

西红柿温室内无线传感器网络 2.4 GHz 信道传播特性*

韩文霆^{1,2} 王毅^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对西红柿温室环境中无线传感器网络节点部署的要求及其应用环境的特性,以 2.4 GHz 为载波频率,研究了无线射频信号传播特性和通信距离、天线高度、传输路径等影响因素间的关系。结果表明,无线传感器网络信号在西红柿温室中的衰减符合对数模型;当天线高度固定时,接收信号强度随通信距离的增加总体呈递减趋势,丢包率随通信距离的增加总体呈递增趋势;西红柿温室中天线最宜部署在日光温室中央一列的位置,且西红柿顶部略高于它的位置为放置天线高度的首选,其次为西红柿顶部距地面 1.5 m 以上的部分,越接近西红柿顶部越好;在上述试验研究的基础上,建立了天线高度、通信距离和接收信号强度之间的关系模型,模型参数 A 与天线高度、衰减系数 n 与天线高度之间均呈二次多项式关系。验证试验结果表明:该模型可以较好地预测不同天线高度不同通信距离的接收信号强度,为西红柿温室无线传感器网络的部署提供技术支持。

关键词: 无线传感器网络 西红柿 温室 2.4 GHz 无线通信 信号衰减

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0264-08

引言

无线传感器网络(Wireless sensor networks, WSN)作为一种信息采集手段,具有低功耗、无需布线、低成本、自组网等特点,在各个领域都得到普遍应用,特别是在一些环境恶劣、不利于布线的场合,无线传感网络的优势更加明显^[1-4],非常适合在农业信息采集方面进行应用^[5-7]。基于电磁波在农业环境及土壤中传输波型的信道模型、路径损失模型是无线传感器网络监测技术与系统研究的理论基础,是研究农业环境信息无线传感器网络技术参数优化及开发系统的主要依据^[8]。研究无线电波在不同农业环境中的传播特性、建立信号传输模型很有必要,可以为建立高效、稳定、合理的无线传感器网络提供技术支持。

近年来,国内外学者对无线传感器网络在农业领域的应用进行了大量研究^[9-15]。

目前,针对温室无线传感器网络的研究侧重于传感器的设计和温室的智能管理^[16-17],而对温室中无线通信特性的试验与研究还比较缺乏。西红柿作为一种经济价值较高的作物,近几年来,越来越受到人们的重视。西红柿生长过程中对温度和湿度的要求较高,通常西红柿在冬季以温室栽培为主。在西

红柿温室内,金属材料多、环境封闭、温湿度等诸多因素,对无线信号的传播又有着特殊的影响。本文主要对西红柿温室内无线传感器网络的信号传输特性进行研究,建立用于预测 2.4 GHz 信号在温室中的信号衰减模型,为具有高稳定性和可靠性无线传感器节点温室西红柿成熟期的部署提供技术依据。

1 材料与方 法

1.1 试验环境

试验场地选在陕西省杨陵区现代农业示范园区五泉设施农业基地农园十二路 31 号温室(位置为 34°17'37"N,107°58'47"E)(图 1)。温室坐北朝南,后墙及东西墙为砖墙外包土坯墙,高约 5 m,内部钢骨架,采用三层共挤聚乙烯无滴膜覆盖温室。种植面积约 105 m × 7 m,起畦规格采用 1.3 m 包沟,2 行植,株距 0.40 ~ 0.50 m,采用地膜覆盖栽培技术,苗高约 2.0 m。

选取温室西红柿结果期 4 月 25 日—30 日进行试验。试验期间,温室内平均空气温度为 24℃,平均空气相对湿度为 40%。

1.2 传感器节点

试验选用中国深圳市亿道信息技术有限公司生

收稿日期:2014-06-22 修回日期:2014-07-22

* 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-0473)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B08)

作者简介:韩文霆,研究员,博士生导师,主要从事农业智能化检测技术研究,E-mail:hanwt2000@126.com

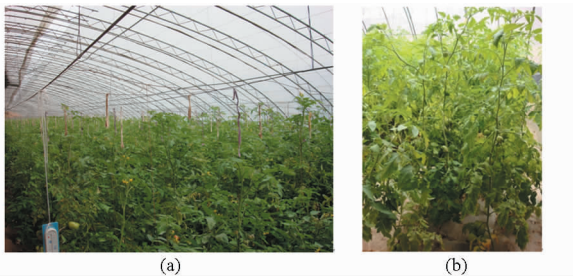


图 1 试验西红柿温室全景图及温室西红柿示例

Fig.1 A panoramic view of tomato greenhouse utilized in experiments and an example of a tomato

