

doi: 10.3788/gzxb20174608.0812004

中红外二氧化碳传感器的研制及在农业中的应用

郑玲娇, 牛新涛, 王嘉宁, 郑传涛, 王一丁

(集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 吉林大学 电子科学与工程学院, 长春 130012)

摘要:利用二氧化碳气体分子在 $4.25\ \mu\text{m}$ 处的基频吸收带, 研制了一种差分式中红外二氧化碳检测系统. 系统的光路部分由热辐射红外光源、双通道热释电探测器和球面反射镜构成, 电路部分主要包括信号处理、光源驱动及主控模块. 采用 Tracepro 软件对气室结构进行仿真和优化设计, 使气体吸收光程达到 $30\ \text{cm}$, 改善了系统的性能. 实验研究了系统对不同浓度二氧化碳气体样品的传感特性. 实验结果表明, 由拟合曲线得到的浓度与实际浓度误差较小, 在 $0\sim 5\ 000\ \text{ppm}$ 范围内, 测得二氧化碳浓度的标准差小于 $45\ \text{ppm}$, 而在 $500\ \text{ppm}$ 以下, 测量浓度的标准差小于 $5\ \text{ppm}$; 对浓度为 $0\ \text{ppm}$ 的二氧化碳气体样品连续测量 $2\ \text{h}$, 测量结果的标准差约为 $2.8\ \text{ppm}$; 根据 Allan 方差分析得到系统的 1σ 检测下限为 $2.5\ \text{ppm}$. 在每个二氧化碳传感器上增加无线模块 nRF24L01, 构成传感器节点, 在选定的日光温室大棚中构建了无线传感器网络, 采集了温室大棚中的二氧化碳浓度信息, 验证了所研制的传感器性能.

关键词:光电子学; 红外吸收光谱; 气体检测仪; 二氧化碳; 无线传感器网络; 温室大棚

中图分类号: TN21

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0812004-8

Development and Agricultural Application of a Mid-Infrared Carbon Dioxide Sensor System

ZHENG Ling-jiao, NIU Xin-tao, WANG Jia-ning, ZHENG Chuan-tao, WANG Yi-ding
(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Using the fundamental absorption band at the wavelength of $4.25\ \mu\text{m}$ of carbon dioxide molecule, a differential mid-infrared carbon dioxide detection system was developed. The optical part of the system includes infrared thermal emitter, dual-channel pyroelectric detector and spherical mirror and the circuit part mainly consists of signal-processing, source-driving and main-control module. Simulating and optimizing the structure of the gas cell by using Tracepro software, eventually, the optical path of the gas absorption reaches $30\ \text{cm}$, and the performance of the system is improved. Preparing standard carbon dioxide gases with different concentration and investigating the sensing characteristics of system on carbon dioxide gas. Experimental results indicate that, the error between the measured concentration which are obtained by fitting curve and actual concentration is small, in the range of $0\sim 5\ 000\ \text{ppm}$, the standard deviation of the measured concentration is less than $45\ \text{ppm}$, and that is less than $5\ \text{ppm}$ under $500\ \text{ppm}$; the standard deviation of 2 hours long-term measurement concentration on the $0\ \text{ppm}$ is about $2.8\ \text{ppm}$; the 1σ theoretical limit of detection obtained from the Allan variance is $2.5\ \text{ppm}$. Finally, each carbon dioxide sensor becomes a sensor node by adding wireless module nRF24L01 on each carbon dioxide

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (Nos. 2014BAD08B03-4, 2013BAK06B04), 国家重点研发计划课题 (Nos. 2016YFD0700101, 2016YFC0303902), 国家自然科学基金项目 (Nos. 61307124, 61627823), 吉林省科技发展计划项目 (Nos. 20120707, 20140307014SF), 长春市科技发展计划项目 (Nos. 11GH01, 14KG022) 资助

第一作者: 郑玲娇 (1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为红外气体检测系统. Email: 13843047106@163.com

导师: 王一丁 (1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为红外光电子学. Email: wangyiding47@hotmail.com

通讯作者: 郑传涛 (1982-), 男, 副教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为光电子器件与系统. Email: zhengchuantao@jlu.edu.cn

收稿日期: 2016-12-29; **录用日期:** 2017-03-30

<http://www.photon.ac.cn>

sensor. Building a wireless sensor network in the chosen greenhouse. We have collected the carbon dioxide concentration and verified the performance of the developed sensor by filed application.

