

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.037

土壤不同频率无线地下传感器网络信号传播特性试验*

郁晓庆^{1,2} 韩文霆² 吴普特² 张增林²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探究土壤环境中无线地下传感器网络节点部署要求、信号传输及其应用环境的特性, 分别以 240、433 和 868 MHz 为载波频率, 研究了无线信道下地上至地下、地下至地上和地下至地下 3 种通信方式中无线射频信号的传播特性和节点埋藏深度、水平节点间距离以及土壤含水率等影响因素之间的关系, 获得了接收信号强度、误码率等数据, 并进行了统计分析。试验结果表明, 节点埋藏深度和土壤含水率对 AG-UG 和 UG-AG 通信中 RSSI 和 BER 影响的 24 种模型拟合优度, R^2 最大为 0.997, 最小为 0.910。水平节点间距离和土壤含水率对 UG-UG 通信中 RSSI 和 BER 影响的 12 种模型拟合优度, R^2 最大为 0.971, 最小为 0.866。此外, 建立了 433 MHz 频率下 RSSI 变化的三维曲面, 可直观反映土壤环境下无线信号的传播特性, 并采用 SPSS 软件对模型进行了验证。AG-UG 和 UG-AG 通信中, 拟合优度 R^2 最小为 0.954, 最大为 0.998, 均方根误差 RMSE 在 0.729 ~ 3.198 dBm 之间。UG-UG 通信中, 拟合优度 R^2 最小为 0.854, 最大为 0.960。均方根误差 RMSE 在 3.238 ~ 6.553 dBm 之间。验证试验结果表明, 该模型可以较好地预测不同条件通信中的接收信号强度, 为土壤环境中无线地下传感器网络的部署和系统的建立提供了技术支持。

关键词: 土壤 无线传感器网络 试验 射频频率 信号衰减

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0252-09

Experiment of Propagation Characteristics Based on Different Frequency Channels of Wireless Underground Sensor Network in Soil

Yu Xiaoqing^{1,2} Han Wenting² Wu Pute² Zhang Zenglin²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To explore wireless underground sensor network (WUSN) node deployment, signal transmission and the channel characteristics in the soil, the relationship among radio frequency signal propagation characteristics of AG-UG, UG-AG and UG-UG communication mode under wireless channel and node burial depth, horizontal inter-nodes distance and soil water content were studied with 240, 433 and 868 MHz carrier frequency for configuring wireless underground sensor networks in the soil. The experiment demonstrated that the maximum and minimum determination coefficient R^2 of 24 models for goodness of fit were 0.997 and 0.910, respectively, which was the effect of node burial depth and soil water content on RSSI and BER in AG-UG and UG-AG communication. And that maximum and minimum R^2 of 12 models for goodness of fit were 0.971 and 0.866, respectively, which was the effect of horizontal inter-nodes distance and soil water content on RSSI and BER in UG-UG communication. Besides, three-dimensional surface of RSSI was built with frequency of 433 MHz, which could reflect the exact wireless signal propagation characteristics in the soil environment, and the model verification experiment was conducted through SPSS software. In the AG-UG and UG-AG communication, the

收稿日期: 2014-12-12 修回日期: 2015-01-18

* 新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NECT-12-0473) 和中国博士后科学基金资助项目 (2014M552495)

作者简介: 郁晓庆, 博士后, 主要从事农业智能化检测研究, E-mail: yuxiaoqing2006@163.com

通讯作者: 韩文霆, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业智能化检测研究, E-mail: hanwt2000@126.com

minimum R^2 of goodness of fit was 0.954, the maximum was 0.998, and root mean square error was in the range of 0.729 ~ 3.198 dBm. In the UG - UG communication, the minimum R^2 of goodness of fit was 0.854, the maximum was 0.960, and root mean square error was in the range of 3.238 ~ 6.553 dBm. Validation results showed that the model could better predict the received signal strength in different communications. The results can provide technical support for building of wireless underground sensor network system in the soil.

Key words: Soil Wireless sensor network Experiments RF frequency Signal attenuation

引言

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要解决的首要问题之一^[1-5]。无线传感器网络技术的出现和应用是解决该问题的主要技术手段。无线地下传感器网络(Wireless underground sensor network, WUSN)作为一种新型的信息采集手段,是无线传感器网络的一种延伸^[6],是将具有无线收发模块的传感器设备完全埋入地下土壤中,感应模块感知到数据后,通过无线方式发送数据,具有隐藏性强、易于布设、数据及时、可靠性强、覆盖范围大、容易升级等优点。

无线地下传感器网络的概念是2006年美国佐治亚理工学院无线通信实验室提出的,近些年来,仍处于试验研究阶段,在农业应用研究方面的报道甚少^[7-15]。Akyildiz等首次提出了WUSN的概念,分析了地下无线信道在不同土壤组成下的路径损耗,并提出了无线地下传感器网络通信架构和WUSN设计应考虑的关键问题。Vuran等^[8,12]研究了电磁波在土壤中传输的信道模型,分析了土壤组成、土壤体积含水率、节点埋藏深度、节点距离、传感器频率等主要影响因素下电磁波多路径传输的路径损失、误码率、最大传输距离、含水率测试误差等。Silva等^[13]研究了无线传感器网络节点在433 MHz频率下的天线带宽、节点在土壤15 cm和35 cm深度及农田土壤含水率9.5%和37.3%等因素下,对地下节点与地上节点之间通信性能的影响。Coen等^[14]开发了一种用于高尔夫球场的近地表无线地下传感器网络系统,设计了采集节点、汇聚节点、中继节点和网关节点。Bogena等^[15]在实验室采用土柱试验研究了Zigbee无线收发模块在不同土壤类型和土壤含水率下,无线信号的衰减情况。李莉对无线地下传感器网络系统进行了体系结构设计,研究了电磁波在地下土壤中的传播情况、地下信道模型、土壤电气特性对网络性能影响以及无线地下传感器网络的节点布置方案等,并用Matlab进行了仿真分

