其检测精度。测量光照度采用BH1750FVI型数字光照度传感器,其测量中心波长为560 nm,为可见光范围,测量结果具有较高分辨率,测量范围

为1~65 535 lx。

### 1.2.4 CO<sub>2</sub>调控节点

通过无线传感器节点所采集的温室环境参数,通过上位机系统基于模糊PID算法处理后所得的控制信号将传输至CO<sub>2</sub>浓度补偿驱动节点,该节点由瓶装CO<sub>2</sub>气源、无线驱动电路及电磁阀组成。

驱动电路将接收到的驱动信号转换成电磁阀开关过程中不同的占空比,从而达到智能调控CO<sub>2</sub>释放流量的目的。微处理器及控制端采用TPL521型光耦进行隔离,防止驱动端脉冲信号对前端电路造成影响。采用为SONGLE型电磁阀,其最大工作频率可达4 Hz,起重力超过10 kg。但考虑到温室环境的延迟特性及探测最小周期等限制,在该设计中,调控周期设置为10 s。

## 1.3 无线传感器网络节点的通信设计

### 1.3.1 通信频段及通信流程

433 MHz通信模块具有可集成度高,小型化,绕射性好,通信距离远,发射功率可调等优势,对温室环境信息监测具有较好的针对性<sup>[13-14]</sup>。中间层的数据传输主要由433 MHz无线通信模块来完成,该模块采用si4463作为主芯片,采用射频放大芯片对发射功率进行放大且功率可调。

在无线传感器网络通信过程中,当传感器网络终端无数据采集命令时,传感器节点采用监听式工作模式,传感器处于休眠状态,经测试单片机耗电在30 μA以下,整体节点耗电在850 μA以下,极大延长了传感器节点的使用寿命。

### 1.3.2 通信频段及通信流程

收发信息的同时,接收终端会对每次通信的RSSI值进行测量,以评价链路质量。考虑通信可靠性、丢包率、同频干扰等因素,在该设计中,会根据用户需求设定所需的RSSI数值范围,当接收到的RSSI数值超出该区间,将对传感器节点发射功率进行调节,达到尽可能降低能源消耗的同时确保无线通信的信号质量。

在监测系统中传感器节点与上位机终端之间,确定有效通信距离、最大通信距离、发射功率、RSSI等参数之间关系为

$$P_R = P_T / r^n \quad (1)$$

式中  $r$ ——传输距离  $n$ ——传播因子

$P_R$ ——无线信号接收功率

$P_T$ ——无线信号发射功率

由于一般情况下发射功率可由用户自行设定,可将式(1)转换为

$$P_R (\text{dBm}) = A - 10n \lg r \quad (2)$$

式中  $A$ ——随发射功率而变化的常数

从式(2)可发现,随通信距离的增加,接收功率呈反指数曲线关系<sup>[15-17]</sup>。实际情况将由实地测试结果给出并进行分析。

#### 1.4 基于 LabVIEW 的远程监测终端

在监测系统应用层设计中,各项功能主要由上位机软件来实现,采用 LabVIEW 2013<sup>[18-20]</sup>和 Microsoft Office 2007 进行开发,操作系统为 Windows 7。

作为温室数据收发终端,LabVIEW 软件平台主要实现了传感器节点与上位机通信、数据存储与共享和模糊 PID 调控算法 3 个功能。

##### 1.4.1 传感器节点与上位机通信

上位机将按设定好的采集频率定期唤醒传感器节点,接收并保存接收到的测量结果,如数据接收无误,则反馈相应的 ACK 验证结果,使传感器重新回到睡眠监听模式。图 4 中红色虚线部分为传感器节点与上位机通信的相应参数设置区域。对传感器节点的运行状态及无线通信质量(如电池电量、RSSI 值等)进行监控。监控结果将与预先设置的要求实时比对,当不满足要求时,将对传感器节点发出相应调整命令,如改变发射功率,进入休眠模式等。该标准可在图 4 中蓝色虚线部分进行手动设置。上位机与无线网络通信采用 RS232 通用 Uart 模式。