产的无线传感器节点,射频芯片为 CC2530 (Texas Instrument, USA),传输频率为 2.4 GHz,片内搭载一个增强型 8051CPU,具有 256 Kb 可编程闪存和 8 Kb 的 RAM,在低功耗工作模式下的工作电流可以低至 $0.6 \mu\text{A}$ 。内部集成了一个 8 ~ 14 位 A/D 转换电路,1 个 16 位定时器,2 个 8 位计时器,AES128 协同处理器,看门狗定时器,2 kHz 晶振的休眠模式定时器,上电复位电路,掉电检测电路以及 21 个可编程 I/O 引脚。节点的接收灵敏度 -97 dBm ,由 2 节 5 号干电池供电。接收端使用网关节点通过串口和电脑相连。通过串口助手获取 RSSI (Received signal strength index) 的瞬时值。

1.3 试验方法

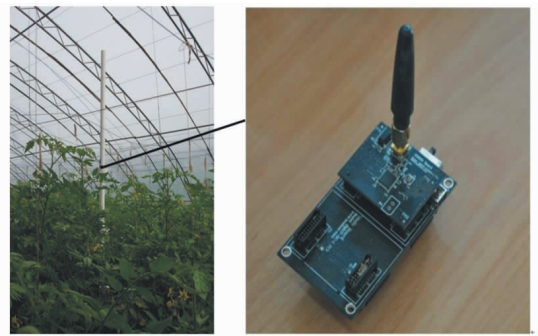
发射器和接收器分别放在 2 个绝缘且与地面垂直的塑料支架上,天线高度分别设置为 0 (地面)、0.5、1.0、1.5 和 2.0 m。发射器的发射功率固定为 4.5 dBm,使用全向天线,天线增益为 2 dBi。每个测试点均测量 50 组 RSSI 的瞬时值并计算其平均值作为此测试点的平均 RSSI 值。

1.3.1 发射器和接收器间距离直线方式变化试验

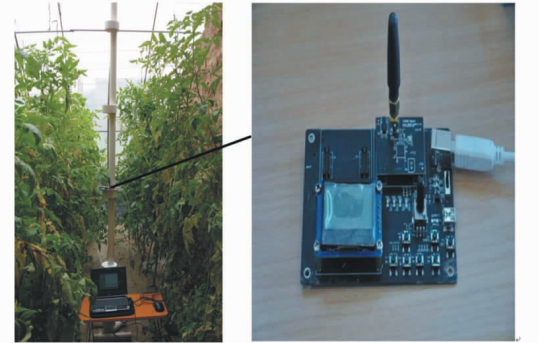
选取温室中央长势较均匀的一列西红柿,将带有接收器和发射器的支架均放置在此列西红柿中 (图 2),接收器固定在第一包沟处,发射器依次以 5 个包沟 (6.5 m) 为一个通信距离远离接收器,共设计 10 个水平。分别测量每种天线高度对应的 10 种距离的接收信号强度和丢包率。试验整体结构图如图 3 所示,图中只画出了 5 种高度第一、第二距离点的情况。

1.3.2 不同传输路径试验

为了多方面、多角度研究日光温室西红柿对无



(a)



(b)

图 2 发射器与接收器

Fig.2 Transmitter and receiver

线射频信号传输特性的影响,试验将接收器设置在温室自西向东第一个包沟中心处,每隔 4° 选取一条传输路径,分别记为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 和 L_5 ;在每条传输路径上,发射器依次以 2 个包沟 (2.6 m) 为一个通信距离远离接收器,共设计 5 个水平。分别测量每条传输路径各天线高度对应的 5 种距离的接收信号强度和丢包率。试验设计方案如图 5 所示。

