

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.021

农田土壤无线地下传感器网络节点设计与通信试验

张增林¹ 韩萌¹ 韩文霆^{1,2} 郑佳运¹ 杨杰¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了揭示电磁波信号在农田土壤中的传输特性、科学部署传感器节点,以关中地区农田土壤为研究对象,采用模块化设计思想,将传感器、无线数传、处理器和能量供应等模块集于一体,设计了无线地下传感器网络(Wireless underground sensor networks, WUSN)节点和汇聚节点。采用单因素试验方法,分析了土壤含水率、WUSN节点埋深、节点间水平距离对WUSN节点信号传输的影响,建立了接收信号强度和误码率预测模型。结果表明,当WUSN节点信号在地下垂直方向上传输时,土壤含水率增加2.5个百分点,接收信号强度降低4~6 dBm,通信误码率增加3~5个百分点;WUSN节点埋深增加5 cm,接收信号强度降低3~5 dBm,通信误码率增加3~4.5个百分点。当WUSN节点信号在地下水平方向上传输时,土壤含水率增加2.5个百分点,接收信号强度降低5~7 dBm,通信误码率增加4~5个百分点;节点间水平距离在10~90 cm范围内,节点间水平距离增加10 cm,接收信号强度降低6~8 dBm,通信误码率增加6.5~8个百分点;节点间水平距离在90~190 cm范围内,节点间水平距离增加10 cm,接收信号强度降低约1 dBm,通信误码率增加1~1.5个百分点。WUSN节点信号在垂直、水平两种传输方向上误码率和接收信号强度预测模型拟合优度 R^2 最高为0.982,均方根误差RMSE为1.7%,拟合优度 R^2 最低为0.942,均方根误差RMSE为5.136 dBm。WUSN节点信号在土壤中传输受到土壤含水率、WUSN节点埋深和节点间水平距离的严重影响。

关键词: 农田土壤;无线地下传感器网络;土壤含水率;节点埋深;节点间水平距离

中图分类号: S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)07-0203-10

OSID:



Design and Test of Wireless Underground Sensor Network Nodes

ZHANG Zenglin¹ HAN Meng¹ HAN Wenting^{1,2} ZHENG Jiayun¹ YANG Jie¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to reveal the general characteristics of electromagnetic wave signal transmission in farmland soil and scientifically deploy sensor nodes, taking the farmland soil in Guanzhong region as the research object, adopted the modular design idea, integrated sensor, wireless data transmission, processor and energy supply module into one. Wireless underground sensor networks (WUSN) nodes and sink nodes were designed. The influences of soil moisture content, buried depth of WUSN nodes and horizontal distance between nodes on signal transmission of WUSN nodes were analyzed by single factor test method, and the prediction model of received signal strength and bit error rate was established. The experimental results showed that when the WUSN node signal was transmitted vertically underground, the soil moisture content was increased by 2.5 percentage points, the received signal strength was decreased by 4~6 dBm, and the bit error rate was increased by 3~5 percentage points. The buried depth of WUSN node was increased by 5 cm, the received signal strength was decreased by 3~5 dBm, and the bit error rate was increased by 3~4.5 percentage points. When the WUSN node signal was transmitted in the horizontal direction underground, the soil moisture content was increased by 2.5 percentage points, the received signal strength was decreased by 5~7 dBm, and the bit error rate was increased by 4~5 percentage points. When the horizontal distance between nodes was within the range of 10~90 cm, the received signal

收稿日期: 2021-02-09 修回日期: 2021-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979233)

作者简介: 张增林(1976—),男,副教授,主要从事农业智能化检测研究,E-mail: zzlin@nwfu.edu.cn

strength was decreased by 6 ~ 8 dBm when the horizontal distance between nodes was increased by 10 cm, and the bit error rate was increased by 6.5 ~ 8 percentage points. When the horizontal distance between nodes was within the range of 90 ~ 190 cm, the received signal strength was decreased by about 1 dBm when the horizontal distance between nodes was increased by 10 cm. The bit error rate would be increased by 1 ~ 1.5 percentage points. The best fit R^2 and root mean square error of WUSN node bit error rate and signal receiving strength prediction model in two transmission directions were 0.982 and 1.7%, respectively, and the best fit R^2 and root mean square error were 0.942 and 5.136 dBm, respectively. In conclusion, the signal transmission of WUSN nodes in soil was seriously affected by soil moisture content, buried depth of WUSN nodes and horizontal distance between nodes. The received signal strength and bit error rate can be accurately calculated by using this prediction model, and then the maximum buried depth and maximum horizontal distance of WUSN nodes can be obtained. At the same time, the general conclusion of WUSN signal transmission in farmland soil was given.

Key words: farmland soil; wireless underground sensor network; soil moisture content; joint buried depth; horizontal distance between nodes

0 引言

农田土壤参数信息获取是农业环境信息技术研究的主要内容^[1],目前大多采用无线地上传感器网络(Wireless sensor network, WSN),即使用有线的方式将埋藏在土壤中的传感器连接到地面上的数据读取和无线收发设备,以避免传感器网络在地下土壤中进行通信^[2-4]。然而,这些暴露在地面上的传感器设备不仅影响农业机械作业,而且传感器节点本身也因受地质灾害、极端天气等自然因素的影响而易导致失效^[5]。为此,研究人员提出了无线地下传感器网络(Wireless underground sensor networks, WUSN)概念^[6],WUSN为农田土壤信息监测提供了新的手段。WUSN是指将具有无线接收、发送模块的传感器设备完全埋入地下土壤中,通过无线方式收发数据,这种方式具有隐藏性强、易于布设、数据及时、可靠性好、覆盖范围大、容易升级等优点^[7]。WUSN具有十分广阔的应用前景,是农业环境信息监测技术的重要研究方向^[8-9]。

在WUSN技术应用领域,国内外研究人员已经取得了一定的研究成果^[10-15]。但WUSN技术是一个较新的研究领域,目前,WUSN节点信号在土壤介质中传输特性的相关研究较少^[16-17],鲜见关于土壤含水率、节点埋深以及节点间水平距离对WUSN节点信号传输影响的研究报道。

