doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.030

面向多机器人的传统苹果园无线通信信号传播特性研究

刘志杰[1,2]　刘　恒[1,3]　毛文菊[1,3]　杨福增[1,3]　王　旺[1]　秦纪凤[1,3]

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;
2. 农业农村部苹果全程机械化科研基地, 陕西杨凌 712100;
3. 农业农村部北方农业装备科学观测实验站, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为解决农业多机器人在传统苹果园行间协同作业时的通信节点最佳部署问题,研究了 2.4 GHz Wi-Fi 信号在传统苹果园(苹果成熟期)中的传播特性。将信号发射、接收节点分别距地面高度 0.45、0.55、0.65、0.75 m 垂直部署,依据多机器人直线型、小间距 V 形、大间距 V 形、并排型等 4 种典型编队方式将节点水平部署,测量通信信号在不同高度条件以及上述 4 种编队方式下不同距离处的接收强度。研究结果表明,4 种编队方式中,以直线型编队方式下的信号衰减最缓慢。因此,传统苹果园中多机器人最佳的编队方式为直线型,节点部署高度最好在果树第一侧枝向下 0.2 m 左右处。对路径损耗数据进行回归分析,发现其在每个无线通信信号节点高度、每种多机器人典型编队方式下均符合对数路径损耗模型,模型的 R^2 在 0.860 ~ 0.989 之间。同时,建立了用于预测 2.4 GHz Wi-Fi 信号在传统苹果园(苹果成熟期)中的路径损耗模型,并同期选择了其他苹果园验证了预测模型的准确性,R^2 在 0.947 ~ 0.967 之间,RMSE 在 1.489 ~ 2.432 dBm 之间。模型能较好地预测 Wi-Fi 信号在传统苹果园中的路径损耗情况,可为农业多机器人在传统苹果园中的通信节点部署提供参考。

关键词: 农业多机器人; 传统苹果园; 无线通信信号; 传播特性

中图分类号: S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2022)08-0283-11　　**OSID**:

Wireless Signal Propagation Characteristics of Traditional Apple Orchard for Multi-robot

LIU Zhijie[1,2]　LIU Heng[1,3]　MAO Wenju[1,3]　YANG Fuzeng[1,3]　WANG Wang[1]　QIN Jifeng[1,3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *Apple Full Mechanized Scientific Research Base, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
3. *Northern Agricultural Equipment Scientific Observation and Experimental Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: In order to solve the optimal deployment of agricultural multi-robot communication nodes in the cooperative operation between rows in the traditional apple orchard, the propagation characteristics of 2.4 GHz Wi-Fi signal in the traditional apple orchard (mature stage) were studied. The signal transmitting and receiving nodes were vertically deployed at the heights of 0.45 m, 0.55 m, 0.65 m and 0.75 m from the ground, respectively. The nodes were horizontally deployed according to the four typical formation modes of multi-robot linear, small spacing V-shaped, large spacing V-shaped and parallel. The receiving intensities of communication signals at different heights and at different distances under the above four formation modes were measured. The research results showed that among the above four formation modes, the signal attenuation in the linear formation mode was the slowest. Therefore, the best way of multi-robot formation in the traditional apple orchard was linear, and the node height was best deployed at about 0.2 m down the first branch of the fruit tree. The regression analysis of path loss data showed that it conformed to the logarithmic path loss model under the height of each wireless communication signal node and the typical formation mode of each multi-robot, and the R^2 of the model was between 0.860 and 0.989. At the same time, a path loss model for predicting 2.4 GHz Wi-Fi

收稿日期: 2021-08-19　修回日期: 2021-09-18
基金项目: 陕西省科技重大专项(2020zdzx03-04-01)
作者简介: 刘志杰(1980—),男,讲师,博士,主要从事智能农机装备和智能控制技术研究,E-mail: liuzhijie@nwafu.edu.cn
通信作者: 杨福增(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业智能装备及相关技术研究,E-mail: yangfzkm@nwafu.edu.cn

signal in traditional apple orchard was established. At the same time, other apple orchards were selected to verify the accuracy of the prediction model, R^2 was 0.947 ~ 0.967, RMSE was 1.489 ~ 2.432 dBm. The model can better predict the path loss of Wi - Fi signal in traditional apple orchard, and the research result can provide reference for the deployment of communication nodes of agricultural multi-robot in traditional apple orchard.

Key words: agricultural multi-robot; traditional apple orchard; wireless signals; propagation characteristic

0 引言

我国苹果种植面积占世界 50% 以上,传统果园种植面积约占果园种植总面积的 75%[1]。传统果园树间枝组交叉、低矮密闭,果园机械通过性差,生产作业仍以人工为主[1-2]。随着农业劳动力减少、农村老龄化问题日渐突出,“用工荒”、“用工贵”问题严峻[3-4]。发展多机器人协同技术,提高机器作业效率,已逐渐成为果园现代化、智能化发展的研究热点[5-9]。

通信作为多机器人系统的关键技术之一,是实现农业多机器人协同作业的重要基础[10-12]。研究通信信号在果园中的传播特性,可为农业多机器人无线通信系统设计提供理论指导[13-14]。

郭秀明等[15]研究了苹果园中 2.4 GHz 射频信号在距离地面高度 0.5(主干高度)、1.0、1.5、…、3.0 m(冠层高度)处不同距离下的信号接收强度和丢包情况,发现信号衰减符合对数损耗模型,并得到无线传感器网络天线最佳部署高度为 3.0 m。

在实际应用于传统苹果园环境的多机器人通信系统中,通信节点架设位置必须低于果树第一侧枝高度(其高度不高于 1.2 m),方能保证多机器人在果园环境中良好的通过性。目前,未见对无线信号在传统苹果园地面与果树第一侧枝高度范围内的传播特性研究。因此,针对农业多机器人的通信需求,有必要对无线通信信号在传统苹果园环境下的传播特性进行研究。

本文拟对 2.4 GHz Wi - Fi 信号在传统苹果园中的传播特性进行研究。在 4 种不同节点高度下测量 Wi - Fi 信号沿着多机器人(以 3 台机器人为例)4 种编队方式形成的路径下的信号强度,建立无线信号在传统苹果园中传播的预测模型,为多机器人无线通信节点部署提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验环境

试验地点选在陕西省渭南市白水县西北农林科技大学白水苹果试验示范站西南方向 400 m 处的传统苹果园(35°12′24.444″N,109°32′33.612″E),选取试验苹果园中长势均匀的果树区域进行试验。试验区苹果果树品种为“红富士”,开心形树形,果树枝组交叉密闭,树冠透光率小于 30%(行间枝条有不同程度修剪),树龄 15 a 左右,种植面积 9 900 m^2(180 m × 55 m),株距约 3 m,行距约 4 m,树高约 3 m,果树第一侧枝高度距地面约 1.2 m,部分侧枝低至 1 m 左右。为减小天气的影响,选连续晴天天气开展试验,试验时,风速 2 ~ 4 m/s。试验果园附近无通信基站,且往来车辆较少。

试验时间为 2020 年 8 月 25 日至 9 月 5 日,此时试验区苹果处于成熟期,果实体积最大,枝叶最为繁茂(图 1),对 Wi - Fi 信号传播的影响最大[15]。



