

温室青椒中 2.4 GHz 无线电波传播特性研究^{*}

李萍萍^{1,2} 彭玉礼¹ 王纪章¹

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

摘要:为解决温室中无线传感器网络的规划和部署问题,探讨作物对无线电波传播特性的影响,研究了种植青椒的温室中 2.4 GHz 无线信号在不同方向和高度下的传播特性。通过试验实地测量了 3 个方向和 2 个高度下接收信号强度和丢包个数,并通过 Matlab 对试验数据进行回归分析。结果表明:不同方向和高度下,青椒中无线信道传播特性符合对数路径衰减模型,拟合相关系数在 0.900 7 和 0.947 3 之间;传感器节点在青椒中的不同高度决定着青椒中 2.4 GHz 无线电波的传播特性,对无线信道传播特性的影响较为显著,而传播方向对青椒中无线信号的影响较弱。同时得到了青椒中传感器节点最宜部署在青椒冠层及以上位置,为无线传感器网络在种植青椒的温室中的节点部署提供了技术支持。

关键词: 温室 青椒 无线传感器网络 无线电波 路径衰减

中图分类号: S24; TN919.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)02-0251-05

引言

无线传感器网络(Wireless sensor networks, WSN)集传感器技术、微机电系统技术、无线通信技术、嵌入式技术和分布式信息处理技术于一体^[1-2]。无线传感器网络在农业中的应用能够有效降低人力消耗,实时、高效地获取农业环境和作物信息,符合现代化农业的发展方向^[3-9]。但是由于无线传感器网络具有节点资源有限、传播方式易受到应用环境影响的特点,而农业环境复杂多变,从种植环境到植被种类都有很大的变化^[10-15];且植被的生长是一种动态变化过程,具有一定的不确定性,使得研究不同农业环境下的无线电波传播特性变得至关重要。目前,国内外学者已对不同农业环境下的无线信道传播特性进行了前期探索性研究^[11-17],主要侧重于大田和果园对无线电波传播特性的影响。温室是一个封闭性的空间,其结构和作物生长会影响无线电波的传播特性,有必要对温室内的无线电波传播特性进行研究与分析。

为解决无线传感器网络在温室中部署的关键性技术问题,本文研究种植青椒的连栋温室中 2.4 GHz 无线射频信号在不同传播方向和高度下的传播特性。分别对青椒冠层和地面在 3 个传输方向

的接收信号强度和丢包个数进行实地测量,为进一步研究传感器节点在温室中的部署和功率控制提供理论基础。

1 试验

1.1 试验环境及材料

试验地点位于江苏省丹徒区世业州四季春农业园。试验选取的温室为多跨连栋钢结构温室,长×宽约 50 m×40 m,温室内种植着同一品种的青椒;青椒平均株高 45 cm,平均株冠幅度 45 cm,平均行距 60 cm;测试时正值青椒结椒期,植株已生长到最茂盛时期,代表了无线网络部署问题的最恶劣环境条件。

试验测试设备选用美国德州仪器公司(Texas instruments, TI)生产的 CC2430 无线传感器节点,传输载波频率 2.4 GHz,接收机灵敏度 -91 dBm。接收端通过仿真器与计算机相连,通过协议分析仪软件 Packet Sniffer 提取接收信号强度 RSSI(Received signal strength index, RSSI),单位为: dBm。

1.2 试验方法

为了多层次、多角度测试青椒对无线信号传播特性的影响,设计了如图 1 所示的试验测试方案,图中每条长方形代表实际中的每行青椒,相邻两条长

收稿日期: 2013-03-05 修回日期: 2013-03-22

^{*} 科技型中小企业技术创新基金资助项目(11C26213204549)、江苏省农业科技支撑计划资助项目(BE2010347)、江苏省产学研联合创新资金资助项目(BY2013065-07)和江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 李萍萍,教授,博士生导师,主要从事设施农业工程研究, E-mail: lipingping@ujs.edu.cn

方形之间的距离代表两行青椒间的行距。为了便于描述,试验中规定了3个测试方向和2个测试高度。3个测试方向分别指与每行青椒平行的0°纵向、与每行青椒垂直的90°横向、以及与每行青椒呈45°的方向;2个测试高度是试验时传感节点分别位于地面时天线高度距离地面10 cm和节点位于青椒冠层时天线高度距离地面55 cm。

