

考虑无线传输损耗的农业物联网节点分布规划算法研究

谢家兴^{1,2} 梁高天¹ 高鹏¹ 王卫星^{1,3}

(1. 华南农业大学电子工程学院, 广州 510642; 2. 广东省智慧果园科技创新中心, 广州 510642;
3. 广东省农情信息监测工程技术研究中心, 广州 510642)

摘要: 针对传统的农业物联网路由以及网关选址时,考虑实际地形对传输损耗的影响不够,导致节点电能的浪费以及维护费用增加的问题,本文首先对农场地形以及已布置终端的位置进行建模,使用 K-means 算法确定路由初始位置以及该路由负责对接的终端。在考虑电磁波自由空间损耗以及绕射损耗的前提下设计合理的适应度函数,基于一种可变惯性系数的粒子群优化算法对路由和网关的位置进行优化。最终模型给出最大的电磁波损耗数据,用于在确定节点的最大发射功率时提供参考。算例仿真发现,路由位置通过 PSO 算法寻优,最大传输损耗最多可降低 27.82%。实地检验发现,本算法所选取的最优点通信质量显著高于其附近的点,RSSI 提升达 12%~20%。模型最终给出的路由和网关最大传输损耗与最优布局位置对于实际节点铺设具有指导性意义。

关键词: 农业物联网; 节点选址; K-means 算法; 粒子群优化算法; 绕射损耗; 自由空间损耗

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)05-0275-07

OSID:



Algorithm for Distribution Planning of Agricultural IoT Nodes Considering Wireless Transmission Loss

XIE Jiaying^{1,2} LIANG Gaotian¹ GAO Peng¹ WANG Weixing^{1,3}

(1. College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China
2. Guangdong Modern Agricultural Science and Technology Innovation Center for Intelligent Orchard, Guangzhou 510642, China
3. Guangdong Engineering Research Center for Monitoring Agricultural Information, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The node location of the agricultural IoT node is of great significance for reducing power consumption. However, the existing literature rarely considers the loss in the signal transmission process in the node location problem, especially the diffraction loss caused by the terrain factor. A method of node location based on K-means and PSO algorithm was proposed. Firstly, the K-means algorithm was used to determine the approximate location of each route and the terminal which were responsible for docking according to the distance of the straight line. Then, considering the electromagnetic wave free space loss and diffraction loss, combined with the modeling of the nodal topography, using the Fresnel integral and free space loss formula, a fitness function was constructed. A variable inertia coefficient PSO algorithm was used to solve this function. This method increased the inertia weight factor to improve the particle search ability when the global optimal point was updated. Anyway, the inertia to accelerate the convergence of the algorithm was reduced. The improved PSO algorithm was used to optimize the location of routers and gateways. The simulation found that the routing position was optimized through the PSO algorithm, which can reduce the maximum transmission loss by up to 27.82%. Field inspection showed that the optimal communication quality selected by this algorithm was significantly higher than that of the nearby points, and the RSSI was improved by as much as 12% to 20%. In addition, the model gave the maximum electromagnetic wave loss data, which can be used to determine the maximum transmission

收稿日期: 2021-06-16 修回日期: 2021-07-29

基金项目: 广东省科技专项资金项目(2020020103)、广东省教育厅特色创新类项目(2019KTSCX013)、广东省现代农业产业技术体系创新团队建设专项资金项目(2022KJ108)、省级乡村振兴战略专项省级组织实施项目(粤财农〔2021〕37号)、广东省科技创新战略(“攀登计划”)专项资金项目(pdjh2021b0077)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-32-14)

作者简介: 谢家兴(1979—),男,讲师,博士,主要从事农业物联网和电子信息技术研究,E-mail: xjx1998@scau.edu.cn

通信作者: 王卫星(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业物联网和电子信息技术研究,E-mail: weixing@scau.edu.cn

power of the node and estimate the energy loss of the node, so as to make a more rational estimate of the overall energy consumption of the node, and effectively reduced the subjectivity and arbitrariness of nodes planning.

