

# 农业生态环境监测中无线传感节点信号有效传输距离的确定

徐兴元<sup>1</sup>, 章 玥<sup>2</sup>, 季民河<sup>1\*</sup>, 宋 洋<sup>2</sup>

(1. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241; 2. 华东师范大学软件学院, 上海 200241)

**摘 要:** 农业生态环境的物理形态和结构复杂多样, 对 WSN (wireless sensor networks) 的无线信号传输造成不同衰减影响。为确保无线传感器网络在农业环境中经济、合理、高效部署, 有必要明确典型农业环境中无线传感节点间的有效传输距离。该文基于 Shadowing 信号衰减模型, 利用当前通用的 CC2530 和 CC2591 无线通信模块, 分别选定 4 种不同农业环境 (湖泊、草地、农田、树林) 开展单跳组网试验, 通过设定不同距离测试传感器节点的接收信号强度指标 (received signal strength indication, RSSI), 分析不同环境中 RSSI 与传输距离间的变化特征。试验结果表明, 所有测试环境获得的 RSSI 值与有效距离遵从 Shadowing 模型, 其拟合度在 0.9232~0.9846 之间。通过对实测数据建立拟合模型, 以接收节点的灵敏度为临界值, 计算出湖泊、草地、农田、树林 4 种环境的理论传输距离分别为 663.3, 419.3, 208.0 和 79.5 m, 而实测有效传输距离与理论值之间的相对误差在 22%~34% 之间。从误差分布看, 复杂环境的实测值更接近理论值, 而特殊结构的复杂环境似对实际信号传输有增强作用。该文的研究方法和模型估算获得的信号衰减系数可为实际环境监测组网提供有益参考。

**关键词:** 农业, 传感器, 无线网络, 有效传输距离, 农业环境监测

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.021

中图分类号: TP212.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-14-0164-07

徐兴元, 章 玥, 季民河, 等. 农业生态环境监测中无线传感节点信号有效传输距离的确定[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 164—170.

Xu Xingyuan, Zhang Yue, Ji Minhe, et al. Determination of effective transmission distances of wireless sensor network nodes for agro-ecological environment monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 164—170. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

农业生态环境对农作物健康生长以及农产品安全性的影响至关重要。采用无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSN) 的农业生态环境监测技术近年来得到广泛关注<sup>[1-5]</sup>。澳大利亚的 CSIRO<sup>[6]</sup>将无线传感器网络大规模用于监测气象、土壤、牧场和牲畜, 进而建立农业普适计算系统。荷兰的 Lofar Agro 项目<sup>[7]</sup>使用大量无线传感器节点监测土豆作物的小气候环境, 监测结果为各个独立耕地中的作物疫病抗击提供改进建议。蒋鼎国<sup>[8]</sup>对农业信息监测进行了需求分析, 提出了 WSN 农业监测整体框架, 较为全面地研究了节点数据收集和远程传输问题。

无线信号的传输质量与其工作环境密切相关,

受到地形地貌、植被密度、温度、雨水等因素的综合影响<sup>[9-12]</sup>。农业生态环境复杂多样, 为了在农业环境中经济、合理、高效地部署无线传感器网络, 有必要明确典型农业环境中无线传感节点间的有效传输距离。文韬等<sup>[13]</sup>和郭秀明<sup>[14]</sup>等分别在不同节点部署方式下进行了橘园和苹果园中无线传感器网络的信号传播试验, 重点分析了上述环境中植被密度及天线高度对通信距离产生的影响, 对于无线传感器节点的部署具有积极意义。然而农业生态环境往往涉及多种土地覆盖类型, 如林地、草地、耕地、水域等, 因此有必要明确无线节点在典型土地覆盖类型中的有效通信距离及相关影响因子, 为农业生态环境中部署无线传感器网络提供进一步参考。

本文选取 2.4 GHz 工作频段的无线节点, 以湖泊、草地、农田以及树林 4 种不同的自然环境作为研究对象, 对无线传感器节点的接收信号强度指标 (RSSI, received signal strength indication) 值进行测试及回归分析, 拟合出不同环境中 RSSI 值和传输距离的关系曲线, 明确各种环境中节点传输距离的变化特征, 基于拟合模型计算出不同农业环境所支持的节点间最大传输距离的理论参考值。在此基础上进一步明确上述环境中与无线信号传播具有密切关联的影响因素,

收稿日期: 2012-12-11 修订日期: 2013-05-15

基金项目: 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室主任基金 (KLGIS2011B01)

作者简介: 徐兴元 (1987—), 男, 山东济宁人, 研究方向为 GIS 与遥感应用, 上海 华东师范大学资源与环境学院, 200241。

Email: xuxingyuan727@163.com.