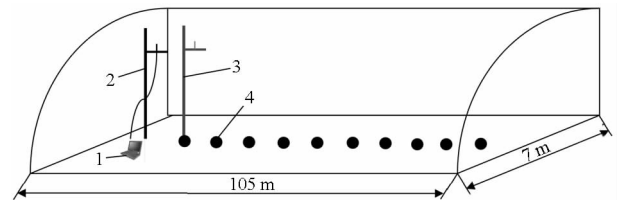


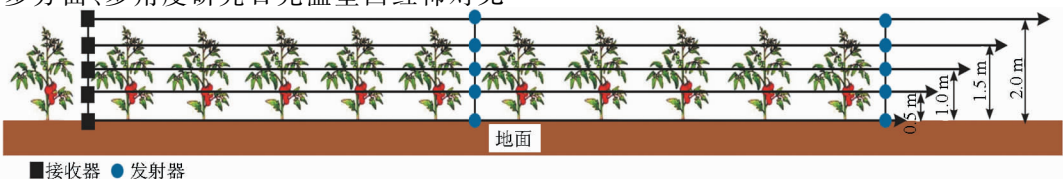
图 3 试验整体结构图

Fig.3 Overall configuration of experimental tests

1. 计算机 2. 接收器 3. 发射器 4. 试验点

1.4 路径损耗及丢包率计算方法

丢包率 (Packet loss rate, PLR) 是指测试中所丢失数据包数量占所发送数据包的比率,与数据包长度以及包发送频率相关,是用来衡量信号水平的一



■接收器 ●发射器

图 4 试验设计方案

Fig.4 Design of experimental tests

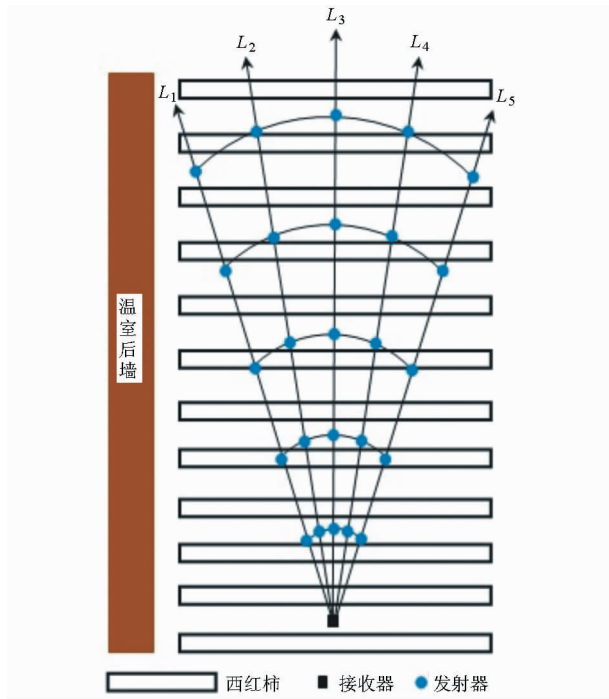


图 5 试验设计方案

Fig. 5 Design of experimental tests

个重要指标。计算方法为

$$R_{PLR} = \frac{N_{lost}}{N_{transmitted}} \times 100\% \quad (1)$$

式中 N_{lost} ——接收机丢失的数据包个数

$N_{transmitted}$ ——发射机发出的数据包个数

无线信号传输中普遍采用的理论模型——

Shadowing 模型^[18]为

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10n \lg \frac{d}{d_0} + X \quad (2)$$

式中 d ——接收器与发射器之间的距离, m

d_0 ——参考距离, m

$P_r(d)$ ——接收器接收信号功率, dBm

$P_r(d_0)$ ——参考距离 d_0 点对应的接收信号功率, dBm

X ——平均值为零的高斯随机变量, 反映了当距离一定时接收信号功率的变化, dBm

n ——衰减系数, 一个与环境相关的值

在实际应用中, 采用简化的 Shadowing 模型^[18]

$$\overline{P_r(d)} = P_r(d_0) - 10n \lg \frac{d}{d_0} \quad (3)$$

通常取 $d_0 = 1$ m, 从而得到对数距离路径损耗模型

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

式中 P_R ——实地测量的接收信号强度, dBm

A ——信号传输 1 m 远处接收信号功率, dBm

采取式(4)为回归分析模型, 运用 Excel 软件进行回归分析。

2 结果与分析

2.1 发射器和接收器间距离直线方式变化试验结果分析

2.1.1 接收信号强度与丢包率

接收器与发射器均在一列西红柿中, 沿着一列西红柿在天线高度分别为 0 m(地面)、0.5、1.0、1.5 和 2.0 m 的 5 个高度水平上, 发射器每隔 5 个包沟为一个通信距离共 10 个距离的平均接收信号强度和丢包率分别如图 6 和图 7 所示。

