

基于无源 RFID 传感标签的农田土壤环境监测技术研究

邓芳明¹ 吴翔¹ 李兵² 汪涛² 刘珺¹

(1. 华东交通大学电气与自动化工程学院, 南昌 330013; 2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

摘要: 针对现有农田环境无线传感器网络在长期性、环保性和追踪性方面的不足, 提出了一种基于无源射频识别 (Radio frequency identification, RFID) 传感标签的农田土壤环境监测技术。该 RFID 传感器标签基于超高频 RFID 通信协议, 且工作于无源模式下。提出了一种新的数据融合方式, 比传统数据融合方式显著降低了系统工作的功耗以及响应时间。测试了电磁波在农田土壤中传输的损耗情况, 确定了标签可正常工作的基本条件。针对埋入深度超过 30 cm 时传感器标签传输精确度不足的情况, 提出在同一测量点布置两个传感器标签, 通过天线极化方向的不同以获取更高的数据传输精确度。通过实验对所设计的温湿度传感器标签进行了通信性能及温湿度测量性能测试。实验结果表明, 基于该无源 RFID 传感器标签所测试的温湿度与传统方式的测试结果基本一致, 温度测试误差不超过 1.5%, 湿度测试误差不超过 1%。与现有农田土壤环境监测方法相比, 具有便利性强、成本低、寿命长、传感数据易于跟踪定位等显著优点。

关键词: 精准农业; 土壤环境监测; 无线传感网络; RFID 传感标签

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0187-07

Monitoring Technology of Farmland Soil Environment Based on Passive RFID Sensor Tag

DENG Fangming¹ WU Xiang¹ LI Bing² WANG Tao² LIU Jun¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China

2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The information of soil environment is one of the most important information parameters in precision agriculture. There are some disadvantages lie in current wireless sensor networks in agriculture, including long-time monitoring, environmental protection and tracking ability. According to these disadvantages, a novel wireless monitoring method was proposed based on radio frequency identification (RFID) sensor tag. The RFID sensor tag was based on ultra-high frequency (UHF) electronic product code (EPC) 2nd generation communication protocol and worked on a passive mode. A new method of data fusion was also proposed. Compared with the traditional data fusion method, the power consumption and response time of the system were significantly reduced. Because of the complex composition of farmland soil, the loss of electromagnetic wave transmission in farmland soil and the basic conditions for the normal work of the tag were determined. In view of the fact that the transmission accuracy of sensor labels was insufficient when the embedding depth was more than 30cm, two sensor tags at the same measurement point were proposed, and higher data transmission accuracy was obtained through the polarization direction of antennas. The communication performances and the temperature and humidity performances of the proposed sensor tag were tested in laboratory. The experimental results showed that the proposed sensor tag exhibited good consistence with conventional methods. The maximum error of the temperature test was not more than 1.5%, and the maximum error of the humidity test was not more than 1%. Compared with the existing soil environment monitoring methods, it had the advantages of convenience, low cost, long life and rapid positioning.

Key words: precision agriculture; soil environment monitoring; wirelss sensor network; RFID sensor tag

收稿日期: 2018-02-28 修回日期: 2018-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51767006、51777050)、江西省自然科学基金项目(20171BAB206045)和江西省教育厅科学技术项目(GJJ160491、GJJ170378)

作者简介: 邓芳明(1980—),男,副教授,主要从事 RFID 技术及物联网技术研究,E-mail: dengfm1980@sina.cn

通信作者: 吴翔(1974—),男,副教授,主要从事物联网技术研究,E-mail: 13755633966@163.com

0 引言

由于农田信息采集数据量大,针对农业地域分散、地形多变、环境条件不同等特点,多方位、网络化、准确、快速、有效地采集作物生长环境变量信息的方法,是农业环境信息技术研究领域解决的首要问题之一^[1]。无线传感器网络作为一种全新的信息获取和处理技术,凭借其部署简单、布置密集、低成本和无需现场维护等优点,自其出现便迅速取代传统环境监测方法,被广泛应用到农业各领域^[2-3]。部署在区域农田内大量集成化传感器协作地,实时感知和监测作物、土壤、气象等信息,通过嵌入式系统对信息进行智能处理,并通过随机自组织无线网络将所感知的信息传送到诊断决策中心,实现农业环境及作物信息的远程集群化监测和管理。根据目前的研究成果,无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)在农业环境信息监测的应用研究包括无线地上传感器网络系统^[4-7]和无线地下传感器网络系统^[8-11]。无线地上传感器网络将传感器埋入土壤中,在土壤表面设置无线传输节点。这种方法避免了土壤环境对无线信号传输的损耗,能有效提高 WSN 节点的寿命和信号传输的稳定性,但是暴露在土壤表面的 WSN 节点容易受外界环境的影响,且不利于农业机械的操作。无线地下传感器网络将 WSN 节点全部埋入土壤中,避免了外界环境对 WSN 信号传输的影响,但土壤环境中的无线信号传输损耗较大,而且现有的 WSN 节点均采用电池供电,一旦埋入土壤中后期更换电池不方便,不适合长期监测,废弃电池也容易对土壤环境造成污染。