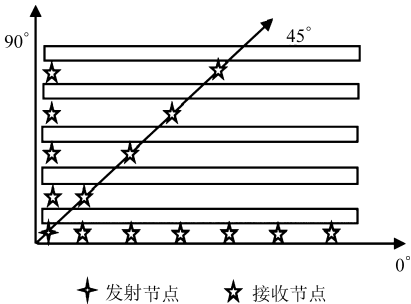


图1 无线信道传播特性试验设计方案
Fig.1 Experiment scheme used for testing radio channel propagation characteristics

在试验过程中,发射节点的发射功率固定为零,使用全向天线,天线增益为3 dBi,发射节点与接收节点始终保持在同一水平线上,每个测试方向上分别依次测试节点位于地面和冠层2组试验;在每个方向的冠层试验时,发射和接收节点分别固定在2个可以自由调节高度的三角支架上,保证节点天线高度相同。测试时,发射节点固定在如图1所示的开始位置,接收节点在分别在规定的0°纵向、45°方向和90°横向依次移动,分别记录每个测试点距离发射节点的距离、接收信号强度和丢包个数,直到接收节点接收不到无线测试信号为止。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

2.1.1 接收信号强度

图2为不同方向 and 高度下接收信号强度(RSSI)随收发节点之间距离不同而变化的曲线。由图可知,随着收发节点间的距离增大,接收机信号强度呈现递减趋势,在收发节点间距离较小时,接收信号强度衰减速度较快;随着收发节点间距离的增大,衰减速度变得较为平缓。

在同一方向上,地面和冠层传感节点的接收信号强度由初始状态降低到-70 dBm所传输的距离分别约为5 m和10 m,说明节点位于地面时的RSSI衰减速度明显大于节点位于冠层时的RSSI衰减速度;节点位于冠层时的传输距离明显好于节点位于地面时的传输距离。这是由于节点位于地面时,整个节点处于青椒之内,青椒枝叶生长较为茂密,无线

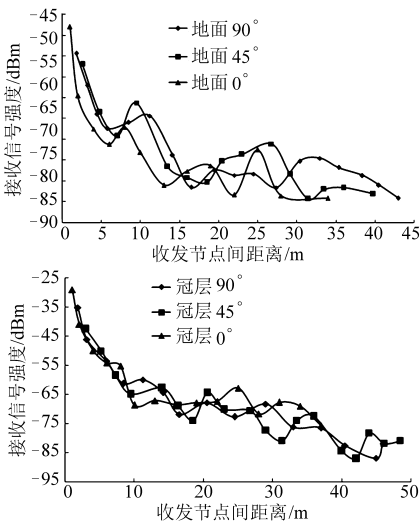


图2 不同方向 and 高度下收发节点不同距离时的接收信号强度
Fig.2 Received signal strength at different distances between nodes at different directions and height

信号受植株枝叶的遮挡和吸收等造成的衰减影响较大,因此节点处于地面时的RSSI衰减速度较快,传输距离较小;而节点处于冠层时,整个节点处在植株冠层之上,除了没有受到青椒枝叶的遮挡影响外,青椒枝叶造成的吸收等影响也相对变小,因此此时节点的RSSI衰减速度相对较慢,传输距离较大。

在同一高度上,总体而言各个方向上的接收信号强度衰减速度和传输距离基本相同。不过在节点处于地面时,各测试方向的接收信号强度的差异性较大,这主要是由于青椒的枝叶的差异性,使得相同距离处的接收信号强度差异性较大。节点处于冠层时,各测试方向的接收信号强度的差异性较小,因为此时青椒的枝叶不会遮挡住节点的天线,使得青椒枝叶的差异性对信号传输的影响较小。

2.1.2 丢包率

丢包率(Packet loss rate, PLR)指测试中所丢失数据包数量占所发送数据包的比率,是衡量无线通信信号优劣水平的一个重要指标,即

$$P = \frac{L}{S} \times 100\%$$
 (1)

式中 P——丢包率 L——丢失数据包数量
S——发送数据包数量

在青椒对无线信号传输特性的影响试验中,得到如图3所示的丢包率与传输距离之间的关系。由图可知,在开始的一段传输距离内,节点的丢包率基本为零,能够保证无线信号的可靠传输;然后随着距离增大,节点的丢包率会在较短距离内迅速跳变,出现严重的丢包现象,致使无线通信终止。如图3a所示,节点处于地面时,3个方向上都出现了不正常丢