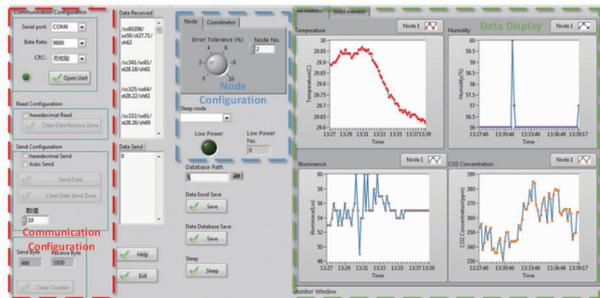


图 4 基于 LabVIEW 的上位机系统前面板

Fig. 4 Front panel of PC terminal based on LabVIEW

##### 1.4.2 数据存储与共享

接收的数据经由后台解码后,将被实时显示到前面板观察界面。实时数据观测区域如图 4 中绿色虚线方框区域所示。可通过选择结点序号观测不同结点信息,实时环境信息将通过 GSM 通信缓存至 GSM 900A 外接芯片,或者由短信模式发送至来信手机,实现远程信息同步。针对温室大滞后渐变环境,当监测系统进入自动运行状态时,可实现无人值守远程信息监控等功能。在数据的存储方面,SQL 的数据库建立 LabVIEW 与 Access 2007 连接,采集的环境数据被实时显示到前面板的同时存储至 Access 数据库之中,以便后期数据的处理与分析。该过程由 LabVIEW 后台函数 DB Tools 函数库实现。

#### 1.4.3 模糊 PID 算法

在对数据进行显示、存储的同时,LabVIEW 后台程序也将提取接收到的数据,作为模糊 PID 的输入变量:测得 CO<sub>2</sub> 浓度与理想值之间的差值( $E$ )与 CO<sub>2</sub> 变化趋势( $E_c$ )。

基于 LabVIEW 的模糊控制算法如下:首先对变量  $E$ 、 $E_c$  进行模糊化处理,将归一化后变量的变化范围定义在模糊集的论域上,即 {NB, NS, ZO, PS, PB},从而确立各模糊子集的隶属度,该过程称之为模糊化。其次,针对模糊 PID 输出量  $P$ 、 $I$ 、 $D$  确立其模糊规则表,该过程称为模糊规则的建立,以“IF... THEN...”的形式进行表示,在该设计中,控制规则的生成主要采用经验和模糊模型获得,共设定 25 条模糊规则。最后,确定解模糊规则,该设计中选择重心法进行解模糊处理,将信息量进行最大化利用以得到最佳的控制结果。设定完成后的模拟 PID 参数输出如图 5 所示。

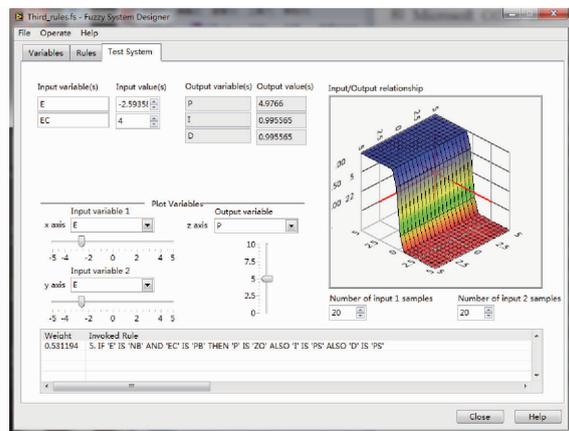


图 5 基于 LabVIEW 的模糊规则结果测试

Fig. 5 Fuzzy test system for PID control based on LabVIEW

当确定模糊算法计算原则后,通过模糊算法所得到的 PID 控制参数将根据外界环境因素实时调整。通过仿真与实地测试发现,采样间隔会直接影响调控性能的精度及响应时间。

## 2 系统性能试验与结果分析

### 2.1 S300 型红外 CO<sub>2</sub> 传感器性能测试

考虑到温室环境 CO<sub>2</sub> 浓度变化范围较大,需对 S300 型红外 CO<sub>2</sub> 传感器进行标定测试。采用 99.999% 纯氮气与不确定度为 2%、体积分数为  $5 \times 10^{-3}$  的 CO<sub>2</sub> 标准气作为气源,采用误差为 2% 的质量流量计(MT-300 型)配气,试验结果如图 6 所示。当待测 CO<sub>2</sub> 体积分数低于  $6 \times 10^{-5}$  时,待测信号淹没在噪声之中,测量结果失真,在  $6 \times 10^{-5} \sim 3.2 \times 10^{-3}$  范围内,测量结果线性度良好。随后使用纯氮气冲洗气室,再将传感器节点长期放置于  $3 \times$