射频识别(Radio frequency identification, RFID)技术作为一种先进的自动识别和数据采集技术,已经成功应用到生产制造、物流管理、公共安全等各个领域^[12]。近年来基于无源 RFID 标签与传感器相融

合的传感标签技术引起了国内外的广泛关注。由于无源 RFID 传感标签采用反向散射工作机制,结构简单,无需内置电源供电,成本低,灵活性强,且自带身份(ID)信息,能够实现快速定位^[13-15]。而且近年来,国内外已经开展了大量关于 RFID 技术与其他无线传感器网络技术融合的研究^[16-18],RFID 传感技术可以方便地和现有各种无线传感技术一起构成监测网络,因此 RFID 传感标签尤其适合应用于土壤环境精准监测中。

本文提出一种基于 RFID 传感标签的农田土壤环境实时监测方法,设计一种无源 RFID 温湿度传感标签,并对所设计的传感器标签进行测试与分析。

1 无源 RFID 温湿度传感器设计

1.1 传感标签结构设计

RFID 传感标签采集传感器数据主要有两种方法,一种是读取存储在标签非易失性内存中的传感器数据,另一种是直接将传感器数据嵌入传感器标签标识符(Identification, ID)中。图 1a 为传感器数据存储的第 1 种方法,先将传感器数据存储存储在标签的非易失性存储器中,然后进行读取操作。该读取操作与常规的 RFID 标签数据的读取类似,在阅读器发出询问(Query)指令后通过 ISO18000-6C 协议中定义的读取指令来实现。由文献[19]可知,从非易失性存储器(Non-volatile memory, NVM)中读取数据时功耗较高,且会有延时。图 1b 所示为第 2 种方法,与第 1 种方法类似,传感器也是在标签激活后进行传感器采样,但传感器数据被直接存入标签易失性内存中,并在下一个 Query 指令后随标签 ID 信息一起被读取。尽管嵌入标签 ID 中的传感器数据大小受到 ID 地址空间的约束,但这种方法避免了将传感器数据写入 NVM 所导致的高功耗以及时间延

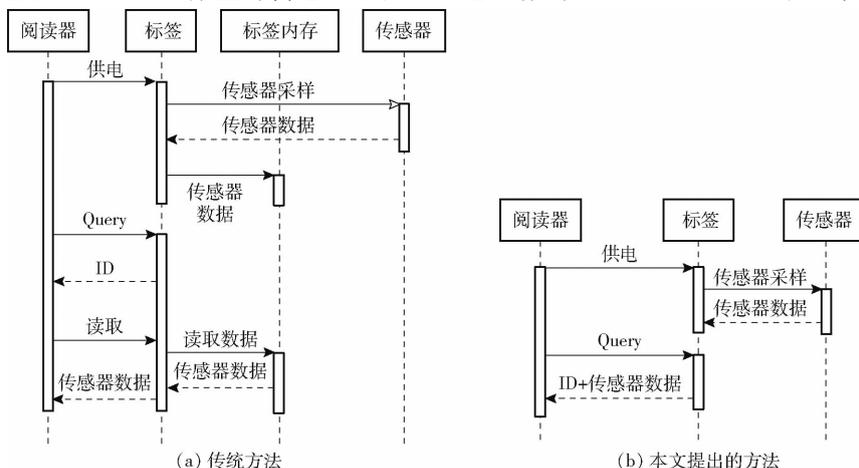


图 1 RFID 标签传感器信息融合模式

Fig. 1 Data mixing methods of RFID sensor tag

迟,因此与第 1 种方法相比,采用该方法的传感器标签具有更高的数据率和通信距离。

据以上分析,本文采用图 1b 所示的传感器数据读取方式,重新定义电子产品代码(Electronic product code, EPC)标签 ID 格式如图 2 所示。所定义的 96 bits EPC 在逻辑上分为 3 个区域,标签类型

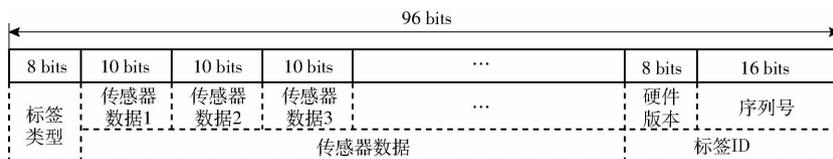


图 2 96 bits EPC 标签 ID 结构

Fig. 2 96 bits EPC tag ID format

图 3 为本文所设计的 RFID 温湿度传感标签结构图。该传感标签由通信模块、能量管理模块和数字模块组成;其中,能量管理模块应分为倍压整流电路、稳压器和储能电容,通信模块由天线以及 RFID 标签芯片构成,用于完成标签与阅读器之间通信所需的调制与解调功能。数字模块由微控制单元(Micro-controller unit, MCU)、内部集成电路(Integrated circuit, I²C)总线以及传感器构成,用于控制传感器标签整体工作流程和获取传感器测量数据。