析^[16]。目前,在农业方面应用的无线传感器网络属于地上无线传感器网络^[17-18],是用有线的方式将传感器连接到地面上的数据读取收发设备,以避免传感器网络在地下土壤中进行通信。关于无线地下传感器网络的研究仍处在基础试验性的研究阶段,还没有形成较为完善的理论体系和技术体系。国内外研究者对地下无线信道特性的一系列研究可以为无线地下传感器网络的规划和部署以及进一步研究提供必要的基础。但是因为农田土壤环境复杂,土壤成分、紧实度、含水率等的不同,对无线地下传感器网络信号的传输所造成的影响也各不相同。所以,针对具体土壤环境进行无线信号传播的稳定性、可靠性等传播特性还需要进行深入的研究。文献显示,将频率为2.4 GHz的地上无线传感器网络节点直接用于无线地下传感器网络中,仅在土壤表层深度中可以进行通信,但在实际节点布置于耕作层土壤下的信息采集中,是不可行的^[19]。综合考虑信号衰减和天线尺寸的影响,对百兆赫兹频率无线地下传感器网络的信道进行试验,探明在土壤环境下不同因素对信号强度和误码率的影响,可为具有稳定性和高可靠性无线地下传感器网络节点的布置和网络系统的构建奠定一定的基础。

目前无线地下传感器网络在土壤中传输的研究侧重于采用市场已有的传感器节点和电磁波在土壤表层中的传输,而对低功耗无线地下传感器节点在土壤耕作层下较深范围传输特性的试验与研究还比较缺乏。本文主要对土壤介质中无线地下传感器网络的信号传输进行研究,建立3种不同通信方式无线射频信号传播特性和节点埋藏深度、水平节点间距离以及土壤含水率等影响因素之间的关系模型,以期为具有高稳定性和可靠性的无线地下传感器节点部署提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验设备与场地

本研究采用已开发的无线地下传感器网络节点和汇聚节点,汇聚节点与地下节点组成基本相同,只是没有传感器,通过232或485接口与计算机采用

的高性能屏蔽数据线连接。节点处理器模块采用16位MSP430单片机作为主控制芯片。土壤水分传感器为XR61-TDR2型,工作电压4~6.5VDC,电流28~30mA,输出电压0~2.5VDC,通过A/D转换将电压信号转换成数字信号,并传输至处理器模块。节点射频模块为H8410,采用8~24VDC宽电压设计,最大发射功率20dBm,灵敏度为-120dBm,传输速率为2400~57600bps。采用标准1/4波长的单极全向天线,阻抗50Ω,接口SMA公头,GFSK调制方式。开模制作工程塑料密封外壳,用704密封胶做防水处理。WUSN节点实物图如图1所示。利用安捷伦N9912A型手持式RF频谱分析仪测试WUSN电磁波信号衰减,频率范围为100kHz~4GHz和6GHz。

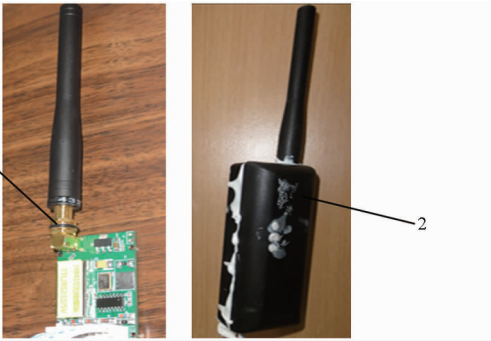


图1 无线地下传感器网络节点

Fig.1 Picture of wireless underground sensor network node

1. 未封装的传感器节点 2. 封装的传感器节点

试验场地位于西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院传感器网络实验室,试验所用土壤取自研究院施工工地平面以下30~40cm深度,风干后过2mm筛,制作长5m,宽和高均1m的土箱。进行电磁波特性测试前,在一定环境温度下,利用搅拌机将备用细土调制成一定含水率的试验用土,根据颗粒粒级大小,可以分为砂粒、粉粒和粘粒。理论上,土壤砂粒含量越高,对电磁波信号衰减作用越小,而粘粒含量越高,对电磁波在土壤传输中信号衰减影响越大。试验周围环境温度保持在20~24℃,测得试验用土的物理性质指标见表1。

表1 土样的基本物理性质指标

Tab.1 Basic physical property index of soil sample

类型	粒级组成/%		
	砂粒 (0.02~2mm)	粉粒 (0.002~0.02mm)	粘粒 (<0.002mm)
粉壤土	27.42	61.26	11.32

1.2 试验设计

无线地下传感器网络通信中,节点主要布置在地下土壤中,但其仍需与地上设备即汇聚节点进行

通信,用以实现数据的收集、管理和中继等功能。因此,基于发射节点与接收节点在地面上还是在地下土壤中的不同,WUSN存在3种不同的通信方式,地上-地下(Aboveground-Underground,AG-UG)通信、地下-地上(Underground-Aboveground,UG-AG)通信和地下-地下(Underground-Underground,UG-UG)通信,通信结构示意图如图2所示。

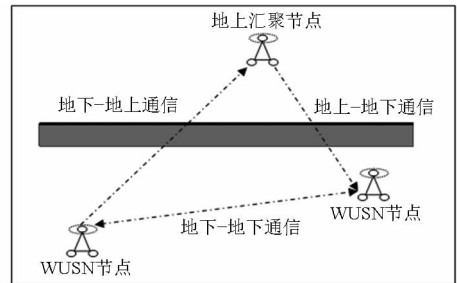


图2 WUSN通信结构

Fig.2 Structure of communication in WUSN

WUSN在土壤通信中,节点埋藏深度、土壤含水率以及水平节点间距离等对无线信号的传播存在一定的绕射、散射和直射等影响。通信质量是衡量无线地下传感器网络通信性能的重要指标之一,通过改变节点埋藏深度、土壤含水率和水平节点间距离,测试不同通信方式的接收信号强度(Received signal strength index,RSSI)和误码率(Bit error rate,BER),以此对无线地下传感器网络系统的通信质量作出评价。

1.3 试验方法

节点射频频率、节点埋藏深度、土壤含水率和水平节点间距离是影响无线地下传感器网络通信的主要因素。WUSN节点频率为百兆赫兹范围内的3个工频即240、433和868MHz。在AG-UG、UG-AG和UG-UG通信中,选用不同节点发射功率以降低功耗,分别为-1、11和20dBm。每种通信方式,每个试点均测量10组RSSI和BER并计算其平均值作为此测试的RSSI和BER。