Key words: agricultural internet of things; node location; K-means algorithm; particle swarm optimization algorithm; diffraction loss; free space loss

0 引言

在无线信号传输的过程中,信号不仅会随着传输距离增大而衰减,还会因为地形的高低起伏而存在一定的绕射损耗^[1]。然而目前农场物联网节点的选址大多依靠经验,没有综合考虑地形、信号损耗等因素,从而造成了不必要的发射功率浪费。因此设计一种合理的节点选址方法对于延长节点续航,减少电能消耗具有重大意义。

对于类似的规划问题,常见的解决方法有蚁群算法^[2]、粒子群算法^[3]等群智能算法,也有 Bug 算法^[4]、A* 算法^[5]、Dijkstra 算法等图搜索算法,以及聚类算法^[6]等无监督学习方法。

在无线节点的选址上,文献[7]基于基站选址优化问题的约束条件构建一种基站选址优化模型,该模型使用鲸鱼优化改进算法,仿真发现算法能够获得更理想的优化解,且具有较快的收敛速度。文献[8]通过把单跳 Sink 节点选址问题转换为区间数学全局寻优问题,结合粒子群算法与质心理论,提出了质心重选址算法,实现了多 Sink 节点的最优化选址。文献[9]将人工鱼群算法应用到基站选址规划上,提出了变步长的人工鱼群算法,仿真发现该算法只需要更少的待建基站数目就能满足覆盖 95% 以上的目标。

然而目前已有文献在节点的选址问题上很少考虑信号传输过程中的损耗问题,尤其是由于地形因素导致的绕射损耗,因此本文提出一种结合 K-means 聚类算法以及粒子群优化 (Particle swarm optimization, PSO) 算法的物联网节点选址方法。该方法通过 K-means 算法确定每个路由的管辖终端以及初始位置,根据电磁波损耗模型建立合适的适应度函数,利用 PSO 算法得到路由节点的最终位置,再次使用 K-means 算法确定每个网关的管辖路由以及初始位置,通过 PSO 算法确定网关的最终位置。

1 物联网系统概述

农场无线物联网一般包括终端、路由以及网关 3 种节点,其拓扑结构如图 1 所示。终端节点负责采集温湿度等环境信息以及控制电磁阀等设备的工作;路由节点是网关与终端之间通信的桥梁,用于转

发网关对终端的下行指令以及终端到网关的上行信息,一个路由对接在它附近的多个终端;网关节点负责把终端采集到的数据通过 4G 等方式上传到后台服务器,以及接收来自服务器的控制指令并通过路由传达给终端,一个网关对应多个路由。

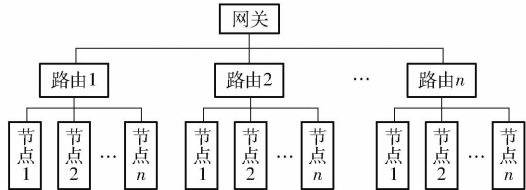


图 1 农业物联网拓扑结构

Fig. 1 Topology of agricultural internet of things

在农场物联网节点的铺设中,一般需要安装 3 种节点:终端节点、路由节点与网关节点。为了方便建模,做如下假设:

- (1)终端位置已知。终端需要控制电磁阀的开关与采集农情信息,它的安装位置需要根据场地的实际情况人为决定。
- (2)一个终端只能连接到一个路由,终端间不存在任何连接。需要确定每个路由所负责的终端,对终端的分割可以视为一类聚类问题。
- (3)聚类中的元素一经确定后不再改变。在确定路由对接的终端后,无论路由位置如何改变,其下属的终端都不会增加或减少。
- (4)模型的目标是降低最大通信损耗。最大通信损耗指路由到多个终端或者网关到多个路由间最大的无线传输损耗,只要终端到其所属的路由或者路由到网关的无线传输损耗小于等于最大无线传输损耗,即视为可以通信成功。
- (5)网关只有一个,且只能与路由通信,每个路由都必须连接到网关。

2 模型建立

2.1 自由空间损耗

没有任何障碍物的情况下电磁波在自由空间中传播时,会存在自由空间损耗,根据国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 在 2019 年发布的关于自由空间损耗的参考计算方法^[10],自由空间损耗计算式为

$$L_{fs} = 32.44 + 20\lg f + 20\lg d \tag{1}$$

式中 L_{fs} ——自由空间损耗, dB

f ——电磁波频率, MHz

d ——信号发射点与接收点的直线距离, km

2.2 绕射损耗

如果电磁波在传输过程中遇到凸起的障碍物, 则会产生绕射损耗, 根据 ITU 于 2019 年发布的关于绕射损耗的计算方法^[11], 绕射损耗的计算存在 2 种情况, 如图 2、3 所示。