Key words: Optoelectronics; Infrared absorption spectroscopy; Gas detector; Carbon dioxide; Wireless sensor network; Greenhouse

OCIS Codes: 120.6200; 250.0040; 230.4480; 040.1880; 040.3060; 260.3060

0 引言

在环境保护、医学诊断、卫生防疫、宇航生保和工业过程与分析等领域检测并控制二氧化碳(CO_2)浓度是一项必不可少的工作. 与传统的干涉法、电化学法等气体浓度检测方法相比, 红外吸收法具有灵敏度高、检测速度快、稳定性好等优点, 因此得到了广泛的发展和运用^[1-4]. 目前国内外研究者采用红外光谱检测技术检测 CO_2 浓度主要有: 1) 可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)技术^[5-10], 在近红外波段使用量子阱激光器作为红外光源, 在中红外波段使用量子级联激光器作为红外光源; 2) 光声光谱技术^[11-12]; 3) 腔增强光谱技术^[13]; 4) 非分光红外(Non-Dispersed Infrared, NDIR)光谱技术^[14]等. 非分光红外检测技术的结构相对简单, 且光源一般采用热辐射红外光源或者红外发光二极管(Light Emitting Diode, LED), 易于调制, 不易损坏且寿命长, 受到广泛的关注.

本文采用 NDIR 光谱技术, 利用 CO_2 在 $4.25 \mu\text{m}$ 处的基频吸收带, 采用热辐射红外光源、双通道热释电探测器和球面反射镜构成光路部分, 结合后端集成的硬件处理电路, 最终研制出了功耗低、结构简单且性能优良的红外 CO_2 浓度检测仪. 同时, 在每个红外 CO_2 浓度检测仪上增加无线模块 nRF24L01 形成无线传感器节点, 并利用多个节点构建了无线传感器网络, 实现了对温室大棚中 CO_2 浓度信息的多点检测.

1 CO_2 分子的中红外吸收光谱

分子在红外光的照射下, 其振动能级和转动能级跃迁, 从而得到气体分子的红外吸收光谱. 不同气体分子的结构不同, 振动和转动能级跃迁所需能量不同, 因此对电磁波的吸收也就不同, 所以各种气体都有各自