※通信作者: 季民河 (1955—), 男, 广西南宁人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为地理信息处理、环境遥感、空间分析、土地利用模拟, 上海 华东师范大学资源与环境学院, 200241。

Email: mhji@geo.ecnu.edu.cn

分析实测数据与理论值之间的关系, 以期 WSN 组网在农业生态环境中的应用提供参考。

## 1 RSSI 测距原理

根据电磁波原理, 无线信号强度自发射源始, 随着距离的增大逐渐减弱, 而这一衰减过程是非线性的<sup>[27]</sup>。无线信号传输中普遍使用的理论模型为 Shadowing 模型<sup>[15]</sup>。Shadowing 模型是在已知发射功率的情况下, 通过测量接收点的信号强度, 使用信号传播模型, 将传播损耗转换为距离的数学模型<sup>[16]</sup>, 该模型也称为长期衰落模型, 由式 (1) 表示。

$$P_R(d)_{dBm} = P_R(d_0) - 10\eta \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{dBm} \quad (1)$$

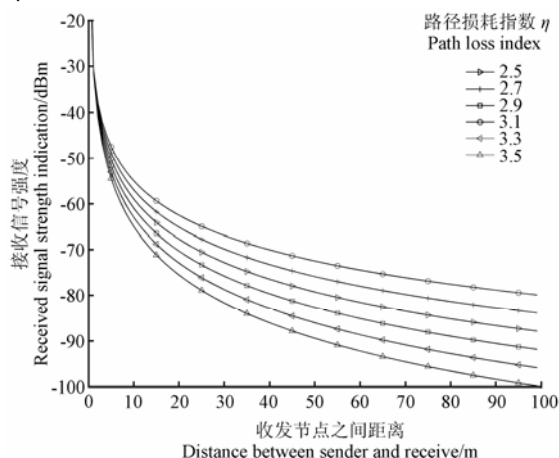
式中,  $d$  为发射端到接收端的距离, m;  $d_0$  为参考距离, 一般取 1 m;  $P_R(d)_{dBm}$  为接收端接收的信号功率, dBm;  $P_R(d_0)_{dBm}$  为参考位置  $d_0$  的接收信号功率, dBm;  $X_{dBm}$  是一个平均值为 0 的高斯随机变量, dBm, 表示当距离一定时接收信号功率的变化;  $\eta$  为路径损耗指数, 也称为衰减系数, 是一个由环境决定的值。

本文采用 Shadowing 的简化模型<sup>[17]</sup>, 由式 (2) 表示。

$$P_R(d)_{dBm} = A - 10\eta \lg(d) \quad (2)$$

式中,  $A$  为发射源功率, 表示距发射地点 1 m 处信号的功率, dBm。

由式 (2) 可知, 信号的传播距离由发射源功率 ( $A$ ) 和路径损耗指数 ( $\eta$ ) 共同决定。本文主要研究不同生态环境对于信号传输的影响, 因此可对  $A$  赋予一个恒值, 即在试验中使用相同的发射功率模块, 以  $\eta$  来模拟不同生态环境中信号传输所受的阻碍, 研究信号强度随距离变化的衰减程度。在特定环境中  $A$  为一既定常量, 这里假设  $A$  为 -30 dBm, 令  $\eta$  取不同的值, 可得出图 1。



注: 发射源功率  $A$  为 -30 dBm。

Note: Emitter power  $A$  is -30 dBm.

图 1 接受信号强度与收发点之间距离的关系

Fig.1 Relationship between RSSI and transceiver node distance

由图 1 可知, 当路径损耗指数  $\eta$  取值越小时, 信号在传播过程中衰减的速率越小, 传播距离越远; 相反, 信号在传播过程中衰减的速率越大, 传播距离越近。 $\eta$  主要取决于无线信号在空气中的衰减、反射、多径效应等干扰<sup>[18-23]</sup>。干扰越小,  $\eta$  就越小, 信号的传播距离也就越远。

## 2 试验设置与方法

为了研究通信距离和 RSSI 值之间的关系, 明确在不同农业生态环境中无线节点间的有效传输距离, 本文在上述理论基础上, 对在不同农业生态环境下传输节点的 RSSI 值进行了测量试验。