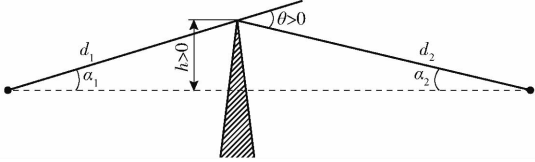


图 2 端点水平线在山峰下方

Fig. 2 Horizontal line below spike

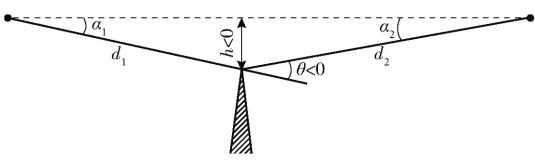


图 3 端点水平线在山峰上方

Fig. 3 Horizontal line above tip

计算几何参数的综合量, 其计算式为

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (2)$$

式中 v ——全部几何参数的综合量, 它是一个归一化的、无量纲参数

h ——端点的水平连线与峰顶的垂直距离, 当端点水平线在山峰上方时(图 3), h 为负值, 反之正值(图 2)

λ ——电磁波波长

d_1 、 d_2 ——障碍物顶部与路径两端间的距离

绕射损耗计算式为

$$J(v) = -20 \lg \left(\frac{\sqrt{(1 - C(v) - S(v))^2 + (C(v) - S(v))^2}}{2} \right) \quad (3)$$

式中 J ——绕射损耗, dB

C ——复数菲涅尔积分实部

S ——复数菲涅尔积分虚部

复数菲涅尔积分结果计算式为

$$F_c(v) = \int_0^v e^{j \frac{\pi s^2}{2}} ds = C + jS \quad (4)$$

式中 F_c ——复数菲涅尔积分结果

s ——被积变量

为了计算方便, ITU 建议在 v 大于 -0.78 时, 绕射损耗 J 的近似值计算式为

$$J(v) = 6.9 + 20 \lg \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \quad (5)$$

以上仅为一种比较简单的绕射损耗计算方式, 有文献表明在林区、丘陵、森林等不同环境中测得的绕射损耗与 ITU 建议公式的计算结果均有差异^[12-16], 本文为了方便展示方法原理, 仅使用了比较简单的绕射损耗计算方法, 在实际使用时应该根据实际的环境选择合适的绕射损耗计算方法。

2.3 适应度模型

在本模型中, 传输损耗的计算主要考虑的是节点发射的电磁波在传播过程中存在的自由空间损耗以及绕射损耗, 目的在于减少通信时最大传输损耗, 所以设计路由或者网关的适应度方程式为

$$L_{\text{loss}}^i = \max \{ J^p + \text{poslin}(L_{fs}^p) \} \quad (p \in C_i) \quad (6)$$

其中

$$\text{poslin}(a) = \begin{cases} 0 & (a < 0) \\ a & (a \geq 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中 L_{loss}^i ——粒子 i 当前的最大传输损耗, 也是路由或者网关当前位置的适应度, 位置优化算法需要不断地降低 L_{loss}^i

J^p ——节点 p 与管理节点 p 的终端或网关之间的绕射损耗

L_{fs}^p ——节点 p 与管理节点 p 的终端或网关之间的自由空间损耗

C_i ——属于第 i 个路由或网关管理的节点的集合

poslin ——正值线性传输函数

由于传输损耗为非负值, 当发射点与接收点距离较少时, 根据式(1)计算的损耗有可能达到负无穷, 为了使 PSO 算法正常执行, 对自由空间损耗添加一个正值线性传输函数。

节点 p 不止一个, 路由或者网关的最大发射功率应该高于最大传输损耗, 故用 $\max$ 函数取最大的传输损耗作为适应度。

3 算法设计

3.1 K-means 算法

K-means 算法^[17]是一种无监督的聚类算法, 对于给定的样本集, 可以按照样本之间的距离, 将样本划分为 k 个簇。该算法用于确定路由节点的初始位置, 种子与路由节点的距离采用的是平面距离, 其计算方法为