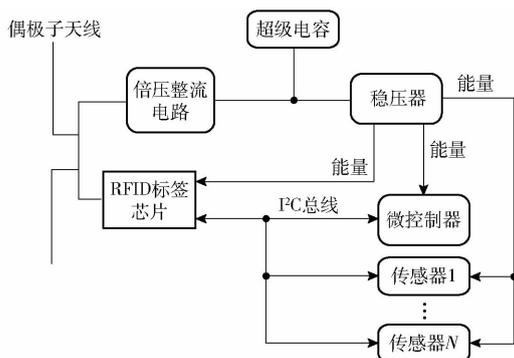


图 3 RFID 传感标签结构

Fig. 3 Structure of RFID sensor tag

1.2 传感标签电路设计

在射频模块中,由于弯折偶极子天线具有体积小、制作成本低且通信性能良好等特点,因此本文选用弯折偶极子天线。RFID 标签芯片采用 Impinj X-2K,该芯片符合 EPC 二代标准,具有 2 176 bits 的非易失性存储器。此外,除了标准的空中接口,同时还可由 I²C 来对其存储器实现读/写操作,因此传感器的测量数据可以直接存储到 RFID 芯片中。

为了获得最大能量传输效率,采用高品质因数的可调射频电感和可调高频电容用以实现阻抗匹配。如图 4 所示,倍压整流部分采用四级升压整流电路方案,其输出电压经过稳压器处理后可以获得稳定的 1.8 V 直流电压输出。由于该电路工作在超

(8 bits)、传感器数据(64 bits)和标签 ID(24 bits)。标签类型用于识别标签的类型和功能。传感器数据分段用于嵌入获得的传感器数据,每段数据为 10 bits,也可以自定义数据位数。标签 ID 部分由硬件版本和标签序列号组成,RFID 传感器标签可以使用此标签 ID 进行唯一标识。

高频交流电状态,本设计选用了在超高频率下具有较高灵敏度的 SMS7630 零偏压肖特基二极管。由于无线能量获取的不稳定性,倍压整流电路的输出电压也是不稳定的,因此本文采用了稳压器以获得稳定的直流电压输出,并将超级电容作为储能元件。

在数字模块中,MCU 采用 MSP430F5132 型带有 8 kB 闪存、1 kB 静态随机存储器以及 8 个 10 bits 模数转换接口。该 MCU 工作电压为 1.8 V,工作电流与其运行频率相关,为 180 μ A/MHz,最大运行频率为 12 MHz。本文设计的传感标签工作符合 ISO-18000-6C 协议,所有元件均工作在超低功耗模式下,整个标签能耗仅为 115 μ W。

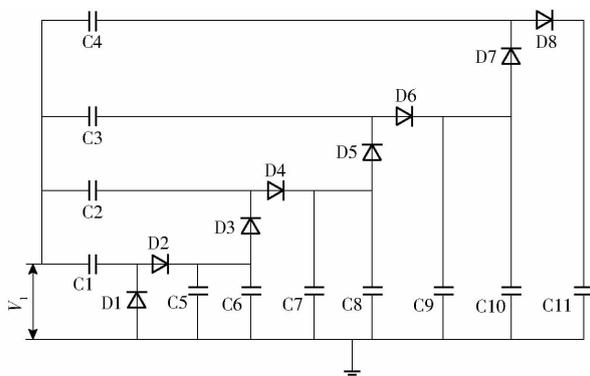


图 4 四级升压整流电路

Fig. 4 Four stages boost rectifier circuit

2 测试与分析

2.1 通信性能测试

为了验证所设计的标签的通信性能,本文采用 VISN-R1200 型仪器对所设计的传感器标签进行通信流程的测试,图 5a 所示为相应的测试环境,图 5b 为本文所设计的温湿度传感器标签。由于本文选用温湿度传感器来验证本文设计方案的可行性,因此使用了 VCL4003 型温湿度箱对温湿度传感器进行标定。设计的 RFID 传感器标签采用分立元件搭建,其基底材料为 FR4,尺寸为 12 cm \times 8 cm。