本文以关中地区农田土壤为研究对象,设计一种农田土壤无线地下传感器网络节点,建立接收信号强度和误码率与土壤含水率、WUSN节点埋深以及节点间水平距离的关系模型,采用单因素试验法,在调制土壤中进行节点间传输试验,获取汇聚节点接收信号强度和误码率数据,以期提出一种WUSN节点信号在土壤中传输的预测模型,为无线地下传

感器网络节点部署提供参考。

1 节点设计

1.1 节点设计要求

无线地下传感器网络主要借助网络节点中内置的传感器,测量节点周边环境温度、湿度、压力、光照强度等信号,是一类典型的传感器网络应用,针对WUSN在农田土壤水分信息监测的实际需要,WUSN节点的设计需要满足土壤含水率监测范围和节点无线通信性能要求。

1.1.1 农田土壤水分监测要求

根据关中地区农田土壤水分信息监测需求^[18-20],选择土壤水分传感器作为数据采集端。农田土壤含水率监测范围为0~25%,分辨率为1%,准确率为1%,采样速率为1次/h。

1.1.2 节点无线通信性能要求

在农田土壤信息监测中,WUSN节点布置在土壤深处,为了保证节点系统在农田土壤中长期运行,WUSN节点应具有低功耗、低成本、高稳定性的特性。另外,根据农田土壤监测成本需求,WUSN节点需在保持以上监测范围和采样速率的基础上稳定运行12个月以上。

1.2 节点硬件设计

1.2.1 WUSN节点硬件设计

根据农田土壤WUSN节点设计要求,结合现有传感器、单片机、无线通信等技术,将传感器、A/D转换器、处理器、无线数传和能量供应等模块结合,开发设计无线地下传感器网络节点。WUSN节点体系结构如图1所示。

其中,传感器模块负责农田土壤信息采集和转换;处理器模块负责控制存储和处理土壤数据;无线数传模块负责与汇聚节点进行无线通信,发送土壤

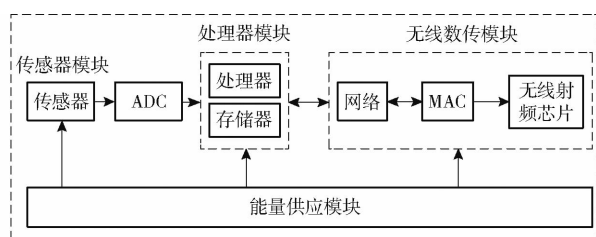


图1 WUSN节点体系结构

Fig. 1 Architecture of WUSN node

数据;能量供应模块为各模块提供所需的能量。

WUSN节点中传感器模块采用XR61-TDR2型土壤水分传感器,该传感器具有稳定性高、屏蔽性好、体积小、价格低等优点,可以精确获取土壤含水率。WUSN节点中处理器模块采用16位MSP430单片机作为主要控制芯片,该芯片具有功耗低、集成度高、性价比高、抗干扰能力强、串口编程方便等优点^[21]。

WUSN节点信号源采用H8410型无线射频模块,该模块是一种嵌入式高速处理器和低功耗射频芯片,采用标准1/4波长的单极全向天线,采用GFSK调制方式^[22]。其中,工频可分别为240、433、868 MHz,本文选用433 MHz频段进行节点间传输性能测试试验。

WUSN节点通常布置在无人值守的农田,大多数属于一次性使用,故在本文研究中能量供应模块采用普通碱性电池。另外在能量供应模块设计中,采用按键选择开关选用外接电池供电或者USB供电,这样可以在调试和下载程序时采用USB供电,保持电压稳定,在应用时采用电池供电。

由于农田土壤深处比较潮湿,需要对WUSN节点做防水处理。本文设计开发的WUSN节点防水处理前后实物如图2所示。

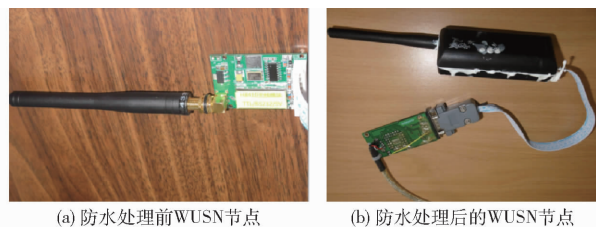


图2 WUSN节点实物图

Fig. 2 WUSN node physical diagrams

1.2.2 汇聚节点硬件设计

汇聚节点由无线数传、处理器、显示和能量供应等模块组成,汇聚节点体系结构如图3所示。

无线数传模块负责接收WUSN节点发送来的数据,并送入处理器存储和处理,最后在显示模块上显示土壤参数信息。汇聚节点采用的处理器和无线数传模块与WUSN节点相同,能量供应模块采用USB供电,显示模块采用计算机实现。

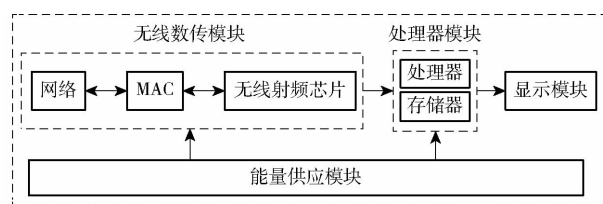


图3 汇聚节点体系结构

Fig. 3 Aggregation node architecture

2 试验与分析

2.1 试验区域概况

试验区域位于陕西省咸阳市杨陵区(108°7'E, 34°28'N, 海拔435~563 m)。年降水量635.1~663.9 mm,年均气温12.9℃,属于暖温带季风半湿润气候,土壤类型是关中地区典型的壤土,土壤肥沃,适宜多种农作物生长。

2.2 试验设计及数据采集

土壤组成直接影响WUSN节点信号传输质量,但是农田土壤参数复杂多样,且外界干扰因素较多,难以有效进行WUSN节点通信试验,本文在实验室内搭建土壤测试平台,用调制土壤进行WUSN节点通信试验。土壤测试平台尺寸为2.5 m×1.0 m×1.5 m,用复合软磁吸波材料封装制作,因此WUSN节点信号在四周产生的反射可以忽略不计,土壤测试平台如图4所示。