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (8)$$

式中 D ——种子(即终端)与路由的距离

(x_1, y_1) ——路由坐标

(x_2, y_2) ——终端坐标

在确定好路由的初始位置以及每个路由所负责的终端后, 使用 PSO 算法进行位置优化。

3.2 PSO 算法

PSO 算法^[18]是一种全局优化算法,通过群体中粒子间的合作与竞争产生的群体智能指导优化算法,它可根据对环境的适应度,将群体中的粒子移动到更好的区域,从而实现对函数全局最优的求解。

文献[19]建议在一般情况下将个体认知分量和群体社会分量的权重设置为常数更有利于 PSO 算法迭代到全局最优点。为了加速 PSO 算法收敛,参照文献[20]与可变学习率反向传播(Variable learning rate back propagation)算法^[21],设计了可变惯性权重因子算法,该算法在每次迭代后都需要执行一次以获得新的惯性权重因子,该算法的伪代码为

输入:全局最优点是否更新标志,目前的 d 值,目前的惯性权重因子

输出:新的惯性权重因子,新的 d 值

Function[new_inertia, new_d] = new_inertia(flag, d, inertia)

```
If flag == true
    new_d = max(0, d - 1)
    If d < 2
        new_inertia = inertia * 2
    If d > 5
        new_inertia = inertia/2
else
    new_d = d + 1
    new_inertia = inertia
```

以上算法用变量 d 记录全局最优位置不更新的次数,当 d 小于 2 时,提高惯性权重因子以提高粒子搜索最优点的能力,当全局最优位置大于 5 次不更新时,减少惯性权重因子以加快算法收敛。

为减少 PSO 执行时间,设置了最优位置不更新的最大容许时间,如果已知最优位置超过此容忍时间没有更新时,退出 PSO 算法的执行,取当前最优结果作为最终优化结果。

3.3 本文算法使用步骤

本文算法使用步骤为:①对农场地形进行建模,得到地形描述函数。②根据地形描述函数,依据终端实际的分布得到终端坐标。③根据实际情况确定路由部署数量以及网关部署数量。④利用 K-means 聚类算法对终端进行分组,取每组的中心作为路由的初始中心。⑤针对每组终端,在该组的初始中心附近初始化若干个粒子,通过式(6)得到适应度函数,利用 PSO 算法确定路由的最终位置。⑥初始化若干个粒子,通过式(6)得到适应度函数,利用 PSO 算法确定网关的最终位置。

4 仿真分析

4.1 仿真参数

4.1.1 地形描述函数

仿真使用的地形描述函数为

$$\begin{aligned} \text{terr}(x,y) = & 30(1-u)^2e^{-u^2-(v+1)^2} - \\ & 100\left(\frac{u}{5} - u^3 - v^5\right)e^{-u^2-v^2} - \frac{10}{3}e^{-(u+1)^2-v^2} \\ & (-500\text{ m} \leq x \leq 500\text{ m}, -500\text{ m} \leq y \leq 500\text{ m}) \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $u = \frac{x}{100} \quad v = \frac{y}{100}$

式中 $\text{terr}(x,y)$ ——坐标 (x,y) 处的地形高度
该描述函数对应地形的立体图如图 4 所示。

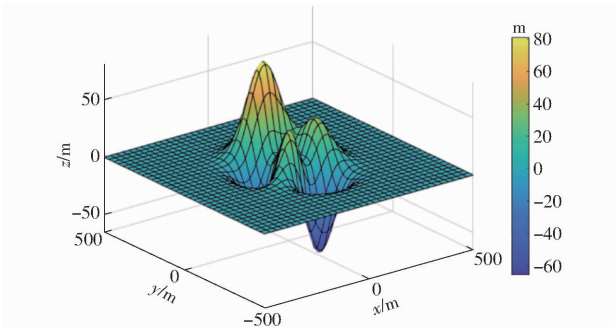


图 4 仿真地形立体图

Fig. 4 Three-dimensional map of simulated terrain

4.1.2 波长

目前大部分的物联网节点主要工作在 2.4 GHz 频段,根据电气与电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)颁布的标准^[22],该频段的频率范围为 2.401 ~ 2.495 GHz,为了计算方便,采用其中心频率 $f(2.448\text{ GHz})$ 进行仿真,则波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (10)$$