### 2.1 试验装置

WSN 节点的硬件部分主要由微处理模块、无线通信模块、数据采集模块以及其他一些外围电路和模块组成<sup>[23]</sup>。本试验的无线通信模块选用 TI 公司研发的 CC2530 和 CC2591 芯片协同工作, 两者的工作频段都为 2.4 GHz<sup>[24-26]</sup>。为提高收发信号的能力, 传输节点上配有短杆天线, 天线的增益为 5 dB。试验所采用节点的接收灵敏度为 -97 dBm, 经测试节点的发射功率为 -36.9 dBm。计算机通过串口连接到接收端节点以采集 RSSI 值。

### 2.2 试验环境

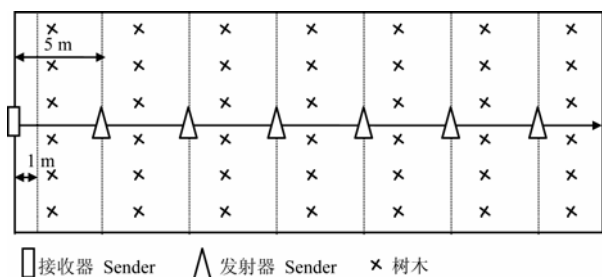
根据土地覆盖类型, 农业生态环境一般可划分为林地、草地、农田和水域 4 种, 本试验分别选择树林、草场、农田及湖面为模拟试验环境。实测环境的详细情况如下: 1) 树林地形平整, 面积约为 100 m×20 m, 树林的植被深度<sup>[13]</sup>纵向行距为 3 m, 横向行距为 4 m, 树木种类是高大针阔叶混合乔木, 高度约为 20 m; 2) 草地试验场景选用一块面积约为 400 m×100 m 的草地, 人工种植绿草生长茂密, 覆盖完整, 平均高度约为 10 cm; 3) 农田场景选用面积约为 200 m×30 m 的玉米田地, 玉米植株的高度约为 1.1 m, 植株间纵向行距约为 20 cm, 横向行距约为 25 cm; 4) 水域场景定在一个公园湖区, 面积约为 114.3 万 m<sup>2</sup>, 环湖岸种植有各种树木。

### 2.3 试验方法

在野外测量时, 气象条件对于无线信号的传播影响不明显, 且可以通过取平均值将其消除<sup>[16]</sup>。因此, 测试仪考虑不同环境中的距离因素。

这里以树林场景为例说明测试方法 (图 2)。首先将发送节点与接收节点都置于高度为 0.5 m 的支架上, 并将接收节点固定于距林区边缘 1 m 处。然后在距接收节点 5 m 处设立发送节点, 连续发送 2 000 个数据包并记录对应的 RSSI 值, 对该组数据取平均后作为该距离所对应的 RSSI 值。之后再以 5 m 为步长将发送节点远离接收点, 并分别执行相

同的操作。在树林中测试收发节点间最远距离为 70 m。同时测量距接收节点 1 m 处的 RSSI 值作为该环境的实测  $A$  值。其他环境中的测试方法与树林环境测试方法相同。



注：测试高度设为 0.5 m。

Note: Test nodes are set to 0.5 m above ground.

图 2 树林采样点部署方案

Fig.2 Sample spots with experimental woodland setup

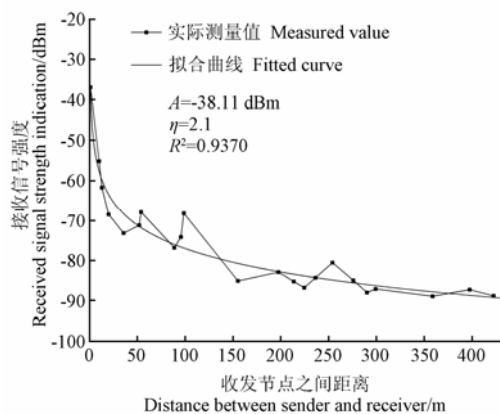
其中湖面测量距离 ( $d$ ) 采用 10 m 到 420 m 之间的随机定位。草地测试的距离范围从 1 m 到 100 m, 相邻测试点的间隔距离由 1 m 到 10 m 逐渐增大。农田环境中测试的距离范围为 1 m 到 160 m, 相邻测试点每隔 10 m 测量一次。树林环境中测量距离范围从 1 m 到 70 m, 相邻测试点间隔距离为 5 m。