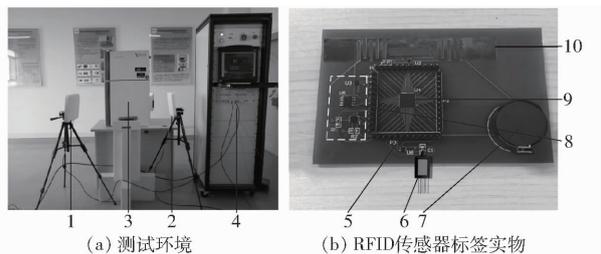
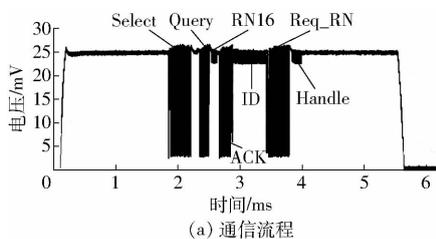


图5 通信性能测试

Fig. 5 Communication performances measurement

1. 天线 2. 温湿度箱 3. 温湿度箱 4. RFID 测试仪 5. 温度传感器 6. 湿度传感器 7. 超级电容 8. 能量管理电路 9. MCU 10. 天线

选取的测试参数如下:工作频率采用当前 RFID 主流频率 915 MHz,发射功率为 1 W,标签与 2 个天线间的距离均为 0.5 m,2 个天线中一个作为发射信号的 antenna,另一个作为接收信号的 antenna,增益均为 2.15 dB。测试装置发送指令的过程为:首先发出选择指令 (Select),经过 5 ~ 6 间隔 (Tari),再发出 Query 指令,传感器标签被激活并回应随机数指令 (RN16),随后测试装置为获取标签的 ID 信息 (含



(a) 通信流程

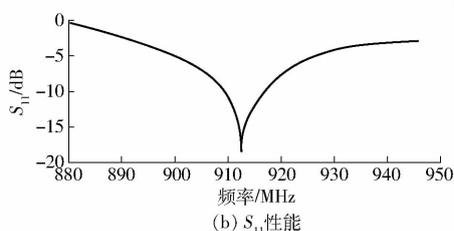
(b) S₁₁性能

图6 传感标签通信性能测试

Fig. 6 Communication performances measurement of sensor tag

通过实际测量了 2 种数据传输方式下传输同样的数据所需要的时间以及标签功耗,结果如表 1 所示。由表 1 可知,将数据直接嵌入标签 ID 中进行传输所需要的时间与功耗均只有传统方式的 1/3,显著地改善了标签的数据传输性能。

表 1 数据存储方式性能比较

Tab. 1 Performances comparison of both data storage methods

数据传输方式	存储位置	传输时间/ms	功耗/ μ W
传统方式	NVM	21.41	400
本文提出的方式	标签 ID	7.35	135

2.2 数据无线传输测试

2.2.1 传感器埋入深度

无线温湿度传感器的通信性能依赖于所处土壤的深度,因此有效埋入深度对于后期无线传感器的布置起着决定性作用。将本文所设计的无线温湿度传感器埋入待监测土壤中,在 10 ~ 100 cm 的深度范围内以 10 cm 为间隔,共布置 10 个无线温湿度传感器,工作频率均设为 915 MHz。在地表布置符合

有传感器数据),发出确认指令 (ACK),最后发出随机数请求指令 (Req_RN) 来获取握手响应 (Handle)。完整的标签通信数据基带波形如图 6a 所示。其次,本文对所设计的 RFID 振动传感标签天线进行测试,测量其实际最佳工作频率与设计最佳工作频率是否一致。选择 915 MHz 作为无线温湿度传感器的工作频率。天线的回波损耗特性 (S_{11}) 参数是指当电磁波通过某一个输入后经由天线传输时所反射的电磁波强度,在本文的测试中该参数可通过矢量网络分析仪测得。对于天线来说, S_{11} 参数在工作频段上反射的电磁波强度越低越好,根据 ISO 18000-6c 协议中的规定,在实际工程应用中工作频段的 S_{11} 值小于等于 -10 dB 就可以满足正常的工作需求,因此可以通过测试确定本文的天线反射强度最小值,最小值所对应的频率就是该天线的最佳工作频率,即其中心频率。测试结果如图 6b 所示,可看出,本文设计的通信天线最佳工作频率为 915 MHz,与设计最佳工作频率一致,满足本文的使用需求。

RFID 协议的 RFID 测试仪,用于测试不同深度下无线温湿度传感器所发出的信号强度与误码率,图 7 为现场土壤环境测试图,测试土壤质量含水率为 5%。



图7 测试现场图

Fig. 7 Testing environment scene

由文献 [18] 可知,电磁波在土壤介质中传播一定路径后,接收端设备接收到的信号强度为

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad L_p = L_0 + L_s \quad (2)$$

$$L_0 = 32.4 + 20 \lg d + 20 \lg f \quad (3)$$

式中 P_r ——接收信号强度

P_t ——发射信号强度

G_r ——接收节点天线增益

G_t ——发射节点天线增益
 L_0 ——电磁波在自由空间传输的损耗
 L_s ——电磁波在土壤中传播时由土壤导致的额外损耗
 d ——发射点与接收点间直线距离
 f ——设备工作频率

