

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.037

基于信道测试的橘园 WSN 网络部署试验*

岳学军^{1,2} 王叶夫¹ 洪添胜¹ 徐兴¹ 刘永鑫¹ 张宗杰¹

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;

2. 南昆士兰大学工程与测绘学院, 图文巴 QLD4350)

摘要: 为解决无线传感器网络(WSN)规划与快速部署问题,基于无线信道传播特性,研究橘园 WSN 射频信号衰减模型,指导 WSN 部署并进行了组网试验。选 433 MHz 与 2.4 GHz 载波频率,基于连续无线电波在通信码率、天线增益、调制扩频方式、数据包长度和通信距离等多因素作用下分析 WSN 射频信号在橘园的衰减,建立 2 频率射频信号接收强度与环境传播因子及通信距离间的模型,拟合 R^2 最小值与最大值分别为 0.957 031 与 0.971 218, 0.954 6 与 0.986 3。通信码率低于 1.2 kb/s 且远距离通信时,433 MHz CC1110 具有优势;发射功率与天线增益相同时,433 MHz 平均信号强度高于 2.4 GHz;通信码率相同时,CC2530 丢包率低于 CC1110。针对橘园选 ZigBee 设计星型 WSN 进行组网试验,结果表明,尽可能短数据包与较低通信码率的通信协议较好;WSN 各节点平均通信成功率高于 84%。

关键词: 橘园 无线传感器网络 信道测试 传播信道 网络部署

中图分类号: S126; TN919.72 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)05-0213-06

WSN Layout Experiment Based on Radio Frequency Propagation Tests in Citrus Orchard

Yue Xuejun^{1,2} Wang Yefu¹ Hong Tiansheng¹ Xu Xing¹ Liu Yongxin¹ Zhang Zongjie¹

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, Toowoomba QLD4350, Australia)

Abstract: The layout of wireless sensor network (WSN) in citrus orchards was analyzed concerning radio frequency (RF) signal strength attenuation and packet loss rate of WSN based on radio wave propagation characteristics. Accordingly, a simply equipped WSN network was deployed and tested. The attenuation of radio wave was studied in the tests with the carrier frequencies of 433 MHz and 2.4 GHz in the circumstance of different combinations of impact factors including data rate, packet length, transmission distances, etc. The two RF signal strength linear models (433 MHz and 2.4 GHz) were built in citrus orchards with the related determination coefficients for fitting-curves ranging from 0.957 031 to 0.971 218 and 0.954 6 to 0.986 3. Signal attenuation tests showed that the CC1110 (433 MHz) had a better performance in long distance communication with data rate lower than 1.2 kb/s and the average received signal strength was higher than the 2.4 GHz's with the same output power. While the CC2530 (2.4 GHz) provided lower packet loss rate compared with the CC1110 (433 MHz) in transmitting in the same data rate. For WSN configuration, short data packet and low data rate were recommended according to the test results. A ZigBee star network was constructed and experimented with the guidance provided by signal attenuation tests. Statistics showed that the average success rate for communication was higher than 84%.

Key words: Citrus orchard WSN Propagation test Propagation channel Network layout

收稿日期: 2012-06-27 修回日期: 2012-11-29

* 现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-27)、省部产学研结合项目(2011B090400359)和国家星火计划资助项目(2012GA780043)

作者简介: 岳学军,副教授,南昆士兰大学访问学者,主要从事电子信息及通信技术应用研究,E-mail: yuexuejun@scau.edu.cn

通讯作者: 洪添胜,教授,博士生导师,主要从事机电一体化技术和信息技术在农业中的应用研究,E-mail: tshong@scau.edu.cn

引言

WSN 广泛应用于精细农业中采集作物生长过程诸如温度、湿度、雨量、光照、叶面积指数、营养元素含量等信息,相关关键技术如节点部署、路由协议、能量获取、节能、数据融合及服务与实践应用结合是当前研究热点^[1~2]。农业环境时空变异性大,复杂多变,环境因子严重影响无线信号传播的稳定性和可靠性,WSN 应用于农业的关键技术需要深入研究^[3~4]。