为了对预测模型进行验证, 在不同环境中, 选择不同的信号接收位置, 同时设置不同的收发节点间距进行信号测试, 将此测试数据作为模型验证数据。

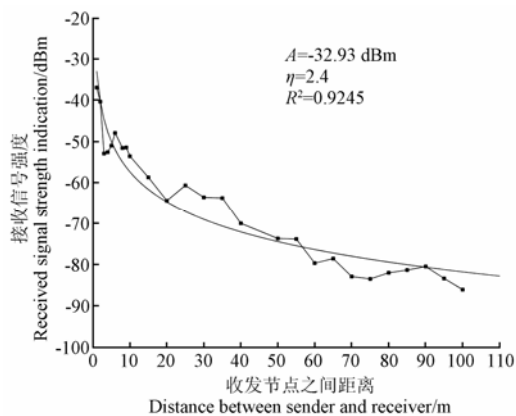
### 3 结果与分析

#### 3.1 试验数据回归分析

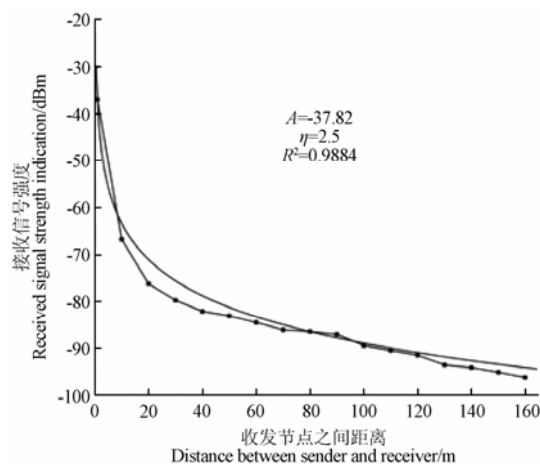
为了分析不同环境中的信号有效传输距离和 RSSI 值之间的关系, 采用了统计学中的回归分析方法, 即通过建立反映要素之间具体的数量关系的回归模型, 来评价相似性或影响程度<sup>[27]</sup>。本文利用 Matlab 工具分别对不同环境中测得的数据进行回归分析, 并绘制成便于直观评价的拟合曲线图 (图 3)。



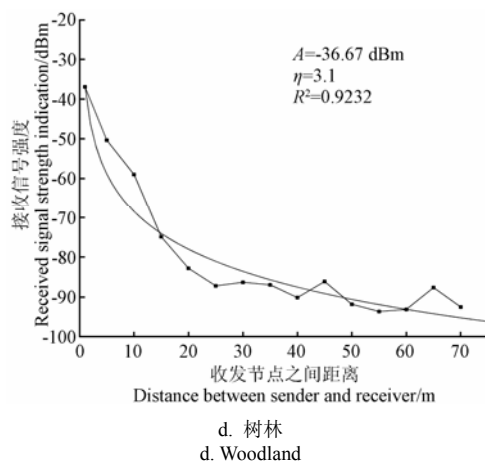
a. 湖泊  
a. Lake



b. 草地  
b. Grassland



c. 农田  
c. Farmland



d. 树林  
d. Woodland

注:  $A$  为发射功率, dBm;  $\eta$  为路径损耗指数;  $R^2$  为拟合度。

Note:  $A$  is emitter power, dBm;  $\eta$  is path loss index;  $R^2$  is goodness of fit.

图 3 不同环境中按不同距离实测的 RSSI 值及拟合曲线

Fig.3 RSSI measured in different environments and corresponding fitted

由图 3 可以看出, 4 种环境测试数据回归分析的拟合度介于 0.9232~0.9884 之间, 表明试验数据与模型之间相关性甚高。不同环境中拟合得到的  $\eta$  值中, 湖泊最小 (2.1), 说明平静水面对于信号传播的阻碍影响最小; 草地和农田中信号衰减指数分

别为 2.4 和 2.5, 树林场景所对应的  $\eta$  值最大(3.1), 表明植被对于信号的衰减作用明显, 且随其高度增加影响愈加显著。

### 3.2 模型验证

为了对所拟合的模型进行验证, 利用另外一组数据对于模型进行评估。在拟合曲线的基础上, 本文计算了反映实测数据波动大小的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和决定系数  $R^2$ 。计算结果见表 1。

表 1 不同环境下实测数据与预测模型计算结果比较  
Table 1 Result comparison between measured and computed data for different environments

环境类型	均方根误差	决定系数 $R^2$
湖泊	1.6816	0.917
草地	1.9999	0.949
农田	2.4030	0.908
树林	2.8821	0.866