误码率为传输过程中误码占总传输码数的比率。本文每隔 1 s 发送 50 byte 的数据包, 每次实验发送 100 条信息, 共 1 000 数据包, 计算不同埋入深度下的误码率, 实验结果如图 8 所示。由图 8 可知, 接收信号强度随着埋入深度的增加而减少, 在埋入深度小于 60 cm 时, 接收的信号强度均大于 -70 dBm。而当埋入深度小于 60 cm 时, 误码率始终为 0, 当埋入深度进一步增加时, 误码率随着深度的增加而增加。因此本文设计的无线温湿度传感器在质量含水率 5% 的土壤中可埋入的最大深度为 60 cm。

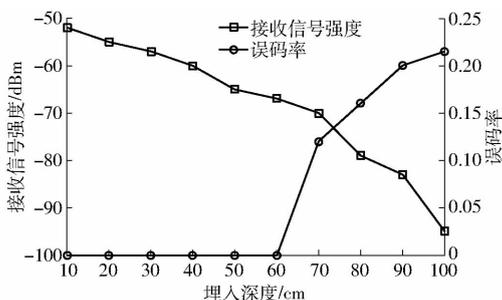


图 8 传感器埋入深度对通信的影响

Fig. 8 Influence of sensor embedding depth on received signal intensity

2.2.2 土壤湿度

为进一步确定土壤湿度对于本文所设计无线温湿度传感器通信性能的影响, 从所监测土壤中取出土壤样本 6 份, 每份体积约为 30 L。每份土壤先用干燥箱干燥至恒质量, 然后将水与之混合并搅拌均匀。本文选择无线传感器埋入深度为 60 cm, 工作在 915 MHz, 土壤湿度设定在 5% ~ 30% 之间, 以 5% 的间隔共设置 6 个测试单位, 对地面测试仪接收的信号强度和误码率进行研究, 测试结果如图 9 所示。由图 9 可知, 接收信号强度随着土壤湿度的增加而显著降低, 变化范围为 -80 ~ -61 dBm。而当土壤湿度小于 10% 时, 误码率为 0; 当土壤湿度在 10% ~ 15% 之间时, 误码率开始增加, 随后误码率增加速度趋于平缓。综合考虑上述实验, 在埋入深度为 60 cm 时, 最大土壤湿度应不超过 20%。

从图 9 可得, 土壤的湿度对无源 RFID 传感标签传输性能的影响较大, 这主要是因为电磁波传输路径损耗受土壤湿度影响较大。为进一步增加本文所设计的无源 RFID 传感器标签的使用范围, 在不

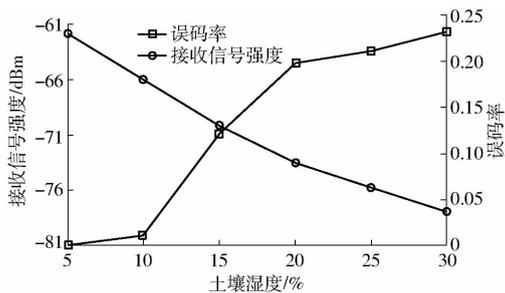


图 9 土壤湿度对通信的影响

Fig. 9 Influence of soil moisture on received signal intensity

改变本文传感标签设计方案的前提下, 可以采用多标签设置方案, 利用标签天线的极化方向性, 达到接收信号的最大利用。在土壤湿度超过 20% 的环境中, 本文在同一测量点布置 2 个无源 RFID 传感器标签, 呈“T”型分布, 其测试结果如图 10 所示。由图 10 可知, 在改进了无源 RFID 传感器标签的布置方法之后, 同样的环境下, 接收信号强度明显上升, 且在土壤湿度超过 20% 的情况下, 其误码率显著降低, 最大误码率不超过 0.045。另外, 在高湿度环境下也可以通过改变 RFID 传感标签的设计来改善标签的工作性能, 如采用高增益高性能的 RFID 天线来增强标签的接收信号强度^[20-21], 但会增加标签的设计和制造成本。

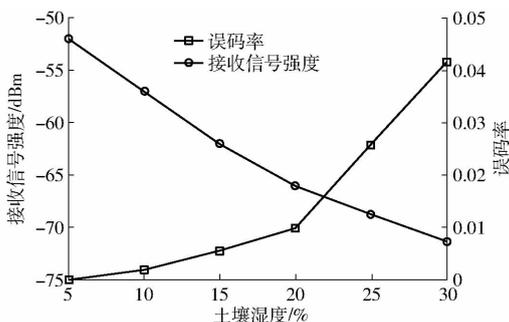


图 10 改进传感器布置方法后土壤湿度对通信的影响

Fig. 10 Influence of soil moisture on received signal intensity after improved sensor placement