信道中无线信号传输受橘园的地形地貌、植被密度、株高、大气温度、风向和风力、太阳辐射、发射和接收节点高度等复杂因素的共同影响^[5~6],进行无线信道信号衰减试验研究,可对橘园 WSN 的规划和部署提供理论基础与实践指导^[7~8]。当前国内研究中试验分为两类:第 1 类是未组网之前的通信性能与距离关系,第 2 类是组网之后的通信性能与距离关系。两类试验都在固定的组网方式与通信协议条件下进行,均偏于应用^[9]。当前无线信号衰减研究理论支撑不够,建立模型缺少验证,很多结论处于定性阶段,为共性常识,定量分析偏少^[10]。

本文选华南农业大学亚热带果树资源苗圃中的柑橘种植区域为试验场地,以 433 MHz 与 2.4 GHz 为试验频率,进行无线通信信道测试,测试其强度变化规律,探讨橘园影响无线信号传播的因子,建立数学模型,研究 WSN 组网方案优劣与橘园节点部署,为 WSN 在橘园中的应用提供理论依据。

1 射频信号传播特性

无线电信号传输受地形与植被等因素影响引发反射、散射、吸收等而导致衰减^[11]。无线射频信号强弱表现为功率大小,其发射功率和接收功率间关系表示为

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

式中 P_R ——无线信号接收功率, mW

P_T ——无线信号发射功率, mW

d ——收发单元间距离, m

n ——传播因子,数值大小取决于无线信号传播环境

式(1)两边取对数得

$$10n \lg d = 10 \lg (P_T / P_R) \quad (2)$$

节点发射功率已知,将发送功率代入式(2)得

$$10 \lg P_R = A - 10n \lg d \quad (3)$$

式中 $10 \lg P_R$ ——无线信号接收功率单位 mW 转换为 dBm(功率毫瓦)的表达式,简称为 P_R (dBm)

A ——选近地参考点 $d_0 = 1$ m 处的接收信号强度作为信号衰减计算时的有效发射功率^[12], dBm

式(3)可直接写成

$$P_R(\text{dBm}) = A - 10n \lg d \quad (4)$$

A 和 n 值决定接收信号强度和信号传输距离的关系。

2 试验设备与试验方法

2.1 影响因素选择

将无线节点部署在利于信号传播的开阔地带,无线电信号在视距内传播。系统通信码率、数据包长度、载波频率、发射功率、天线高度等多因素影响 WSN 的可靠性,多种影响因素组合取值如表 1 所示^[13]。天线高度固定为 1.5 m,发射功率 0 dBm。根据 IEEE 802.15.4 标准与 CC1110 模块常用通信码率,将 CC1110 的通信码率分别配置为 1.2 kb/s 与 250 kb/s,针对 2 频率测试通信模块在默认配置或相同通信码率组网的可靠性,进行 3 种通信方式的对比试验。

表 1 信道测试影响因素取值

Tab. 1 Impact factor values of influences on radio propagation

频率 / MHz	通信码率 / kb·s ⁻¹	调制扩频 方式	天线增益 / dBi	数据包长 / B
433	250(1.2)	GFSK	3	10
433	250(1.2)	GFSK	3	20
433	250(1.2)	GFSK	3	30
2 405	250	DSSS	3	10
2 405	250	DSSS	3	20
2 405	250	DSSS	3	30

2.2 试验场地与设备

选华南农业大学亚热带果树资源苗圃中的柑橘种植区域,地形为山坡丘陵,柑橘树按梯田式分布栽种,平均坡度 20°,橘树高度 2.8 m,橘树冠层直径 3 m,植株平均间距 2.8 m,如图 1 所示。