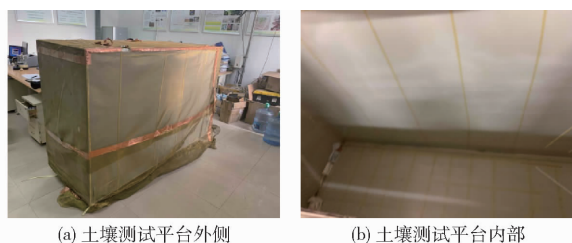


图4 土壤测试平台

Fig. 4 Soil testing platforms

试验所用土壤取自杨陵区某农田地下30~130 cm处,自然风干后过2 mm筛,根据土壤颗粒级,划分为沙粒、粉粒和粘粒,对试验用土进行测定,所得试验用土砂粒(粒径0.02~2 mm)质量分数为22.36%,粉粒(粒径0.002~0.02 mm)质量分数为58.26%,粘粒(粒径小于0.002 mm)质量分数为19.38%。

选取土壤含水率5%~55%,节点埋深30~130 cm,节点间水平距离10~210 cm,三因素均取21个水平。在土壤测试平台进行的WUSN节点信号传输试验分2部分:第1部分为WUSN节点信号在地下垂直方向上的传输性能测试试验;第2部分为WUSN节点信号在地下水平方向上的传输性能测试试验。在第1部分试验中,WUSN节点布置在

平台内部土壤中,汇聚节点垂直于 WUSN 节点布置在距离地面 1 m 处。在第 2 部分试验中,WUSN 节点与汇聚节点均布置在平台内部土壤中,且保持在 50 cm 深处。采用单因素试验法进行试验,分别在不同 WUSN 节点埋深、土壤含水率以及节点间水平距离试验条件下,获取汇聚节点接收信号强度和误码率数据,研究 WUSN 节点信号在土壤介质中的传输特性。

选用安捷伦 N9912A 型手持频谱分析仪实现对 WUSN 节点信号强度信息的检测,手持频谱分析仪如图 5 所示。误码率计算方法为 WUSN 节点每隔 1 s 发送一次 20 字节的数据包,单次通信试验连续发送 100 次数据包,进行 3 次通信试验完成 300 条数据包发送,数据包被汇聚节点错误接收的条数除以 300 则为通信误码率数据。



图 5 手持式频谱分析仪

Fig. 5 Hand-held spectrum analyzer

2.3 接收信号强度和误码率回归分析及模型建立

在土壤测试平台选定区域布置 WUSN 节点和汇聚节点,分别改变 WUSN 节点埋深、土壤含水率以及节点间水平距离等试验条件,获得汇聚节点接收信号强度和误码率,通过 Matlab 对接收信号强度和误码率进行回归分析,建立接收信号强度和误码率的预测模型。

2.4 试验结果与分析

2.4.1 WUSN 节点信号在地下垂直方向上传输性能测试结果

在不同土壤含水率试验条件下,汇聚节点接收信号强度和误码率随 WUSN 节点埋深的变化曲线如图 6 和图 7 所示。

由图 6、7 可知,当土壤含水率不变时,随着 WUSN 节点埋深增大,汇聚节点接收信号强度逐渐下降,误码率逐渐增加。当 WUSN 节点埋深不变时,随着土壤含水率增大,汇聚节点接收信号强度同样逐渐下降,误码率逐渐增加。在建立接收信号强度和误码率预测模型之前,需首先对试验数据进行

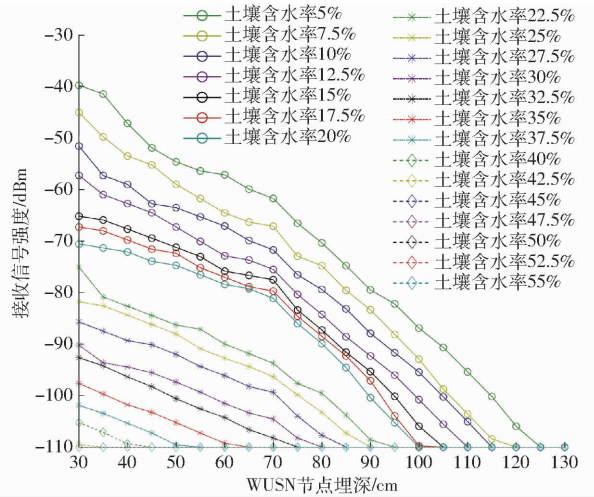


图 6 接收信号强度随 WUSN 节点埋深的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of received signal strength with buried depth of WUSN node

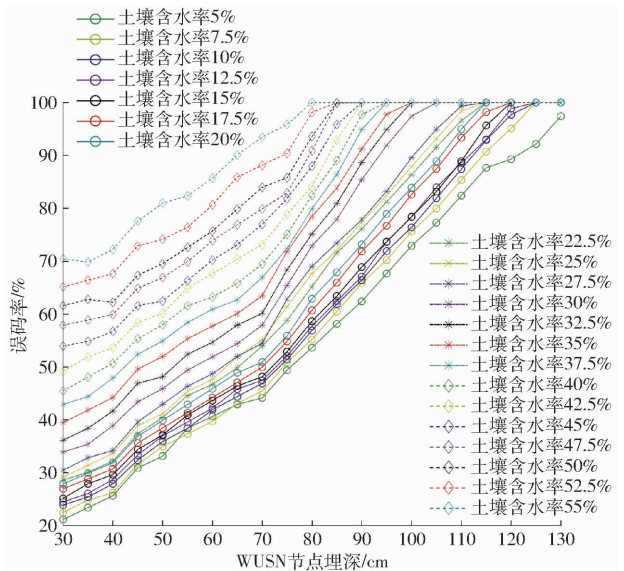


图 7 误码率随 WUSN 节点埋深的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of bit error rate with buried depth of WUSN node

相关性分析,Pearson 相关系数能够反映两组数据的相关程度,其绝对值越大,则说明两组数据具有越强的相关性。

利用 SPSS 软件计算出 WUSN 节点埋深与接收信号强度、误码率的 Pearson 相关系数见表 1。

由表 1 可得,当 WUSN 节点埋深为 30 ~ 130 cm,土壤含水率低于 40% 时,WUSN 节点埋深与接收信号强度的 Pearson 相关系数绝对值均大于 0.5,且为负数,表明两者具有比较强的负相关性;WUSN 节点埋深与误码率的 Pearson 相关系数绝对值均大于 0.9,且为正数,表明两者具有非常强的正相关性。

