

基于 HPSO 的自适应路由节点优化部署策略

樊成鹏¹, 张丽娜²

(1. 重庆华渝电气集团有限公司, 重庆 400021;
2. 中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030051)

摘要: 针对无线网络中的路由节点的部署结构冗杂, 经济成本高, 通信质量差的问题, 提出了一种基于优化混合粒子群算法(HPSO)的自适应路由节点部署策略(ADS); 以最低部署成本为算法寻优目标, 以无线组网节点通信, 空间覆盖完整性等特点为限制条件, 通过优化 HPSO 结合 ADS, 得到应用范围内的最佳的路由节点部署; 首先建立无线通信网络路由节点的部署成本模型, 部署通信距离关系模型, 节点通信负载模型, 自由空间损耗模型; 依据模型确定算法寻优目标及算法限制条件; 然后对 HPSO 进行优化, 加入淘汰机制和多样性补充机制, 在不降低算法效率(寻优时间)的基础上提升算法寻优准确度; 对于空间相邻的路由节点, 设计并采用 ADS 进行部署, 同时优化可视域模型, 缩小 ADS 中可行点集范围, 提高下一节点的部署效率; 文章方法中的 HPSO 与遗传算法(GA)算法和人工免疫算法(AIA)分别结合 ADS 进行对比试验; 仿真结果表明, 文章方法在保证无线通信网络通信质量的基础上, 提升 14%~33% 算法效率, 降低 8%~10% 的路由节点部署成本。

关键词: 节点部署; 混合粒子群算法; 自适应无线通信网络; 路由节点; 自适应机制

Optimal Deployment Strategy of Adaptive Routing Nodes Based on HPSO

FAN Chengpeng¹, ZHANG Lina²

(1. Chongqing Huayu Electric Group Co., Ltd., Chongqing 400021, China; 2. North University of China, School of Information and Communication Engineering, Taiyuan Shanxi Province, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problems of redundant deployment structure, high economic cost, and poor communication quality of routing nodes in wireless networks, and adaptive routing node deployment strategy (ads) based on optimized hybrid particle swarm optimization (HPSO) is proposed. It takes the lowest deployment cost as the algorithm optimization goal, takes the characteristics of wireless network node communication and spatial coverage integrity as the limiting conditions, and obtains the best routing node deployment in the application range by optimizing HPSO combined with ads. Firstly, the deployment cost model, deployment communication distance relationship model, node communication load model, and free space loss model of routing nodes in a wireless communication network are established. According to the model, the optimization objectives and algorithm constraints are determined. Then, HPSO is optimized, and elimination mechanism and diversity supplement mechanism are added to improve the optimization accuracy without reducing the efficiency of the algorithm. For spatially adjacent routing nodes, ads are designed and used for deployment, and the visual domain model is optimized to reduce the range of feasible point sets in ads and improve the deployment efficiency of the next node. In this paper, HPSO is compared with genetic algorithm (GA) and artificial immune algorithm (AIA) combined with ads. The simulation results show that the proposed method improves the algorithm efficiency by 14% ~ 33% and reduces the deployment cost of routing nodes by 8% ~ 10% based on ensuring the communication quality of the wireless communication networks.

Keywords: Node deployment; Hybrid particle swarm optimization; Adaptive wireless communication network; Node routing; Adaptive mechanism

0 引言

近些年随着无线通信技术的不断进步, 在各个领域中对于无线通信网络的应用不断增加, 同时对于无线通信网络的技术研究也在不断发展。节点部署对于无线通信网络的成本, 通信功耗, 通信质量都有着不可忽视的影响^[1,2]。好的节点部署策略可以使无线通信网络有更低的成本, 更低的功耗以及更好的通信质量。

对于无线通信网络, 其结构中包含了终端节点, 路由节点及汇聚节点^[3]。对于终端节点在网络中的位置, 主要取决于终端节点所需要实现的功能。例如在农业物联网的节点部署过程中, 对于温度监测终端节点的部署与光强监测终端节点的部署有不同的部署条件, 其主要取决于农作物所处环境特点, 即在部署过程中, 此类终端节点部署的主要影响因素即实际应用的环境特点。无线通信网络中的

收稿日期: 2021-07-10; 修回日期: 2021-08-11。

基金项目: 山西省应用基础研究项目(201701D221124); 山西省重点研发计划项目(201903D221025); 山西省青年科技基金资助(项目编号: 201801D221236)。

作者简介: 樊成鹏(1989-), 男, 重庆人, 大学本科, 主要从事测试技术与人工智能方向的研究。

引用格式: 樊成鹏, 张丽娜. 基于 HPSO 的自适应路由节点优化部署策略[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 262-267.