图 1 试验区苹果园环境

Fig. 1 Environment of apple orchard in pilot area

1.2 试验材料

试验选用与农业多机器人无线通信模块相同的 2.4 GHz 频段。采用成都亿佰特公司的 E103 - W02DTU(以 TI 公司的 CC3200 为核心)作为 Wi - Fi 信号的发射端和接收端,发射功率 20 dBm,支持标准的 IEEE 802.11b/g/n 协议和完整的 TCP/IP 协议栈,支持 STA/AP 工作模式。为提高信号在果园中的传播能力,模块外接 TX2400 - XPL - 150 型全向天线,天线增益为 3.5 dBi。

通信模块通过 USB 转 232 串口线连接计算机后,借助 AccessPort 串口调试工具,利用 AT 指令将发射端设置为 AP 模式,并建立 TCP 服务器;接收端设置为 STATION 模式并连接发射端 AP,通过 TCP Client 方式与发射端建立通信。

本研究中无线信号路径损耗测试系统(图 2)以微控制器 ATMEGA328P - AU 为核心,通过 TTL 转 RS485 模块与发射端的数传电台连接,并持续给发射端的数传电台发送数据,接收端的数传电台通过



图 2　果园无线信号路径损耗测试系统

Fig. 2　Wireless signal path loss test system for orchards

1. 三脚架Ⅰ　2. 锂电池Ⅰ　3. 接收端数传电台　4. 接收端天线
5. 发射端天线　6. 发射端数传电台　7. 锂电池Ⅱ　8. 三脚架Ⅱ

TCP/IP 协议接收发射端的数传电台数据；使用 2 块锂离子电池分别给控制器以及数传电台供电。利用安捷伦 N9912A 型手持式频谱分析仪采集接收端处的接收信号强度，其他设备包括 2 个三脚架及 MS6252B 型数字风速表。

1.3　试验设计

根据农业多机器人作业时的通信需求，试验选取的 Wi－Fi 信号传播影响因素包括：Wi－Fi 信号的发射节点高度 h_s、接收节点高度 h_r、发射节点与接收节点间的距离 d，以及多机器人直线型、小间距 V 形、大间距 V 形、并排型等 4 种典型编队方式[16－17]（图 3，图中 A 为领航机器人，B、C 为跟随机器人）。

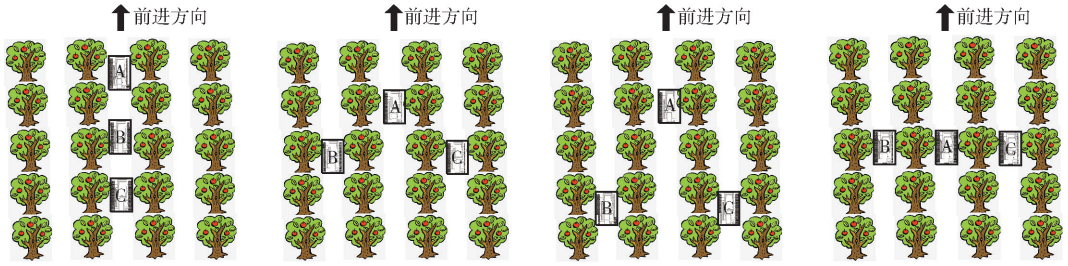


图 3　果园多机器人编队方式

Fig. 3　Multi-robot formation in orchard

果园环境中通信基础设施缺乏，利用 Wi－Fi 自组网（Ad Hoc）可实现多机器人间的数据交互，传输速度快，数据传输实时性能满足传统苹果园多机器人无线通信系统需求[18]。对采用 Ad Hoc 网络实现相互通信的农业多机器人而言，每个节点既可以作为主机收发数据，又可以作为路由转发数据。因此，多机器人无线通信信号传播特性研究可以简化成 2 个通信节点间的信号传播问题。

（1）节点垂直部署设计

无线信号节点部署高度受苹果园环境影响。若节点部署位置过高，多机器人及无线信号天线易受果树低矮枝组影响，导致其在传统苹果园中的通过性差；若节点部署位置过低，易加剧杂草对信号传播（包括反射、绕射等）的影响。由于机器人无线信号节点高度按天线底座高度计算，天线长 0.15 m，为保证农业多机器人在果园行间行走、株间转弯时良好的通过性，并结合试验区果园实际环境（最低侧枝 1 m 左右），设定苹果园内 Wi－Fi 发射节点与接收节点的高度分别为 0.45、0.55、0.65、0.75 m，Wi－Fi 收发节点在垂直方向的部署方案如图 4 所示。

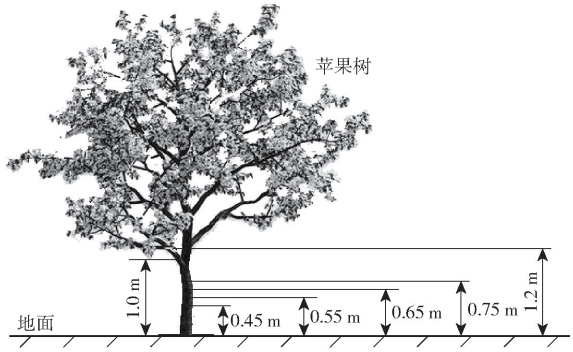


图 4　节点垂直部署方案

Fig. 4　Node vertical deployment scheme

（2）节点水平部署设计

无线信号节点按果园多机器人编队方式水平部署，如图 5 所示。Wi－Fi 信号发射、接收节点水平测试间距需考虑机器人间的安全距离及果园行距、株距。现有机器人车身长约 1.2 m，为保证作业安全性，需保持至少为 1 m 的安全距离，因此设定 Wi－

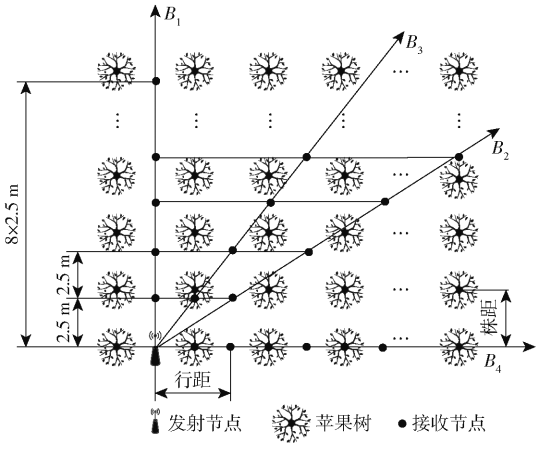


图 5　节点水平部署方案

Fig. 5　Node level deployment scheme

Fi 信号收发节点沿 B_1 线的水平测试间距为 2.5 m(取整后)。沿 B_4 线的测试间距为 2 m(行距的一半),发射节点位于行距中间且与树干平齐。

将发射节点分别放置在测量起点距地面 0.45、0.55、0.65、0.75 m 高度处,并将接收节点放置在距测量起点 2.5、5、…、20 m 的位置;利用 N9912A 型手持式频谱分析仪分别测量接收节点高度为 0.45、0.55、0.65、0.75 m 时的 Wi-Fi 信号强度,每个高度重复测量 5 组数据,去除明显异常值后求平均,即为该测量点处的 Wi-Fi 信号接收强度。分别沿 B_2、B_3、B_4 线部署 Wi-Fi 发射节点和接收节点,并重复上述步骤测量不同编队方式下的 Wi-Fi 信号接收强度。