土壤含水率与接收信号强度、误码率的 Pearson 相关系数见表 2。

表 1 接收信号强度、误码率与 WUSN 节点埋深的 Pearson 相关系数

Tab.1 Pearson correlation coefficient of received signal strength, bit error rate and buried depth of WUSN node

| 土壤含水率/ % | Pearson 相关系数 | |
|-------------|----------------------|-------------------|
| | WUSN 节点埋深与 接收信号强度 | WUSN 节点埋深 与误码率 |
| 5.0 | -0.993 | 0.996 |
| 7.5 | -0.992 | 0.994 |
| 10.0 | -0.990 | 0.994 |
| 12.5 | -0.988 | 0.994 |
| 15.0 | -0.978 | 0.993 |
| 17.5 | -0.972 | 0.992 |
| 20.0 | -0.966 | 0.991 |
| 22.5 | -0.960 | 0.991 |
| 25.0 | -0.949 | 0.990 |
| 27.5 | -0.930 | 0.988 |
| 30.0 | -0.902 | 0.977 |
| 32.5 | -0.861 | 0.972 |
| 35.0 | -0.776 | 0.968 |
| 37.5 | -0.672 | 0.963 |
| 40.0 | -0.535 | 0.959 |
| 42.5 | -0.369 | 0.954 |
| 45.0 | | 0.949 |
| 47.5 | | 0.941 |
| 50.0 | | 0.936 |
| 52.5 | | 0.923 |
| 55.0 | | 0.898 |

表 2 接收信号强度、误码率与土壤含水率的 Pearson 相关系数

Tab.2 Pearson correlation coefficient of received signal strength, bit error rate and soil moisture content

| WUSN 节点 埋深/cm | Pearson 相关系数 | |
|------------------|--------------|-----------|
| | 土壤含水率与接收信号强度 | 土壤含水率与误码率 |
| 30 | -0.972 | 0.992 |
| 35 | -0.968 | 0.966 |
| 40 | -0.966 | 0.971 |
| 45 | -0.956 | 0.970 |
| 50 | -0.949 | 0.966 |
| 55 | -0.940 | 0.972 |
| 60 | -0.932 | 0.968 |
| 65 | -0.925 | 0.965 |
| 70 | -0.907 | 0.971 |
| 75 | -0.888 | 0.986 |
| 80 | -0.863 | 0.993 |
| 85 | -0.830 | 0.991 |
| 90 | -0.787 | 0.977 |
| 95 | -0.704 | 0.956 |
| 100 | -0.638 | 0.934 |
| 105 | -0.559 | 0.914 |
| 110 | -0.421 | 0.861 |
| 115 | -0.369 | 0.754 |
| 120 | | 0.567 |
| 125 | | 0.369 |
| 130 | | 0.369 |

由表 2 可得,当土壤含水率为 5% ~ 55%, WUSN 节点埋深为 30 ~ 105 cm 时,土壤含水率与接收信号强度的 Pearson 相关系数绝对值均大于 0.5,且为负数,表明两者具有比较强的负相关性。土壤含水率与误码率的 Pearson 相关系数绝对值也均大于 0.9,且为正数,表明两者具有非常强的正相关性。

综上所述,WUSN 节点在地下垂直方向上传输中,节点埋深、土壤含水率与汇聚节点接收信号强度、误码率有着很强的相关性,因此可以构建汇聚节点接收信号强度、误码率的预测模型。

由图 6 可知,WUSN 节点与汇聚节点通信中,接收信号强度在 -39 ~ -110 dBm 变化。当土壤含水率在 5% ~ 40% 变化,WUSN 节点埋深低于 40 cm 时,接收信号强度均大于 -110 dBm,汇聚节点可以接收到 WUSN 节点发出的信号。在相同的 WUSN 节点埋深下,土壤含水率增加 2.5 个百分点,接收信号强度降低 4 ~ 6 dBm,在相同的土壤含水率下,WUSN 节点埋深增加 5 cm,接收信号强度降低 3 ~ 5 dBm,并且随着节点埋深与土壤含水率的增加,接收信号强度降幅逐渐变大。

根据农田土壤水分监测要求以及本文试验结果,当土壤含水率超过 25%、WUSN 节点埋深超过 85 cm 后,汇聚节点接收信号强度均达到 -110 dBm,因此建立的预测模型土壤含水率取值范围为 5% ~ 25%,WUSN 节点埋深取值范围为 30 ~ 85 cm,接收信号强度与节点埋深、土壤含水率基本呈线性关系。在 Matlab 软件中对这部分试验数据进行分析处理,建立汇聚节点接收信号强度与 WUSN 节点埋深、土壤含水率之间的预测模型,三者关系式为

$$R_{ss} = -21.2 - 0.491N_d - 1.679S_v \quad (1)$$

其中 $30 \text{ cm} \leq N_d \leq 85 \text{ cm}$ $5\% \leq S_v \leq 25\%$

式中 R_{ss} ——WUSN 节点与汇聚节点通信中的接收信号强度, dBm

N_d ——WUSN 节点埋深, cm

S_v ——土壤含水率, %

从式(1)可以看出,汇聚节点的接收信号强度 R_{ss} 与 WUSN 节点埋深 N_d 、土壤含水率 S_v 之间为二元一次关系,模型拟合优度 R^2 为 0.967,均方根误差 (RMSE) 为 2.598 dBm。

由图 7 可知,WUSN 节点与汇聚节点通信中,误码率在 20% ~ 100% 范围内变化。当土壤含水率在 5% ~ 40% 变化,WUSN 节点埋深低于 90 cm 时,通信误码率均小于 100%。在相同的 WUSN 节点埋深下,土壤含水率增加 2.5 个百分点,通信误码率增加

3~5个百分点;在相同的土壤含水率下,WUSN节点埋深增加5cm,通信误码率增加3~4.5个百分点。并且随着埋深与土壤含水率的增加,误码率增幅逐渐变大。

在Matlab软件中同样对这部分试验数据进行分析处理,建立了节点通信误码率与WUSN节点埋深、土壤含水率之间的预测模型,三者关系式为

$$E_r = -0.044 + 0.007N_d + 0.005S_v \quad (2)$$

式中 E_r ——通信误码率

从式(2)可以看出,WUSN节点和汇聚节点通信中产生的误码率与WUSN节点埋深 N_d 、土壤含水率 S_v 之间为二元一次关系,模型拟合优度 R^2 为0.982, RMSE为1.7%。