1.3.1 AG-UG和UG-AG通信试验

在无线地下传感器网络AG-UG和UG-AG通信中,汇聚节点部署在垂直于地下节点的地表面,地下节点埋藏深度在10~100cm范围内每隔10cm变化,土壤含水率在5%~30%范围内变化,共设计6个水平,测得节点埋藏深度和土壤含水率对AG-UG和UG-AG通信中接收信号强度和误码率的影响特性。AG-UG和UG-AG通信测试模型如图3所示。

1.3.2 UG-UG通信试验

无线地下传感器网络实际通信中,除存在WUSN地上汇聚节点与地下节点之间的通信外,地

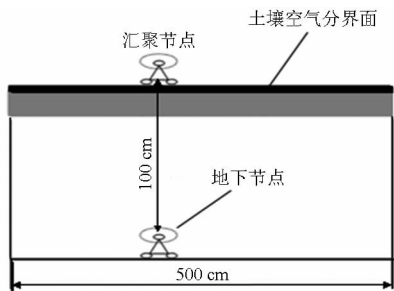


图 3 AG-UG 和 UG-AG 通信测试模型

Fig. 3 Testing model of AG-UG and UG-AG communication

下节点间的通信是必不可少的,也是尤为重要的,地下通信测试模型如图 4 所示。在 UG-UG 通信中,发射节点和接收节点埋藏深度固定为 40 cm,土壤含水率变化范围为 5%~30%,设计 6 个水平,水平节点间距离范围为 100~1 000 cm,共设计 10 个水平,测得水平节点间距离和土壤含水率对 UG-UG 通信中接收信号强度和误码率的影响。UG-UG 通信测试模型如图 4 所示。

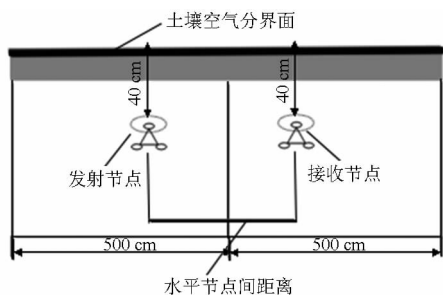


图 4 地下通信测试模型

Fig. 4 Testing model of underground communication

1.4 RSSI 测试和 BER 计算方法

从 Friis 等式可知,电磁波在自由空间经过路径长度后,接收信号强度表达式如下^[20-21]

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_0 \quad (1)$$

其中 $L_0 = 32.4 + 20\lg d + 20\lg f \quad (2)$

- 式中 P_r ——接收节点接收能量
- P_t ——发射节点发射能量
- G_t ——发射节点天线的增益
- G_r ——接收节点天线的增益
- L_0 ——电磁波在自由空间传播的路径损耗
- d ——发射节点和接收节点间的距离,m
- f ——节点操作频率,MHz

电磁波在土壤中传播,应该在 Friis 等式中增加一个校正因子来表示土壤介质对电磁波传播的损耗影响。由此,接收节点接收到的信号能量被表述为

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p \quad (3)$$

- 其中 $L_p = L_0 + L_s$
- 式中 L_s ——电磁波在土壤介质中传播由土壤引起的额外路径损耗

本次试验利用频谱分析仪来测试 WUSN 电磁波信号衰减,即接收信号强度 RSSI。将汇聚节点与频谱分析仪的射频输入端相连,在频谱分析仪上设置与汇聚节点相同的频率,标记功能设置成峰值电平跟踪,打开平均功能,记录标记输出的功率电平 P_0 。保持频谱分析仪设置不变,调汇聚节点输出功率为最小值 -20 dBm ,在频谱分析仪标记处读出功率电平 P_1 ,则汇聚节点输出功率的电平,及通信中 RSSI 为 $P = P_1 - P_0$ 。

误码率 BER 是衡量规定时间内数据传输精确性的重要指标,是传输中的误码占所传输总码数的比率。试验误码率计算过程中,每隔 1 s 发送一次 30 字节的数据包,每 3 次试验进行 300 条信息共 900 个数据接收包,正确的数据包方被记录。

2 结果与分析

2.1 AG-UG 和 UG-AG 试验结果分析

2.1.1 节点埋藏深度的影响

汇聚节点垂直地下节点布置在地表面,节点频率为 240、433 和 868 MHz 时,地下节点埋藏深度在 10~100 cm 范围内均间隔 10 cm,共设计 10 个水平,对 AG-UG 和 UG-AG 通信中接收信号强度和误码率的影响分别如图 5 和图 6 所示。

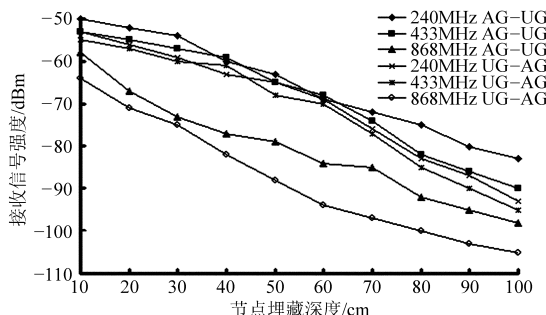


图 5 节点埋藏深度对接收信号强度的影响

Fig. 5 Effects of node burial depth on received signal strength

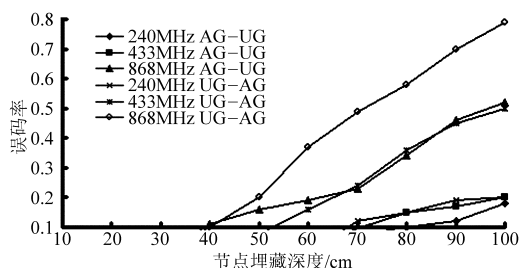


图 6 节点埋藏深度对误码率的影响

Fig. 6 Effects of node burial depth on bit error rate

由图 5 可知,RSSI 随着节点频率和地下节点埋藏深度的增加而减小,基本呈线性减少。AG-UG 通信中,节点在土壤深度 40 cm 和 60 cm 处,433 MHz 频率节点 RSSI 相对最强。UG-AG 通信