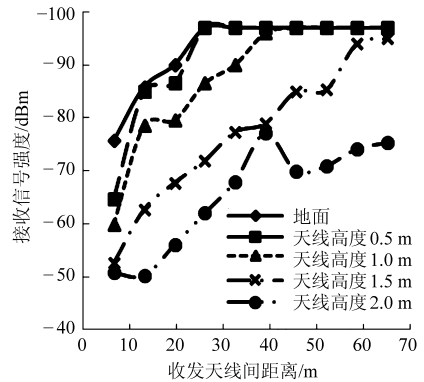


图 6 不同高度收发器不同距离时的接收信号强度

Fig. 6 RSSIs at different distance points in different heights

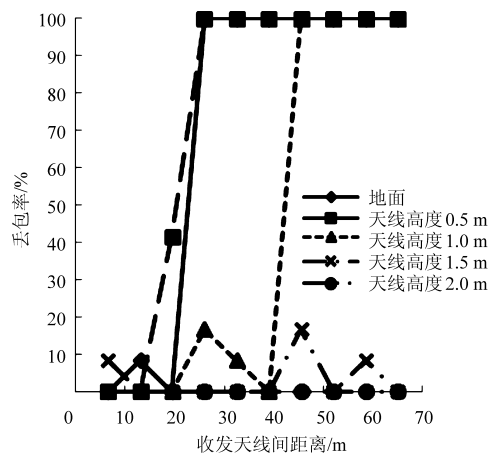


图 7 不同高度收发器不同距离时的丢包率

Fig. 7 PLRs with different propagation distances at different heights

由图 6 可知, 在每种高度上, 随着距离的增加 RSSI 均呈递减趋势, 直至接收信号强度灵敏度为 -97 dBm。在距离较小时, RSSI 减幅较大。随着距离的增加, 衰减速率减缓直至为 0。收发器距离相同且在距地面最高的 2.0 m 处的 RSSI 值最大, 这是由于 2.0 m 处为西红柿顶端, 枝叶稀疏, 信号传播受到阻碍较少, 枝叶阻挡信号被吸收和散射很少, 所以 RSSI 值最大。在 5 种不同天线高度上, 信号衰减至 RSSI 灵敏度时, 收发器间的距离不同, 在天线处于地面和高 0.5 m 时, RSSI 最快衰减至接收灵敏度,

此时收发节点间隔约 26 m。而高 1.5 m 和 2.0 m 时均还没有衰减到接收灵敏度。这是因为高 1.5 m 以上为西红柿的顶部,枝叶较稀疏,信号衰减受枝叶的吸收、散射等影响小,信号衰减较慢。

由图 7 可知,在 5 种不同天线高度上,RSSI 未衰减至接收灵敏度之前,丢包率很小。但也有发生丢包较严重的现象,比如天线高 0.5 m 处,收发器间距 19.5 m 时的丢包率为 41.67%。这是由于温室环境特殊,其后墙及东西墙为砖墙外包土坯墙,信号除受枝叶散射、衍射外,温室地面、后墙、侧墙以及顶部也会反射无线信号,对其传播产生影响。当信号衰减至接收灵敏度后,丢包现象较严重,丢包率随着收发器间距离的增加而波动变化,总体呈递增趋势。

2.1.2 回归分析

运用 Excel 软件对 5 种不同天线高度上测量的 RSSI 值进行了回归分析,各参数拟合值如表 1 所示, R^2 为决定系数,是理论计算值与实测值之间相关关系密切程度的统计分析指标,该值越接近于 1,说明相关性越高。

由表 1 可知,沿着一列西红柿的不同高度层上,信号衰减基本符合对数路径损耗模型,信号强度可以用该模型来预测。决定系数最小为 0.821,最大为 0.958。每个高度上的衰减系数如图 8 所示。

表 1 不同天线高度试验数据的回归参数

Tab. 1 Regression parameters for the experimental data at different transmitter and receiver heights

天线高度/m	A/dBm	衰减系数 n	决定系数 R^2
0	-62.114	2.106	0.856
0.5	-47.476	2.998	0.821
1.0	-32.734	3.751	0.951
1.5	-15.765	4.175	0.958
2.0	-22.650	2.913	0.851

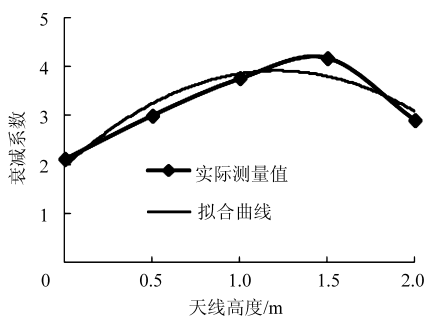


图 8 不同天线高度的衰减系数

Fig. 8 Attenuation index in different heights

由图 8 可知,天线高 1.5 m 时,衰减系数达到最大值,为 4.175。这是因为高 1.5 m 位于西红柿中上部,西红柿果实较多,叶片健康并且较大。高度大于

1.5 m 时,衰减系数随着高度的增加而减小。这是因为天线高度大于 1.5 m 为冠层的顶部,枝叶稀疏,信号受枝叶吸收、散射和衍射影响较小。所以在西红柿温室中部署无线传感器网络时,应将传感器节点部署在西红柿顶部。