2.4.2 WUSN节点信号在地下水平方向上传输性能测试结果

汇聚节点接收信号强度和误码率随节点间水平距离增加变化情况如图8和图9所示。

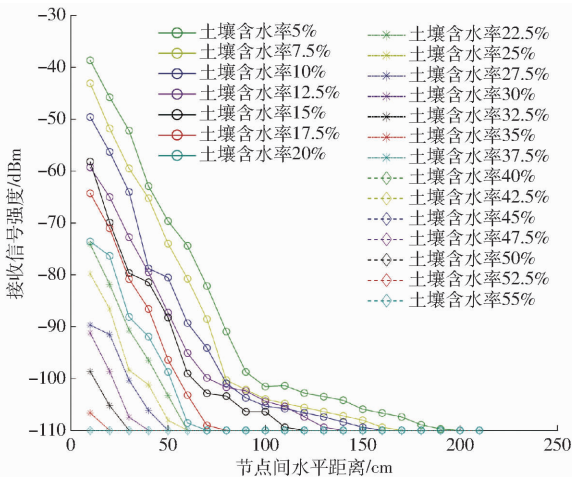


图8 接收信号强度随节点间水平距离的变化曲线
Fig.8 Variation curve of received signal strength with horizontal distance between nodes

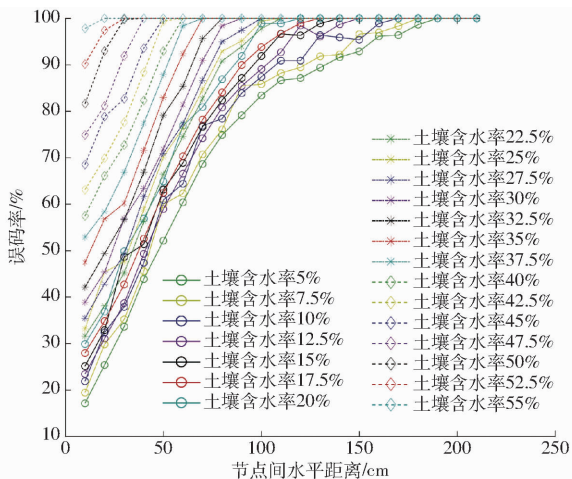


图9 误码率随节点间水平距离的变化曲线
Fig.9 Variation curves of bit error rate with horizontal distance between nodes

由图8、9可知,当土壤含水率不变时,随着节点间水平距离增大,汇聚节点接收信号强度逐渐下降,误码率逐渐增加。当节点间水平距离不变时,随着土壤含水率增大,汇聚节点接收信号强度同样逐渐下降,误码率逐渐增加。利用SPSS软件计算出节点间水平距离与接收信号强度、误码率的Pearson相关系数见表3。

表3 接收信号强度、误码率与节点间水平距离的Pearson相关系数
Tab.3 Pearson correlation coefficient of received signal strength, bit error rate and horizontal distance between nodes

| 土壤含水率/ % | Pearson 相关系数 | |
|-------------|--------------------|-----------------|
| | 节点间水平距离与 接收信号强度 | 节点间水平距离 与误码率 |
| 5.0 | -0.906 | 0.930 |
| 7.5 | -0.880 | 0.917 |
| 10.0 | -0.860 | 0.908 |
| 12.5 | -0.859 | 0.898 |
| 15.0 | -0.820 | 0.885 |
| 17.5 | -0.751 | 0.876 |
| 20.0 | -0.727 | 0.853 |
| 22.5 | -0.697 | 0.846 |
| 25.0 | -0.653 | 0.836 |
| 27.5 | -0.631 | 0.824 |
| 30.0 | -0.535 | 0.804 |
| 32.5 | -0.478 | 0.779 |
| 35.0 | -0.369 | 0.752 |
| 37.5 | | 0.724 |
| 40.0 | | 0.701 |
| 42.5 | | 0.663 |
| 45.0 | | 0.640 |
| 47.5 | | 0.576 |
| 50.0 | | 0.475 |
| 52.5 | | 0.448 |
| 55.0 | | 0.369 |

由表3可得,当节点间水平范围为10~210cm,土壤含水率低于30%时,节点间水平距离与接收信号强度的Pearson相关系数绝对值均大于0.5,且为负数,表明两者具有比较强的负相关性;节点间水平距离与误码率的Pearson相关系数绝对值均大于0.8,且为正数,表明两者具有非常强的正相关性。

土壤含水率与接收信号强度、误码率的Pearson相关系数见表4。

由表4可得,当土壤含水率为5%~55%,节点间水平距离为10~150cm时,土壤含水率与接收信号强度的Pearson相关系数绝对值均大于0.5,且为负数,表明两者具有比较强的负相关性;土壤含水率与误码率的Pearson相关系数绝对值也均大于0.5,

表 4 接收信号强度、误码率与土壤含水率的
Pearson 相关系数

Tab. 4 Pearson correlation coefficient of received signal strength, bit error rate and soil moisture content

| 节点间水平 距离/cm | Pearson 相关系数 | |
|----------------|------------------|---------------|
| | 土壤含水率与接收 信号强度 | 土壤含水率与 误码率 |
| 10 | -0.954 | 0.967 |
| 20 | -0.941 | 0.964 |
| 30 | -0.902 | 0.963 |
| 40 | -0.886 | 0.978 |
| 50 | -0.843 | 0.974 |
| 60 | -0.754 | 0.969 |
| 70 | -0.714 | 0.952 |
| 80 | -0.708 | 0.918 |
| 90 | -0.725 | 0.896 |
| 100 | -0.733 | 0.818 |
| 110 | -0.681 | 0.767 |
| 120 | -0.655 | 0.690 |
| 130 | -0.601 | 0.664 |
| 140 | -0.554 | 0.626 |
| 150 | -0.527 | 0.587 |
| 160 | -0.427 | 0.571 |
| 170 | -0.369 | 0.484 |
| 180 | -0.369 | 0.369 |
| 190 | -0.369 | |
| 200 | | |
| 210 | | |

且为正数,表明两者具有比较强的正相关性。

综上所述,WUSN 节点信号在地下水平方向传输中,节点间水平距离、土壤含水率与汇聚节点接收信号强度、误码率有着比较强的相关性,因此可以构建汇聚节点接收信号强度、误码率的预测模型。