中,节点埋藏深度为 40 cm 深度处,频率为 433 MHz 的节点接收信号强度最大。节点频率为 240 MHz 和 433 MHz 频率时,RSSI 均大于 -100 dBm。当 WUSN 节点频率为 868 MHz 时,地下节点埋藏深度超过 80 cm 则 RSSI 低于 -100 dBm,比 AG-UG 通信的 RSSI 减小 2~10 dBm。

由图 6 可知,地下节点埋藏深度小于 40 cm 时,RSSI 大于 -80 dBm,误码几乎不存在。当 WUSN 节点频率分别为 240 MHz 和 433 MHz 时,AG-UG 通信的 BER 在节点埋藏深度大于 70 cm 和 80 cm 时开始增加,但均小于 20%。当节点频率为 868 MHz 时,BER 相对较高,但最高值小于 50%。UG-AG 通信中,节点频率为 240 MHz 时,与 AG-UG 中 433 MHz 频率中 BER 几乎一致,最大值小于 20%。节点频率分别为 433 MHz 和 868 MHz 时,BER 增加,分别小于 50% 和 80%。

可见,UG-AG 通信较 AG-UG 通信的接收信号强度减弱,降低了 5~10 dBm,误码率增加了 25%。

2.1.2 土壤含水率的影响

在不同节点频率 240、433 和 868 MHz 时,土壤含水率变化范围为 5%~30%,设计 6 个水平,对 AG-UG 和 UG-AG 通信中接收信号强度和误码率的影响分别如图 7 和图 8 所示。

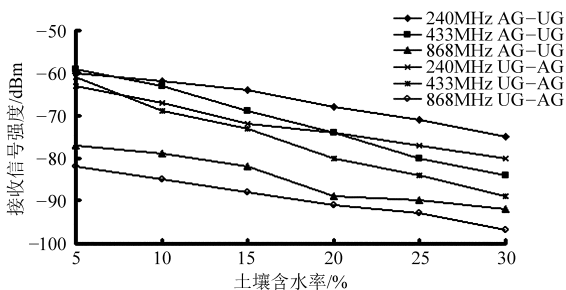


图 7 土壤含水率对接收信号强度的影响

Fig.7 Effects of soil water content on received signal strength

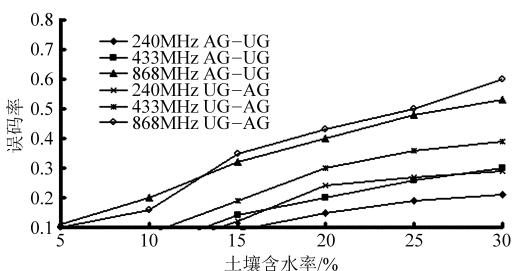


图 8 土壤含水率对误码率的影响

Fig.8 Effects of soil water content on bit error rate

由图 7 知,AG-UG 通信中,土壤含水率小于 10%,节点频率为 240 MHz 和 433 MHz 时接收信号强度几乎相等,随着土壤含水率的增加,呈线性减

小,在 $-80 \sim -60$ dBm 范围内变化。当节点频率为 868 MHz 时,接收信号强度明显降低,含水率大于 15%,接收信号强度急剧下降达 10 dBm,土壤含水率在 20%~30%时,接收信号强度又呈平缓减少状态。UG-AG 通信中,土壤含水率小于 15%时,频率为 240 MHz 和 433 MHz 的接收信号强度相差不大,随着土壤含水率的增加,呈线性减小,在 $-90 \sim -60$ dBm 范围内变化。当节点频率为 868 MHz 时,接收信号强度从 -82 dBm 变化到 -97 dBm,较其他频率接收信号强度都小,较 AG-UG 降低了 5 dBm。

由图 8 可知,AG-UG 通信中,节点频率分别为 240 MHz 和 433 MHz 时,最大误码率不超过 30%,土壤含水率小于 16% 和 13% 时,几乎不存在误码。节点频率为 868 MHz 时,误码率明显增加,几乎每增加 5% 土壤含水率,误码率增加 10%。UG-AG 通信较 AG-UG 通信误码率增加了约 8%。节点频率为 240 MHz,土壤含水率超过 15% 时,误码率迅速上升,直至达到 30% 左右。节点频率为 433 MHz 时,误码率呈直线上升状态,在土壤含水率小于 10% 时通信几乎无误码产生,当土壤含水率增加时,误码率均匀增加至 40%。对于节点频率为 868 MHz,误码率变化曲折,总体呈增加趋势,变化范围为 10%~60%。可见,UG-AG 通信较 AG-UG 通信的接收信号强度减弱,误码率增加,接收信号强度降低了 5 dBm,误码率增加了 9%。

通过 Matlab 对 3 个频率下,节点埋藏深度和土壤含水率对 AG-UG 和 UG-AG 通信中接收信号强度和误码率的影响进行回归分析,拟合优度分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 和表 3 给出了不同节点频率下,节点埋藏深度和土壤含水率对 RSSI 和 BER 影响的 24 种模型拟合优度, R^2 最大为 0.997,最小为 0.910。

总之,节点埋藏深度对 AG-UG 和 UG-AG 通信影响中,接收信号强度呈线性变化;误码率在节点频率为 240 MHz 和 433 MHz 时呈指数变化,在节点

表 2 节点埋藏深度对 RSSI 和 BER 影响模型的拟合优度 R^2

Tab.2 R^2 in the effect of node burial depth on RSSI and BER

节点频率/MHz	通信方式	RSSI 拟合 R^2	BER 拟合 R^2
240	AG-UG	0.992	0.964
240	UG-AG	0.975	0.960
433	AG-UG	0.968	0.944
433	UG-AG	0.910	0.923
868	AG-UG	0.973	0.945
868	UG-AG	0.971	0.957

表 3 土壤含水率对 RSSI 和 BER 影响模型的拟合优度 R^2

Tab.3 R^2 in the effect of soil water content on RSSI and BER

节点频率/MHz	通信方式	RSSI 拟合 R^2	BER 拟合 R^2
240	AG - UG	0.983	0.959
240	UG - AG	0.984	0.934
433	AG - UG	0.997	0.976
433	UG - AG	0.990	0.971
868	AG - UG	0.950	0.986
868	UG - AG	0.995	0.976