$10^{-4} \sim 6.5 \times 10^{-4}$  标准待测  $\text{CO}_2$  气体中,该气体浓度选择对应实际应用温室环境监测浓度需求,直至读数稳定后开始记录数据,试验进行 10 h 以上,结果如图 7 所示,在  $3 \times 10^{-4}$  稳定性测量时出现最大波动,其误差波动范围为 2.6%。

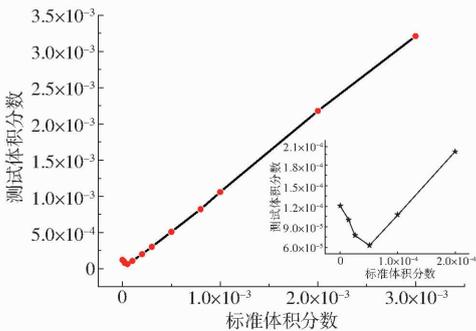


图6  $\text{CO}_2$  传感器(S300型)的标定实验结果  
Fig.6 Calibration results of  $\text{CO}_2$  sensor (S300)

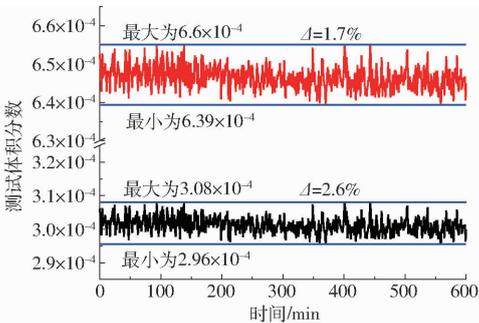


图7 稳定性实验结果

Fig.7 Experimental results of sensor stability

## 2.2 实地通信试验

现场试验地点为吉林省长春市双阳区奢岭镇国信采摘园。通信测试地点为大型韭菜温室,测试期间植株处于成熟期,该日光温室为无柱拱形屋面式温室,面积为  $220 \times 8 \text{ m}^2$ ,高度约 3 m,夜间棚顶采用草帘覆盖,达到夜间保温的效果。在试验中,为避免天线增益的产生,发送端与接收端采用同种天线,其收发节点天线方向一致,距地高度大于 1 m,由上位机软件进行实时监测记录 RSSI。

图 8a 为接收无线信号强度 RSSI 值随传输距离增加的变化趋势,可以看出,随着收发距离的增加,

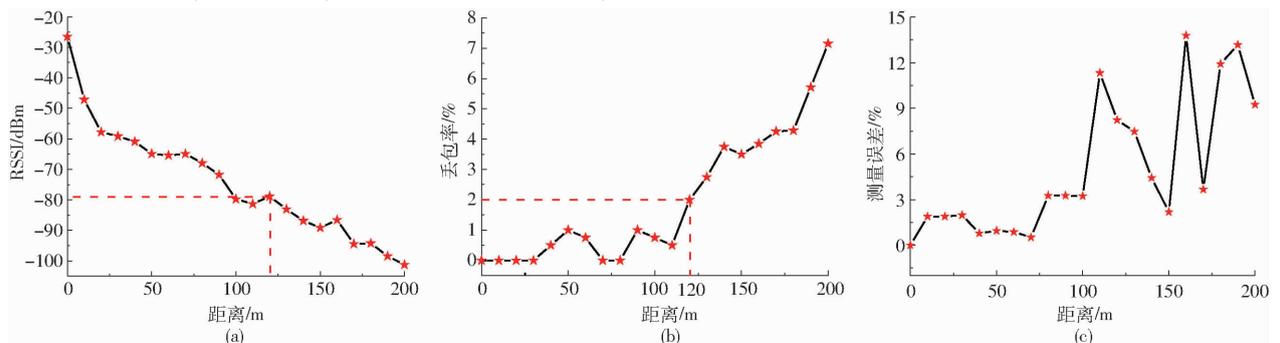


图8 随距离增加,无线通信性能测试结果

Fig.8 Wireless communication measurement results with increase of communication distance in greenhouse

RSSI 值逐渐减小,当传输距离在 0 ~ 20 m 范围以内 RSSI 值变化较为明显,从 -25 dBm 迅速降低至 -60 dBm。随着收发距离的进一步增加,RSSI 值呈现出比较缓慢的变化趋势,当传输距离达到 200 m 时,RSSI 降低至 -100 dBm 以下。该试验结果符合 RSSI 值随传输距离增加而变化的理论关系。