1.4 模型构建

以科学性为基础的农业预测(估测)模型,是农业科学定量与综合的重要方法[19]。在农业环境中,无线信号的路径衰减多用经典的对数距离路径损耗模型来预测[20-22],公式为

$$\mathrm{PL}_{LN}=\mathrm{PL}(d_0)+10n'\log_a\left(\frac{d}{d_0}\right)+X_\sigma \quad (1)$$

式中 n'——路径损耗指数,表示信号随距离衰减的速率

d_0——信号强度参考距离,m

$\mathrm{PL}(d_0)$——在信号强度参考距离为 d_0 情况下,收发节点距离为 d 处的路径损耗强度,dBm

PL_{LN}——收发节点距离为 d 时的路径损耗强度,dBm

X_σ——具有标准偏差的零均值高斯随机变量,反映信号平均接收功率变化,dBm

式(1)中的 3 个主要变量 n'、$\mathrm{PL}(d_0)$、X_σ 可用于获得果园环境下的 Wi-Fi 信号路径损耗与果树环境之间的关系。但在工程应用中,通常根据实际应用环境,将复杂模型简化。在传统苹果园环境下,试验取式(1)中的信号强度参考距离 $d_0=1$ m。当发射端和接收端之间相对位置在 1~10 m 的范围内变化时,接收信号功率的平均值基本保持不变。只有当发射端和接收端之间相对位置的改变远超过上述范围时,接收信号的平均功率才会出现变化。因此,多机器人在传统苹果园作业时的通信距离需求下,可忽略信号平均接收功率的变化,即 $X_\sigma=0$,则得到适用于本研究苹果园信号的对数距离路径损耗模型。由于信号在传统苹果园传播过程中,Wi-Fi 信号受果树低矮枝组、杂草等环境影响,直射、反射和散射等多种传播机制会加剧信号的传播损耗,不同果园对无线信号的遮挡、吸收等影响也有差异,导致信号在传播过程中的路径损耗不一[22]。引入参数 B 作为模型的信号强度补偿值,进而补偿不同果树树龄、外形及高度等因素对信号衰减的影响。另外,式(1)给出的是信号在路径上损耗的通用模型,当信号强度参考距离为 $d_0=1$ m 情况下,实际测量得到的 $\mathrm{PL}(d_0)$ 和 PL_{LN} 皆为负常数(单位为 dBm),则 $10n'\log_a\left(\frac{d}{d_0}\right)$ 前的符号应该变号,即得

$$P_R=A-10n\log_a d \quad (2)$$

经演化后得到传统苹果园 Wi-Fi 信号路径损耗模型公式

$$P_R=B-10n\log_a d \quad (3)$$

其中 $B=A'-A$

式中 P_R——Wi-Fi 信号接收强度,dBm

A——模型参数,dBm

A'——d_0 为 1 m 时的信号强度,dBm

n——路径衰减因子,表示传输距离增加时信号强度的衰减速度,试验果园环境下,与 Wi-Fi 信号传播路径有关

由式(2)可得到 Wi-Fi 信号在本试验苹果园中的 Wi-Fi 信号路径损耗模型示意图如图 6 所示。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

按照农业多机器人直线型编队方式(沿 B_1 线)水平部署 Wi-Fi 信号发射节点和接收节点。发射节点距地面高度分别为 0.45、0.55、0.65、0.75 m,分别测量接收节点在 0.45、0.55、0.65、0.75 m 高度处与发射节点间的水平距离为 2.5、5、…、20 m 时 Wi-Fi 信号接收强度,如图 7 所示。

按照农业多机器人小间距 V 形编队方式(沿 B_2 线)水平部署 Wi-Fi 信号发射节点和接收节点。发

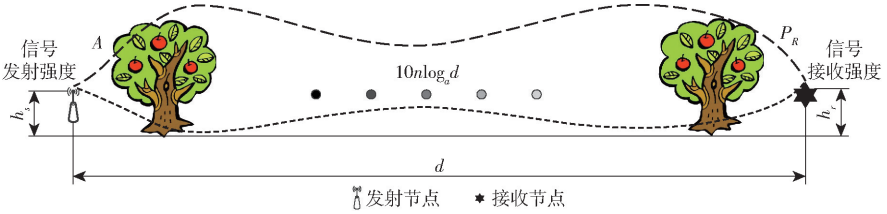
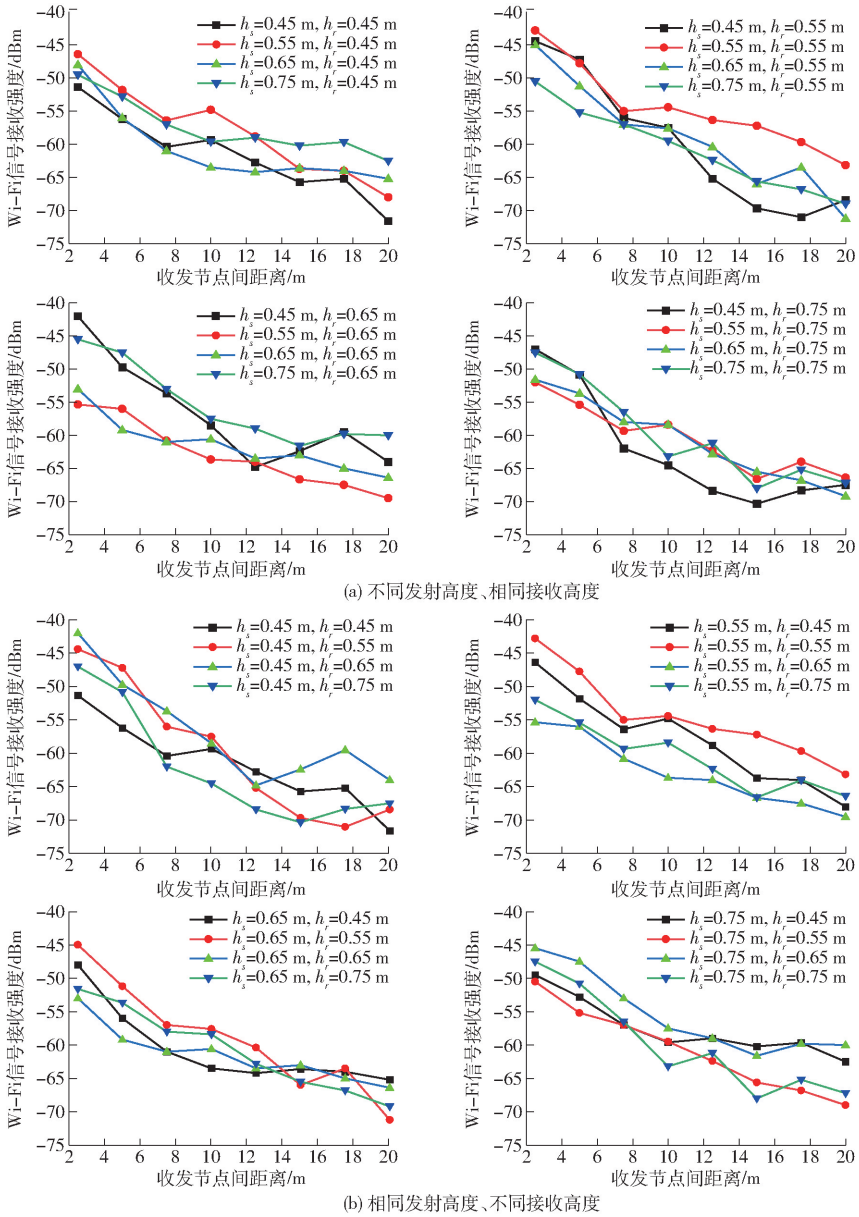