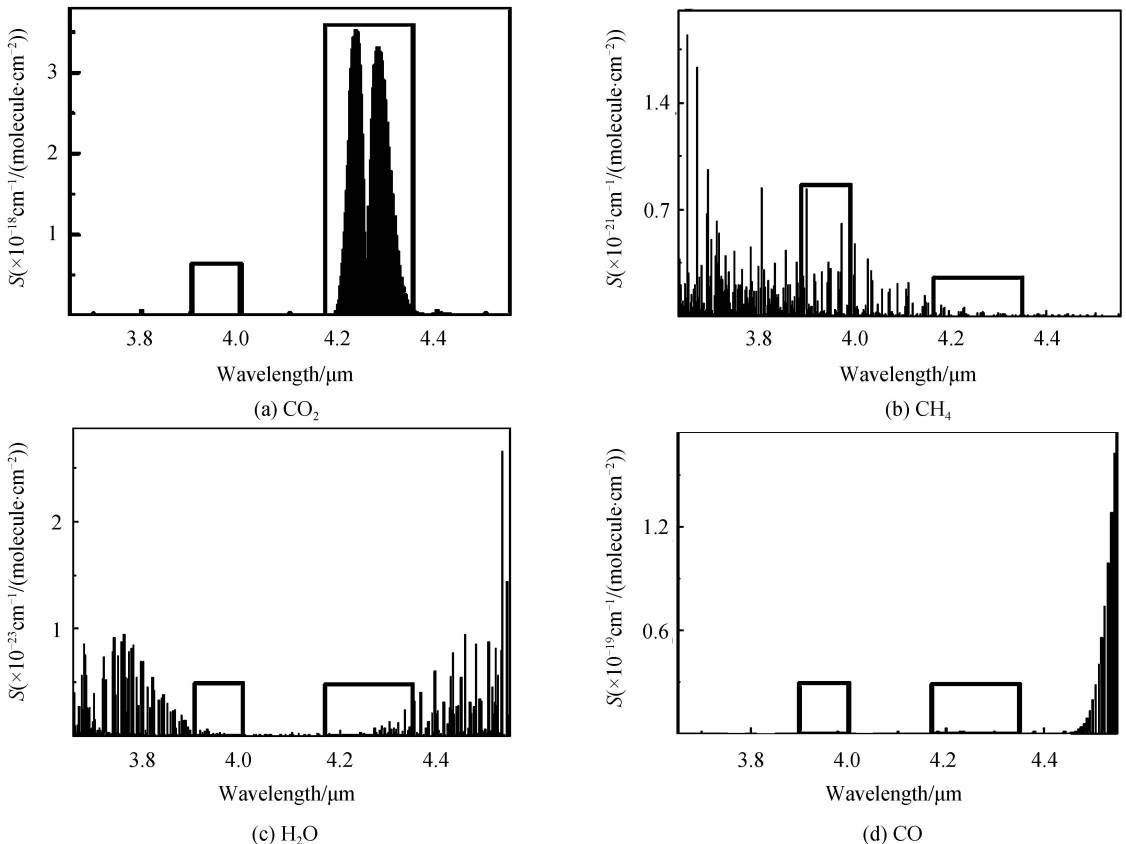


图 1 CO_2 、 CH_4 、 H_2O 、 CO 在 $4.25 \mu\text{m}$ 附近的吸收光谱
Fig. 1 Absorption spectrum of CO_2 , CH_4 , H_2O , CO around $4.25 \mu\text{m}$

特定的吸收光谱. CO₂ 分子在中红外区有一个强吸收峰,在 4.25 μm 附近,对应的波数为 2 352.94 cm⁻¹. 根据高分辨率分子透射吸收数据库 (High-Resolution Transmission Molecular Absorption Database, HITRAN)绘制的 CO₂ 在 3.92 μm~4.55 μm 波长范围的中红外吸收光谱,如图 1 所示,其中横坐标为波数,纵坐标为吸收强度.图中也包含了水(H₂O)、一氧化碳(CO)、甲烷(CH₄)的红外吸收光谱,可以看到在 3.9~4 μm这一范围内四种分子的吸收都基本为 0,在 4.17~4.35 μm 范围内 CO₂ 有强吸收,但其他分子基本无吸收.而且本系统中对电路和光路部分都进行密闭封装,通过防水透气膜实现气体的扩散,进一步避免了 H₂O 的干扰.

2 CO₂ 检测系统结构与原理

2.1 CO₂ 检测系统结构

设计的红外 CO₂ 检测系统的结构框图如图 2 所示,低频调制(Low Frequency Modulation, LFM)后的红外光源发出的光经过球面镜的反射入射到探测器上,探测器输出的两路电信号分别经过低通滤波电路(Filter)、峰值检波电路(Peak detector)、采样保持电路(S/H)和数模转换电路(ADC)到达数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP),主芯片处理得到的数据,将气体的浓度信息显示在液晶显示屏(Liquid Crystal Display, LCD)上,并通过无线模块将浓度信息发送出去,实现与主机的通信.同时利用温度传感器监测整个电路所在环境的温度,当温度超过设定范围时打开风扇降温,以避免仪器因温度过高而损坏.

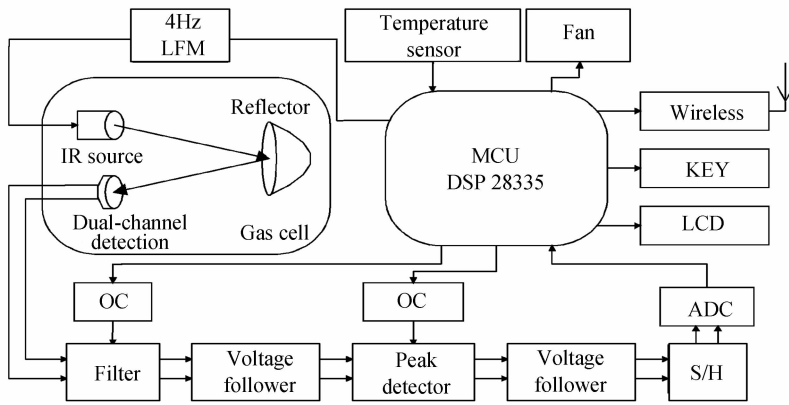


图 2 中红外 CO₂ 检测系统的结构

Fig. 2 Structure of the mid-infrared CO₂ detection system

2.2 检测原理

探测器具有两个包含滤光片(滤光片的中心波长分别为 3.95 μm、4.25 μm)的敏感窗口,对应输出两路信号.波长为 4.25 μm 的红外光被 CO₂ 吸收,吸收后的光强经探测器转换为测量信号 U₁;波长为 3.95 μm 的红外光不被气体吸收,经探测器转换为参考信号 U₂.朗伯-比尔定律为 $I = I_0 \exp(-KCL)$,其中 I₀ 代表初始光强, K 代表吸收系数, C 代表气体浓度, L 代表光程.定义探测器在 λ₁、λ₂ 处的光电转换系数分别为 k₁、k₂,则可得到 U₁、U₂ 的表达式为

$$U_1 = I_0 k_1 \exp(-KCL) \tag{1}$$

$$U_2 = I_0 k_2 \tag{2}$$

由式(1)、(2)得

$$U_1 - U_2 = I_0 [k_1 \exp(-KCL) - k_2] \tag{3}$$

定义 ΔU = U₁ - U₂,则差分信号的比值为

$$\frac{\Delta U}{U_2} = \frac{I_0 [k_1 \exp(-KCL) - k_2]}{I_0 k_2} = \frac{k_1 \exp(-KCL)}{k_2} - 1 \tag{4}$$