衰减系数随着高度的增加先增加后减小,拟合结果表明衰减系数 n 和天线高度 h 符合二次多项式关系模型,其拟合的决定系数 R^2 为 0.899。拟合出西红柿温室内天线高度与衰减系数的关系模型为

$$n = -1.3249h^2 + 3.2079h + 1.968 \quad (5)$$

式中 h ——收发天线高度, m

由表 1 可得模型参数 A 和收发天线高度之间的拟合关系如图 9 所示。拟合的决定系数 R^2 为 0.951。

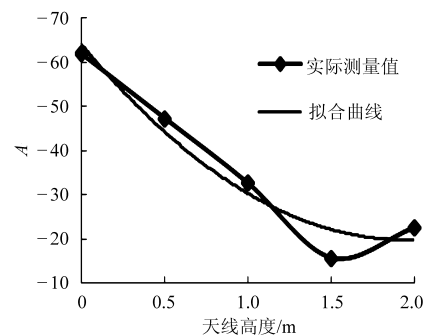


图 9 不同天线高度的 A 值

Fig. 9 A at different heights

拟合式为

$$A = -11.663h^2 + 45.453h - 64.107 \quad (6)$$

由图 9 和式(6)可以看出, A 的取值随着天线高度的增加先增大后减小, A 与天线高度 h 之间符合二次多项式关系。

将式(5)、(6)代入式(4)中可得到温室西红柿结果期的信号强度预测模型为

$$P_R = -11.663h^2 + 45.453h - 64.107 + (13.249h^2 - 32.079h - 19.68) \lg d \quad (7)$$

2.1.3 模型验证

为了对接收信号强度衰减预测模型进行验证,选取温室中的另一列西红柿进行试验验证。验证结果如图 10 所示。

为了能够评估预测模型,计算了能较好反映数据波动的决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE,如表 2 所示。因为节点的 RSSI 灵敏度为 -97 dBm,故只取 RSSI 未达到 -97 dBm 之前的测量点进行计算。

由表 2 可知,模型计算结果和实际测量值之间的决定系数 R^2 在高 0 m 处最小为 0.841。在天线高 1.0 m 时最大,为 0.956。RMSE 在 3.328 ~ 4.136 dBm 之间。

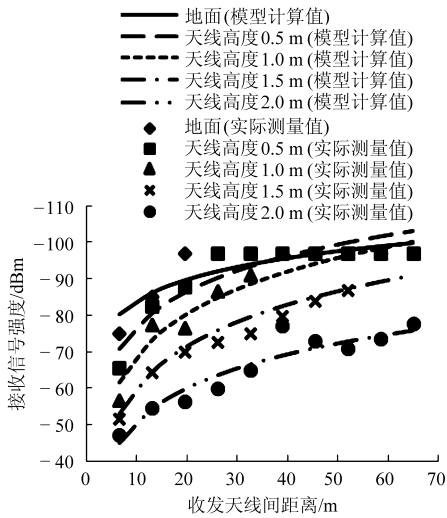


图10 模型计算和实测接收信号强度的对比

Fig. 10 Comparison between computed and measured received signal strength

表2 不同天线高度实测数据与预测模型计算结果的
决定系数和均方根误差

Tab. 2 Determination coefficients and root-mean-square error between measured and computed data at different heights

天线高度/m	决定系数 R^2	RMSE/dBm
0	0.841	4.136
0.5	0.953	4.013
1.0	0.956	3.560
1.5	0.939	3.722
2.0	0.893	3.328

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。该模型能够较好地温室西红柿结果期不同高度不同距离处的接收信号强度进行预测。

2.2 不同传输路径试验

2.2.1 接收信号强度与丢包率

每条传输路径各测试点的接收信号强度和丢包率分别如表3和表4所示。

从表3数据可知,每条传输路径,各天线高度下的RSSI,随着收发器间距离的增加而减小。收发器距离较小时,RSSI减幅较大,随着距离的增加,衰减幅度逐渐减小。在天线高度2.0m时,每条传输路径下的RSSI最大,但也有个别例外,如传输路径 L_4 在收发器距离2.6m,天线高度2.0m处的RSSI小于天线高度1.5m处的值,传输路径 L_2 在收发器间距13m时,天线高度2.0m处的RSSI也小于天线高度1.5m处的值;并且相同收发器距离、相同天线高度、不同传输路径和相同传输路径、相同收发器距离、不同天线高度的变化规律不显著。一方面,这是因为作物的生长具有随机性和差异性,温室内大量

西红柿枝叶及花果随机分布,且西红柿株与株之间的茂密程度也不完全相同,枝叶、花果会阻挡信号产生吸收、散射等影响;另一方面,日光温室不同于大田,环境特殊,其后墙及东西墙为砖墙外包土坯墙,信号除受枝叶及花果影响外,温室地面、后墙、侧墙以及顶部也会反射无线信号,对其传播产生影响。