图 6 苹果园 Wi-Fi 信号路径损耗示意图

Fig. 6 Schematic of apple orchard Wi-Fi signal path loss



(a) 不同发射高度、相同接收高度

(b) 相同发射高度、不同接收高度

图 7　直线型编队方式(沿 B_1 线)部署 Wi－Fi 节点时的信号强度曲线

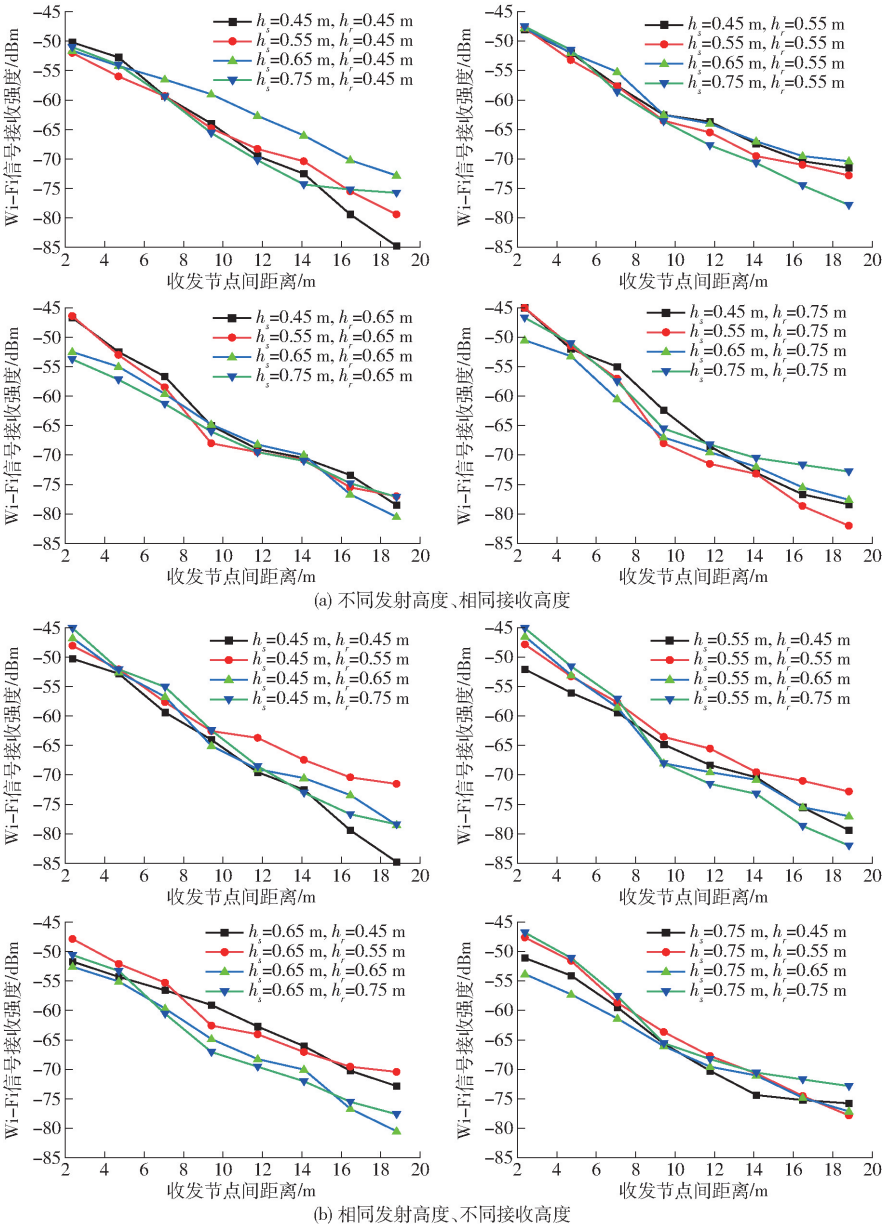
Fig. 7　Signal strength graph when Wi－Fi nodes were deployed in a linear formation (along B_1 line)

射节点距地面高度分别为 0.45、0.55、0.65、0.75 m，分别测量接收节点在 0.45、0.55、0.65、0.75 m 高度处与发射节点间的水平距离为 2.35、4.7、…、18.8 m 时 Wi－Fi 信号接收强度，如图 8 所示。

按照农业多机器人大间距 V 形编队方式(沿 B_3 线)水平部署 Wi－Fi 信号发射节点和接收节点。发射节点距地面高度分别为 0.45、0.55、0.65、0.75 m，分别测量接收节点在 0.45、0.55、0.65、0.75 m 高度处与发射节点间的水平距离为 3.2、6.4、…、25.6 m 时 Wi－Fi 信号接收强度，如图 9 所示。

按照农业多机器人并排型编队方式(沿 B_4 线)水平部署 Wi－Fi 信号发射节点和接收节点。发射节点距地面高度分别为 0.45、0.55、0.65、0.75 m，分别测量接收节点在 0.45、0.55、0.65、0.75 m 高度处与发射节点间的水平距离为 2、4、…、16 m 时 Wi－Fi 信号接收强度，如图 10 所示。

由图 7～10 可知，Wi－Fi 信号接收强度随发射和接收节点间水平距离的增加而逐渐衰减，符合无线电传播基础理论，且不同节点高度以及不同编队方式下接收强度衰减程度不同，说明无线通信信号节点高度、编队方式和通信距离是路径损耗的主要影响因素。与其他几种编队方式相比，以直线型编队方式水平部署发射节点和接收节点时，得到的 Wi－Fi 信号接收强度衰减程度最缓慢，最后趋于平稳(忽略个别数据)，接收强度稳定在 －75 dBm。因此，多机器人以图 3a 所示的直线型编队方式在传统苹果园作业时的 Wi－Fi 无线通信效果最佳。此外，通过对比 Wi－Fi 信号在相同接收高度、不同发射高度下及相同发射高度、不同接收高度下的信号强度图，可初步得到不同编队方式下对应的最佳部署高