由表 1 可知,  $RMSE$  值在 1~3 之间, 说明模型拟合的效果比较好。模拟计算结果和实际测量数据之间的决定系数  $R^2$  都大于 0.866, 其中树林环境中的  $R^2$  最小为 0.866。这是由于树林环境中的环境最为复杂, 信号传播路径受植物影响而发生变化, 致

使接收信号强度波动变化。湖泊和草地因环境障碍物较小, 其对应的  $R^2$  都大于 0.91, 且  $RSME$  相对较小。由此可见, 所建模型可用于随后的信号强度和布设距离的预测。

### 3.3 不同距离范围的 RSSI 值变化

根据不同环境测试建模获得的拟合曲线, 分别求出在距离 10、20、30、40 和 50 m 处相应的  $RSSI$  值。首先确定可用信号范围, 方法是将接收节点和发送节点相距 1 m 处测得  $RSSI$  值 -36.7 dBm 作为初始值, 并将节点接收灵敏度 (-97 dBm) 设为  $RSSI$  的最小值, 即获得  $RSSI$  值的总体变化范围为 -97 到 -36.7 dBm。不同环境中不同距离范围内  $RSSI$  值的变化和所占的比例由式 (3) 和式 (4) 计算, 计算结果见表 2。

$$\Delta RSSI = RSSI_{\max} - RSSI_{\min} \quad (3)$$

式中,  $\Delta RSSI$  是该距离范围的  $RSSI$  值的变化, dBm;  $RSSI_{\max}$  为该距离范围中最大  $RSSI$  值, dBm;  $RSSI_{\min}$  为最小  $RSSI$  值, dBm。

$$\Delta P = \Delta RSSI / (97 - 36.7) \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $\Delta P$  为衰减率, 即该距离范围内的  $RSSI$  变化在  $RSSI$  整体取值范围中所占百分比, %。

表 2 4 种环境中不同距离范围的  $\Delta RSSI$  和  $\Delta P$   
Table 2  $\Delta RSSI$  and  $\Delta P$  within different distance ranges for various environments

	1~10 m		>10~20 m		>20~30 m		>30~40 m		>40~50 m		>1~50 m	
	$\Delta RSSI$ /dBm	$\Delta P$ /%	$\Delta RSSI$ /dBm	$\Delta P$ /%	$\Delta RSSI$ /dBm	$\Delta P$ /%	$\Delta RSSI$ /dBm	$\Delta P$ /%	$\Delta RSSI$ /dBm	$\Delta P$ /%	$\Delta RSSI$ /dBm	$\Delta P$ /%
湖泊	22.3	36.9	6.2	10.4	3.6	6.1	2.6	4.3	2.0	3.4	36.9	61.1
草地	20.7	34.2	7.3	12.1	4.3	7.1	3.1	5.1	2.4	3.9	37.7	62.6
农田	26.65	44.2	7.7	12.7	4.5	7.4	3.2	5.3	2.4	4.0	46.1	73.8
树林	31.7	52.5	9.5	15.8	5.5	9.3	4.0	6.6	3.1	5.1	53.9	89.4

注:  $\Delta RSSI$  为接收信号强度指标变化值;  $\Delta P$  为衰减率。

Note:  $\Delta RSSI$  is the change of received signal strength index;  $\Delta P$  is decay rate.

表 2 表明, 4 种环境中的  $RSSI$  值随着距离的增加而递减, 在 1~10 m 间衰减速率最快最为剧烈, 其中树林环境所对应的  $\Delta P$  高达 52.5%, 农田接近 50%, 草地和湖泊场景高于 34%。在随后的距离区间内  $RSSI$  的变化呈平缓下降趋势, 尤其在 20 m 之后, 每 10 m 间距内  $RSSI$  的衰减率皆小于 10%。在 1~50 m 范围内, 所测试 4 种环境中的衰减率都高于 60%; 而树林环境中因茂密枝叶的遮挡, 信号衰减率接近 90%。因此, 可利用表 2 中针对各环境设定不同距离范围而测得衰减率, 建立  $RSSI$  值的衰减程度与距离的一般经验关系。

### 3.4 不同环境中无线信号有效传输距离

根据式 (2) 对 4 种环境拟合得到的回归曲线及以节点的接收灵敏度值 -97 dBm 为  $RSSI$  临界值分别求解, 得到最大传输距离的理论预测结果, 同时分别实测 4 种环境的有效传输距离, 根据式 (5)

计算理论值和实测值之间的相对误差, 结果见表 3。

$$P_{\Delta S} = \frac{S' - S}{S} \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $P_{\Delta S}$  为理论值同实测值之间的相对误差, %;  $S'$  为理论有效传输距离, m;  $S$  为实测有效传输距离, m。