频率为 868 MHz 时,呈线性变化。土壤含水率对 AG - UG 和 UG - AG 通信影响中,接收信号强度呈线性变化;误码率在节点频率为 240 MHz 时呈指数变化,在节点频率为 433 MHz 和 868 MHz 时,呈线性变化。

2.1.3 433 MHz 频率下 RSSI 模型建立与验证

选择 433 MHz 频率作为 WUSN 节点通信频率,通过 Matlab 建立 433 MHz 频率下 AG - UG 和 UG - AG 通信中,节点埋藏深度和土壤含水率对接收信号强度影响的三维曲面,如图 9 和图 10 所示,并通过 Matlab 进行二元二次拟合,得出接收信号强度和误码率的拟合模型和拟合优度。

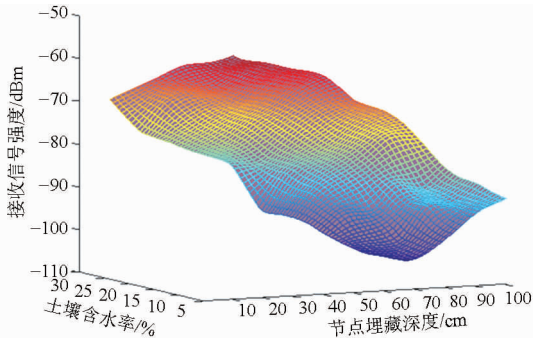


图 9 AG - UG 通信中接收信号强度三维曲面

Fig.9 Curved surface of RSSI in AG - UG communication

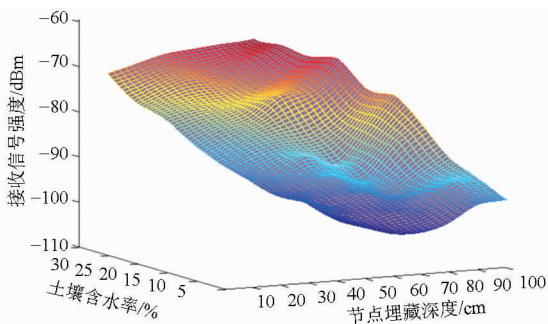


图 10 UG - AG 通信中接收信号强度三维曲面

Fig.10 Curved surface of RSSI in UG - AG communication

由图 9 可知,AG - UG 通信中,地下节点埋藏深度越深,土壤含水率越大,则接收信号强度越小。土壤含水率低于 20%,接收信号强度大于 -105 dBm,土壤含水率大于 20%,地下节点埋藏深度在 10 ~ 90 cm 范围时,接收信号强度均大于 -100 dBm。通

过 Matlab 进行分析,建立关系

$$R_{ss} = -43.5622 - 0.2722N_d - 0.7695S_v - 0.0016N_d^2 - 0.0011N_dS_v - 0.0029S_v^2 \quad (R^2 = 0.987) \quad (4)$$

式中 R_{ss} ——通信中接收信号强度, dBm

N_d ——地下接收节点的埋藏深度, cm

S_v ——土壤含水率, %

节点埋藏深度和土壤含水率对接收信号强度基本呈二元二次关系,拟合优度 R^2 较高,为 0.987。

由图 10 可知,UG - AG 通信中,土壤含水率低于 20% 时,RSSI 大于 -100 dBm。土壤含水率大于 20% 时,在地下节点最大埋藏深度处,接收信号强度值达到最小 -110 dBm。在不同的土壤含水率下,UG - AG 通信中地下节点的最大节点埋藏深度不同。与 AG - UG 通信相比,在相同的土壤含水率下,接收信号强度降低了 2 ~ 5 dBm。通过 Matlab 进行分析,建立关系

$$R_{ss} = -38.1378 - 0.5136N_d - 1.4867S_v - 0.0003N_d^2 - 0.0010N_dS_v - 0.0161S_v^2 \quad (R^2 = 0.987) \quad (5)$$

节点埋藏深度和土壤含水率对接收信号强度基本呈二元二次关系,拟合优度 R^2 较高,为 0.987。

为了能够评估 AG - UG 和 UG - AG 通信预测模型,采用 SPSS 软件对能较好反映数据波动的拟合优度 R^2 和均方根误差 RMSE 进行了分析,如表 4 和表 5 所示。

表 4 AG - UG 通信中不同土壤含水率实测数据与预测模型计算结果的拟合优度和均方根误差

Tab.4 R^2 and root mean square error between measured and computed data at different soil water contents in AG - UG communication

土壤含水率/%	拟合优度 R^2	均方根误差/dBm
5	0.968	2.571
10	0.954	3.198
15	0.983	1.872
20	0.985	1.987
25	0.992	1.415
30	0.979	2.139

表 5 UG - AG 通信中不同土壤含水率实测数据与预测模型计算结果的拟合优度和均方根误差

Tab.5 R^2 and root mean square error between measured and computed data at different soil water contents in UG - AG communication

土壤含水率/%	拟合优度 R^2	均方根误差/dBm
5	0.963	2.906
10	0.995	1.072
15	0.984	1.966
20	0.998	0.729
25	0.994	1.223
30	0.979	1.987

由表4和表5可知,AG-UG通信中,在土壤含水率10%时,模型计算结果和实际测量值之间的拟合优度 R^2 最小为0.954,在土壤含水率25%时最大为0.992。均方根误差在1.415~3.198 dBm之间。UG-AG通信中,在土壤含水率5%时,模型计算结果和实际测量值之间的拟合优度 R^2 最小为0.963,在土壤含水率20%时最大为0.998。均方根误差在0.729~2.906 dBm之间。

结果表明,实测接收信号强度与计算的接收信号强度相差较小。该模型能够较好地对AG-UG和UG-AG通信中不同土壤含水率不同地下节点埋藏深度的接收信号强度进行预测。

2.2 UG-UG试验结果分析

2.2.1 接收信号强度与误码率

UG-UG通信中,节点频率为240、433和868 MHz,发射节点和接收节点埋藏深度为40 cm,水平节点间距离在100~1000 cm范围内均间隔10 cm,共设计10个水平,土壤含水率变化范围为5%~30%,设计6个水平,对UG-UG通信中接收信号强度和误码率的影响如图11、12所示。