汇聚节点主要功能是对整体网络中的数据进行汇聚, 相较于终端节点或汇聚节点, 一般汇聚节点仅有 1 个或几个即可实现对全部网络内数据的处理, 所以在一般的无线通信网络中, 都是以汇聚节点的位置为中心进行其他节点的部署。

对于节点部署的过程, 目前相关学者主要采用智能算法进行寻优, 具体算法包括人工免疫算法 (AIA, artificial immune algorithm)、遗传算法 (GA, genetic algorithm) 等。此类方法中节点坐标获取与功能划分或组网通信是分段完成的, 无法同时将两部分协同寻优, 也正由于此, 此类方法的局限性趋于明显^[4]。

一个完整高效的无线通信网络的设计, 不仅仅在于节点间通讯功能的实现, 更重要的是需要完善的、稳定的数据网络^[5]。对于无线网络的设计, 陈畅等针对网络能耗和寿命问题, 通过对无线通信网络特征的多目标优化算法设计了一种传感器节点智能部署方法, 但其方法仅通过调整组网通信规则, 并未对节点部署有进一步优化研究^[6]。吴海燕等通过优化图论方法实现光传感器节点的优化部署, 但算法中限制条件及因素过多, 虽算法达到理想的寻优结果, 但算法效率降低^[7]。陈欣等提出基于生物地理学优化算法的节点部署策略, 算法优化后寻优效率改进, 但该方法在节点数量变多时寻优精度下降^[8]。但上述研究中对于节点的部署, 均以提升算法寻优的效率或算法精度为优化目标, 对节点的基础部署方法均未研究。宋伟奇等针对无线组网的能耗问题和数据拥塞问题, 通过优化网络节点可靠性权值提出了一种网络节点的优化方法, 但算法中权值需要每次针对特定应用背景进行设置, 不具有通用性^[9]。韦运玲等针对传感器网络特性而影响其寿命的问题, 设计了一种基于自适应人工免疫网络算法的无线通信网络拓扑结构, 虽延长了网络寿命, 但该结构对实际传输应用背景过于限制^[10]。Maheswari 等通过分析 F-SCH (Fuzzy based Super Cluster Head) 方法, 提出了一种利用模糊控制结合自适应结构提高整体网络节点的有效寿命的方法, 但该方法需在超大规模传感网内进行应用^[11]。

上述方法对于无线通信网络的部署策略都有一定的优化研究, 但对于空间自适应节点的部署均未涉及^[12-16]。同时上述方法的算法在优化过程以牺牲算法的准确性来提升算法效率。虽然目前已有众多方法用于优化无线通信网络, 但在路由节点的控制上尚未有明确的优化方法^[16-19]。本文提出一种基于优化混合粒子群算法 (HPSO, hybrid particle swarm optimization,) 结合自适应路由节点部署策略 (ADS, adaptive routing node deployment strategy,) 的路由节点部署方法。

1 算法模型

1.1 路由节点部署成本模型

相关学者对于无线通信网络中的路由节点也有所研究^[19]。

本文针对无线通信网络中如何实现终端到汇聚节点所需部署最低成本的路由节点为算法寻优目标。其中路由节点部署成本主要包括部署的通信距离成本和节点组网关系功耗成本。其部署的总成本计算式如下:

$$P = \alpha \cdot P_x + \beta \cdot P_c \quad (1)$$

1.1.1 路由节点部署通信距离成本模型

路由节点部署过程中的成本, 主要包含节点成本, 部署后的通信功耗成本, 节点部署成本即无线模块的基础成本与数量的积。通信功耗成本包括通信距离产生的成本及组网关系产生的成本。

无线通信网络中的组网可以分为一级通信关系和二级通信关系。一级通信关系即路由节点与路由节点间的组网和路由节点与汇聚节点间的组网。二级通信关系即终端节点与路由节点的组网。

节点间的通信距离计算式如下:

$$d = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2} \quad (2)$$

一级、二级通信关系单位距离的功耗分别是 R_{1d} 、 R_{2d} , 则, 节点间距离为 d_x 时, 一级、二级通信关系产生的功耗如下式:

$$R_{1x} = \omega_{1x} \cdot d_x^2 \cdot R_{1d} \quad (3)$$

$$R_{2x} = \omega_{2x} \cdot d_x^2 \cdot R_{2d} \quad (4)$$

通信距离产生总计成本如下式:

$$P_x = a_x \cdot \sum_{i=1}^n R_{1xi} + b_x \cdot \sum_{j=1}^m R_{2xj} \quad (5)$$