图 8b 为传输丢包率随传输距离增加而变化的关系。从图中可以看出,当传输距离超过 120 m,即 RSSI 值低于 -80 dBm 时,丢包率高于 2%,且随着传输距离的进一步增大,丢包率明显增加。而随丢包率增加而引起的数据重传则意味着传感器节点能量的进一步消耗,使用寿命随之缩短。

图 8c 为 RSSI 检测误差随距离的变化关系,当传输距离在 100 m 之内,RSSI 检测误差波动较为平稳,最大检测误差在 3% 以内,测量精度较高,可有效确保依据 RSSI 判断信号质量的有效性。当传输距离在 100 ~ 200 m 之间,检测误差较大同时伴有较大的波动性,在该传输距离内,通过 RSSI 值判断信号质量的方法的可靠性有限。

## 2.3 实地数据采集

实地通信测试结果显示,所设计的传感器节点通信性能有限,在 100 m 以内可达到良好的通信性能。因此,实地数据采集选择在面积为  $80 \text{ m} \times 8 \text{ m}$  的非菜温室内进行,所采集的数据除二氧化碳浓度外还包括温室内温湿度及光照度。为提高数据可读性,采样间隔设置为每 10 s 采集一组数据,在实际应用中,应根据实际需要增加采样间隔时间以延长节点使用寿命,其实物图及测量结果如图 9 所示。测试日期为 2 月初,测试环境为日光韭菜温室,如图 9a 所示。

图 9b 为截取的 2 d 内温室  $\text{CO}_2$  及光照度测量结果,结果符合植物生长规律,白天当光照度较强时,植物进行光合作用, $\text{CO}_2$  浓度降低。16:00 左右为保持温室内夜间温度,将使用卷帘机对温室棚顶进行遮盖保暖,因此,所测得光照度降低为 0,夜间植物以呼吸作用为主, $\text{CO}_2$  体积分数显著提升,峰值

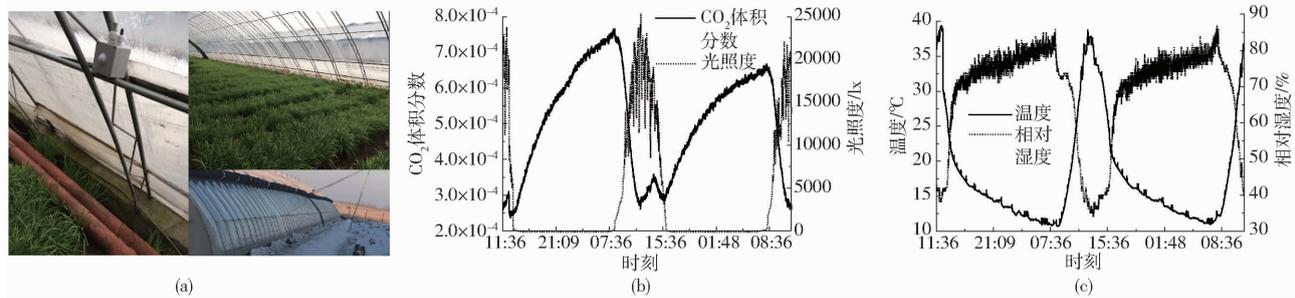


图 9 实验温室实地照片及测试结果

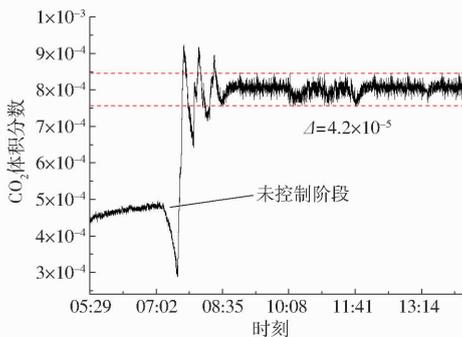
Fig. 9 Photo of greenhouse and related measured results

可超过  $7 \times 10^{-4}$ 。

图 9c 为截取的 2 d 内温室中温度与相对湿度测量结果。随着白日光照照射,温室温度升高,湿度降低。相反,夜间温室中温度较低,最低可降低至 12℃,相对湿度较高,最高可达 85% 左右。