(a) 不同发射高度、相同接收高度

(b) 相同发射高度、不同接收高度

图 8 小间距 V 形编队(沿 B_2 线)部署 Wi-Fi 节点时的信号强度曲线

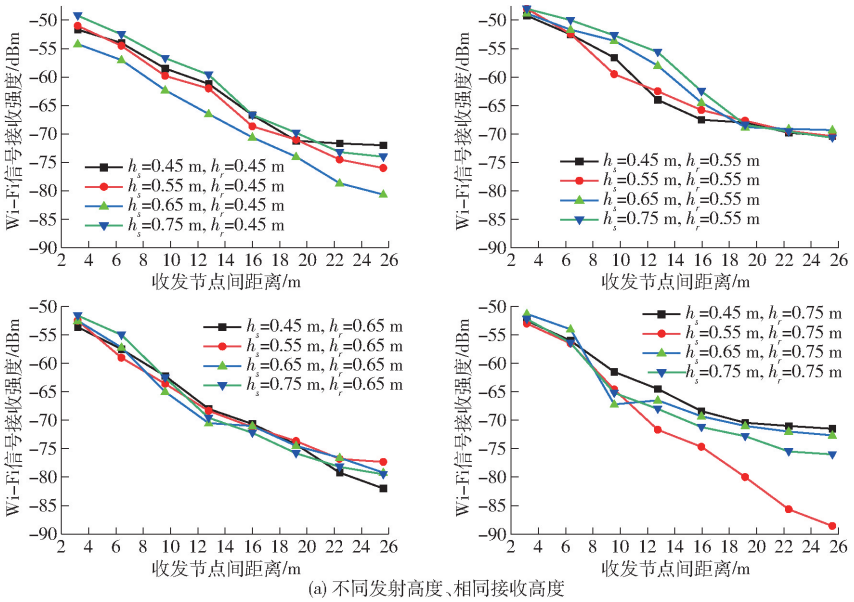
Fig. 8 Signal strength graph when Wi-Fi nodes were deployed in small V-shaped formations (along B_2 line)

度。发射高度、接收高度均为 0.75 m 时,直线型编队对应的信号强度递减程度最缓慢;小、大间距 V 形编队时,对应的最佳收发节点高度为 0.65 m;由于果树主干高度为 0.5 ~ 0.9 m,对并排型编队部署节点的 Wi-Fi 信号影响较大,因而其对应的最佳收发节点高度为 0.45 m。试验将收发节点水平沿 B_1、B_2、B_3、B_4 线部署时,由于 B_1 线与苹果树的列种植方向一致且位于行距正中间,农户为通行方便对果树行间枝条进行了小幅度修剪,低落枝叶较少,因此 Wi-Fi 信号沿 B_1 线传输过程中受树枝影响较小,信号衰减也相应较慢。

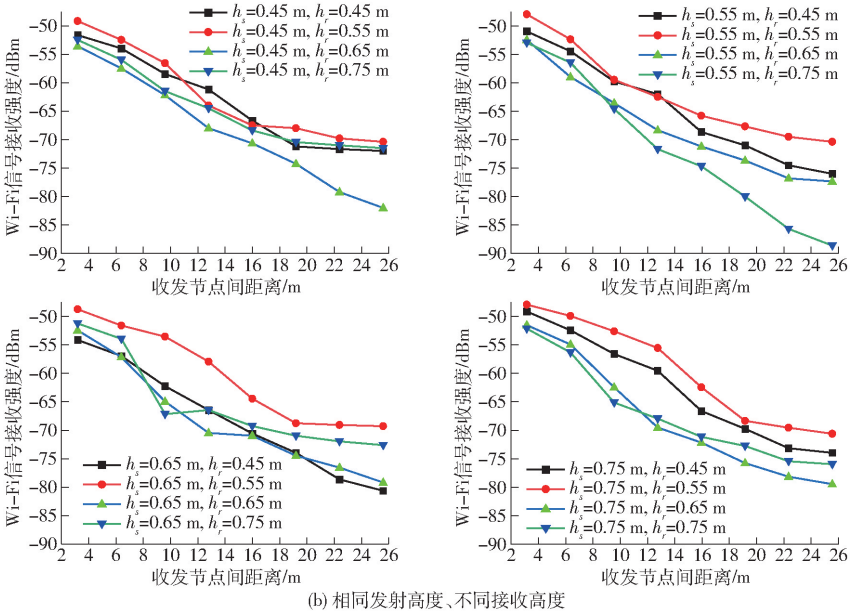
2.2 试验回归分析

根据 Wi-Fi 信号路径损耗预测模型,利用数据分析软件 SPSS 对试验测量的 Wi-Fi 信号接收强度进行最小二乘拟合,得到式(2)中以不同编队方式部署节点位置时模型参数 A、路径衰减因子 n 的拟合值以及拟合曲线的决定系数 R^2,如表 1 ~ 4 所示。

由表 1 ~ 4 可知:决定系数 R^2 在 0.860 ~ 0.989 之间,表明不同编队方式下的 Wi-Fi 信号接收强度均符合式(2)的 Wi-Fi 信号在传统苹果园中路径损耗模型。因此,可使用该模型来描述传统苹果园中各影响因素对 Wi-Fi 信号接收强度衰减的影响。通过比较模型参数 A 和路径衰减因子 n,确定多机器人直线型、小间距 V 形、大间距 V 形、并排型等 4 种典型编队方式下节点对应的最佳部署高度分别为 0.75、0.65、0.65、0.45 m,所得的收发节点高度可作为多机器人无线通信系统的通信模块最佳部署高



(a) 不同发射高度、相同接收高度



(b) 相同发射高度、不同接收高度

图 9　大间距 V 形编队(沿 B_3 线)部署 Wi－Fi 节点时的信号强度曲线

Fig. 9　Signal strength graph when Wi－Fi nodes were deployed in a large V-shaped formation (along B_3 line)

度,且最佳的编队方式为直线型,对应的收发节点高度为 0.75 m(果树第一侧枝高度向下 0.2 m 左右处)。为提高土壤有机质含量,改善土壤肥力状况和土壤结构,果园内自由生草;果园地势起伏不平,Wi－Fi 信号受果园环境直射、反射和散射等多种传播机制的影响,加剧信号的传播损耗。因此,随着节点发射和接收高度的减小,以直线型、V 形、并排型编队方式水平部署发射节点和接收节点时,路径衰减因子 n 总体呈增大趋势,表明环境对 Wi－Fi 信号衰减的影响越显著,并排型编队方式下对应的路径衰减因子 n 例外。

2.3　模型建立

利用多项式对模型参数 A 和路径衰减因子 n 进行拟合,发现二次多项式拟合效果最好,拟合曲线 R^2 最大为 0.993,最小为 0.854,得到不同编队方式下参数 A 和 n 的拟合方程为:

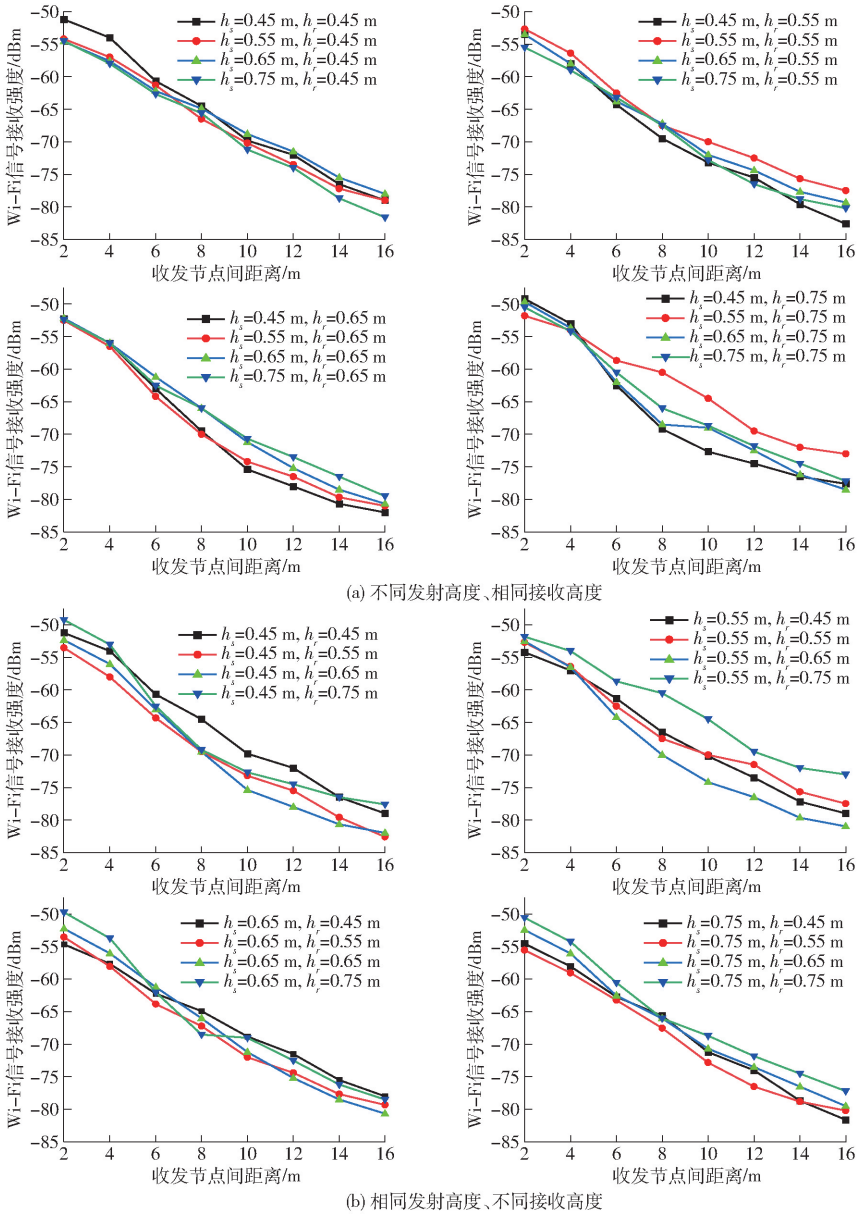
$$B_1\text{ 线}\quad\begin{cases}A_1=90.69796-456.099h_r+386.175h_r^2\\ n_1=6.70669-19.605h_r+16.125h_r^2\end{cases}\tag{4}$$

$$B_2\text{ 线}\quad\begin{cases}A_2=-44.71058-73.842h_r-92.65h_r^2\\ n_2=0.57639+4.263h_r-4.675h_r^2\end{cases}\tag{5}$$

$$B_3\text{ 线}\quad\begin{cases}A_3=-121.84203+299.124h_r-228.35h_r^2\\ n_3=-3.61604+17.211h_r-13.425h_r^2\end{cases}\tag{6}$$

$$B_4\text{ 线}\quad\begin{cases}A_4=20.47146-198.429h_r+154.175h_r^2\\ n_4=4.25139-9.867h_r+7.925h_r^2\end{cases}\tag{7}$$

将 Wi－Fi 信号节点最佳接收高度 0.75、0.65、



(a) 不同发射高度、相同接收高度

(b) 相同发射高度、不同接收高度

图 10 并排型编队(沿 B_4 线)部署 Wi-Fi 节点时的信号强度曲线

Fig. 10 Signal strength graphs when Wi-Fi nodes were deployed in a side-by-side formation (along B_4 line)

表 1 直线型编队方式部署节点时的模型回归参数

Tab. 1 Model regression parameters when deploying nodes in a linear formation

发射节点高度 h_s/m	拟合参数	接收节点高度 h_r/m			
		0.45	0.55	0.65	0.75
0.45	R^2	0.902	0.922	0.901	0.901
	n	0.843	1.406	1.066	1.180
	A/dBm	-42.680	-28.417	-32.938	-35.917
0.55	R^2	0.919	0.951	0.936	0.913
	n	0.971	0.900	0.717	0.711
	A/dBm	-36.228	-34.367	-46.870	-44.626
0.65	R^2	0.911	0.933	0.945	0.923
	n	0.800	1.141	0.575	0.867
	A/dBm	-42.761	-33.413	-48.573	-41.320
0.75	R^2	0.944	0.956	0.919	0.923
	n	0.996	0.883	0.835	0.743
	A/dBm	-44.188	-40.959	-36.779	-34.582

表 2 小间距 V 形编队方式部署节点时的模型回归参数

Tab. 2 Model regression parameters when deploying nodes in small-pitch V-shaped formations

发射节点高度 h_s/m	拟合参数	接收节点高度 h_r/m			
		0.45	0.55	0.65	0.75
0.45	R^2	0.893	0.970	0.957	0.947
	n	1.652	1.192	1.536	1.701
	A/dBm	-30.541	-35.648	-30.552	-26.792
0.55	R^2	0.921	0.979	0.971	0.958
	n	1.300	1.263	1.543	1.848
	A/dBm	-37.378	-35.080	-31.198	-25.568
0.65	R^2	0.872	0.959	0.895	0.955
	n	1.013	1.174	1.336	1.397
	A/dBm	-39.548	-35.444	-36.784	-35.273
0.75	R^2	0.943	0.958	0.975	0.963
	n	1.360	1.503	1.156	1.397
	A/dBm	-36.051	-31.220	-41.136	-32.529

表 3　大间距 V 形编队方式部署节点时的模型回归参数

Tab. 3　Model regression parameters when deploying nodes in a large-spacing V-shaped formation

发射节点高度 h_s/m	拟合参数	接收节点高度 h_r/m			
		0.45	0.55	0.65	0.75
0.45	R^2	0.920	0.947	0.936	0.972
	n	1.116	1.151	1.392	1.015
	A/dBm	−35.588	−33.613	−33.778	−39.222
0.55	R^2	0.938	0.984	0.989	0.937
	n	1.277	1.153	1.250	1.794
	A/dBm	−32.907	−33.276	−36.688	−27.194
0.65	R^2	0.927	0.891	0.977	0.915
	n	1.333	1.141	1.324	1.122
	A/dBm	−34.826	−32.085	−35.351	−37.580
0.75	R^2	0.919	0.860	0.961	0.977
	n	1.299	1.220	1.476	1.234
	A/dBm	−30.371	−29.318	−31.305	−36.446

表 4　并排型编队方式部署节点时的模型回归参数

Tab. 4　Model regression parameters when deploying nodes in a side-by-side formation