化简式(4)可得 CO₂ 的浓度为

$$C = \frac{1}{-KL} \ln \left[\frac{k_2}{k_1} \left(1 + \frac{\Delta U}{U_2} \right) \right] \tag{5}$$

在对检测系统的标定实验中,按照式(4)、(5)的变化规律拟合得到差分电压比值与气体浓度之间的关

系,再根据拟合关系式将测得的差分电压比值转换为气体的浓度.

2.3 中红外热光源及探测器

采用微机电系统技术制作而成的热光源 IR55 具有许多优点,如宽光谱输出($1\sim 20\ \mu\text{m}$)、快速响应、高调制深度、低功耗、长寿命等. 探测器选用双通道热释电探测器 LM242,两个通道的中心波长分别为 $\lambda_1 = 4.25\ \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 3.95\ \mu\text{m}$,半功率宽分别为 $180\ \text{nm}$ 、 $90\ \text{nm}$,由第 1 节对 CO_2 、 H_2O 、 CO 、 CH_4 的红外吸收光谱的分析可得,探测器中心波长为 $4.25\ \mu\text{m}$ 的通道经 CO_2 后有强吸收,而中心波长为 $3.95\ \mu\text{m}$ 的通道探测几乎无分子吸收. 考虑到热释电探测器响应时间长的问题,本文选用 $4\ \text{Hz}$ 作为光源的调制频率.

2.4 气室设计

合适的光学气室结构可以增加光程,从而增大两路信号的差值,优化仪器的性能. 本文设计了一种基于球面反射镜的气室结构,采用 Tracepro 软件对气室结构进行仿真和优化设计. 图 3(a)为气室结构,红外光源和探测器位于球面反射镜的主截面上且关于球面反射镜的主轴对称,光源与探测器间距离为 $30\ \text{mm}$,光源探测器所在平面距离球面反射镜 $150\ \text{mm}$,球面反射镜的开孔直径为 $101\ \text{mm}$,这样可使红外光源发射的红外光经过球面反射镜的反射最终入射到探测器的敏感面上. 图 3(b)为该结构在 Tracepro 中的光路仿真结果,图中可见该结构具有很好的聚光效率.

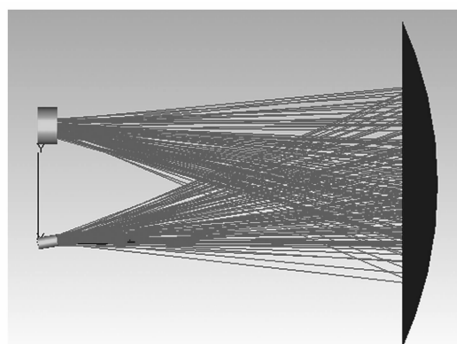
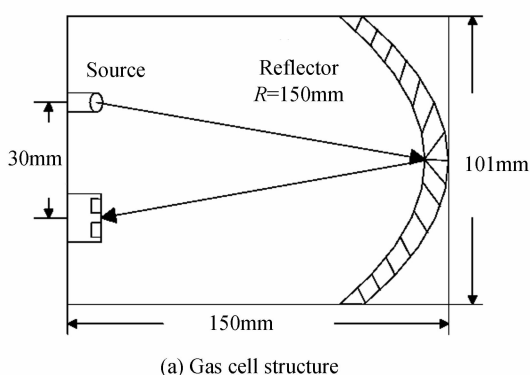