## 2.4 实地 CO<sub>2</sub> 浓度调控结果

在实地调控中,采用钢瓶装纯 CO<sub>2</sub> 气体,通过减压阀、电磁阀接至通气软管之中,为均衡管内压力,使 CO<sub>2</sub> 均匀扩散至棚内,软管每隔一段距离设置放气孔,放气孔间距随远离气源逐渐变小。经实地测试,最终补偿结果如图 10 所示。从未受控阶段

图 10 温室 CO<sub>2</sub> 浓度调控结果Fig. 10 Regulation result of CO<sub>2</sub> concentration in greenhouse

至最终稳定约需 40 min,进入稳定阶段后,温室内 CO<sub>2</sub> 气体体积分数波动范围约为  $(8 \pm 0.42) \times 10^{-4}$ ,其中 10:00—12:00 间存在较为明显波动阶段,其为人工开窗散热导致。

根据图 10 监测数据,采用模糊 PID 算法成功地对温室内 CO<sub>2</sub> 浓度进行了合理调控,可通过优化模糊算法隶属函数及增加调控点以减小响应时间等方式进一步提升其调控性能。

## 3 结束语

根据现代化温室大棚环境监测需要,设计并实现了基于无线传感器网络的温室 CO<sub>2</sub> 测控系统。集成红外 CO<sub>2</sub> 模块的小型化传感器节点实现了温室 CO<sub>2</sub> 浓度实时监测。基于 RSSI 的 433 MHz 的无线通信在确保无线通信网络通信质量的同时延长了传感器节点的使用寿命。基于 LabVIEW 的上位机终端实现了数据的远程共享和在线分析。同时,模糊 PID 算法被应用于温室 CO<sub>2</sub> 浓度的智能调控。在温室环境进行了实地数据测量,验证了该系统的可行性及可靠性。实现了温室内 CO<sub>2</sub> 浓度的实时调控。

## 参 考 文 献

- 1 白义奎. 西北非耕地温室结构与建造技术项目成果汇报(18) 落地装配式全钢骨架结构日光温室[J]. 农业工程技术, 2016(4): 30-33.
- 2 张欣. 日光温室相变材料墙板蓄/放热过程数值模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
- 3 李萍萍,王纪章. 温室环境信息智能化管理研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 236-243. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20140438&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140438&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.038. LI Pingping, WANG Jizhang. Research progress of intelligent management for greenhouse environment information [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 236-243. (in Chinese)
- 4 AZAZA M, TANOUGAST C, FABRIZIO E, et al. Smart greenhouse fuzzy logic based control system enhanced with wireless data monitoring [J]. ISA Transactions, 2016, 61: 297-307.
- 5 MALAVER A, MOTTA N, CORKE P, et al. Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse gases[J]. Sensors, 2015, 15(2): 4072-4096.
- 6 SERODIO C, CUNHA J B, MORAIS R, et al. A networked platform for agricultural management systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 31: 75-90.
- 7 GUTIERREZ J, VILLA-MEDINA J F, NIETO-GARIBAY A, et al. Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(1): 166-176.

- LI Xiya, WU Gao, LIAO Jun, et al. Road identification of automobile ABS braking process [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 34(4): 24 - 27. (in Chinese)
- 11 钱立军, 邱利宏, 陈朋. 基于模糊 PID 扭矩识别的混合动力汽车优化控制[J]. 中国机械工程, 2015, 26(13): 1752 - 1759. QIAN Lijun, QIU Lihong, CHEN Peng. Optimal control of hybrid electric vehicle based on fuzzy PID torque identification [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(13): 1752 - 1759. (in Chinese)
- 12 姜立标, 丘华川, 吴中伟, 等. 四轮驱动汽车牵引力控制系统控制策略[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(11): 2289 - 2298. JIANG Libiao, QIU Huachuan, WU Zhongwei, et al. Four wheel drive vehicle traction control strategy [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(11): 2289 - 2298. (in Chinese)
- 13 吴光强, 陈慧勇. 基于遗传算法的混合动力汽车参数多目标优化[J]. 汽车工程, 2009, 31(1): 60 - 64. WU Guangqiang, CHEN Huiyong. Multi-objective optimization of hybrid vehicle parameters based on genetic algorithm [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(1): 60 - 64. (in Chinese)
- 14 王威, 薛彦冰, 宋玉玲, 等. 基于 GA 优化控制规则的汽车主动悬架模糊 PID 控制[J]. 振动与冲击, 2012, 22(3): 157 - 162. WANG Wei, XUE Yanbing, SONG Yuling, et al. Fuzzy PID control of vehicle active suspension based on GA optimal control rules [J]. Vibration and Shock, 2012, 22(3): 157 - 162. (in Chinese)
- 15 KIENTCH U. Realtime estimation of adhesion characteristic between tires and road[C] // Proceedings of IFAC World Congress, 1993: 15 - 18.
- 16 刘刚, 靳立强, 陈鹏飞. 复杂工况下基于最佳滑移率的汽车牵引力控制算法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2016, 46(5): 1391 - 1398. LIU Gang, JIN Liqiang, CHEN Pengfei. The traction control algorithm based on the optimal slip ratio under complex conditions [J]. Journal of Jilin University: Engineering Science, 2016, 46(5): 1391 - 1398. (in Chinese)
- 17 胡建军, 王银, 秦大同, 等. 基于轴间转矩分配的四轮驱动汽车牵引力控制[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 38(1): 108 - 112. HU Jianjun, WANG Yin, QIN Datong, et al. Wheel drive vehicle traction control based on the four wheel drive [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(1): 108 - 112. (in Chinese)
- 