式中 c ——真空中的光速,取 $3 \times 10^8\text{ m/s}$
可算得波长约为 0.12 m。

仿真的终端数目为 500 个,它们的位置由系统随机生成,分布在上述地形描述函数的定义域内。路由为 5 个。

4.1.3 PSO 算法参数

PSO 算法参照文献[23]选择 3 组参数进行测试,如表 1 所示。

表 1 PSO 仿真参数

Tab. 1 PSO simulation parameters

参数组序号	S_o	ω	ϕ_p	ϕ_g
1	25	0.395 2	2.558 6	1.335 8
2	29	-0.434 9	-0.650 4	2.207 3
3	20	0.1	1.49	1.49

注: S_o 为粒子个数, ϕ_p 为个体认知权重, ϕ_g 为社会认知权重, ω 为初始惯性系数。

为了确定 PSO 算法仿真最终使用的参数,进行预实验,测试每组参数下 PSO 算法执行所需要的时间,每组测试 5 次,结果如表 2 所示。

表 2 PSO 算法不同参数组耗时测试结果
Tab.2 Time-consuming test results of different parameter groups of PSO algorithm

测量次序	参数组 1	参数组 2	参数组 3
1	311.484	1 153.467	152.824
2	525.641	924.405	351.747
3	843.990	485.493	256.445
4	943.165	454.736	138.843
5	364.701	412.330	338.881
平均值	597.796	686.086	247.748

可见,参数组 3 的平均耗时显著小于参数组 1 和参数组 2,因此选择参数组 3 作为 PSO 算法的参数。

设置 PSO 算法粒子最大迁移次数为 400 次;最小容忍迁移距离为 10^{-6} m;最优位置不更新的最大容许时间为 120 s。当满足以下条件之一时结束 PSO 算法:①迁移达到 400 次。②所有的粒子迁移距离小于最小容忍距离。③群体最优位置超过 120 s 没有更新。

4.2 仿真结果

4.2.1 分类

对随机初始化的 500 个终端使用 K-means 算法分成 5 类,结果如图 5 所示。

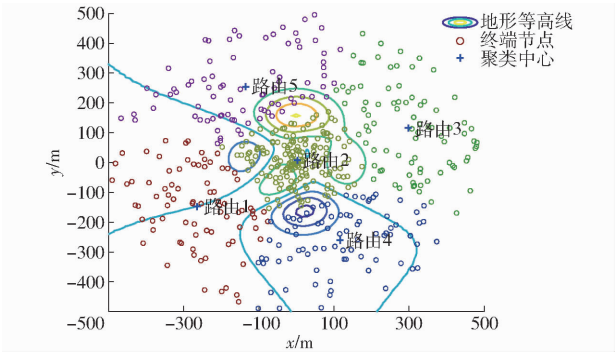


图 5 K-means 分类结果
Fig. 5 K-means classification results

图 5 中处在同一聚类中的终端用同一种颜色表示,可见分类结果有明显的分类边界。因为 K-means 算法存在一定的随机性,所以将该算法运行了 10 次,取最好的一次进行绘图以及下一步的分析。

4.2.2 路由位置优化

使用 PSO 算法,在图 5 的聚类中心附近初始化 20 个粒子,执行算法进行路由位置择优,优化结果如图 6 所示。

优化前后各个路由的最大传输损耗如表 3 所

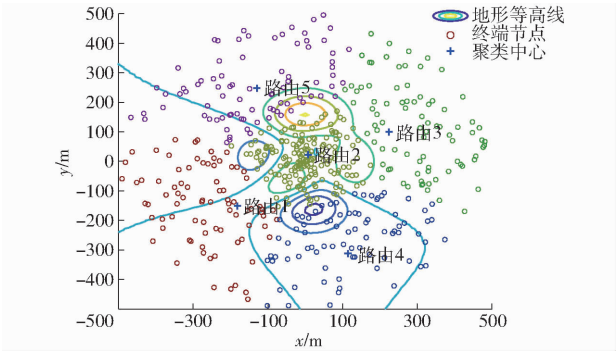


图 6 路由位置优化结果
Fig. 6 Route location optimization results

表 3 PSO 算法位置寻优结果比较
Tab.3 Comparison of PSO algorithm location optimization results