试验设备选取如图 2 所示。

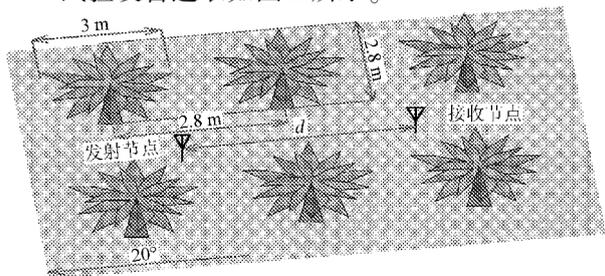


图 1 通信信道测试场地示意图

Fig. 1 Diagram of propagation channel in experimental orchard

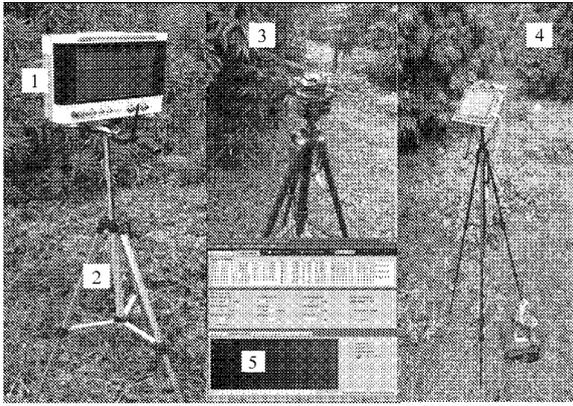


图 2 信道特性与丢包率试验设备

Fig. 2 Equipments of radio propagation and packet loss rate test

1. 物联网协议分析仪 2. 三脚架 3. 无线发射节点 4. 连接计算机的无线接收节点 5. TI SmartRF Studio 通信调试软件

用 IOT100 型物联网协议分析仪(深圳无线龙电子公司)进行工业、科学和医用频段 ISM(Industry scientific and medical band) 频率频谱扫描与数据包截取;用三脚架固定节点,高度在 35 ~ 150 cm 区间内调整;2.4 GHz 与 433 MHz 发射节点分别由 TI 公司的 CC2530 与 CC1110 射频单片机为核心构成;接收节点由测试接口连接计算机;TI SmartRF Studio 7 通信测试软件运行于 IOT100 型物联网协议分析仪中,由调试接口(JTAG)对 TI 无线 SOC 进行芯片级的测试或通信试验^[14]。

2.3 信道测试试验方案与组网方案设计

参照文献,融入橘园的特殊性,设计信道测试试验方案与组网方案如下:

(1) 用 IOT100 型协议分析仪分别全扫描 CC2530 与 CC1110 工作频率,选背景噪声最小的频率 434 MHz 与 2.405 GHz 进行试验。

(2) 分别将 2 频率的无线发射节点与协议分析仪用三脚架固定 1.5 m 高度,以 10 m 为步进距,改变收发(T-R)距离,每个测试点均接收发射节点发送的 200 个数据包,统计其平均接收信号强度 RSSI (Receive signal strength index) 与丢包率。

(3) 时长 2.5 h 内统计网关接收数据包数,用丢包率与平均链路质量 LQI (Link quality index) 评估网络性能,分析试验数据,探索最优的组网通信方式,设计网络拓扑结构,进行组网试验。

3 信道测试试验与数据分析

3.1 2 频率的信号强度-通信距离测量结果分析

测量 433 MHz 不同通信距离 d 下的接收信号强度(RSSI),用 Matlab 中 CFTools 对均值后的 RSSI 进行拟合,如图 3 所示,公式为

$$I_{RSSI-433\text{ MHz}} = -5.0773 \lg d - 35.044 \quad (R^2 = 0.9725) \quad (5)$$

式中 $I_{RSSI-433\text{ MHz}}$ ——信号强度, dBm

式(5)对应射频信号传播特性, A 为 -35.044 , n 为 -0.51 。重复 3 次,3 组重复试验数据与式(5)回归分析得 R^2 最大值为 0.971218,最小值为 0.957031,试验表明,该方程可表达 433 MHz 信号在试验场地的传播特性。

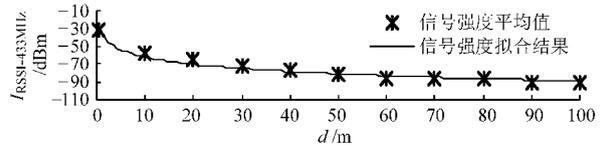


图 3 在 433 MHz 频率下的衰减曲线

Fig. 3 Attenuation curves under 433 MHz frequency band

同理,2.4 GHz 的 RSSI 均值与拟合结果如图 4 所示, RSSI 与通信距离的回归方程为

$$I_{RSSI-2.4\text{ GHz}} = -5.113 \lg d - 39.729 \quad (R^2 = 0.9860) \quad (6)$$