由图 8 可知,WUSN 节点与汇聚节点通信中,接收信号强度在 $-38 \sim -110$ dBm 变化。当节点间水平距离在 $10 \sim 110$ cm 变化,土壤含水率低于 15% 时,接收信号强度均大于 -110 dBm,汇聚节点可以接收到 WUSN 节点发出的信号。在相同的节点间水平距离下,土壤含水率增加 2.5 个百分点,接收信号强度降低 $5 \sim 7$ dBm,并且随着土壤含水率的增加,接收信号强度降幅逐渐变大。在相同土壤含水率下,节点间水平距离在 $10 \sim 90$ cm 时,节点间水平距离增加 10 cm,接收信号强度降低 $6 \sim 8$ dBm;节点间水平距离在 $90 \sim 190$ cm 时,节点间水平距离增加 10 cm,接收信号强度降低约 1 dBm。

根据农田土壤水分监测要求以及本文试验结果,当土壤含水率超过 25%、节点间水平距离超过 50 cm 后,汇聚节点接收信号强度均达到 -110 dBm。当土壤含水率低于 12.5%,接收信号强度与节点间

水平距离呈非线性关系,而当土壤含水率超过 12.5%,接收信号强度与节点间水平距离基本呈线性关系。因此建立的预测模型由非线性和线性预测模型组成,非线性预测模型土壤含水率取值范围为 5% ~ 12.5%,节点间水平距离取值范围为 $10 \sim 130$ cm。线性预测模型土壤含水率取值范围为 12.5% ~ 25%、节点间水平距离取值范围为 $10 \sim 50$ cm。目前无线信号传输模型应用最广的是对数距离损耗模型^[23],具体公式为

$$P = P_0 - 10t \lg \frac{d}{d_0} + \zeta \quad (3)$$

式中 P ——信号强度

P_0 ——参考信号强度

t ——路径损耗指数

d ——信号传输距离

d_0 ——信号传输参考距离

ζ ——随机变量

本文基于对数距离损耗模型在 Matlab 软件中对非线性部分试验数据进行分析处理,建立了汇聚节点接收信号强度与节点间水平距离、土壤含水率之间的预测模型,三者关系式为

$$\begin{cases} R_{ss1} = -26.6 \lg \left(\frac{L_{d1}}{10} \right) - 1.694 S_{s1} - 24.46 \\ R_{ss2} = -0.720 L_{d2} - 1.799 S_{s2} - 27.66 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $10 \text{ cm} \leq L_{d1} \leq 130 \text{ cm}$ $5\% \leq S_{s1} \leq 12.5\%$

$10 \text{ cm} \leq L_{d2} \leq 50 \text{ cm}$ $12.5\% \leq S_{s2} \leq 25\%$

式中 L_d ——节点间水平距离,cm

式(4)中接收信号强度非线性预测模型拟合优度 R^2 为 0.942,均方根误差 RMSE 为 5.136 dBm,线性预测模型拟合优度 R^2 为 0.980,均方根误差 RMSE 为 1.9 dBm。

由图 9 可知,WUSN 节点与汇聚节点通信中,误码率在 17% ~ 100% 变化。当节点间水平距离在 $10 \sim 110$ cm 变化,土壤含水率低于 20% 时,通信误码率均小于 100%。在相同的节点间水平距离下,土壤含水率增加 2.5 个百分点,通信误码率增加 4 ~ 5 个百分点。并且随着土壤含水率的增加,通信误码率增幅逐渐变大。在相同土壤含水率下,节点间水平距离在 $10 \sim 90$ cm 时,节点间水平距离增加 10 cm,通信误码率增加 6.5 ~ 8 个百分点;节点间水平距离在 $90 \sim 190$ cm 时,通信误码率增加 1 ~ 1.5 个百分点。

在 Matlab 软件中同样基于对数距离损耗模型对非线性部分试验数据进行分析处理,建立了节点通信误码率与节点间水平距离、土壤含水率之间的预测模型,三者关系式为

$$\begin{cases} E_{r1} = 0.3213 \lg\left(\frac{L_{d1}}{10}\right) + 0.0086 S_{v1} + 0.021 & (5) \\ E_{r2} = 0.0089 L_{d2} + 0.0077 S_{v2} + 0.046 \end{cases}$$

式(5)中节点通信误码率非线性预测模型拟合优度 R^2 为 0.956, 均方根误差 RMSE 为 5.2%, 线性预测模型拟合优度 R^2 为 0.979, 均方根误差 RMSE 为 2%。

3 讨论

3.1 WUSN 节点埋深对接收信号强度和误码率的影响

WUSN 节点与汇聚节点通信的本质是电磁波能量的传递, 汇聚节点接收信号强度和误码率可以很好地反映电磁波能量衰减和数据传输质量情况^[24-25], 这为研究 WUSN 节点在土壤中的传输规律提供了数据支撑。为了避免 WUSN 节点设备被农用机械损坏, 通常将其埋置于农作物根部以下, 因此获得 WUSN 节点信号在地下垂直方向上的传输规律有助于选择合适的节点埋深, 提高节点设备的稳定性。

WUSN 节点与地上汇聚节点通信中, 节点信号首先在土壤介质中传输, 然后经过土壤与空气的分界面, 最后在自由介质空气中进行传输, 而土壤相对于空气属于光密媒质, 会对电磁波信号产生较大的吸收衰减。因此 WUSN 节点埋深不同, 电磁波信号损耗也会不同, 接收信号强度和误码率也会随之变化。文献[26]研究发现, WUSN 节点信号抵达地上汇聚节点有 2 条路径, 分别为折射波路径、侧面波路径。随着节点埋深增加, 折射波与侧面波能量衰减, 其中侧面波由于传输路径较长衰减幅度较大。同时, 图 6、7 表明, 当 WUSN 节点埋深超过 70 cm 后, 节点信号衰减速度加快。这是因为当节点埋深超过 70 cm 后, 侧面波能量衰减严重, 节点信号主要通过折射波路径抵达汇聚节点, WUSN 节点信号衰减速度随之加快。