图 3 气室结构及光路仿真
Fig. 3 Gas cell structure and simulation of the light path

3 传感器实验

3.1 标定实验

采用静态配气法,并以商用 CO_2 传感器的读数为标准来开展标定实验,以确定检测系统的差分比信号与气体浓度之间的关系. 使用的商用传感器为 ELT SENSOR 公司的 K300 传感器,它是基于非分光红外吸收光谱原理研制而成,测量范围 $0\sim 2\ 000/3\ 000/5\ 000/10\ 000\ \text{ppm}$ 四个档次可选,测量准确度达到 $\pm 30\ \text{ppm}$ (测量值的 $\pm 5\%$),响应时间为 $60\ \text{s}$,采样间隔为 $3\ \text{s}$,唤醒时间为 $60\ \text{s}$. 配置的气体样品的浓度范围是 $0\sim 5\ 000\ \text{ppm}$,共配备了 24 种 CO_2 气体样品. 实验测得的差分电压信号与气体浓度之间的关系如图 4 所示,对实验数据进行拟合,得到的曲线方程为

$$\frac{\Delta U}{U_2} = -0.20 + 1.44 \exp(-6.12C \times 10^{-4}) \quad (6)$$

比较式(4)式和(6),二者具有相同的形式,且由图 4 可看出,实验数据点都较好的分布在曲线附近,表明曲线具有较好的拟合优度. 在测量未知浓度的 CO_2 气体时,首先需要测量差分电压比值,再根据式(6)计算

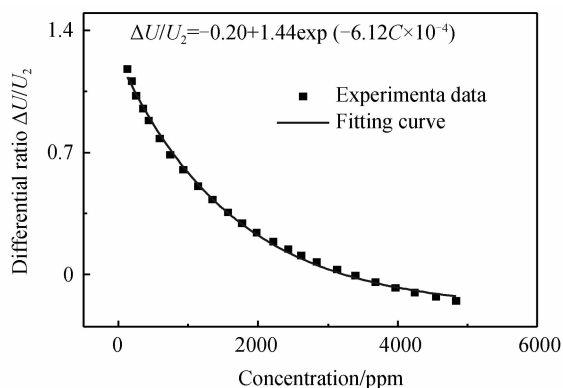


图 4 两路信号的差分比与 CO_2 浓度的拟合曲线
Fig. 4 Fitting curve of the relationship between differential ratio of the two output signals and CO_2 gas concentration

气体浓度.

3.2 测量准确度实验

采用静态配气法,以商用 CO₂ 传感器的读数为标准浓度,以所研制测试系统的读数为测量浓度.在 0~5 000 ppm 的范围内共测量 32 组不同浓度时的数据,每组测量 10 min,每秒记录一次数据.

采用标准差计算公式

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (7)$$

式中 $\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$. 计算每组测量浓度数据的平均值和标准差,得到的系统的测量浓度与标准浓度的关系如图 5 所示.由图 5 可得:当 CO₂ 浓度 < 500 ppm 时,标准差 < 5 ppm;在 500~3 000 ppm 的范围内,标准差 < 10 ppm;在 3 000~5 000 ppm 范围内标准差 < 45 ppm.

拟合测量值与标准值之间的关系,得到的曲线方程为

$$y = 0.97 \cdot x + 14.84 \quad (8)$$

由曲线方程可得,曲线斜率为 0.97,十分接近 1,故检测系统具有较高的测量准确度.

3.3 稳定性实验

测试检测系统在 0 ppm 时的稳定性,实验系统如图 6 所示,先用氮气洗气,待气室中完全充满氮气时,密封气室,测量系统输出,测试时间为 2 h, U₁、U₂、ΔU 的测试结果如图 7(a) 所示,浓度 C 的测试结果如图 7(b) 所示.由图可得, U₁ 的平均值为 2.844 V,变化范围为 2.816~2.890 V,动态波动范围为 -0.99%~1.61%; U₂ 的平均值为 1.236 V,变化范围为 1.222~1.253 V,动态波动范围为 -1.06%~1.41%;差分电压比值的平均值为

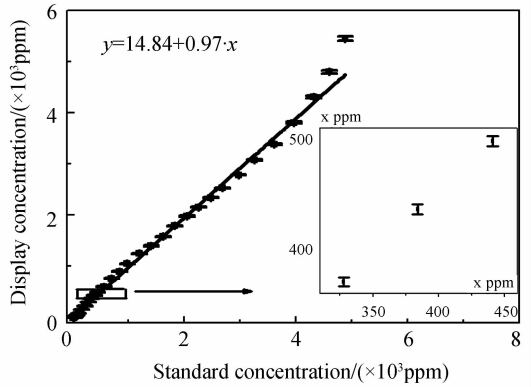


图 5 测量浓度与标准浓度的关系曲线
Fig. 5 Curve of measured concentration versus standard concentration