表3 不同传输路径的接收信号强度

Tab. 3 RSSIs at different transmission paths dBm

传输路径	天线高度/m	收发天线间距离/m				
		2.6	5.2	7.8	10.4	13.0
L_1	0	-46.55	-70.55	-86.51	-89.57	-88.72
	0.5	-49.62	-59.29	-70.69	-88.27	-87.17
	1.0	-49.50	-70.23	-75.49	-73.38	-77.33
	1.5	-53.55	-63.08	-61.15	-65.14	-66.92
	2.0	-40.36	-49.50	-49.62	-61.50	-62.08
L_2	0	-47.36	-63.77	-76.01	-88.69	-87.46
	0.5	-53.18	-59.67	-68.64	-82.77	-80.14
	1.0	-51.69	-65.42	-68.86	-66.38	-71.62
	1.5	-47.33	-52.08	-60.08	-60.92	-63.36
	2.0	-41.62	-45.21	-55.92	-58.17	-64.03
L_3	0	-58.58	-66.38	-76.14	-89.92	-89.90
	0.5	-60.18	-68.54	-70.91	-82.08	-90.50
	1.0	-50.36	-63.57	-70.33	-81.27	-82.69
	1.5	-48.31	-58.62	-65.27	-64.92	-65.64
	2.0	-37.07	-46.93	-51.14	-50.81	-54.54
L_4	0	-46.30	-64.18	-84.21	-89.18	-90.03
	0.5	-48.27	-57.00	-64.62	-79.70	-90.18
	1.0	-62.31	-66.32	-71.08	-80.10	-85.37
	1.5	-37.08	-52.43	-61.92	-73.50	-64.85
	2.0	-42.29	-45.23	-51.69	-55.52	-60.71
L_5	0	-56.25	-70.07	-89.09	-85.50	-90.50
	0.5	-43.82	-59.14	-77.53	-72.75	-89.25
	1.0	-71.37	-76.27	-78.07	-84.46	-88.20
	1.5	-49.75	-52.33	-59.08	-65.29	-63.64
	2.0	-42.15	-44.71	-56.36	-55.77	-63.57

由表4可知,每条传输路径,各测试点的丢包率均在10%以下,且大多不丢包。每条传输路径在天线高度2.0m时均无丢包现象。传输路径 L_1 上,7处试验点出现丢包现象,是出现丢包试验点最多的传输路径,而 L_3 上出现丢包试验点最少,只有2处。这是因为传输路径 L_1 距离日光温室后墙较其他传输路径最近,信号传输除受枝叶及花果影响外,后墙也会反射无线信号,对信号传输产生影响,而 L_3 处于温室中央,距离后墙或3层共挤聚乙烯无滴膜较其他传输路径均较远,因此 L_3 上出现丢包的试验点最少,无线信号受后墙或无滴膜影响较小,信号传播可靠性也较高。

表 4 不同传输路径的丢包率

传输 路径	天线 高度/m	收发天线间距离/m				
		2.6	5.2	7.8	10.4	13.0
L_1	0	4.17	4.17	0	8.33	8.33
	0.5	0	0	0	8.33	0
	1.0	0	0	0	0	0
	1.5	4.17	0	0	8.33	0
	2.0	0	0	0	0	0
L_2	0	0	0	8.33	0	0
	0.5	0	0	8.33	0	0
	1.0	0	0	0	0	0
	1.5	0	0	0	0	8.33
	2.0	0	0	0	0	0
L_3	0	0	0	0	0	8.33
	0.5	0	0	0	0	0
	1.0	0	0	0	0	0
	1.5	0	0	8.33	0	0
	2.0	0	0	0	0	0
L_4	0	0	0	0	8.33	8.33
	0.5	0	4.17	0	0	0
	1.0	0	0	0	8.33	0
	1.5	0	0	0	0	0
	2.0	0	0	0	0	0
L_5	0	0	0	8.33	0	0
	0.5	0	0	0	0	8.33
	1.0	0	0	0	0	0
	1.5	0	4.17	0	0	8.33
	2.0	0	0	0	0	0