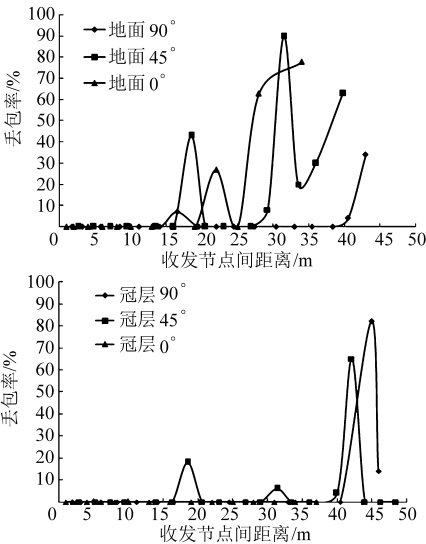


图 3 不同方向 and 高度下收发节点不同距离时的丢包率

Fig. 3 Packet loss rate at different distances between nodes in different directions and height

包现象,即丢包率在一段的传输距离内出现了先增大后减小又增大的现象。这是由于作物的生长具有不确定性和差异性,且本试验采用了离散式测试的方法,使得某个测试点的丢包率出现了跳变现象。另外这也说明作物对 2.4 GHz 无线通信质量的影响是致命性的,因此只有在认识了作物中无线电波的传播特性,才能有效解决温室中无线传感网络的规划和部署问题。

2.2 试验结果分析

2.2.1 回归分析模型

路径损耗是指有效发射功率和接收功率之间的差值,表示信号的衰减程度,单位为 dB 的正值。基于理论和测试的传播信道模型指出,无论室内还是室外信道,平均接收信号功率随距离的变化都呈现出对数衰减,符合对数距离路径损耗模型的变化规律,可表示为^[18]

$$\overline{P}_L(d) = \overline{P}_L(d_0) + 10n\lg \frac{d}{d_0} \tag{2}$$

式中 $\overline{P}_L$ ——给定距离 d 的所有可能路径损耗的整体平均值

n ——路径损耗指数,大小取决于传播环境

d_0 ——近地参考距离 d ——传输距离

为了便于进行回归分析,将式(2)中的 d_0 的值取为 1 m, $\overline{P}_L(d_0)$ 则等于 1 m 处的平均接收信号功率,此时 $\overline{P}_L(d_0)$ 就转换为固定损耗值,但 $\overline{P}_L(d_0)$ 的值会因应用环境的不同而改变。因此在式(2)的基础上得到回归分析模型函数为

$$P_r = A - 10n\lg d \tag{3}$$

式中 P_r ——接收信号平均强度

A ——回归分析模型参数

其中 A 反映了应用环境对无线电波信号强度衰减,即无线信号因青椒吸收、反射等影响而产生的固定功率损耗; n 反映了信号强度的衰减速率。

2.2.2 回归参数分析

式(3)为回归分析模型,在 Matlab 中利用最小二乘法的曲线拟合算法,对测得的青椒中不同方向和高度下 RSSI 值进行回归分析,得到参数 A 和 n 的值如表 1 所示。表中 R^2 为决定系数,由表可知,决定系数 R^2 最小为 0.900 7,最大为 0.947 3,说明使用对数路径损耗模型对青椒中无线信号的传播特性进行描述和预测是比较合理的。

表 1 对数路径损耗模型回归参数

Tab. 1 Regression parameters of log-path loss model

试验组名称	A	n	R^2
地面 90°	-51.79	2.266	0.944 2
地面 45°	-51.31	2.316	0.900 7
地面 0°	-54.29	2.361	0.919 9
冠层 90°	-28.51	3.208	0.945 8
冠层 45°	-29.28	3.148	0.925 8
冠层 0°	-28.44	3.055	0.947 3

在同一高度下,无线信号在不同传播方向上的衰减指数 n 基本相同,最大差值为 0.153;表明同一高度下青椒中无线信号的衰减速率是一个比较固定的值,只会因为传播环境的变化而变化,不会受到来自传播方向的影响。对于参数 A ,本试验中主要是表征无线信号因青椒的影响而产生衰减值的大小。在相同高度时,不同方向下的参数 A 基本相同,最大差值为 2.98 dB;说明在传播环境和传播高度固定时,由作物而引起的无线电波信号强度衰减是一个稳定值,不会因为传播方向的改变而发生跳变。