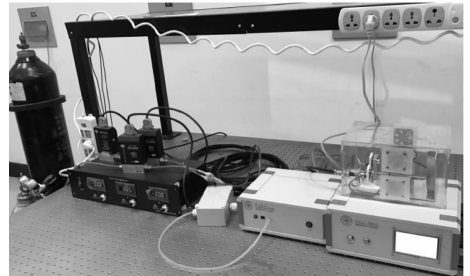
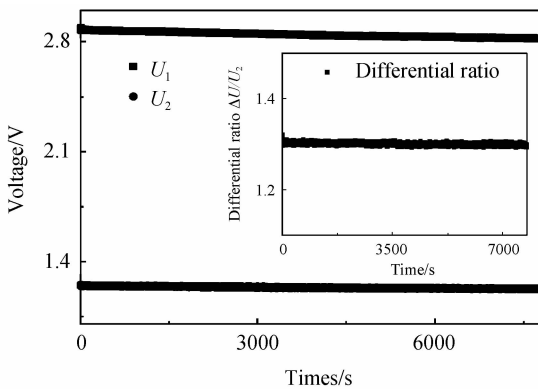
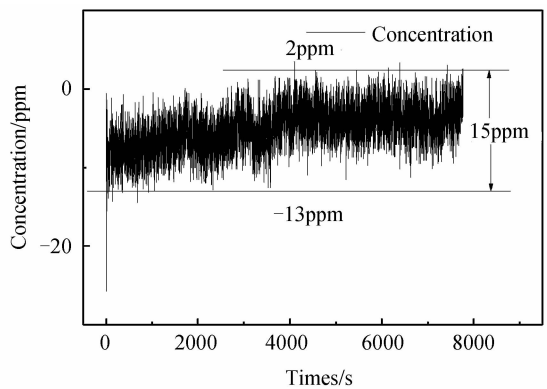


图 6 稳定性实验的实验系统
Fig. 6 Experimental system diagram of stability experiment



(a) U₁, U₂, ΔU~t



(b) C~t

图 7 0 ppm 时,参考通道、测量通道的输出电压、两个通道的差分比信号以及测量浓度的稳定性曲线

Fig. 7 Stability curve of reference channel signal, detection channel signal, two-channel differential ratio signal, and measured concentration on a 0 ppm CO₂ gas sample

1.301,变化范围为 1.292~1.321,动态波动范围为 -0.69%~1.56%.将测得的电压信号换算成浓度信息,可得在 0 ppm 时,系统的测量结果的变化范围为 -13 ppm~2 ppm.根据标准差计算式(7)计算得到 U₁、U₂、ΔU、C 的标准差分别为 0.016 V、0.006 V、0.002、2.8 ppm.

3.4 检测下限

Allan 方差是 David Allan 在研究振荡器稳定性时提出的一种方差分析方法,其定义为:设数据的样本长度为 N ,采样周期为 τ_0 ,将样本分为 K 组,每组含 m 个数据点,则每组数据的相关时间 $\tau_m = m\tau_0$,每组数据的平均值为 $\overline{w_i(m)}$ ($i=1,2,\dots,K$),则艾伦方差定义为

$$\sigma^2(\tau_m) = \frac{1}{2(K-1)} \sum_{i=1}^{K-1} [\overline{w_{i+1}(m)} - \overline{w_i(m)}]^2 \quad (9)$$

本系统中,根据 0 ppm 时的 2 h 浓度测量结果计算测量数据的 Allan 方差(采样周期为 1 s),得到系统的 Allan 方差双对数曲线如图 8 所示.由图 8 可得,当前系统的艾伦方差为 2.5 ppm,则系统的 1σ 检测下限为 2.5 ppm;当将每 115 个测量值的平均值作为一次输出时,系统的艾伦方差最小为 0.3 ppm,此时系统的 1σ 检测下限为 0.3 ppm.

4 二氧化碳无线传感器网络

4.1 传感器节点设计及部署

设计的 CO_2 浓度检测系统具有无线模块 nRF24L01,之后将整个系统集成装箱,则每个检测系统都可构成一个无线传感器节点.农业中无线传感器网络的节点部署常采用确定性部署,一般采用基于网格划分的部署方式^[15-16].根据农业实际情况以采样间距 r_s 和节点间的通信范围 r_c 来进行节点部署.当保证节点连通且满足采样要求时,正方形网格部署所需节点数介于等边三角形网格部署和正六边形网格部署之间,同时其连通性也介于两者之间,而且,正方形网格部署更加简单易行,综合考虑选择正方形网格部署方式,正方形边长的最大值为 $l_{\max} = \min(r_s, r_c)$ ^[17].

4.2 无线传感器网络的构建

考虑到节点个数较少,且无线模块的有效传输距离较远,故构建星状无线传感器网络.各传感器节点直接与汇聚节点通信,汇聚节点通过串口将采集的信息发送至管理节点即个人计算机,最终将信息在个人计算机上显示并存储,如图 9 所示.完成一次数据采集和传输称为网络运行了一轮,每一轮分为两个时段,即建立网络时段和数据传输时段.