表 5 不同传输路径试验数据的回归参数

传输路径	天线 高度/m	A/dBm	衰减系数 n	决定系数
				R^2
L_1	0	-22.807	6.447	0.936
	0.5	-21.893	5.911	0.922
	1.0	-37.719	3.788	0.853
	1.5	-47.472	1.745	0.864
	2.0	-26.420	3.152	0.897
L_2	0	-21.067	6.210	0.974
	0.5	-32.489	4.380	0.898
	1.0	-43.38	2.577	0.852
	1.5	-36.834	2.397	0.959
	2.0	-26.016	3.247	0.925
L_3	0	-35.607	4.884	0.929
	0.5	-40.739	4.057	0.885
	1.0	-29.784	4.799	0.981
	1.5	-39.125	2.579	0.917
	2.0	-28.372	2.374	0.949
L_4	0	-18.510	6.774	0.962
	0.5	-19.644	5.814	0.896
	1.0	-45.989	3.256	0.882
	1.5	-18.676	4.727	0.883
	2.0	-29.490	2.600	0.917
L_5	0	-35.827	5.109	0.913
	0.5	-17.898	6.090	0.921
	1.0	-60.449	2.314	0.913
	1.5	-38.656	2.330	0.889
	2.0	-27.494	3.012	0.875

2.2.2 回归分析

利用对数距离路径损耗模型式(4)对不同传输路径和不同高度下 RSSI 进行了回归分析,得到各情况下路径损耗模型的回归参数如表 5 所示。

由表 5 可知,决定系数 R^2 最小为 0.852,最大为 0.981。传输路径 L_3 中,衰减系数除天线高 1.0 m 和 1.5 m 情况外,其余均小于其他传输路径。这是应为高 1.0 m 和 1.5 m 处于西红柿中上部,西红柿果实较多,叶片健康并且较大,枝叶和花果对信号传播影响较其他高度大。

综合表 3、表 4 和收发器间距离直线方式变化试验结果可知,在西红柿日光温室部署无线传感器网络时,天线应布置在西红柿温室中央一列的位置,且西红柿顶部略高于它的位置应为放置天线高度的首选,其次为西红柿顶部距地面 1.5 m 以上的部分,越接近西红柿顶部越好。

2.3 试验结果对比分析

分别与文献[7,10]中兰花大棚和小麦田试验结果对比,西红柿日光温室的衰减系数均大于兰花大棚和小麦田中的衰减系数。因为温室本就是一个

封闭性的空间,会加剧无线电波的多径传播现象,导致衰减系数的增加,而本文试验所研究的日光温室是东、西、北三面为围护墙体的单坡面塑料温室,信号除受枝叶散射、衍射外,温室地面及后墙、侧墙以及顶部的无滴膜也会反射无线信号,对其传播产生影响;同时,试验环境、对象的不同也会引起结果的差异性。而空旷的大田和薄膜温室环境对无线信号的传播特性影响较日光温室小,衰减指数相对较小。这也说明不同温室有其自身的特殊性,有必要对不同种类温室内的无线信号传播特性进行试验研究。

3 结论

(1)接收器与发射器均在温室内,当收发器高度固定时,接收信号强度(RSSI)随通信距离的增加总体呈递减趋势,而信号强度在衰减至接收灵敏度之前丢包率较小,偶有发生较大丢包率的现象,丢包率(PLR)随通信距离的增加总体呈递增趋势。

(2)拟合建立西红柿温室中天线高度、通信距离和接收信号强度之间的关系模型,模型参数 A 与天线高度、衰减系数 n 与天线高度之间均呈二次多

项式关系。对模型的验证结果表明,决定系数 R^2 均大于 0.84, 最小为 0.841。均方根误差 RMSE 在 3.328 ~ 4.136 dBm 之间。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。

(3)在不同传输路径和天线高度下,西红柿温室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 0.852 ~ 0.981 之间。

(4)在西红柿温室中部署无线传感器网络时,

天线应布置在西红柿日光温室中央一列的位置,且西红柿顶部略高于它的位置应为放置天线高度的首选,其次为西红柿顶部距地面 1.5 m 以上的部分,越接近西红柿顶部越好。