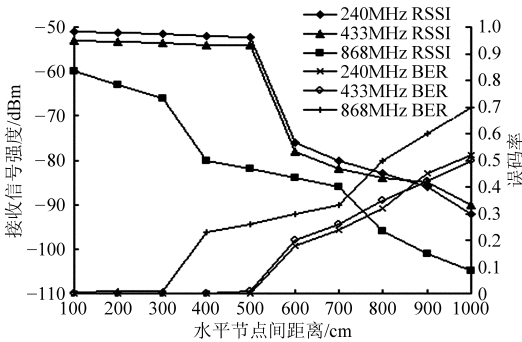


图11 水平节点间距离对接收信号强度和误码率的影响

Fig. 11 Effects of horizontal inter-nodes distance on RSSI and BER

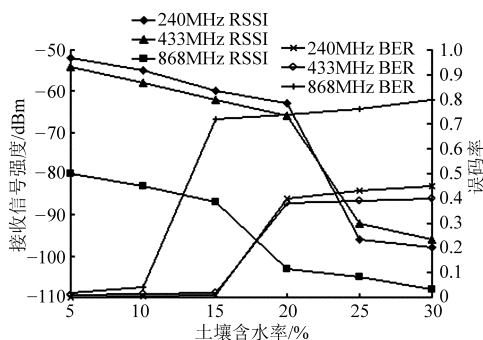


图12 土壤含水率对接收信号强度和误码率的影响

Fig. 12 Effects of soil water content on RSSI and BER

如图11可知,WUSN节点频率为240 MHz和433 MHz,水平节点间距离小于500 cm时,接收信号强度很强,在-55~-50 dBm范围内平稳变化,几乎不产生误码。当水平节点间距离增加至600 cm,

接收信号强度大幅度减小至-80 dBm左右,随着水平节点间距离的不断增加,接收信号强度逐渐减小,减幅变缓,误码率逐渐增加,最大值约50%。当WUSN节点频率为868 MHz时,接收信号强度在水平节点间距离小于300 cm时降低了约10 dBm,误码率几乎为零。当水平节点间距离在400~700 cm范围内,接收信号强度在-85~-80 dBm范围内平稳变化,误码率直线上升,上幅不大,至30%。水平节点间距离大于700 cm时,接收信号强度继续下降到-105 dBm,误码率上升到70%。

由图12可知,水平节点间距离为50 cm不变时,在同一节点频率下,土壤含水率越高,接收信号强度越低。当频率为240 MHz和433 MHz,土壤含水率低于20%时,接收信号强度小幅度降低,且不低于-66 dBm。土壤含水率增加至25%,接收信号强度急剧下降至-95 dBm左右,之后,接收信号强度变化不明显,但频率为240 MHz的接收信号强度小于433 MHz的接收信号强度,且均大于-100 dBm。当频率为868 MHz时,接收信号强度在-108~-80 dBm之间,不同于其他频率的接收信号强度,与240 MHz和433 MHz频率相比,接收信号强度降低了约10~30 dBm。

当节点频率为240 MHz和433 MHz,土壤含水率小于15%时,通信产生的误码可忽略不计。土壤含水率上升到20%,误码率急剧增加至40%。随着土壤含水率继续上升,误码率小幅度变化,增加了约5%,此时,240 MHz频率通信产生的误码率略高于433 MHz频率所产生的误码率。频率为868 MHz的UG-UG通信中产生的误码率高于其他频率所产生的误码率约40%。

2.2.2 回归分析

通过Matlab对3个频率下,水平节点间距离和土壤含水率对UG-UG通信中接收信号强度和误码率的影响进行回归分析,拟合优度分别如表6和表7所示。

表6和表7给出了UG-UG通信中不同节点频率下,水平节点间距离和土壤含水率对接收信号强

表6 水平节点间距离对接收信号强度和误码率影响模型的拟合优度 R^2

Tab. 6 R^2 in the effect of horizontal inter-nodes distance on RSSI and BER

节点频率/ MHz	接收信号强度拟合 优度 R^2	误码率拟合优度 R^2
240	0.894	0.971
433	0.866	0.958
868	0.970	0.967

表 7 土壤含水率对接收信号强度和误码率影响模型的拟合优度 R^2

Tab. 7 R^2 in the effect of soil water content on RSSI and BER

节点频率/MHz	接收信号强度拟合优度 R^2	误码率拟合优度 R^2
240	0.903	0.870
433	0.932	0.887
868	0.923	0.966

度和误码率影响的 12 种模型拟合优度, R^2 最大为 0.971, 最小为 0.866。

2.2.3 433 MHz 频率下 RSSI 模型建立与验证

由 UG-UG 通信中接收信号强度和误码率试验分析可知, 频率为 433 MHz 和 240 MHz 通信中接收信号强度和误码率几乎一致, 且在一定水平节点间距离和土壤含水率范围, 频率为 433 MHz 的通信其接收信号强度较大, 误码率较小。选用 433 MHz 频率作为 WUSN 节点通信频率, 通过 Matlab 建立 433 MHz 频率下的 UG-UG 通信, 水平节点间距离和土壤含水率对接收信号强度影响的三维曲面, 如图 13 所示, 并通过 Matlab 进行二元二次拟合, 得出接收信号强度的拟合模型和拟合优度。

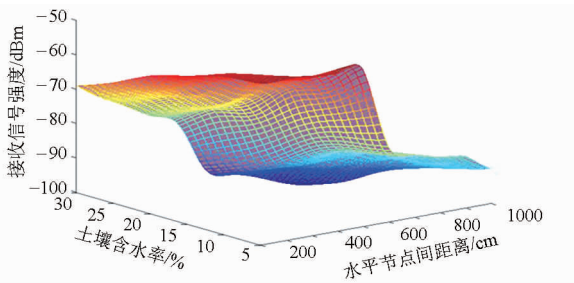


图 13 UG-UG 通信中接收信号强度三维曲面
Fig. 13 Curved surface of RSSI in UG-UG communication

由图 13 可知, 接收信号强度随水平节点间距离和土壤含水率的增加而减小。当土壤含水率达到 20% 时, 在水平节点间距离最大 1 000 cm 处, 接收信号强度值达到 -100 dBm。土壤含水率继续增加至 25%, 水平节点间距离为 800 cm 时, 接收信号强度为 -100 dBm, 随着水平节点间距离的继续增加, 接收信号强度不断减小, 直至最小值约 -105 dBm。在土壤含水率为最大值 30%, 水平节点间距离为 600 cm 时, 接收信号强度达到 -100 dBm, 随着水平节点间距离的增加逐渐减小, 减小幅度 2 ~ 3 dBm, 直至最小值 -110 dBm。