参数	路由序号				
	1	2	3	4	5
优化前最大传输损耗/dB	93.72	97.14	96.03	120.91	94.38
优化后最大传输损耗/dB	91.14	96.02	91.64	87.27	90.76
最大传输损耗减少率/%	2.75	1.15	4.57	27.82	3.84

示。可见,通过 PSO 算法的位置优化,5 个路由最大传输损耗均得到了减少,其中路由 4 的最大传输损耗减少率达到了 27.82%。

4.2.3 网关位置确定

使用 PSO 算法确定网关位置,先求出到 5 个路由距离和最小的点,在此点附近初始化 20 个粒子,执行优化算法,结果如图 7 所示。优化前后网关的最大传输损耗分别为 90.91 dB 和 89.66 dB,通过优化,最大传输损耗降低了 1.37%。

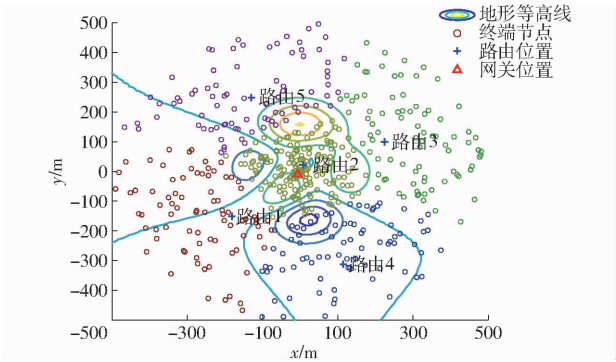


图 7 网关的位置
Fig. 7 Location of gateway

5 实地检验

为了验证算法的有效性,选取华南农业大学园艺教学实验基地作为测试场地,其俯视图如图 8 所示。

5.1 地形建模与通信质量分析

为了得到场地的地形情况以便建模分析,自主设计了一款地形采集装置,该装置实物如图 9 所示,



图 8 实验场地俯视图(航拍)

Fig. 8 Top view of experimental site (aerial photography)

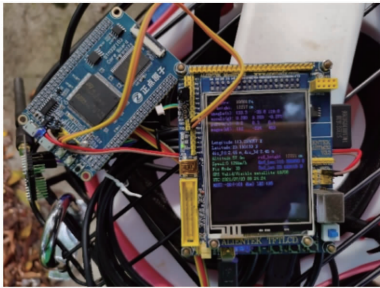


图 9 地形采样仪

Fig. 9 Terrain sampler

采用 RadioLink 公司生产的“SE100”GPS 定位器获取样点的经纬度,利用 GoerTek 公司的“SPL06-001”数字大气压力传感器得到样点的高度信息。

地形信息采样后,为了对地形进行分析,取所有样点经纬度的中心为原点,建立直角坐标系,并根据采样点的经纬度得到每个点相对于原点的坐标(x , y),通过最邻近插值法对地形做数字化建模分析,样点以及建模结果如图 10 所示,其中蓝色点为用于地形建模的转换后采样点,曲面为对实验场地进行插值建模的结果,曲面的颜色表示地势高度。

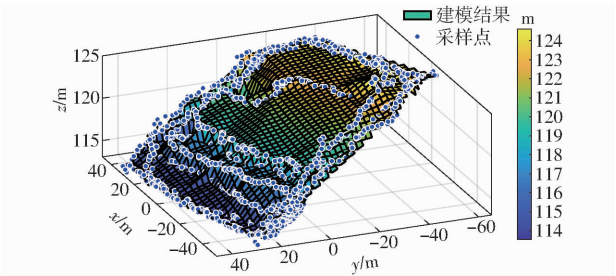


图 10 地形采样点以及地形建模结果

Fig. 10 Terrain sampling points and terrain modeling results

物联网通信模拟测试采用 TI 公司的 CC2530 芯片作为信号收发端,使用同一公司旗下的 CC2591 芯片作为信号功率放大器,通过 CC2530 芯片接收数据包时返回的接收信号强度指标 (Received signal-strength indication, RSSI) 评判通信质量, RSSI 值越大表示通信质量越好。在实地测试时,把 RSSI 回传至上述自制地形采样仪,从而得到对应 GPS 坐标位置的信号强度。