式中 $I_{RSSI-2.4\text{ GHz}}$ ——信号强度, dBm

式(6)对应射频信号传播特性, A 为 -39.729 , n 为 -0.51 。重复 3 次,3 组重复试验数据与式(6)回归分析,得 R^2 最大值为 0.9863,最小值为 0.9546。试验表明,该回归方程可表达 2.4 GHz 信号在试验场地的传播特性。

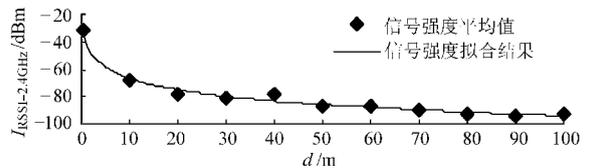


图 4 在 2.4 GHz 频率下的衰减曲线

Fig. 4 Attenuation curves under 2.4 GHz frequency band

信号强度差 $I_{\Delta RSSI}$ 随通信距离 d 变化趋势如图 5 所示,2 频率 RSSI 在近场区随通信距离 d 增大快速衰减,在远场区随通信距离 d 增大缓慢衰减。由式(5)与(6)得 433 MHz 与 2.4 GHz 频率下信号强度差与 d 的关系式

$$I_{\Delta RSSI} = I_{RSSI-433\text{ MHz}} - I_{RSSI-2.4\text{ GHz}} = 0.082 \ln d + 4.685 \quad (7)$$

式中 $I_{\Delta RSSI}$ ——信号强度差, dBm

式(7)表明 433 MHz 频率信号强度高于 2.4 GHz 频率,且 $I_{\Delta RSSI}$ 正比于 d ,增长趋势先快后慢。如图 5 所示。

由图可见,在 100 m 内 $I_{\Delta RSSI}$ 差别小于 5 dBm;在近场区(5 m 内),发射功率均为 0 dBm 的情况下,2.4 GHz 频率 $I_{RSSI-2.4\text{ GHz}}$ 值低于 $I_{RSSI-433\text{ MHz}}$,产生此现象原因是 CC2530 模块用直序扩频(DSSS)方式扩展频谱,频域中产生了较低平均信号能量。

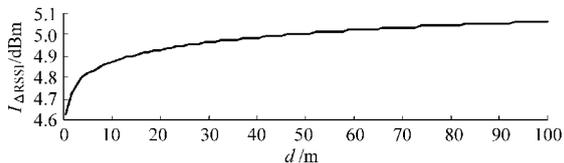


图5 $I_{\Delta RSSI}$ 与通信距离 d 的关系曲线

Fig. 5 Relation between $I_{\Delta RSSI}$ and communication distance d

3.2 常用通信码率条件下的试验

433 MHz 频率(常用通信码率 1.2 kb/s)下通信丢包率与通信距离关系曲线如图 6 所示。图 6 表明,433 MHz 频率 1.2 kb/s 码率下,3 种数据包长度可靠通信距离达 70 m;超过 70 m 后,RSSI 值低于 -80 dBm 后,丢包率显著增加;与通信距离成正比,平均每 10 m 增加 20%;到 100 m 时,丢包率超过 40%,不能有效通信。

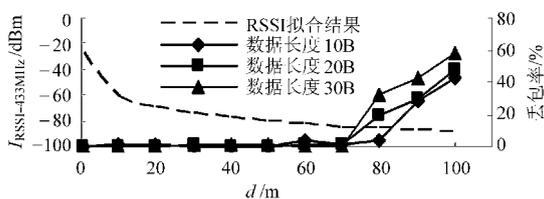


图6 在 433 MHz 频率 1.2 kb/s 下丢包率与通信距离的关系曲线

Fig. 6 Packet loss rate of 433 MHz at 1.2 kb/s data rate

2.4 GHz 频率 250 kb/s 通信码率下的测量结果如图 7 所示。图 7 表明,在 2.4 GHz 频率 250 kb/s 通信码率下,3 种数据包长度的可靠通信距离达 50 m;超过 50 m,RSSI 值低于 -90 dBm 后,丢包率显著增加,并与通信距离成正比,平均每 10 m 增加 20%;通信距离达到 90 m 后,平均丢包率超过 40%,不能有效通信。