2.2.3 通信距离

最大有效通信距离是无线温湿度传感器的重要性能参数之一。采用 RFID 测试仪对无线温湿度传感器的最大有效通信距离进行测试, 该测试仪距离地表高度为 1 m。考虑到正常农田耕作深度在 10 ~ 50 cm, 本文将无线传感器布置于深度为 60 cm, 湿度为 20% (质量含水率) 的土壤中, 测试场景示意图见图 11。测试仪与温湿度传感器标签之间的距离以 0.5 m 为间隔依次增加, 在每个测量点测试仪执行 1 000 次读取指令从温湿度传感器标签获取数据, 并计算每个测量点的通信成功率 (成功通信次数与总通信次数之比), 测试结果如图 12 所示。由文献[22]可知, 通信成功率在 80% 及以上时, 可认为

该测量点距离为有效通信距离。由图 12 可知,当通信距离小于 8 m 时,通信成功率维持在接近 100%,当距离进一步增加到 8.7 m 时,成功率下降到 80%。因此在本文设计的无线温湿度传感器的最大通信距离为 8.7 m。

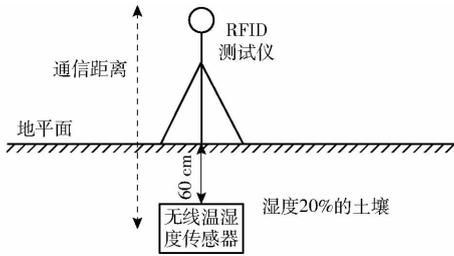


图 11 最大通信距离测试场景示意图

Fig. 11 Measurement setup sketch of maximum communication distance

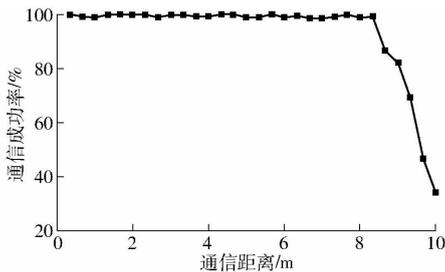


图 12 不同深度下的 RFID 通信成功率

Fig. 12 RFID reading success rate under different embedding depths

2.2.4 精确度测量

从农田中取耕种层土壤 5 份,每份 20 L,在每份土壤样品中加入不同质量的水并搅拌均匀,获得湿度不同的 5 份土壤样品,并置于密闭容器中存放 24 h 备用。将 5 份湿度不同的土壤样本分别编号为 1~5,用本文所设计的无线温湿度传感器对每个样品每隔 1 min 检测一次其温度与湿度,共 20 次,计算其平均值。用标定后的温度器测得每个土壤样品的温度,并用烘干法测得其湿度作为标准值,以计算本文所设计的无线温湿度传感器的误差,表 2 为温度测量结果,表 3 为湿度测量结果。由表 2 可看出,本文设计的无线温湿度传感器测量得到的温度与标准值之间的误差在 1.5% 之内,考虑到温度传感器自身的测量误差以及无线通信过程中的干扰,本文设计的无线温湿度传感器的温度测量性能满足使用

表 2 土壤温度测量结果

Tab. 2 Measurement results of soil temperature

样品号	传感器测量值/°C	温度计测量值/°C	相对误差/%
1	20.1	20.0	0.50
2	19.9	20.2	1.49
3	20.0	19.9	0.50
4	20.2	20.1	0.50
5	19.8	20.0	1.00

表 3 土壤湿度测量结果

Tab. 3 Measurement results of soil humidity %

样品号	传感器测量值	烘干法测量值	相对误差
1	7.83	7.9	0.89
2	10.90	10.8	0.93
3	16.10	16.0	0.63
4	20.00	20.2	0.99
5	25.20	25.0	0.80

要求。由表 3 可以看出,本文设计的无线温湿度传感器测得的湿度与标准值之间的误差小于 1.0%,属于可接受的误差范围。

2.2.5 技术手段对比

表 4 为常用的土壤温度以及湿度测量的手段,并对比了它们的工作性能。就温度测量而言,采用温度计测量土壤温度需要耗费大量的人力资源。采用有线温湿度传感器测量土壤温度以及湿度前期需要大量的布局布线,便利性差,维护成本高,不适合大规模的推广应用。目前测量土壤湿度的方法主要有两大类:变动位置取样测定(烘干法等)以及原位测定(中子法、传感器法等)。烘干法原理简单,精度高,但不能在线实现实时连续监测;中子法能够在田间实时连续监测,但是存在放射性物质危害人体健康;基于传感器的方法需要大量的前期布局布线,维护成本高;基于 WSN 节点的无线测量方法虽然相比于传统方法精度有所降低,但得益于前期安装周期短,维护成本低,适合大规模应用,但是需要采用电池进行供电,增加了使用成本。本文提出基于无线温湿度传感器的方法不仅综合了 WSN 方法的优点,且无需内置电池供电,成本更低,工作寿命长。