4.3 农业应用

利用构建的 CO_2 无线传感器网络测量温室大棚中 CO_2 浓度,测试现场图见图 10,节点的实验数据如图 11 所示,从第一天中午 11:30 开始测量,至第二天的下午 2:00 结束,实验结果符合大棚中实际 CO_2 浓度的变化规律.

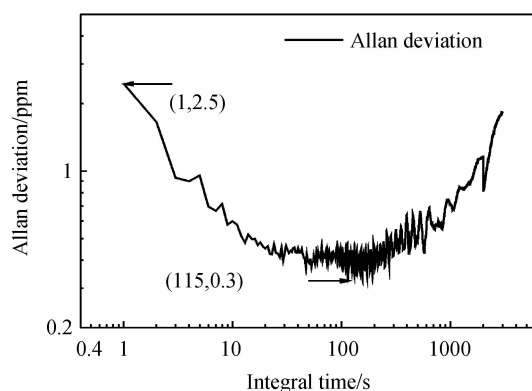


图 8 艾伦方差的双对数曲线
Fig. 8 The double logarithm curve of Allan variance and relevant time

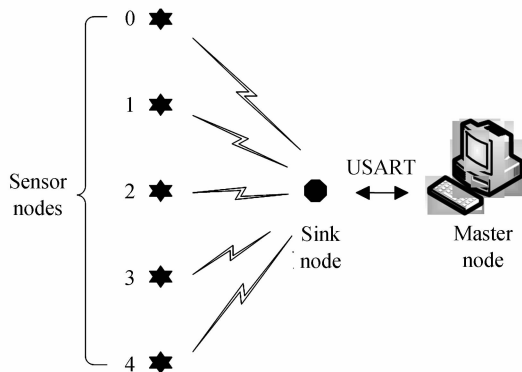


图 9 无线传感器网络结构
Fig. 9 Structure of the wireless sensor network



图 10 CO₂ 传感器节点在温室大棚中的测试现场图
Fig. 10 Site map of CO₂ sensor node in greenhouse

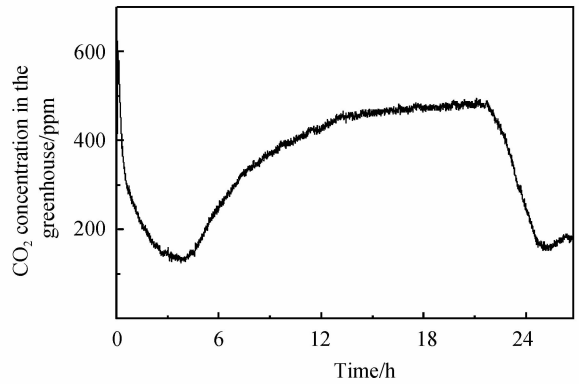


图 11 CO₂ 传感器节点的测试结果
Fig. 11 Measurement results of the CO₂ sensor node

5 结论

利用二氧化碳(CO₂)气体分子在 4.25 μm 处的基频吸收带,根据红外光谱吸收技术设计研制了一种差分式中红外 CO₂ 检测系统.在 1 000 ppm 以下相对误差小于 0.54%,在整个量程范围内相对误差小于 3%;对 0 ppm 气体样品连续测量 2 小时,测量结果的标准差约为 2.8 ppm;并对 0 ppm 下的测量结果进行 Allan 方差分析,得到系统的 1σ 检测下限为 2.5 ppm.最后将每个系统加上无线模块 nRF24L01,构成传感器节点,在一个温室大棚中构建无线传感器网络,采集温室大棚中的 CO₂ 浓度信息.