在同一方向上,冠层的衰减指数 n 大于地面的衰减指数。90°方向上,地面 n 为 2.266,冠层 n 为 3.208;0°方向上,地面 n 为 2.361,冠层 n 为 3.055; n 最大差值为 0.942,最小差值为 0.694,3 方向的平均差值为 0.823。这是由于节点处于冠层时,青椒的叶片引发了无线电波的多径传播现象,无线通信中的多径传播会加速无线信号强度的衰减速率,使得衰减指数增大,说明节点在冠层时衰减指数 n 是无线电波的传播特性的主要影响因素。对于参数 A ,冠层 A 小于地面 A ,45°方向上,地面 A 为 -51.31,冠层 A 为 -29.28;0°方向上,地面 A 为 -54.29,冠层 A 为 -28.44,最大差值为 25.85 dB,最小差值为 22.03 dB,3 方向的平均差值为 23.72 dB。因为此时地面上的节点处于青椒茂盛的枝叶之中,增加了作物对无线电波的吸收损耗,使得地面组的参数 A 大于冠层组的参数 A ;表明节点在地面时参数 A 是影

响无线电波传播特性的主要因素。

2.2.3 试验结果对比分析

与文献[10-11]中小麦田试验结果相比,2.4 GHz 无线电波在温室青椒中的传播特性要劣于小麦田中,特别是温室冠层的衰减指数明显大于小麦田中的衰减指数,最小差值 0.8。一方面是由于试验环境的不同而引起的差异性;另一方面温室是一个封闭性的空间,加剧了无线电波的多径传播现象,导致衰减指数的增加;而空旷的大田环境类似于无线电波的视距传播过程,衰减指数相对较小。这也说明温室环境具有其自身的特殊性,有必要对温室内的无线电波传播特性进行试验分析。

综上可知,温室环境的特殊性导致了无线电波传播规律在温室与大田中的差异性。温室青椒中 2.4 GHz 无线电波的传播特性主要取决于节点所在作物中的高度,而受无线电波传播方向的影响较小,在无线传感器网络的规划和部署问题时可以忽略传播方向的影响;并且在不同高度时决定无线电波传播特性的主要参数不同,节点在地面时,参数 A 是影响无线电波传播特性的主要因素;对于节点在冠层时,主要影响因素则是参数 n 。综合考虑所有影响因素,在青椒中部署无线传感器网络时,为减少作物和不同传播方向对无线信号传播特性的影响,应将传感器节点部署在青椒冠层及以上位置。

3 结论

(1) 在不同方向和高度下,青椒中无线信道传播特性符合对数路径衰减模型,拟合决定系数在 0.900 7 和 0.947 3 之间。

(2) 传感器节点在青椒中的不同高度决定了青椒中 2.4 GHz 无线电波的传播特性,对无线信道传播特性的影响较为显著;而传播方向对青椒中无线信号的影响较弱。

(3) 不同高度时决定无线电波传播特性的主要参数不同,参数 A 是影响地面节点无线电波传播特性的主要因素;对于节点在冠层时,主要影响因素则是参数 n 。

(4) 在每组试验的接收信号强度衰减至接收灵敏度之前,丢包率较小,偶有较大丢包现象,主要是由于作物的生长具有不确定性和差异性,使得某个测试点的丢包率出现了跳变现象。