表 4 不同温湿度测量技术手段对比

Tab. 4 Comparison of different measurement methods of temperature and humidity

方法	便利性	实时性	成本	寿命	精确度	危害性
温度计 ^[23]	差	差	中	长	高	低
烘干法 ^[24]	差	差	高	长	高	低
有线传感器 ^[25]	差	优	高	中	中	低
中子法 ^[1]	差	优	高	长	高	高
WSN ^[7]	优	优	中	中	中	中
本文	优	优	低	长	中	低

3 结束语

提出了一种基于无源 RFID 传感标签的农田土壤环境监测方法。由于农田土壤成分复杂,通过实验测量了所设计传感标签埋入深度以及土壤含水率对电磁波传输损耗以及误码率的影响,确定了该标签可正常工作的基本条件,并对所设计的温湿度传

传感器标签进行了通信性能及温湿度测量性能的测试。结果表明,该传感器标签具有良好的温湿度测量性能,可在 RFID 系统中完成正常通信过程,在埋入深度为 60 cm、湿度为 20% 的土壤中最大通信距离为 8.7 m。将该传感器标签与热电偶同时放置于农田土壤中进行温度测试实验,实验结果表明,两种

不同测温方式下的最大误差不超过 1.5%。使用烘干法测量土壤湿度,并与本文所设计的温湿度传感器标签的测量值进行比较,结果表明,不同方式测得的土壤湿度误差最大不超过 1%。与现有农田土壤环境无线监测方法相比,具有成本低、寿命长、无污染、适合农田土壤环境长期监测和追踪等显著优点。

参 考 文 献

- 1 李晓东, 吴永烽, 李光林, 等. 基于太阳能的无线土壤水分传感器的研制[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11):13-18.
LI Xiaodong, WU Yongfeng, LI Guanglin, et al. Development of wireless soil moisture sensor base on solar energy [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11):13-18. (in Chinese)
- 2 王福顺, 刘永福, 孙小华, 等. 高精度土壤温度原位测量系统[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(11):102-106. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20121119&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.019.
WANG Fushun, LIU Yongfu, SUN Xiaohua, et al. High-accuracy soil temperatures in situ measurement system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11):102-106. (in Chinese)
- 3 李道亮, 杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1):1-20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180101&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.001.
LI Daoliang, YANG Hao. State of the art review for internet of things in agriculture [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1):1-20. (in Chinese)
- 4 何勇, 聂鹏程, 刘飞. 农业物联网与传感仪器研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(10):216-226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131035&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.035.
HE Yong, NIE Pengcheng, LIU Fei. Advancement and trend of internet of things in agriculture and sensing instrument [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10):216-226. (in Chinese)
- 5 ANISI M H, ABDUL-SALAAM G, ABDULLAH A H. A survey of wireless sensor network approaches and their energy consumption for monitoring farm fields in precision agriculture [J]. Precision Agriculture, 2015, 16(2):216-238.
- 6 VERECKEN H, HUISMAN J A, PACHEPSKY Y, et al. On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale [J]. Journal of Hydrology, 2014, 516(17):76-96.
- 7 BOGENA H R, HERBST M, HUISMAN J A, et al. Potential of wireless sensor networks for measuring soil water content variability[J]. Vadose Zone Journal, 2010, 9(4):1002-1013.
- 8 DONG X, VURAN M C, IRMAK S. Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems [J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(7):1975-1987.
- 9 YU X, WU P, HAN W, et al. A survey on wireless sensor network infrastructure for agriculture [J]. Computer Standards & Interfaces, 2013, 35(1):59-64.
- 10 OJHA T, MISRA S, RAGHUWANSHI N S. Wireless sensor networks for agriculture: the state-of-the-art in practice and future challenges [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2015, 118(3):66-84.
- 11 郁晓庆, 韩文霆, 吴普特, 等. 土壤不同频率无线地下传感器网络信号传播特性试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4):252-260. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150437&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.037.
YU Xiaoqing, HAN Wenting, WU Pute, et al. Experiment of propagation characteristics based on different frequency channels of wireless underground sensor network in soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):252-260. (in Chinese)
- 12 LIU Y, DENG F, HE Y, et al. Novel concrete temperature monitoring method based on an embedded passive RFID sensor tag [J]. Sensors, 2017, 17(7):1463.
- 13 ZHOU S, DENG F, YU L, et al. A novel passive wireless sensor for concrete humidity monitoring [J]. Sensors, 2016, 16(9):1535.
- 14 XIANG W, DENG F, YONG H, et al. Design of a humidity sensor tag for passive wireless applications [J]. Sensors, 2015, 15(10):25564-25576.
- 15 DENG F, HE Y, ZHANG C, et al. A CMOS humidity sensor for passive RFID sensing applications [J]. Sensors, 2014, 14(5):8728-8739.