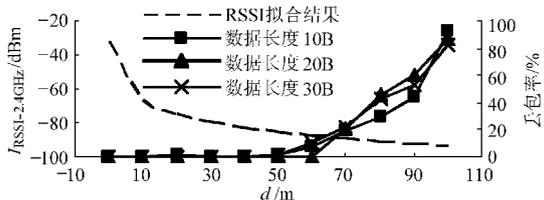


图7 在 2.4 GHz 频率 250 kb/s 下丢包率与通信距离的关系曲线

Fig. 7 Packet loss rate of 2.4 GHz at 250 kb/s data rate

2 频率试验表明,数据包长,丢包率高,原因是:信道随机干扰一定,数据包长度增加,误码率增大,CRC16 校验失败,丢包率增加。

3.3 试验环境下相同通信码率的丢包率对比

2 频率通信码率 250 kb/s 下,3 数据包长的丢包率随通信距离 d 的变化如图 8 所示。433 MHz 频率在通信码率为 250 kb/s 时,可靠通信距离仅为 45 m,通信距离超过 40 m 后,丢包率高于 2.4 GHz 频率的平均丢包率,可靠通信距离随着数据包长度的增加

而减小。

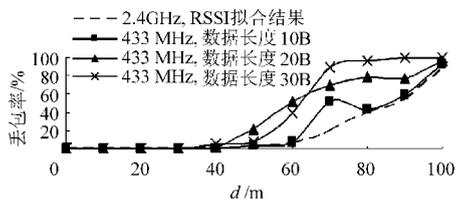


图8 2 频率 250 kb/s 下丢包率与通信距离的关系曲线

Fig. 8 Packet loss rate of two frequencies at 250 kb/s

3.4 3 种通信方式的平均性能对比试验

3 种不同通信方式下,2 频率下的平均丢包率与 RSSI 的关系如图 9 所示。

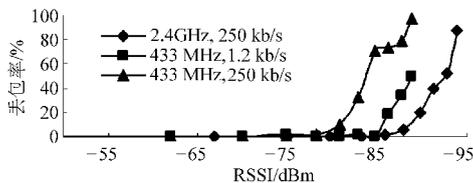


图9 平均丢包率与 RSSI 的关系曲线

Fig. 9 Average packet loss rates and RSSI

图 9 表明在表 1 条件下,2.4 GHz 频率 CC2530 在 RSSI 低于 -85 dBm 时,仍可有效通信,接收灵敏度高于 433 MHz 的 CC1110。统计 2 种频率数据包的平均丢包率与通信距离的关系,如图 10 所示。

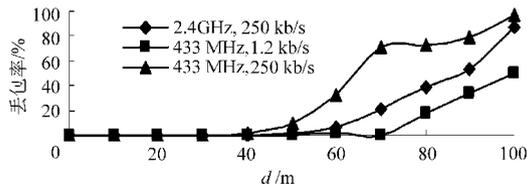


图10 在 2 频率下数据包平均丢包率与通信距离关系曲线

Fig. 10 Average packet loss rates of two frequency bands

图 10 表明,433 MHz 的 CC1110 模块仅在通信码率为 1.2 kb/s 时具有最远通信距离。平均性能对比表明,2.4 GHz 频率下的 CC2530 具有更高的灵敏度,且在相同通信码率与发射功率下,性能优于 433 MHz 频率下的 CC1110。原因是:CC2530 采用的直序扩频(DSSS)方式能在相同通信码率与发射功率(码片能量相等)下,提供比 CC1110 更高的信噪比,更低的误码率。

设定 WSN 的丢包率高于 30%,无法有效通信,统计出在该橘园环境与表 1 所限定条件下,2 频率 3 种通信方式下最大的组网距离 d_{max} 如下:433 MHz (CC1110 模块)在 1.2 kb/s 与 250 kb/s 通信码率下,分别为 90 m 与 60 m;2.4 GHz (CC2530 模块)在 250 kb/s 通信码率下,为 75 m;2.4 GHz 频率下的 CC2530 模块能够提供较合适通信距离的同时提供高达 250 kb/s 的通信码率,具有更大的数据容量与更好的应用价值。

4 组网测试试验结果与分析

4.1 组网方案设计

基于信道测试与通信方式平均性能比较, 选 2.4 GHz 的 CC2530 在橘园中以 ZigBee 构建星型网, 按表 1 进行组网试验。部署节点时, 将节点安装在有利于射频信号传输的开阔地带, 并令节点与网关协调器间距离为 30 m, 小于 d_{max} , 部署如图 11 所示。