(5) 针对温室青椒环境特点和试验分析结果得出,在温室青椒中部署无线传感器网络时,应将传感器节点部署在青椒冠层及以上位置。

(6) 通过温室与大田中试验结果对比发现温室环境具有其自身的特殊性,有必要对温室内的无线电波传播特性进行试验分析。

参 考 文 献

- 1 Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2 292-2 330.
- 2 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络[J].软件学报,2003,14(7):1 282-1 291.
Ren Fengyuan, Huang Haining, Lin Chuang. Wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2003, 14(7): 1 282-1 291. (in Chinese)
- 3 赵春江,薛绪掌,王秀,等.精准农业技术体系的研究进展与展望[J].农业工程学报,2003,19(4):7-12.
Zhao Chunjiang, Xue Xuzhang, Wang Xiu, et al. Advance and prospects of precision agriculture technology system[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 7-12. (in Chinese)
- 4 蔡义华,刘刚,李莉,等.基于无线传感器网络的农田信息采集节点设计与试验[J].农业工程学报,2009,25(4):176-178.
Cai Yihua, Liu Gang, Li Li, et al. Design and test of nodes for farmland data acquisition based on wireless sensor network[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 176-178. (in Chinese)
- 5 李莉,李海霞,刘卉.基于无线传感器网络的温室环境监测系统[J].农业机械学报,2009,40(增刊):228-231.
Li Li, Li Haixia, Liu Hui. Greenhouse environment monitoring system based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 228-231. (in Chinese)
- 6 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)
- 7 李震,洪添胜, Wang Ning. 无线传感器网络技术在精细农业中的应用进展[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2011, 37(5): 576-580.
Li Zhen, Hong Tiansheng, Wang Ning. Review on wireless sensor network technology applications in precision agriculture[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2011, 37(5): 576-580. (in Chinese)
- 8 石军锋,钟先信,陈帅,等.无线传感器网络结构及特点分析[J].重庆大学学报:自然科学版,2005,28(2):16-19.
Shi Junfeng, Zhong Xianxin, Chen Shuai, et al. Architecture and characteristics of wireless sensor networks[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(2): 16-19. (in Chinese)
- 9 孙玉文,沈明霞,陆明洲,等.无线传感器网络在农业中的应用研究现状与展望[J].浙江农业学报,2011,3(3):639-644.

Sun Yuwen, Shen Mingxia, Lu Mingzhou, et al. Research status and prospect of wireless sensor network in agriculture [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2011, 23(3): 639 – 644. (in Chinese)

10 刘卉, 汪懋华, 孟志军, 等. 农田环境中短程无线电传播性能试验[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2010, 31(1): 1 – 5.
Liu Hui, Wang Maohua, Meng Zhijun, et al. Performance assessment of short-range radio propagation in crop fields[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2010, 31(1): 1 – 5. (in Chinese)

11 李偲钰, 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 2): 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 CSAE*, 2009, 25(Supp. 2): 184 – 189. (in Chinese)

12 李震, 洪添胜, Wang Ning, 等. 基于神经网络预测的无线传感器网络田间射频信号路径损耗[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 178 – 181.
Li Zhen, Hong Tiansheng, Wang Ning, et al. Path-loss prediction for radio frequency signal of wireless sensor network in field based on artificial neural network[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(12): 178 – 181. (in Chinese)

13 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 CSAE*, 2010, 26(6): 211 – 215. (in Chinese)

14 郭秀明, 赵春江, 杨信廷, 等. 苹果园中 2.4 GHz 无线信道在不同高度的传播特性[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 195 – 200.
Guo Xiuming, Zhao Chunjiang, Yang Xinting, et al. Propagation characteristics of 2.4 GHz wireless channel at different heights in apple orchard[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(12): 195 – 200. (in Chinese)

15 Andrade-Sanchez P, Pierce F J, Elliott T V. Performance assessment of wireless sensor networks in agricultural settings [C] // 2007 ASABE Annual International Meeting, Paper 073076, 2007.

16 Phaebua K, Suwalak R, Phongcharoenpanich C, et al. Statistical characteristic measurements of propagation in durian orchard for sensor network at 5.8 GHz[C] // 2008 IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies, ISCIT 2008: 520 – 523.

17 Vougioukas S, Anastassiou H T, Regen C, et al. Influence of foliage on radio path losses (PLs) for wireless sensor network (WSN) planning in orchards[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 114(4): 454 – 465.

18 Theodore S Rappaport. 无线通信原理与应用[M]. 周文安, 付秀花, 王志辉, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006: 95.

Propagation Characteristics of 2.4 GHz Radio Wave in Greenhouse of Green Peppers

Li Pingping^{1,2} Peng Yuli¹ Wang Jizhang¹

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Forestry Resource and Environment School, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In order to configure wireless sensor networks system and node deployment in greenhouse, this paper researched propagation characteristics of 2.4 GHz wireless channel at different directions and heights in greenhouse of green peppers. Received signal strength and packet loss numbers were investigated by field testing measurements at three directions and two heights. Regression analysis results showed that the radio channel propagation characteristics in different directions and heights of green peppers accorded with logarithm distance path loss model, and the fitting correlation coefficients between computational values and measurement values were between 0.900 7 and 0.947 3. Different heights of sensor nodes in the green peppers determined the radio wave propagation characteristics. Besides, validation results showed that it was the best to deploy the sensor nodes antennas at the top of green peppers canopy or above of it in greenhouse. This research can provide technical support for WSN application in greenhouse.

Key words: Greenhouse Green pepper Wireless sensor networks Radio wave Path loss