- 14 范寿康,卢春兰,李平辉. 微波技术与微波电路[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- 15 TOPP G C, DAVIS J I, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. applications of wetting fronts and steep gradients[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(4): 672 - 678.
- 16 TOPP G C, DAVIS J L. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): a field evaluation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(1): 19 - 24.
- 17 吴涛,张荣标,冯友兵. 土壤水分含量测定方法研究[J]. 农机化研究, 2007, 29(12): 213 - 217.
WU Tao, ZHANG Rongbiao, FENG Youbing. Research in measuring method of soil water content [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(12): 213 - 217. (in Chinese)
- 18 高志涛,田昊,赵燕东. 土壤剖面水分线性尺度测量方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 257 - 264. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170433&journal_id=jcsam DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.033.
GAO Zhitao, TIAN Hao, ZHAO Yandong. Linear scale measurement method for soil profile moisture [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 257 - 264. (in Chinese)
- 19 赵燕东,董晓晨,李宁. 线区域尺度土壤水分实时测量方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 168 - 174. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150624&journal_id=jcsam DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.024.
ZHAO Yandong, GONG Xiaochen, LI Ning. Real-time soil moisture measurement method on line scale [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 168 - 174. (in Chinese)
- 20 高志涛,刘卫平,赵燕东. 基于电容法的非接触式土壤水分传感器设计与性能分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 185 - 191. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161125&journal_id=jcsam DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.025.
GAO Zhitao, LIU Weiping, ZHAO Yandong. Design and performance analysis of soil moisture sensor based on capacitance technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 185 - 191. (in Chinese)
- 21 彭曾瑜. 土壤含水率及紧实度复合传感器的研究与开发[D]. 北京:北京林业大学, 2011.
PENG Zenyu. Research and development on soil moisture and soil compaction compound sensor [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)
- 22 穆永航,李莉,王俊衡,等. 基于频域法传感器的基质含水率检测性能研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 341 - 346. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s052&journal_id=jcsam DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.052.
MU Yonghang, LI Li, WANG Junheng, et al. Performance evaluation of substrate moisture detection based on frequency domain sensor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 341 - 346. (in Chinese)
- 23 隋文涛,张丹. 传感器静态特性的评定[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(3): 80 - 81.
SUI Wentao, ZHANG Dan. Evaluation of static characteristics of sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(3): 80 - 81. (in Chinese)

(上接第 193 页)

- 16 ANSOLA P G, GARCÍA A, DE LAS MORENAS J, et al. ZigID: improving visibility in industrial environments by combining WSN and RFID [J]. Journal of Zhejiang University—SCIENCE A, 2011, 12(11): 849 - 859.
- 17 DENG F, HE Y, LI B, et al. Design of a slotted chipless RFID humidity sensor tag [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2018, 264: 255 - 262.
- 18 DENG F, HE Y, LI B, et al. Design of an embedded CMOS temperature sensor for passive RFID tag chips [J]. Sensors, 2015, 15(5): 11442 - 11453.
- 19 WICKRAMASINGHE A, RANASINGHE D C, FUMEAUX C, et al. Sequence learning with passive RFID sensors for real-time bed-egress recognition in older people [J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2017, 21(4): 917 - 929.
- 20 CHEN H D, SIM C Y D, TSAI C H, et al. Compact circularly polarized meandered-loop antenna for UHF-band RFID tag [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 1602 - 1605.
- 21 ZHANG J, SHEN Z. Compact and high-gain UHF/UWB RFID reader antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2017, 65(10): 5002 - 5010.
- 22 DONNO D D, CATARINUCCI L, TARRICONE L. A battery-assisted sensor-enhanced RFID tag enabling heterogeneous wireless sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(4): 1048 - 1055.
- 23 PAVELKA M, ACOSTA M, MAREK M V, et al. Dependence of the Q₁₀ values on the depth of the soil temperature measuring point [J]. Plant and Soil, 2007, 292(1-2): 171 - 179.
- 24 OCHSNER T E, COSH M H, CUENCA R H, et al. State of the art in large-scale soil moisture monitoring [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(6): 1888 - 1919.
- 25 STEWART M G, SIEW W H, CAMPBELL L C, et al. Sensor system for monitoring soil moisture content in cable trenches of high-voltage cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 451 - 455.