此外, 本研究也针对 WUSN 节点与汇聚节点通信中接收信号强度和误码率变化情况, 分析了它们与 WUSN 节点埋深之间的相关性, 表 1 结果表明, WUSN 节点埋深与接收信号强度、误码率之间存在比较强的相关性, 但是随着 WUSN 节点埋深增加, 两者相关性逐渐下降, 这是由于部分接收信号强度达到最小值、误码率达到最大值所致。综合上述, 本研究得到了 WUSN 节点信号在地下垂直方向上的衰减规律, 在今后的研究中可以重点关注 WUSN 节点在土壤埋深 70 cm 以内的传输性能, 在这个范围内开展 WUSN 研究。

3.2 土壤含水率对接收信号强度和误码率的影响

土壤含水率是农田土壤水分状况的重要指标, 也是影响电磁波信号损失的重要参数之一。WUSN 节点长期部署在农田土壤中, 而土壤在不同季节含水率存在显著区别, 会对 WUSN 节点与汇聚节点通信造成很大干扰。获得 WUSN 节点信号随土壤含水率变化传输规律可以帮助决策者提出科学的 WUSN 节点部署方案, 避免节点通信受到影响。

土壤介电常数越大, 衰减电磁波信号的能力就越强。图 6、7 表明, WUSN 节点信号在地下垂直方向上传输时, 当土壤含水率超过 27.5% 后, 接收信号强度降幅和误码率增幅突然变大。这是因为土壤含水率超过某临界点后土壤中水的介电特性和普通水相似^[27], 此时随着含水率的增加土壤的介电常数将会迅速增大, 衰减电磁波信号的能力大大增强。

此外, 本文也研究了 WUSN 节点信号在地下水平方向上的传输规律, 图 8、9 表明, 当节点间水平距离低于 60 cm, 土壤含水率超过 27.5% 时, 接收信号强度降幅和误码率增幅变化较小, 这可能是因为 WUSN 节点与汇聚节点通信距离较短, 电磁波信号衰减程度较小所致。综合上述, 本研究得到了 WUSN 节点信号随土壤含水率改变衰减规律, 在今后的研究中可以重点关注 WUSN 节点在土壤含水率低于 27.5% 范围内的传输性能, 在这个范围内开展 WUSN 研究。

3.3 节点间水平距离对接收信号强度和误码率的影响

WUSN 技术实际应用中, 通常是将多个 WUSN 节点埋置于地下土壤中, 节点之间相互通信, 将采集到的土壤数据发送给地面上的汇聚节点, 实现大范围的土壤信息监测。因此获得 WUSN 节点信号在地下水平方向上的传输规律对于降低节点部署成本具有重要意义。

文献[28]研究发现, WUSN 节点信号抵达地下汇聚节点有 3 条路径, 分别为直射波路径、反射波路径、侧面波路径, 并且在浅层土壤中节点信号主要以直射波路径、反射波路径抵达, 而在深层土壤中主要以侧面波路径抵达。图 8、9 表明, 当节点间水平距离低于 90 cm, 接收信号强度降幅和误码率增幅较大, 这是因为在这个水平距离范围内直射波和反射波能量受到严重衰减。而当节点间水平距离超过 90 cm 时, 接收信号强度降幅和误码率增幅变小, 这是因为在这个水平距离范围内侧面波能量衰减速度变小, 即电磁波先透过土壤介质来到地面, 然后贴着地面传播一段距离后再透过土壤介质抵达汇聚节点。随着节点间水平距离的增加, 侧面波在地面上

的传播距离随之增加,但在土壤中传输的距离变化很小,又因为电磁波在空气中的衰减很小^[29],因此侧面波能量衰减速度减缓。

WUSN 节点信号地下水平方向上传输中,节点信号在节点间水平距离低于布置深度两倍的时候衰减速度开始下降,这可能是因为上层土壤紧实度较小。综合上述,本研究得到了 WUSN 节点信号在地下水平方向上的衰减规律,在今后的研究中可以重点关注在不同土壤深度下,WUSN 节点信号在地下水平方向上的衰减规律。

4 结论

(1)当 WUSN 节点信号在地下垂直方向上传输时,土壤含水率增加 2.5 个百分点,接收信号强度降低 4~6 dBm,通信误码率增加 3~5 个百分点,且当土壤含水率超过 27.5% 后,接收信号强度降幅和误码率增幅逐渐变大。WUSN 节点埋深增加 5 cm,接收信号强度降低 3~5 dBm,通信误码率增加 3~4.5 个百分点,且当 WUSN 节点埋深超过 70 cm 后,接收信号强度降幅和误码率增幅逐渐变大。

(2)当 WUSN 节点信号在地下水平方向上传输时,土壤含水率增加 2.5 个百分点,接收信号强度降低 5~7 dBm,通信误码率增加 4~5 个百分点,且当节点水平距离超过 60 cm 后,接收信号强度降幅和误码率增幅逐渐变大。节点间水平距离在 10~90 cm 范围内,节点间水平距离增加 10 cm,接收信号强度降低 6~8 dBm,通信误码率增加 6.5~8 个百分点;节点间水平距离在 90~190 cm 范围时,节点间水平距离增加 10 cm,接收信号强度降低约 1 dBm,通信误码率增加 1~1.5 个百分点。

(3)建立的接收信号强度预测模型拟合优度 R^2 分别为 0.967、0.942、0.980,均方根误差 RMSE 分别为 2.598、5.136、1.9 dBm,建立的误码率预测模型拟合优度 R^2 分别为 0.982、0.956、0.979,均方根误差 RMSE 分别为 1.7%、5.2%、2%,WUSN 节点信号在地下垂直方向和水平方向传输的预测模型拟合优度均超过 0.94,故采用本模型可以准确计算出汇聚节点接收信号强度和误码率,进而得出 WUSN 节点最大埋藏深度和最大水平距离,为无线地下传感器网络节点部署提供了参考。