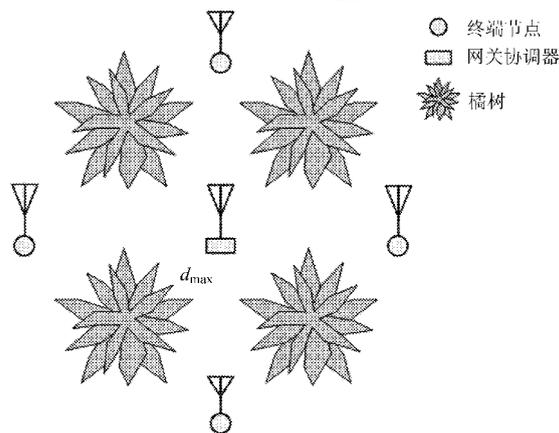


图 11 星型网络部署示意图

Fig. 11 Schematic diagram of star sensor network

为尽量减少 ZigBee 网络层特性影响试验通信系统, 只选星型网, 放弃树状或网状布网试验, 该小型 WSN 由 1 个协调器与 4 个终端节点构成。试验中终端节点每隔 2 s 与网关协调器进行握手通信, 回传链路质量指示值 LQI 协调器。协调器将接收数据通过串口上传到基于 Windows 系统的计算机中。试验持续 2.5 h, 确保网关与每个节点至少通信 1 500 次^[15-16]。

4.2 组网试验与数据分析

统计网关接收到的数据包, 每个终端节点的通信成功率与平均链路质量如表 2 所示。从表 2 可得, 按信道测试结果指导构建的小型 WSN 网络性能较好, 满足实际橘园环境监测需求, 星型网络可通过

增加协调器节点扩展其覆盖范围。

表 2 组网试验统计结果

Tab. 2 Results for networking test

节点编号	通信成功率/%	平均 LQI
1	84.41	107.34
2	91.08	106.75
3	99.59	106.64
4	96.64	106.78

5 结束语

为在橘园中构建最优的小型 WSN, 解决无线传感器网络 (WSN) 规划与快速部署问题, 在橘园中选 2 频率无线传感器节点 (433 MHz 的 CC1110 与 2.4 GHz 的 CC2530) 进行信道测试, 兼顾理论与应用, 基于连续无线电波在受通信码率、天线增益、调制扩频方式、数据包长度和通信距离多因素作用下分析 WSN 射频信号在橘园的衰减, 分别建立了 2 种频率信号衰减数学模型, 经重复试验, 拟合 R^2 的最小值与最大值分别为 0.957 031 与 0.971 218, 0.954 6 与 0.986 3; 该模型对橘园现场布点有一定指导意义。

试验系统平台改变, 若天线增益、发射功率、调制方式等条件不变, RSSI 值在变化趋势上仍将与数学模型符合; 调制扩频方式改变, 通信平台更换后误码率产生差异。

试验表明, 在橘园环境中, 通信码率低于 1.2 kb/s 且远距离通信时, 433 MHz 的 CC1110 具有优势; 发射功率与天线增益相同时, 433 MHz 平均信号强度高于 2.4 GHz; 通信码率相同时, CC2530 丢包率低于 CC1110; 通信协议设计拟选择短数据包与较低通信码率。选 ZigBee 协议进行星型 WSN 试验表明, WSN 各节点的平均通信成功率高于 84%。建议在实践中选择符合 IEEE 802.15.4 标准的射频模块进行橘园或果园 WSN 组网, 优先选择星型网络。

参 考 文 献

- 冯友兵, 张荣标, 沈敏. 面向精确灌溉的无线传感器网络构建[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 56~59.
Feng Youbing, Zhang Rongbiao, Shen Min. Construction of wireless sensor networks for precision irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 56~59. (in Chinese)
- 韩安太, 何勇, 陈志强, 等. 基于无线传感器网络的茶园分布式灌溉控制系统[J]. 农业机械学报, 2012, 42(9): 174~180.
Han Antai, He Yong, Chen Zhiqiang, et al. Design of distributed precision irrigation control system based on wireless sensor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 42(9): 174~180. (in Chinese)
- 乔晓军, 张馨, 王成, 等. 无线网络在农业汇总的应用[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 network in agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(Supp. 2): 232~234. (in Chinese)
- Buckley J, Aherne K, O'Flynn B, et al. Antenna performance measurements using wireless sensor networks [C] // 2006 Proceedings 56th Electronic Components and Technology Conference, San Diego, CA, 2006: 145~150.
- Ziade Y, Roussel H, Tabbara W. A theoretical model of propagation in forest compared with experimental results [C] // IEEE