表 3 4 种环境的实测通信距离和理论通信距离及误差  
Table 3 Measured transmission distance, theoretical transmission distance and error for various environments

环境	实测传输距离 $S$ /m	理论传输距离 $S'$ /m	$P_{\Delta S}$ /%
湖泊	495	663.3	34
草地	330	419.3	27
农田	165	208	26
树林	65	79.5	22

注:  $P_{\Delta S}$  表示实测传输距离同理论传输距离相对误差, %。

Note:  $P_{\Delta S}$  is the relative error between measured transmission distance and theoretical transmission distance, represented as %.

由表 3 可知, 信号在湖泊环境中传播距离最远,

可达 663.3 m; 其次为草地环境, 距离仍可达 419.3 m; 农田环境次之, 距离缩减为 208 m; 信号传播最差的为树林场景, 距离仅有 79.5 m。实测数据中, 湖泊、草地、农田和树林在所接收到的信号强度在降至节点接收灵敏度  $RSSI$  值 ( $-97$  dBm) 时的距离分别为 495、330、165 和 65 m。由于环境中障碍物结构复杂多变, 信号传输中难免发生衍射、散射及反射等现象, 致使各个环境中的有效通信距离小于理论值, 因此, 4 种环境实测有效传输距离同理论最大传输距离相比, 后者均偏大, 两者之间的相对误差为 22%~34%。

## 4 结论与讨论

本文测试了 2.4 GHz 通信频段的无线传感节点在湖泊、草地、农田以及树林 4 种生态环境中的有效传输距离, 分析确定了不同环境的信号衰减程度。通过对测量获取的  $RSSI$  值和距离进行回归分析, 拟合出不同环境中的  $RSSI$  值和传输距离的关系曲线, 并与 Shadowing 信号衰减理论模型做了比较, 得出以下结论:

1) 对湖泊、草地、农田及树林 4 种环境中测试获得的  $RSSI$  值和距离建模拟合表明, 二者为非线性降幂关系, 拟合曲线的  $R^2$  均大于 0.92, 根据该组模型预测无线信号有效传播距离有较高的可信度。

2) 通过模型的拟合曲线, 明确了所测传感器的无线信号在湖泊、草地、农田和树林环境中的最大传输距离的理论值和实际值。由于环境的复杂变化, 收发节点间会存在信号的反射和多径效应。实际测试中, 当  $RSSI$  取值为接收灵敏度时, 各测试环境所对应的最大可接受距离均小于拟合得到的理论值。除了农田之外, 二者之间相对误差随环境障碍物结构复杂程度的增加呈递减趋势。而农田两边树木形成的特殊通道结构似乎对信号传输有补偿作用。该分析结果可为 WSN 部署中节点间距的一般确定提供有益参考。

虽然本试验采用了特定的 WSN 节点芯片模型进行测试分析, 其试验方法、过程、结果和结论仍具有普遍意义。本研究也存在着一些不足, 如试验中仅考虑了不同环境特定高度对于信号衰减的影响, 有必要进一步探索不同高度设置的信号衰减规律。此外, 本研究所选芯片比较单一, 其测试结果有待对其他芯片模型进行同样测试来进一步验证。