发射节点高度 h_s/m	拟合参数	接收节点高度 h_r/m			
		0.45	0.55	0.65	0.75
0.45	R^2	0.940	0.964	0.955	0.964
	n	1.401	1.434	1.582	1.519
	A/dBm	−37.679	−40.584	−37.666	−36.240
0.55	R^2	0.932	0.969	0.968	0.910
	n	1.267	1.255	1.489	1.096
	A/dBm	−41.793	−41.508	−39.265	−40.877
0.65	R^2	0.929	0.968	0.941	0.965
	n	1.141	1.303	1.452	1.448
	A/dBm	−43.602	−41.944	−38.312	−37.027
0.75	R^2	0.919	0.939	0.956	0.964
	n	1.324	1.286	1.347	1.341
	A/dBm	−41.549	−43.225	−39.937	−38.355

0.65、0.45 m 代入式(4)～(7)中，依据式(2)即可建立试验苹果园区 Wi－Fi 发射节点和接收节点在不同编队方式下的信号接收强度预测模型

$$P_R=\begin{cases}-34.153-10.730\ln d & \text{(直线型编队)}\\ -35.858-13.722\ln d & \text{(小间距 V 形编队)}\\ -35.582-13.033\ln d & \text{(大间距 V 形编队)}\\ -37.601-14.161\ln d & \text{(并排型编队)}\end{cases}\tag{8}$$

由式(8)可知，多机器人在直线型编队方式下的路径衰减因子 n 最小，即此编队方式下的 Wi－Fi 信号路径损耗影响最小；在机器人采用 V 形编队进行果园喷药、运输等作业时，不同间距的 V 形编队方式对信号传播影响相差不大，主要与节点间的通信距离有关；较直线型和 V 形编队方式而言，并排型编队方式下信号模型参数更小，这是因为试验时通信模块与树干平齐，果树树干位置杂草自由生长且果树主干高度低，导致路径损耗因子大于直线型和 V 形编队方式。

将 $d=1$ m 时采集的信号强度 A' 代入式(3)，并结合式(8)，可得本试验区传统苹果园对应的 Wi－Fi 信号路径损耗预测模型为

$$P_R=\begin{cases}-10.347-10.730\ln d & \text{(直线型编队)}\\ -11.55-13.722\ln d & \text{(小间距 V 形编队)}\\ -11.334-13.033\ln d & \text{(大间距 V 形编队)}\\ -11.336-14.161\ln d & \text{(并排型编队)}\end{cases}\tag{9}$$

2.4　模型验证

为验证预测模型的准确性，同期选择与试验区栽培模式相同的另一个苹果园(传统苹果园，果树品种为“红富士”，开心形树形，果树枝条交叉密闭，树冠透光率小于 20%(行间枝条很少修剪)，树龄 13 a 左右，株距约 3 m，行距约 4 m，树高约 3 m，果树第一侧枝高度约 1 m，行间杂草较多)，进行 Wi－Fi 信号传播的路径损耗数据采集，并用采集到的数据进行模型验证，新果园环境下的信号路径损耗预测模型及参数如表 5 所示。

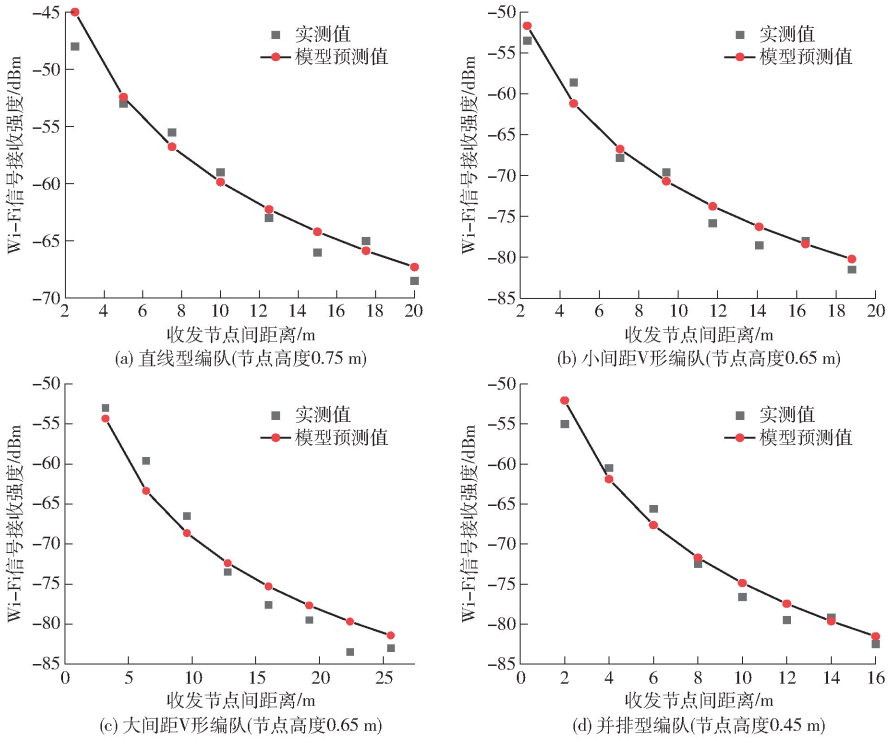
表 5　新果园中信号路径损耗预测模型及参数

Tab. 5　Signal path loss prediction model and parameters in new orchard

编队方式	节点高度/m	A'/dBm	A/dBm	预测模型
直线型	0.75	−45.5	−35.153	$P_R=-35.153-10.730\ln d$
小间距 V 形	0.65	−51.5	−39.950	$P_R=-39.95-13.722\ln d$
大间距 V 形	0.65	−50.5	−39.166	$P_R=-39.166-13.033\ln d$
并排型	0.45	−53.6	−42.264	$P_R=-42.264-14.161\ln d$

对模型预测值和实地测量值进行回归分析，并绘制模型预测值与实测值的关系图(图 11)，结果用回归评价指标决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 进行评价，评价结果见表 6。

从图 11 可以看出，除个别点外，无线信号节点在最佳部署高度下以 4 种典型编队方式测量得到的信号实测值和模型预测值能较好地吻合，说明模型可以预测 2.4 GHz Wi－Fi 信号在传统苹果园(苹果成熟期)中的传播特性。信号节点在近距离(小于 10 m)时，验证区果园实测值基本都小于模型预测值，这是因为预测模型虽通过引入参数 B 补偿了不同果树树龄、外形及高度等因素对信号损耗的影响，但验证区果园较试验区果园而言，枝组更低矮，杂草更多更高，导致路径衰减因子 n 更大，所以对无线信号的路径损耗影响更大。另外，试验时受随机因素影响(风速等)，易造成通信信号散射等变化，导致



(a) 直线型编队(节点高度0.75 m) (b) 小间距V形编队(节点高度0.65 m)

(c) 大间距V形编队(节点高度0.65 m) (d) 并排型编队(节点高度0.45 m)

图 11 4 种编队方式下模型验证

Fig. 11 Model verification in four formation modes

表 6 4 种编队方式下模型评价指标

Tab. 6 Evaluation index values of model in four formation modes

编队方式	收发节点高度/m	评价指标	
		R^2	RMSE/dBm
直线型	0.75	0.950	1.489
小间距 V 形	0.65	0.967	1.707
大间距 V 形	0.65	0.947	2.432
并排型	0.45	0.966	1.716