参考文献

- [1] TU Zhi-hua, ZHAO Yang, ZHENG Li-wen, *et al.* Detection of carbon dioxide concentration in soil profile based on nondispersive infrared spectroscopy technique[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, **35**(4): 997-1000.
涂志华, 赵阳, 郑力文, 等. 基于非分散红外(NDIR)技术的土壤剖面二氧化碳浓度的测定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, **35**(4): 997-1000.
- [2] SONG Guang-lin, LUO Yun-jun, Li Jin-qing, *et al.* Determination of carbon dioxide in refined titanium tetrachloride by infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, **35**(3): 626-630.
宋光林, 罗运军, 李晋庆, 等. 红外光谱法测定精四氯化钛中二氧化碳的含量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, **35**(3): 626-630.
- [3] DOOLY G, CLIFFORD J, LEEN G, *et al.* Mid-infrared point sensor for in situ monitoring of CO₂ emissions from large-scale engines [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(31): 7636-7642.
- [4] DING Xue-zhi, LONG Rui-jun, MI Jian-dui, *et al.* Measurement of methane and carbon dioxide emissions from ruminants based on the NDIR technique [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(6): 1503-1506.
丁学智, 龙瑞军, 米见对, 等. 非分光红外(NDIR)技术测定反刍动物甲烷和二氧化碳研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(6): 1503-1506.
- [5] NWABOH J A, WERHAHN O, ORTWEIN P, *et al.* Laser-spectrometric gas analysis: CO₂-TDLAS at 2 μm[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, **24**(1): 15202-12.
- [6] NWABOH J A, HALD J, LYGNSO J K, *et al.* Measurements of CO₂ in a multipass cell and in a hollow-core photonic bandgap fiber at 2 μm[J]. *Applied Physics B*, 2013, **110**(2): 187-194.
- [7] ZHAO Jian-hua, ZHAO Chong-wen, WEI Zhou-jun, *et al.* Study on monitoring multi-component toxic gases based on near-infrared spectroscopic method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 567-573.
赵建华, 赵崇文, 魏周君, 等. 基于近红外光谱技术的多组分毒性气体检测研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 567-573.
- [8] SHAO Jie, GAO Xiao-ming, ZHENG Wei-jun, *et al.* Highly sensitive diode laser absorption measurements of CO₂ near 1.57 μm at room temperature[J]. *Optica Applicata*, 2005, **35**(1): 49-57.
- [9] LUO Shu-qin. Detection and analysis system for CO₂ gas based on tdlas[D]. Harbin Institute of Technology, 2013: 1-60.
罗淑芹. 基于 TDLAS 的 CO₂ 气体检测分析系统[D]. 哈尔滨工业大学, 2013: 1-60.
- [10] WU Kui-jun, LI Fa-quan, CHENG Xue-wu, *et al.* Sensitive detection of CO₂ concentration and temperature for hot gases using quantum-cascade laser absorption spectroscopy near 4.2 μm[J]. *Applied Physics B*, 2014, **117**(2): 659-666.
- [11] WANG Jian-wei, WANG Hui-li. Ammonia, carbon dioxide and water vapor detection based on tunable fiber laser photoacoustic spectroscopy[J]. *Optik- International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, **127**(2): 942-945.
- [12] MAO Xue-feng, ZHOU Xin-lei, GONG Zheng-feng, *et al.* An all-optical photoacoustic spectrometer for multi-gas

- analysis[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, **232**: 251-256.
- [13] CHEN H, WINDERLICH J, GERBIG C, *et al.* High-accuracy continuous airborne measurements of greenhouse gases (CO₂ and CH₄) using the cavity ring-down spectroscopy (CRDS) technique[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, **3**(2): 375-386.
- [14] BARRITAUULT P, BRUN M, LARTIGUE O, *et al.* Low power CO₂, NDIR sensing using a micro-bolometer detector and a micro-hotplate IR-source [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, **182**(6): 565-570.
- [15] SUN Yu-wen, SHEN Ming-xia, LU Ming-zhou, *et al.* Research status and prospect of wireless sensor network in agriculture[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2011, **23**(3): 639-644.
孙玉文, 沈明霞, 陆明洲, 等. 无线传感器网络在农业中的应用研究现状与展望[J]. 浙江农业学报, 2011, **23**(3): 639-644.
- [16] ZENG Yi-shuai, YANG You-liang, MA Cui-hong. Design of the detection system of multi component gas composition in dust environment[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(7): 859-865.
曾怡帅, 杨友良, 马翠红. 有尘环境多组分气体成分检测系统的设计[J]. 发光学报, 2016, **37**(7): 859-865.
- [17] LIU Hui, MENG Zhi-jun, XU Min, *et al.* Sensor nodes deployment based on regular patterns in farmland environment monitoring[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, **27**(8): 265-270.
刘卉, 孟志军, 徐敏, 等. 基于规则网格的农田环境监测传感器节点部署方法[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(8): 265-270.

Foundation item: The National Key Technology R&D Program of China (Nos. 2014BAD08B03-4, 2013BAK06B04), the National Key Research and Development plan of China (Nos. 2016YFD0700101, 2016YFC0303902), the National Natural Science Foundation of China (No. 61307124), the Science and Technology Department of Jilin Province of China (Nos. 20120707, 20140307014SF), the Changchun Municipal Science and Technology Bureau (Nos. 11GH01, 14KG022)