5.2 实验过程与结果

受到实际情况限制,在实地验证时只使用 5 个终端与 1 个路由器节点,终端安装到指定位置,实验人员手持采样仪,在算法分析得到的最优点及其附近测量 RSSI 值,从而验证算法结果的有效性。终端 GPS 坐标以及算法给出的最佳路由位置如表 4 所示。

表 4 终端与路由的坐标

Tab. 4 Coordinates of terminal and route

位置	纬度/(°)	经度/(°)
终端 1	23. 160 110	113. 355 049
终端 2	23. 159 861	113. 353 943
终端 3	23. 160 540	113. 354 156
终端 4	23. 160 400	113. 355 000
终端 5	23. 159 800	113. 354 000
路由	23. 160 080	113. 354 417

在算法推荐的最优点及其附近,采集路由由分别到 5 个终端的 RSSI,共采样 160 个点,其中最优点及其东南西北 2 m 处的采样结果如表 5 所示。

表 5 部分测量点 RSSI 数据

Tab. 5 RSSI data of some measuring points

终端序号	最优点	东	南	西	北
1	-68	-81	-81	-68	-68
2	-64	-80	-83	-83	-64
3	-71	-71	-71	-71	-87
4	-69	-69	-65	-69	-69
5	-67	-81	-67	-67	-67
最小值	-71	-81	-83	-83	-87

可见,最优点到 5 个终端 RSSI 的最小值均比其附近的点大,最优点的最小 RSSI 相比其附近的点提升了 12% ~ 20%,说明本文算法可提高无线通信质量。

6 结论

(1)在考虑无线传输损耗的基础上,提出了一种基于 K-means 聚类算法与 PSO 算法的农场物联网规划算法,该算法首先对农场建模得到地形描述函数,通过已经部署好的终端的坐标,利用 K-means 算法得到路由的管辖终端与大概的位置,在考虑地形因素对节点间信号传输影响的前提下,建立了以自由空间损耗和绕射损耗最小化为目标的数学模型,结合 PSO 算法得到路由和网关的安装位置。

(2)仿真分析发现,该算法有助于为路由与网关的铺设位置提供参考建议,使用 PSO 算法可以显著降低最大传输损耗,最大减少率为 27. 82%。实地检验发现,本算法所选取的最优点通信质量显著高于其附近的点, RSSI 提升了 12% ~ 20%。

(3)对于地表覆盖物的不同,绕射损耗的实际应根据地表覆盖物的种类对绕射损耗的计算方法进行改进。值与 ITU 推荐的理论值有差别,因此在实际应用中,

参 考 文 献

[1] 李健东,郭梯云,郭国杨. 移动通信[M]. 4 版:西安:西安电子科技大学出版社,2006:94-97.

[2] 景云鹏,金志坤,刘刚. 基于改进蚁群算法的农田平地导航三维路径规划方法[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):333-339. JING Yunpeng, JIN Zhikun, LIU Gang. Three dimensional path planning method for navigation of farmland leveling based on improved ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp. 1):333-339. (in Chinese)

[3] 王华,陈梦奇,蔡恩香,等. 基于多目标粒子群优化算法的永久基本农田划定模型[J]. 农业机械学报,2021,52(8):138-146,171. WANG Hua, CHEN Mengqi, CAI Enxiang, et al. Permanent basic farmland delineation model based on multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(8):138-146,171. (in Chinese)

[4] 彭艳,鲍凌志,瞿栋,等. Multi-Bug 全局路径规划算法研究[J]. 农业机械学报,2020,51(6):375-384. PENG Yan, BAO Lingzhi, QU Dong, et al. Global path planning algorithm of Multi-Bug[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):375-384. (in Chinese)

[5] 劳彩莲,李鹏,冯宇. 基于改进 A* 与 DWA 算法融合的温室机器人路径规划[J]. 农业机械学报,2021,52(1):14-22. LAO Cailian, LI Peng, FENG Yu. Path planning of greenhouse robot based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(1):14-22. (in Chinese)