通过 Matlab 进行分析, 建立关系

$$R_{ss} = -37.8433 - 0.0502H_s - 0.5746S_v - 0.0103S_v^2 \quad (R^2 = 0.945) \quad (6)$$

式中 H_s ——WUSN 水平节点间距离, cm

水平节点间距离和土壤含水率对接收信号强度基本呈二元二次关系, 拟合优度 R^2 较高, 为 0.945。

为了对 UG-UG 通信中接收信号强度 RSSI 衰减预测模型进行验证, 选取节点频率 433 MHz 下土壤含水率为 10% 的不同水平节点间距离进行试验验证, 其中, 接收信号强度衰减模型为

$$R_{ss} = -45.483 - 4.7614N_d - 0.0189N_d^2 \quad (R^2 = 0.988) \quad (7)$$

验证结果如图 14 所示。

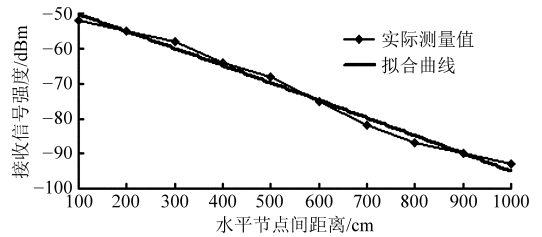


图 14 模型计算和实测 RSSI 的对比
Fig. 14 Comparison between computed and measured RSSI

结果表明, 实测接收信号强度 RSSI 与计算的接收信号强度相差较小。该模型能够较好地对 UG-UG 通信中一定土壤含水率不同水平节点间距离的接收信号强度进行预测。

为了能够评估 UG-UG 通信预测模型, 采用 SPSS 软件对能较好反映数据波动的拟合优度 R^2 和均方根误差进行了分析, 如表 8 所示。

由表 8 可知, UG-UG 通信中, 在土壤含水率 5% 时, 模型计算结果和实际测量值之间的拟合优度 R^2 最小为 0.854, 在土壤含水率 30% 时最大为 0.960, 均方根误差在 3.238 ~ 6.553 dBm。

表 8 UG-UG 通信中不同土壤含水率实测数据与预测模型计算结果的拟合优度和均方根误差

Tab. 8 R^2 and root mean square error between measured and computed data at different soil water contents in UG-UG communication

土壤含水率/%	拟合优度 R^2	均方根误差/dBm
5	0.854	6.553
10	0.932	4.390
15	0.939	4.063
20	0.955	3.463
25	0.950	3.708
30	0.960	3.238

结果表明, 实测接收信号强度值与计算值相差较小。该模型能够较好地对 UG-UG 通信中不同土壤含水率不同水平节点间距离的接收信号强度进行预测。

3 结论

(1) 无线地下传感器网络在土壤环境中传播与

射频频率、节点埋藏深度、水平节点间距离以及土壤含水率等因素有直接关系,节点频率越大,通信性能越差。AG-UG和UG-AG通信中,节点在土壤深度40~60 cm时,433 MHz频率节点接收信号强度相对最强。

(2) AG-UG和UG-AG通信中,接收信号强度随节点埋藏深度和土壤含水率的增加而减小,而误码率相对增加。节点埋藏深度对通信的影响中,UG-AG通信比AG-UG通信中接收信号强度减小2~10 dBm。土壤含水率对通信的影响中,UG-AG通信较AG-UG通信接收信号强度减小了5 dBm左右。通过Matlab拟合建立3个频率下,节点埋藏深度和土壤含水率对AG-UG和UG-AG通信中接收信号强度和误码率影响的24种模型拟合优度, R^2 最大为0.997,最小为0.910。

(3) 建立433 MHz频率下AG-UG和UG-AG通信中接收信号强度的三维曲面,并采用SPSS软件

对模型进行了验证,拟合优度 R^2 最小为0.954,最大为0.998,均方根误差在0.729~3.198 dBm。

(4) UG-UG通信中,频率为240 MHz和433 MHz,水平节点间距离小于500 cm时,接收信号强度在-55~-50 dBm范围内平稳变化,几乎不产生误码。土壤含水率大于25%时,240 MHz频率的接收信号强度小于433 MHz频率的接收信号强度。通过Matlab拟合建立3个频率下,水平节点间距离和土壤含水率对UG-UG通信中接收信号强度和误码率影响的12种模型拟合优度, R^2 最大为0.971,最小为0.866。

(5) 建立433 MHz频率下UG-UG通信中接收信号强度变化的三维曲面,采用SPSS软件对模型进行了验证,拟合优度 R^2 最小为0.854,最大为0.960,均方根误差为3.238~6.553 dBm。实测数据和计算值较吻合,模型能较好地预测接收信号强度。