参 考 文 献

- [1] 曾志雄,董冰,吕恩利,等. 猪舍环境无线多点多源远程监测系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(2):332-340,349.
ZENG Zhixiong, DONG Bing, LÜ Enli, et al. Design and experiment of wireless multi-point and multi-source remote monitoring system for pig house environment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 332-340, 349. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2002036&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.036. (in Chinese)
- [2] 吴瑞睿,刘洁琳. 无线传感器网络综述[J]. 科技创新与应用,2018(14):65-66.
WU Ruirui, LIU Jielin. Key research issues in wireless sensor networks[J]. Technology Innovation and Application, 2018(14): 65-66. (in Chinese)
- [3] 张小栓,张梦杰,王磊,等. 畜牧养殖穿戴式信息监测技术研究现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(11):1-14.
ZHANG Xiaoshuan, ZHANG Mengjie, WANG Lei, et al. Research status and development analysis of wearable information monitoring technology in animal husbandry[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 1-14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191101&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.001. (in Chinese)
- [4] 姚照胜,刘涛,刘升平,等. 农田信息采集车设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(10):236-242.
YAO Zhaosheng, LIU Tao, LIU Shengping, et al. Design and experiment of farmland information collection vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 236-242. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191027&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.027. (in Chinese)
- [5] 张增林. 农田土壤水分无线地下传感器监测网络关键技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
ZHANG Zenglin. Study on key techniques in wireless underground sensor monitoring network for farmland soil water content[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [6] AKYILDIZ I F, STUNTEBECK E P. Wireless underground sensor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2006, 4(6): 669-686.
- [7] KRISHNAPPA R. Design and optimization of data acquisition system using wireless underground sensor networks[D]. San Marcos: Texas State University, 2017.
- [8] 吴为. 基于无线地下传感器网络的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2015.
WU Wei. Research on wireless underground sensor networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015. (in Chinese)

- [9] 韩文霆,吴普特,郁晓庆,等. 农业环境信息无线传感器网络监测技术研究进展[J]. 农业工程学报,2011,27(14):326-330.
HAN Wenting, WU Pute, YU Xiaoqing, et al. Research progress in wireless sensor network for agricultural environment monitoring[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(14):326-330. (in Chinese)
- [10] 郁晓庆. 无线地下传感器网络电磁波在土壤介质中的传输研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2013.
YU Xiaoqing. Study of electromagnetic transmission in soil media based on wireless underground sensor network[D]. Yangling:Northwest A&F University,2013. (in Chinese)
- [11] 刘洲洲,何林. 一种新的基于磁感应技术无线地下传感网收发器设计[J]. 电子器件,2018,41(1):104-109.
LIU Zhouzhou, HE Lin. A new design of wireless sensor underground network transceiver based on magnetic induction technology[J]. Chinese Journal of Electron Devices,2018,41(1):104-109. (in Chinese)
- [12] 郁晓庆,张增林,柴锐. 土壤信息采集传感器节点的透地通信特性试验[J]. 排灌机械工程学报,2019,37(11):1005-1012.
YU Xiaoqing, ZHANG Zenglin, CHAI Rui. Experiment on through-the-earth communication characteristics of soil information acquisition sensor nodes[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(11): 1005-1012. (in Chinese)
- [13] SAMBO D W, FORSTER A, YENKE B O, et al. Wireless underground sensor networks path loss model for precision agriculture (WUSN-PLM)[J]. IEEE Sensors Journal,2020,20(10):5298-5313.
- [14] ABDORAHIMI D, SADEGHIOON A M. Comparison of radio frequency path loss models in soil for wireless underground sensor networks[J]. Journal of Sensor and Actuator Networks, 2019,8(2):1-11.
- [15] HARDIE M, HOYLE D. Underground wireless data transmission using 433-MHz LoRa for agriculture[J]. Sensors,2019,19(19):1-18.
- [16] ZEMMOUR H, BAUDOIN G, DIET A. Soil effects on the underground-to-aboveground communication link in ultrawideband wireless underground sensor networks[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters,2018,16(1):218-221.
- [17] 许珏. NS2 仿真平台上无线地下传感器网络信道模型的扩展与实现[D]. 天津:天津大学,2016.
XU Jue. The extension and implementation of channel model for wireless underground sensor networks on NS2[D]. Tianjin: Tianjin University,2016. (in Chinese)
- [18] 张诗祁. 关中地区田块尺度土壤含水量时空变异性及合理采样方式[D]. 杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2020.
ZHANG Shiqi. Spatiotemporal variability and reasonable sampling method of soil water content in farmland scale of Guanzhong area[D]. Yangling: University of Chinese Academy of Sciences (Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education),2020. (in Chinese)
- [19] 李瑜琴,赵景波. 西安地区丰水年农田深层土壤含水量研究[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(3):78-81.
- [20] 张香,赵景波. 西安与咸阳地区麦地土壤含水量对比研究[J]. 安徽农业科学,2009,37(17):8091-8094.
ZHANG Xiang, ZHAO Jingbo. Contrastive study on soil moisture content in the soil of wheat field in Xi'an and Xianyang[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2009,37(17):8091-8094. (in Chinese)
- [21] 沈建华,杨艳琴,翟晓曙. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [22] 丁莹. 数字 GFSK 调制解调的研究与实现[J]. 电子测试,2010(10):52-55,63.
DING Ying. Study and implement of the digital GFSK modulation and demodulation[J]. Electronic Test,2010(10):52-55,63. (in Chinese)
- [23] 张博,吴兵,陈晓婷. 基于 RSSI 的半参数估计在距离拟合模型中的应用[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2019,41(1):1-5,13.
- [24] MCMAHON J M. Basic electromagnetic theory[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd,2011.
- [25] KATULSKI R J, SADOWSKI J. Concept of compatibility region for the evaluation of IR UWB electromagnetic compatibility[C]//2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo. IEEE,2014.
- [26] 李莉. 无线地下传感器网络关键技术的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2008.
LI Li. Study of some key techniques in wireless underground sensor networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications,2008. (in Chinese)
- [27] 王萍. 探地雷达检测土壤紧实性的实验研究和信号反演[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2010.
WANG Ping. The experimental study and signal inversion of ground penetrating radar for soil compaction detection[D]. Beijing:China University of Mining and Technology(Beijing),2010. (in Chinese)
- [28] XIN D, VURAN M C. A channel model for wireless underground sensor networks using lateral waves[C]//2011 IEEE Global Telecommunications Conference-GLOBECOM 2011. IEEE,2011:1-6.
- [29] 王俊,王世练. 电磁波在水-空气两层媒质中的传播特性研究[J]. 舰船电子工程,2019,39(10):227-231.
WANG Jun, WANG Shilian. Research on propagation characteristics of electromagnetic waves in water-air two-layer media[J]. Ship Electronic Engineering,2019,39(10):227-231. (in Chinese)