### [参 考 文 献]

- [1] 彭孝东, 张铁民, 陈瑜, 等. 无线传感网络在农业领域中的应用[J]. 农业化研究, 2011(8): 245—248.
- [2] 高峰, 俞立, 王涌, 等. 无线传感器网络作物水分状况监测系统的上位机软件开发[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 175—181.
- [3] 张瑞瑞, 赵春江, 陈立平, 等. 农田信息采集无线传感器网络节点设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 213—218.
- [4] Burrrel J, Brooke T, Beckwith R. Vineyard computing: Sensor networks in agriculture production[J]. Pervasive Computing, 2004, 3(1): 38—45.
- [5] 张瑞瑞, 陈立平, 郭建华, 等. 农田土壤监测无线传感器网络通信平台[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊 2): 81—84.
- [6] Wark T, Corke P, Sikka P, et al. Transforming Agriculture through Pervasive Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Pervasive Computing, 2007, 6(2): 50—57.
- [7] Astron.Fighting Phytophthora using micro-climate[B/O]. <http://www.lofar.org/agriculture/fighting-phytophthora-using-micro-climate/fighting-phytophthora-using-micro-climate>, 2012-12-10
- [8] 蒋鼎国. 无线传感器网络农业信息监控系统设计与数据融合研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- [9] Jiang Dingguo. Agriculture Information Monitoring System Design and Data Fusion Research Based on Wireless Sensor Networks[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [10] Peng Xiaodong, Zhang Tiemin, Cheng Yu, et al. Application of wireless sensor networks in the field of agriculture[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(8): 245—248. (in Chinese with English abstract)
- [11] Gao Feng, Yu Li, Wang Yong, et al. Development of host computer software for crop water status monitoring system based on wireless sensor networks[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(5): 175—181. (in Chinese with English abstract)
- [12] Zhang Ruirui, Zhao Chunjiang, Chen Liping, et al. Design of wireless sensor network node for field information acquisition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 213—218. (in Chinese with English abstract)
- [13] Zhang Ruirui, Chen Liping, Guo Jianhua, et al. Communication platform of wireless sensor network for farmland soil monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(Supp.2): 81—84. (in Chinese with English abstract)
- [14] Wark T, Corke P, Sikka P, et al. Transforming Agriculture through Pervasive Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Pervasive Computing, 2007, 6(2): 50—57.
- [15] Astron.Fighting Phytophthora using micro-climate[B/O]. <http://www.lofar.org/agriculture/fighting-phytophthora-using-micro-climate/fighting-phytophthora-using-micro-climate>, 2012-12-10
- [16] 蒋鼎国. 无线传感器网络农业信息监控系统设计与数据融合研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- [17] Jiang Dingguo. Agriculture Information Monitoring System Design and Data Fusion Research Based on Wireless Sensor Networks[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张在琛, 余旭涛, 毕光国. 无线传感器网络的研究与实现[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(5): 128—134.

- Zhang Zaichen, Yu Xutao, Bi Guangguo. Research and realization of wireless sensor networks[J]. Journal of CUMT Mining Science and Technology, 2007, 36(5): 128—134. (in Chinese with English abstract)
- [10] 彭怀云, 樊文生, 潘威炎, 等. 沿不规则不均匀地面传播的侧面波[J]. 电波科学学报, 2006, 21(4): 497—502.
- Peng Huaiyun, Pan Wensheng, Pan Weiyan, et al. Lateralwave propagating along irregular and nonuniform ground[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(4): 497—502. (in Chinese with English abstract)
- [11] Durgin G, Rappaport T S, Xu H. Measurements and models for radio-wave path loss and penetration loss in and around homes and trees at 5.85GHz[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(11): 1484—1496.
- [12] Rattapong S, Kittisak P, Chuwong P, et al. Path loss model and measurements of 5.8 GHz wireless network in durian garden[C]// Vientiane, Laos: 2008 International Symposium on Communications and Information Technologies, 2008: 698—701.
- [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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 211—215. (in Chinese with English abstract)
- [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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(12): 195—200. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张橙, 宋学瑞. 基于 ZigBee 的 RSSI 测距方法精度研究[J]. 湖南工业大学学报, 2011, 21(5): 37—41.
- Zhang Teng, Song Xuerui. Research on the ZigBee-Based RSSI ranging accuracy[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 21(5): 37—41. (in Chinese with English abstract)
- [16] 方震, 赵湛, 郭鹏, 等. 基于 RSSI 测距分析[J]. 传感技术学报, 2007, 20(11): 2526—2530.
- Fang Zhen, Zhao Zhan, Guo Peng, et al. Analysis of distance measurement based on RSSI[J]. Transactions of Sensors Technology, 2007, 20(11): 2526—2530. (in Chinese with English abstract)
- [17] 章坚武, 张璐, 应瑛, 等. 基于 ZigBee 的 RSSI 值测距研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(2): 285—289.
- Zhang Jianwu, Zhang Lu, Ying Ying, et al. Research on distance measurement based on RSSI of ZigBee[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(2): 285—289. (in Chinese with English abstract)
- [18] 秦中华. 无线信号在市区的传播分析、预测及评估[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- Qing Zhonghua. Radio Microwave Propagation in Urban Area Analysis, Prediction and Evaluation[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [19] 周艳, 李海成. 基于 RSSI 无线传感器网络空间定位算法[J]. 通信学报, 2009, 30(6): 75—79.
- Zhou Yan, Li Haicheng. Space localization algorithm based RSSI in wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2009, 30(6): 75—79. (in Chinese with English abstract)
- [20] Yu Song Meng, Yee Hui Lee, Boon Chong Ng. Empirical near ground path loss modeling in a forest at VHF and UHF bands[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(5): 1461—1468.
- [21] Tapan K Sarkar, Zhong J I, Kyungjung Kim. A survey of various propagation models for mobile communication[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2003, 45(3): 51—82.
- [22] 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 等译. 微波工程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [23] 杨柳. 基于 ZigBee 无线传感器环境监测网络设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- Yang Liu. The Design of Environment Monitoring Wireless Sensor Network Based on ZigBee[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [24] 章伟聪, 俞新武, 李忠成. 基于 CC2530 及 ZigBee 协议栈设计无线网络传感器节点[J]. 计算机应用系统, 2011, 20(7): 184—187.
- Zhang Weichong, Yu Xinwu, Li Zhongcheng. Wireless network sensor node design based on CC2530 and ZigBee protocol stack[J]. Computer Systems and Applications, 2011, 20(7): 184—187. (in Chinese with English abstract)
- [25] 程春荣, 毛祥根, 武利珍. 基于 ZigBee 技术的水质监测系统[J]. 电子器件, 2009, 32(5): 942—945.
- Cheng Chunrong, Mao Xianggen, Wu Lizhen. An online monitoring system of water quality based on ZigBee[J].