(上接第 285 页)

- 8 JEONGHWAN H, CHANGSUN S, HYUN Y. Study on an agricultural environment monitoring server system using wireless sensor networks[J]. Sensors, 2010, 10(12): 11189 - 11211.
- 9 JEONGHWAN H, CHANGSUN S, HYUN Y. A wireless sensor network-based ubiquitous paprika growth management system[J]. Sensors, 2010, 10(12): 11566 - 11589.
- 10 ROLDÁN J J, JOOSSEN G, SANZ D, et al. Mini-UAV based sensor system for measuring environmental variables in greenhouses [J]. Sensors, 2015, 15(2): 3334 - 3350.
- 11 季宇寒, 李婷, 张漫, 等. 基于 WSN 的温室 CO<sub>2</sub> 气肥优化调控系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 201 - 207. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2015S033&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2015S033&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.033.
- JI Yuhan, LI Ting, ZHANG Man, et al. Design of CO<sub>2</sub> fertilizer optimizing control system on WSN[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 201 - 207. (in Chinese)
- 12 蒋毅琼, 张漫, 李婷, 等. 基于 WSN 的日光温室 CO<sub>2</sub> 浓度监控系统[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(4): 166 - 171. JIANG Yiqiong, ZHANG Man, LI Ting, et al. Development of a CO<sub>2</sub> concentration monitoring and controlling system in solar greenhouse based on WSN[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(4): 166 - 171. (in Chinese)
- 13 ADRIAN C R, JOSE M R, VICTOR A S, et al. Mobile robot positioning with 433-MHz wireless motes with varying transmission powers and a particle filter[J]. Sensors, 2015, 15(5): 10194 - 10220.
- 14 雷凯峰. 面向农业应用的 433 MHz 无线信号传播特性研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014. LEI Kaifeng. The research on propagation characteristics of 433 MHz wireless sensor network signal in agriculture application[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014. (in Chinese)
- 15 GOLDONI E, SAVIOLI A, RISI M, et al. Experimental analysis of RSSI-based indoor localization with IEEE 802.15.4[C] // 2010 European Wireless Conference, 2010: 71 - 77.
- 16 JANJA S, MARKO M, DUSAN G. Distance estimation using RSSI and particle filter[J]. ISA Transactions, 2015, 55: 275 - 285.
- 17 SHU Jian, LIU Song, LIU Linlan, et al. Research on link quality estimation mechanism for wireless sensor networks based on support vector machine[J]. Chinese Journal of Electronics, 2017, 26(2): 377 - 384.
- 18 FERRAND P. GPSCAN. VI: a general-purpose LabVIEW program for scanning imaging or any application requiring synchronous analog voltage generation and data acquisition [J]. Computer Physics Communications, 2015, 192: 342 - 347.
- 19 WCISLIK M, SUCHENIA K, LASKAWSKI M S. Method of programming of sequential control systems using LabVIEW environment[J]. IFAC-Papers Online, 2016, 49(25): 476 - 481.
- 20 SHI C, TENG G, LI Z. An approach of pig weight estimation using binocular stereo system based on LabVIEW[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 129: 37 - 43.