[6] 肖玉徽,楼振凯. 考虑客户满意度的物流末端节点选址模型及算法[J]. 工业工程,2019,22(3):126-131. XIAO Yuhui, LOU Zhenkai. A model and an algorithm of logistics terminal node location problem considering customer satisfaction[J]. Industrial Engineering Journal, 2019,22(3):126-131. (in Chinese)

[7] 唐丽晴,应忠于,罗云. 基于鲸鱼优化改进算法的基站选址[J]. 计算机与现代化,2020(9):100-105. TANG Liqing, YING Zhongyu, LUO Yun. Base station location planning based on improved whale optimization algorithm[J]. Computer and Modernization, 2020(9):100-105. (in Chinese)

[8] 高丽娜. 无线传感器网络汇聚节点选址算法的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2017. GAO Li'na. The research of wireless sensor network sink node location algorithm[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017. (in Chinese)

[9] 金伟正,宋超,罗义军. 基于人工鱼群算法的电力无线专网基站选址规划[J]. 武汉大学学报(工学版),2021,54(6):551-556. JIN Weizheng, SONG Chao, LUO Yijun. Base station location planning of power wireless private network based on artificial fish swarm algorithm[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021,54(6):551-556. (in Chinese)

[10] ITU. Recommendation ITU-R P.1812-5: a path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands[EB/OL]. [2019-10/2021-03]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1812-5-201908-I!!-PDF-E.pdf.

[11] ITU. Recommendation ITU-R P.526-15: propagation by diffraction[EB/OL]. [2019-10/2021-03]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-15-201910-I!!-PDF-E.pdf.

[12] 陈明,李东虎,王霄,等. 无线信号在马尾松林中传播特性分析[J]. 计算机应用与软件,2021,38(3):88-93,104. CHEN Ming, LI Donghu, WANG Xiao, et al. Analysis of wireless signal propagation characteristics in pine forest[J]. Computer Applications and Software, 2021,38(3):88-93,104. (in Chinese)

[13] 张佳薇,张晓东,李明宝,等. 不同树种对林间无线传感网信号传播特性的影响[J]. 科学技术与工程,2020,20(36):14875-14881. ZHANG Jiawei, ZHANG Xiaodong, LI Mingbao, et al. The influence of different tree species on the signal propagation characteristics of inter-forest wireless sensor networks[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(36):14875-14881. (in Chinese)

[14] 杭超,李刚,谢卓阜. 2.4 GHz 无线信号在丘陵地区铁路沿线中的衰减模型[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2021,42(1):100-104. HANG Chao, LI Gang, XIE Yuzhuo. Attenuation model of 2.4 GHz wireless channel along the railway in hilly regions[J]. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 2021,42(1):100-104. (in Chinese)

[15] KYUNG-WON K, MYUNG-DON K, JUYUL L, et al. Millimeter-wave diffraction-loss model based on over-rooftop propagation measurements[J]. ETRI Journal, 2020, 42(6): 827-836.

[16] FELIPE M D C, LUIS A R R, MAURICIO H C D. Analysis of ITU-R VHF/UHF propagation prediction methods performance on irregular terrains covered by forest[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2018, 12(8): 1450-1455.

[17] MACQUEEN J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations[J]. Math Statistics and Probability, 1967, 1: 281-297.

[18] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//Mhs95 Sixth International Symposium on Micro Machine & Human Science. IEEE, 2002.

[19] 王万良. 人工智能及其应用[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2020:241-244.

[20] MEZURA-MONTES E, COELLO C. Constraint-handling in nature-inspired numerical optimization: past, present and future[J]. Swarm & Evolutionary Computation, 2011, 1(4):173-194.

[21] MARTIN T H, HOWARD B D, MARK H B, et al. Neural network design second edition[M]. 章毅,译. 北京:机械工业出版社, 2017:216-218.

[22] IEEE 802.11g-2003. Further higher data rate extension in the 2.4 GHz band[S]. IEEE. 2003-10-20.

[23] PEDERSEN M E H. Good parameters for particle swarm optimization[R]. Hvass Computer Science Laboratories, 2010.