参 考 文 献

- 1 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)
- 2 Yu X Q, Wu P T, Han W T, et al. A survey on wireless sensor networks infrastructure for agriculture[J]. Computer Standards & Interfaces,2013,35(1):59-64.
- 3 杨玮,李民赞,王秀. 农田信息传输方式现状及研究进展[J]. 农业工程学报,2008,24(5):297-301.
Yang Wei, Li Minzan, Wang Xiu. Status quo and progress of data transmission and communication technology in field information acquisition[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5):297-301. (in Chinese)
- 4 王汝川,孙丽娟. 无线传感器网络技术及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2011:32-39.
- 5 乔晓军,张馨,王成,等. 无线传感器网络在农业中的应用[J]. 农业工程学报,2005,21(增刊2):232-234.
Qiao Xiaojun, Zhang Xin, Wang Cheng, et al. Application of the wireless sensor networks in agriculture [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(Supp.2): 232-234. (in Chinese)
- 6 Green O, Nadimi E S, Blanes V, et al. Monitoring and modeling temperature variations inside silage stacks using novel wireless sensor networks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 69(1):149-157.
- 7 Yu X Q, Wu P T, Wang N, et al. Survey on wireless sensor networks agricultural environment information monitoring[J]. Journal of Computational Information Systems,2012,8(19):7919-7926.
- 8 Li L, Vuran M C, Akyildiz I F, et al. Characteristics of underground channel for wireless underground sensor networks[C]// Proceedings of the Sixth Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, 2007, 6:12-15.
- 9 Li L, Wen X M. Energy efficient optimization of clustering algorithm in wireless sensor network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(4):966-969.
- 10 Celik G, Sabuncuoglu I. Simulation modeling and analysis of a border security system[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 180(3):1394-1410.
- 11 Akyildiz I F, Stuntebeck E P. Wireless underground sensor networks; research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2006, 4:669-686.
- 12 Vuran M C, Akyildiz I F, Al-Dhelaan A M. Channel model and analysis for wireless underground sensor networks in soil medium [J]. Physical Communication, 2010,3(4):245-254.
- 13 Silva A R, Vuran M C. Communication with above devices in wireless underground sensor networks; a empirical study[C]//2010 IEEE International Conference on Communications, 2010:23-27.
- 14 Coen J R, Henk K, Leon K, et al. A new wireless underground network system for continuous monitoring of soil water contents [J]. Water Resources Research, 2009, 45(36):36-44.
- 15 Bogena H R, Huisman J A, Meierb H, et al. Hybrid wireless underground sensor networks; quantification of signal attenuation in soil[J]. Vadose Zone Journal, 2009, 8(3):755-761.
- 16 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.

- Engineering, 2011, 105(3): 563 – 568.
- 15 Ono T. The mechanism of soymilk and tofu formation from soybean, and the factors affecting the formation [J]. Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology, 2008, 55(2): 39 – 48.
- 16 Guo S, Ono T. The role of composition and content of protein particles in soymilk on tofu curding by glucono- δ -lactone or calcium sulfate [J]. Journal of Food Science, 2005, 70(4): C258 – C262.
- 17 熊秀芳, 李星恕, 郭康权, 等. 豆浆凝固过程的有限元解析 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 158 – 163.
Xiong Xiufang, Li Xingshu, Guo Kangquan, et al. FEM analysis and validation of ohmic heating process of soymilk [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 158 – 163. (in Chinese)
- 18 Grimnes S, Martinsen Φ G. Bioimpedance & bioelectricity basis [M]. Tokyo: Academic Press, 2000: 138 – 145.
- 19 Toyoda K. Handbook of nondestructive measurement of food: application of electrical properties [M]. Tokyo: Science Forum Pub., 2003: 84 – 91.
- 20 Toyoda K. New agricultural informatic engineering: spectroscopy [M]. Tokyo: Youkendo Pub., 2004: 156 – 157.
- 21 和劲松, 祁凡雨, 叶章颖, 等. 微酸性电解水贮藏和杀菌过程中有效氯衰减的动力学模型 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 263 – 270.
He Jinsong, Qi Fanyu, Ye Zhangying, et al. Decay kinetics model of available chlorine in slightly acidic electrolyzed water in storage and disinfection process [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 263 – 270. (in Chinese)
- 22 刘刘, 邓良伟, 王志勇. 几种厌氧消化原料的流变特性及其影响因素 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 204 – 209.
Liu Yi, Deng Liangwei, Wang Zhiyong. Rheological properties of several kinds of feedstocks for anaerobic fermentation and their influencing factors [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 204 – 209. (in Chinese)
- 23 郭芳, 赵武奇, 尹贻童, 等. 欧姆加热过程中苹果浆的电导率及 VC 降解规律研究 [J]. 农产品加工·学刊, 2011(6): 26 – 30.
Guo Fang, Zhao Wuqi, Yin Yitong, et al. Electrical conductivity and degradation law about VC in apple pulp during ohmic heating [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2011(6): 26 – 30. (in Chinese)
- 24 Kohyama K, Yoshida M, Nishinari K. Rheological studies on the gelation process of soybean 11S proteins by glucono- δ -lactone [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1992, 40(5): 740 – 744.
- 25 Chang Y, Su H, Shiau S. Rheological and textural characteristics of black soybean touhua (soft soybean curd) prepared with glucono- δ -lactone [J]. Food Chemistry, 2009, 115(2): 585 – 591.
- 26 Avanza M V, Puppo M C, Añón M C. Rheological characterization of amaranth protein gels [J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(5): 889 – 898.
- 27 Ikeda S, Foegeding E A. Dynamics viscoelastic properties of thermally induced whey protein isolate gels with added lecithin [J]. Food Hydrocolloids, 1999, 13(3): 245 – 254.
- 28 李里特. 食品物性学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 11 – 20.
- 29 Tang C H. Effect of thermal pretreatment of raw soymilk on the gel strength and microstructure of tofu induced by microbial transglutaminase [J]. LWT, 2007, 40(8): 1403 – 1409.
- 30 熊秀芳. 豆浆通电加热特性与凝胶流变特性及其在线检测方法的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
Xiong Xiufang. Ohmic heating characteristics of soymilk and rheological properties of tofu gel with online detection [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 260 页)

- 17 李莉, 张彦娥, 汪懋华, 等. 现代通信技术在温室中的应用 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(2): 195 – 200.  
Li L, Zhang Y E, Wang M H, et al. Communication technology for sustainable greenhouse production [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(2): 195 – 200. (in Chinese)
- 18 李萍萍, 彭玉礼, 王纪章. 温室青椒中 2.4 GHz 无线电波传播特性研究 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 251 – 255.  
Li P P, Peng Y L, Wang J Z. Propagation characteristics of 2.4 GHz radio wave in greenhouse of green peppers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 251 – 255. (in Chinese)
- 19 Stuntebeck E P, Pompili D, Melodia T. Wireless underground sensor networks using commodity terrestrial motes [C] // 2006 2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks, 2006: 112 – 114.
- 20 Stuber G. Principles of mobile communication [M]. Boston: Klumer Academic Publishers, 1996.
- 21 Ramo S, Whinnery J, Van D T. Fields and water for communications electronics [M]. New York: John Wiley and Son, 1994.