路径损耗预测值在实测值上下波动[18]。

由表 6 可知,R^2 在 0.947 ~ 0.967 之间,RMSE 在 1.489 ~ 2.432 dBm 之间。在 RMSE 计算中发现,果园枝条修剪程度、杂草长度及枝叶位置变化等环境在近距离处对信号接收强度的影响最为明显,通信距离越远,信号接收强度波动变化越小。这是因为随着距离的变化,果树环境改变对路径衰减因子 n 的影响不再显著。

3 结论

(1)通过比较模型参数 A 和路径衰减因子 n,确定了多机器人直线型、小间距 V 形、大间距 V 形、并排型等 4 种典型编队方式下的收发节点最佳部署高度分别为 0.75、0.65、0.65、0.45 m,可指导多机器人无线通信系统中通信模块的部署。

(2)在传统苹果园环境中,Wi - Fi 信号接收强度随节点间水平距离的增加而逐渐递减。与小间距 V 形、大间距 V 形、并排型等 3 种编队方式相比,直线型编队方式水平部署节点时 Wi - Fi 信号接收强度随距离变大时的衰减程度最为缓慢。因此,多机器人在传统苹果园中进行喷药、运输等作业时,优先考虑直线型编队方式,此时节点部署高度最好在果树第一侧枝向下 0.2 m 左右处。另外,对于多机器人小间距 V 形、大间距 V 形 2 种编队方式而言,通信信号在传播路径上的损耗主要与收发节点间的距离有关,V 形编队的间距变化对信号传播影响不明显。果树树干位置杂草自由生长且果树第一枝干高度低,导致并排型编队时信号的路径损耗大于直线型以及 V 形编队方式,因而多机器人尽量避免并排型编队作业。

(3)采用最小二乘法对模型参数 A、路径衰减因子 n 进行了拟合,得到拟合曲线的决定系数 R^2 在 0.860 ~ 0.989 之间,表明不同编队方式下的 Wi - Fi 信号接收强度均符合 Wi - Fi 信号在传统苹果园中路径损耗模型。通过对预测模型和实地测量值进行回归分析,得到预测模型的决定系数 R^2 在 0.947 ~ 0.967 之间,均方根误差 RMSE 在 1.489 ~ 2.432 dBm 之间,验证结果表明模型可用来预测传统苹果园(苹果成熟期)内 Wi - Fi 信号的路径损耗情况,预测得到的路径信号强度可作为多机器人路由协议开发的理论依据。

参 考 文 献

[1] 赵映,肖宏儒,梅松,等. 我国果园机械化生产现状与发展策略[J]. 中国农业大学学报,2017,22(6):116 - 127.
ZHAO Ying, XIAO Hongru, MEI Song, et al. Current status and development strategies of orchard mechanization production in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(6): 116 - 127. (in Chinese)

[2] 郑永军,江世界,陈炳太,等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2020,51(11):1 - 20.
ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 1 - 20. (in Chinese)

[3] 刘成良,林洪振,李彦明,等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2020,51(1):1 - 18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1 - 18. (in Chinese)

[4] 李道亮,李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. 农业机械学报,2020,51(7):1 - 12.
LI Daoliang, LI Zhen. System analysis and development prospect of unmanned farming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 1 - 12. (in Chinese)

[5] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. 智慧农业,2019,1(1):1 - 7.
ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectives of smart agriculture[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(1): 1 - 7. (in Chinese)

[6] 王猛,赵博,刘阳春,等. 基于多变异分组遗传算法的多机协同作业静态任务分配[J]. 农业机械学报,2021,52(7):19 - 28.
WANG Meng, ZHAO Bo, LIU Yangchun, et al. Static task allocation for multi-machine cooperation based on multi-variation group genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 19 - 28. (in Chinese)

[7] 王伟嘉,郑雅婷,林国政,等. 集群机器人研究综述[J]. 机器人,2020,42(2):232 - 256.
WANG Weijia, ZHENG Yating, LIN Guozheng, et al. Swarm robotics: a review[J]. Robot, 2020, 42(2): 232 - 256. (in Chinese)

[8] 西北农林科技大学. 一种果园实时喷药-供给-维护多机器人系统:201310221017.5[P]. 2015 - 02 - 18.

[9] 西北农林科技大学. 一种多机器协作的小麦收割系统:201310077281.6[P]. 2013 - 07 - 03.

[10] PETERSEN K H, NAPP N, STUART-SMITH R, et al. A review of collective robotic construction[J]. Science Robotics, 2019, 4(28): 8479.

[11] PETERSEN K H, NAPP N, STUART-SMITH R, et al. A review of collective robotic construction[J]. Science Robotics, 2019, 4(28): 8479.

[12] 李世超,曹如月,魏爽,等. 基于 TD - LTE 的多机协同导航通信系统研究[J]. 农业机械学报,2017,48(增刊):45 - 51,65.
LI Shichao, CAO Ruyue, WEI Shuang, et al. Research on multi-machine cooperative navigation communication system based on TD - LTE[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 45 - 51, 65. (in Chinese)

[13] 刘留,张建华,樊圆圆,等. 机器学习在信道建模中的应用综述[J]. 通信学报,2021,42(2):134 - 153.
LIU Liu, ZHANG Jianhua, FAN Yuanyuan, et al. Survey of application of machine learning in wireless channel modeling[J]. Journal on Communications, 2021, 42(2): 134 - 153. (in Chinese)

[14] ZHANG Jianhua. The interdisciplinary research of big data and wireless channel: a cluster-nuclei based channel model[J]. China Communications, 2016, 13(Supp.): 14 - 26.

[15] 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)

[16] BA LCH T, ARKIN R C. Behavior-based formation control for multirobot teams[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1998, 14(6): 926 - 939.

[17] MAO W, LIU Z, LIU H, et al. Research progress on synergistic technologies of agricultural multi-robots[J]. Applied Sciences, 2021, 11(4): 1448.

[18] 毛文菊,刘恒,王东飞,等. 面向果园多机器人通信的 AODV 路由协议改进设计与测试[J]. 智慧农业(中英文),2021,3(1):96 - 108.
MAO Wenju, LIU Heng, WANG Dongfei, et al. Improved AODV routing protocol for multirobot communication in orchard[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(1): 96 - 108. (in Chinese)

[19] 曹宏鑫,葛道阔,张文宇,等. 农业模型发展分析及应用案例[J]. 智慧农业(中英文),2020,2(1):147 - 162.
CAO Hongxin, GE Daokuo, ZHANG Wenyu, et al. Developmental analysis and application examples for agricultural models[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(1): 147 - 162. (in Chinese)

[20] AZEVEDO J A R, SANTOS F E S. An empirical propagation model for forest environments at tree trunk level[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(6): 2357 - 2367.

[21] RAPPAPORT T S. Wireless communications: princi-ples and practice[M]. Second Edition. Prentice Hall, 2002.

[22] SARKAR T K, ZHONG J, KIM K, et al. A survey of various propagation models for mobile communication[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2003, 45(3): 51 - 82.