- Geoscience and Remote Sensing International Symposium, Seoul, South Korea, 2005: 1 357 ~ 1 360.
- 6 Alan Mainwaring, David Culler, Joseph Polastre, et al. Wireless sensor network for habitat monitoring[C]//Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, New York: ACM, 2002: 88 ~ 97.
 - 7 文韬,洪添胜,李震,等. 橘园无线传感器网络不同节点部署方式下的射频信号传播试验[J]. 农业工程学报,2010,26(6): 211 ~ 215.
Wen Tao, Hong Tiansheng, Li Zhen, et al. Test of wireless sensor network radio frequency signal propagation based on different node deployments in citrus orchards[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 211 ~ 215. (in Chinese)
 - 8 姜晟,王卫星,孙道宗,等. 能量自给的果园信息采集无线传感器网络节点设计[J]. 农业工程学报,2012,28(9):153 ~ 158.
Jiang Sheng, Wang Weixing, Sun Daozong, et al. Design of energy self-sufficient wireless sensor network node for orchard information acquisition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(9): 153 ~ 158. (in Chinese)
 - 9 李锶钰,高红菊,姜建钊. 小麦田中天线高度对 2.4 GHz 无线信道传播特性的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(增刊): 184 ~ 189.
Li Siyu, Gao Hongju, Jiang Jianzhao. Impact of antenna height on propagation characteristics of 2.4 GHz wireless channel in wheat fields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(Supp.): 184 ~ 189. (in Chinese)
 - 10 张先毅,王金龙,赵洪磊,等. 基于室内办公环境的 WSN 信道衰落模型的分析[J]. 山东大学学报:理学版,2008,43(11): 44 ~ 47.
Zhang Xianyi, Wang Jinlong, Zhao Honglei, et al. WSN channel fading model analysis based indoor office environment [J]. Journal of Shandong University: Natural Science, 2008, 43(11): 44 ~ 47. (in Chinese)
 - 11 方震,赵湛,郭鹏,等. 基于 RSSI 测距分析[J]. 传感技术学报,2007,20(11):2 526 ~ 2 530.
Fang Zhen, Zhao Zhan, Guo Peng, et al. Analysis of distance measurement based on RSSI [J]. Transactions of Sensors Technology, 2007, 20(11): 2 526 ~ 2 530. (in Chinese)
 - 12 Li Zhen, Wang N, Franzen A, et al. Development of a wireless sensor network for field soil moisture monitoring [C]//2008 ASABE Annual Meeting, 2008:22 ~ 32.
 - 13 张成涛,谭彧,吴刚,等. 基于无线传输方式的农业装备共性参数测控系统研究[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):257 ~ 262.
Zhang Chengtao, Tan Yu, Wu Gang, et al. Parameters measurement and control systems of agricultural equipment similarity based on various wireless transmission modes [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 257 ~ 262. (in Chinese)
 - 14 刘东红,周建伟,莫凌飞. 物联网技术在食品及农产品中应用的研究进展[J]. 农业机械学报,2012,40(1): 146 ~ 152.
Liu Donghong, Zhou Jianwei, Mo Lingfei. Applications of internet of things in food and agri-food areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 40(1): 146 ~ 152. (in Chinese)
 - 15 孙玉文,沈明霞,周良,等. 农田无线传感器网络的节点部署仿真与实现[J]. 农业工程学报,2010,26(8):211 ~ 215.
Sun Yuwen, Shen Mingxia, Zhou Liang, et al. Simulation and realization of farmland wireless sensor networks nodes deployment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2010,26(8): 211 ~ 215. (in Chinese)
 - 16 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.
Liu Hui, Meng Zhijun, Xu Min, et al. Sensor nodes deployment based on regular patterns in farmland environmental monitoring [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(8): 265 ~ 270. (in Chinese)