(5)通过日光温室与大田及薄膜温室中试验结果对比,发现不同温室有其自身的特殊性,有必要对不同种类温室内的无线信号传播特性进行试验研究。

参 考 文 献

- 1 Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey[J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292 - 2330.
- 2 Pottie G J, Kaiser W J. Wireless integrated network sensors[J]. *Communications of the ACM*, 2000, 43(5): 51 - 59.
- 3 陈敏,王肇,李军华,等. 无线传感器网络原理与实践[M]. 北京:化学工业出版社,2011:2 - 9.
- 4 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005:3 - 16.
- 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):232 - 234.
Qiao Xiaojun, Zhang Xin, Wang Cheng, et al. Application of the wireless sensor network in agriculture[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(Supp.): 232 - 234. (in Chinese)
- 6 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 Li, Zhang Yan'e, Wang Maohua, et al. Communication technology for sustainable greenhouse production[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(2): 195 - 200. (in Chinese)
- 7 李小敏,臧英,罗锡文,等. 兰花大棚内无线传感器网络 433 MHz 信道传播特性试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13):182 - 189.
Li Xiaomin, Zang Ying, Luo Xiwen, et al. Experiment of propagation characteristics based on 433MHz channel of WSN in orchid greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(13): 182 - 189. (in Chinese)
- 8 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)
- 9 Lopez R J A, Soto F, Suardiaz J, et al. Wireless sensor networks for precision horticulture in Southern Spain[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 68: 25 - 35.
- 10 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(13):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(13): 184 - 189. (in Chinese)
- 11 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)
- 12 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)
- 13 张水保,徐守志,徐波. 植株对 2.4 GHz 无线信号传播的衰减研究[J]. *计算机科学*, 2012, 39(增刊 1):171 - 173.
Zhang Shuibao, Xu Shouzhi, Xu Bo. Research on the attenuation characteristics of the 2.4 GHz wireless signal affected by plant[J]. *Computer Science*, 2012, 39(Supp. 1):171 - 173. (in Chinese)
- 14 Li Z, Wang N, Hong T. RF Propagation patterns at 915 MHz and 2.4 GHz bands for in-field wireless sensor networks[J]. *Transactions of the ASABE*, 2013, 56(2): 787 - 796.
- 15 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 Pingping, Peng Yuli, Wang Jizhang. 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)
- 16 韩敏,李书琴,张静,等. 智能温室远程监控系统研究与实现[J]. *微计算机信息*, 2007, 23(29):67 - 68.
Han Min, Li Shuqin, Zhang Jing, et al. Research and realization of remote monitor system for intelligent greenhouse[J]. *Microcomputer Information*, 2007, 23(29):67 - 68. (in Chinese)
- 17 刘美琪,马斌强,季宝杰,等. 多信息融合的智能温室控制系统研究[J]. *河南农业大学学报*, 2009, 43(2): 182 - 185.
Liu Meiqi, Ma Binqiang, Ji Baojie, et al. Research on intelligent greenhouse environment control system of multi-information fusion[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2009, 43(2): 182 - 185. (in Chinese)
- 18 Shamir A. 无线电传播简介:专用术语,室内传播和路径损耗及实例[J]. *今日电子*, 2002:26 - 30.

Signal Transmission Characteristics of 2.4 GHz Wireless Sensor Network in Tomato Greenhouse

Han Wenting^{1,2} Wang Yi^{1,2}

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

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China)

Abstract: For deploying a wireless sensor network system and studying the channel characteristics in tomato greenhouse, relationships among radio frequency signal propagation characteristics and communication distances, antenna heights, transmission paths were studied with a 2.4 GHz carrier frequency for configuring wireless sensor network in a tomato greenhouse. The results showed that the attenuation of the received signal strength caused by communication distance accorded with a logarithmic model. When the height was fixed, the strength index of received signal tended to decrease and the packet loss rate fluctuated as the distance of transmitter to receiver increased, which was an overall increasing trend. It was the best to place the antennas at a column of central location in greenhouse, in the top of the tomato or above of it, followed at higher place above 1.5 m. The regression analysis results demonstrated that there was a quadratic relationship between the regression parameter A and the antenna height, and there was also a quadratic regression equation between the environmental factor n and antenna height. Besides, a model used for calculating the received signal strength of 2.4 GHz transmitting through tomato greenhouse was constructed. Validation results showed that the model could better predict the received signal strength at different distance point at different height. This research can provide a reference for WSNs application.

Key words: Wireless sensor network Tomato Greenhouse 2.4 GHz radio communication Signal attenuation

(上接第 276 页)

Poplar Branch and Trunk Modeling Based on Levenberg – Marquardt

Hu Chunhua¹ Li Pingping² Zhu Yongli²

(1. College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The improved Levenberg – Marquardt algorithm was used to estimate the parameters of poplar branch and trunk modeling. To achieve a dynamic three-dimensional visualization of poplar, amount of diameters were obtained by measuring different poplars forest age. According to the growth trend of diameters, the function of diameter growth was built using the improved Levenberg – Marquardt algorithm. A class of heart-shaped curve equation was proposed, and the relationship function between the main branch length and the depth of the sticks was obtained using the improved Levenberg – Marquardt algorithm. A lot of comparison experiments were carried out, and the results demonstrated that the fitting algorithms and mathematical models selected could better simulate the growth of poplar branches. The three-dimensional visualization of poplar was realized with dynamic simulation equation, and the results validated the effectiveness of poplar growth modeling.

Key words: Poplar Levenberg – Marquardt algorithm 3D visualization model