Chinese Journal of Electron Devices, 2009, 32(5): 942—945. (in Chinese with English abstract)

[26] 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 等译. 微波工程[M]. 北京:

电子工业出版社, 2002.

徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 47—48.

## Determination of effective transmission distances of wireless sensor network nodes for agro-ecological environment monitoring

Xu Xingyuan<sup>1</sup>, Zhang Yue<sup>2</sup>, Ji Minhe<sup>1\*</sup>, Song Yang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Software Engineering Institute, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** Wireless sensor networks (WSN) have been widely adopted for monitoring of agro-ecological environment, as they offer a number of advantages over traditional field observation methods. Signal transmission distances and qualities achieved by wireless sensors are highly related to the types of external environments. Attenuation of radio signals varies drastically for wireless sensor networks in different agro-ecological environments with diverse physical forms and structures. To achieve the economic, rational, and efficient goal for WSN deployment, it is essential to identify the effective transmission distance between wireless sensors in typical agro-ecological environments. This paper employed a long attenuation model, known as a Shadowing model, to examine the effect of distance on signal propagation loss with given transmitting power by measuring signal strength at the receiving node in one-hop networking experiments. The network was constructed using 12 nodes with commonly adopted CC2530 and CC2591 as wireless communication modules (both working at 2.4GHz ISM frequency band) and four different landscape settings as typical analysis environments (i.e. lake, grassland, low shrubs, and woodland). To improve the signal sending and receiving capacity, wireless sensor nodes under experiment were equipped with a 5 dB short-stick antenna. The initial test was conducted to determine the minimum sensitivity of sensor nodes to be -97 dBm. By setting a series of distances between data sending and receiving sensor nodes, the corresponding received signal strength indication (RSSI) was recorded. A Matlab-based nonlinear regression model was built with the recorded RSSI data to analyze the relationship between RSSI and transmission distance for each of the four agro-ecological environments. The resulting coefficients of determination for the regression models indicated a strong relationship between RSSI and transmission distance, as they complied with the Shadowing model with a degree of fitting between 0.9232-0.9556. According to the fitted curves in the regression analyses, a transmission path loss index was calculated to represent such interferences as attenuation, reflection, and multi-path phenomenon on wireless signals due to a given environmental morphology and structure. With the signal sending power being kept constant, it was found that lakes had the lowest transmission path loss index value (2.1), which was followed by grassland (2.4), low shrubs (2.6), and finally woodland (3.1). Based on the fitted regression models and adopting the minimum sensitivity of sensors as the threshold, the calculated theoretical maximum transmission distance for the deployment of the given sensor nodes was 663.3m, 419.3m, 155.2m, and 79.5m for lake, grassland, low shrubs, and woodland, respectively. Effective transmission distances were also computed from the theoretical ones by a 25% deduction, resulting in 495m, 330m, 150m and 65m for the above four ecological settings, respectively. The experimental procedure and the transmission path loss index estimated by the fitted regression models in this paper can provide useful reference for practical environmental monitoring network construction and sensor node deployment when facing diverse environmental morphologies. Potential further work will include investigating effects of node height variation on transmission distances in different agro-ecological environments and experimenting and comparing the results of this study with sensor nodes equipped with other wireless modules.

**Key words:** agriculture, sensors, Wi-Fi, effective transmission distance, agricultural environment monitoring

(责任编辑: 鲍洪杰)