1.1.2 路由节点部署组网结构功耗成本模型

无线网络中组网关系如图 1 所示。

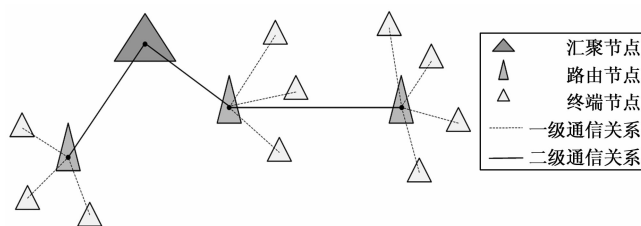


图 1 组网关系示意图

如图 1 中所示, 组网节点结构主要包括汇聚节点、路由节点和终端节点^[20-22]。通信结构主要分为一级通信关系和二级通信关系。汇聚节点仅与路由节点进行通信, 本文假设每一个一级通信关系传输对于发送节点的功耗是 R_{1si} , 接收节点的功耗是 R_{1ri} 。每一个二级通信关系传输对于节点的功耗是 R_{2si} , 接收功耗是 R_{2ri} 。假设共计有 n_1 个一级通信关系, n_2 个二级通信关系。

则该网络组网结构一级通信关系产生的功耗如下式:

$$R_{1c} = \omega_{1c} \cdot n_1 \cdot (R_{1si} + R_{1ri}) \quad (6)$$

则该网络组网结构二级通信关系产生的功耗如下式:

$$R_{2c} = \omega_{2c} \cdot n_2 \cdot (R_{2si} + R_{2ri}) \quad (7)$$

则该网络组网结构产生的总功耗如下式:

$$R = R_{1c} + R_{2c} \quad (8)$$

设组网结构一级通信关系单位功耗产生的成本是 P_{c1} ，二级通信关系单位功耗产生的成本是 P_{c2} 。则组网结构总成本为：

$$P_c = a_c \cdot P_{c1} \cdot R_{1c} + b_c \cdot P_{c2} \cdot R_{2c} \quad (9)$$

路由节点部署过程中的成本，主要包含节点成本，部署后的通信功耗成本。

1.2 路由节点通信距离限制关系模型

本文在路由节点部署时，通信距离应满足数据发送接收双方节点最小通信距离限制，通信限制关系模型如下式：

$$D_h > D_r > D_z \quad (10)$$

即汇聚节点覆盖范围最大，其次是路由节点，终端节点通信距离限制范围最小。

1.3 路由节点通信限制关系模型

在进行路由节点部署时，对于一个节点，其所无线通信节点数是 k ，则：

对于一个汇聚节点，与其通信的节点数量如下：

$$0 < k_h < k_{h\max} \quad (11)$$

对于一个路由节点，与其通信的节点数量如下：

$$0 < k_r < k_{r\max} \quad (12)$$

对于一个终端节点，与其通信的节点数量如下：

$$k_z = 1 \quad (13)$$

即每一个终端节点仅能和一个路由节点通信。

1.4 路由节点部署通信质量评价模型

无线通信网络中，对于通信质量的评估，本文通过自由空间损耗进行比较。自由空间损耗主要与通信频率和通信距离有关。在本文无线通信网络中，一级通信关系采用同一频率，二级通信关系也采用同一频率。故主要用通信距离计算自由空间损耗。

本文中定义每一个通信关系间的自由空间损耗如下式：

$$L = 20 \lg(d + d_L) \quad (14)$$

式中， d_L 是自由空间损耗常数。

2 算法设计

本文方法以 ADS 进行节点坐标部署，并采用优化 HPSO 进行部署迭代寻优，最终得到最低成本条件下的最佳部署结果。总体流程图如图 2 所示。

2.1 优化 HPSO 算法设计

2.1.1 HPSO 设计

本文中 HPSO 主要基于 PSO 并加入 GA 算法特性，使其在迭代过程中也具有交叉，变异等过程，从而更快速寻优。基于优化 HPSO 的流程图如图 3 所示。

算法中，适应度函数计算式如下（在进行粒子种群进化时，适应度值越低则粒子越优秀）：

$$fitness = \frac{K}{\alpha - C} \quad (15)$$

式中 α 为本方法中在计算适应度函数时限制的最高成本。 K 是适应度常数。

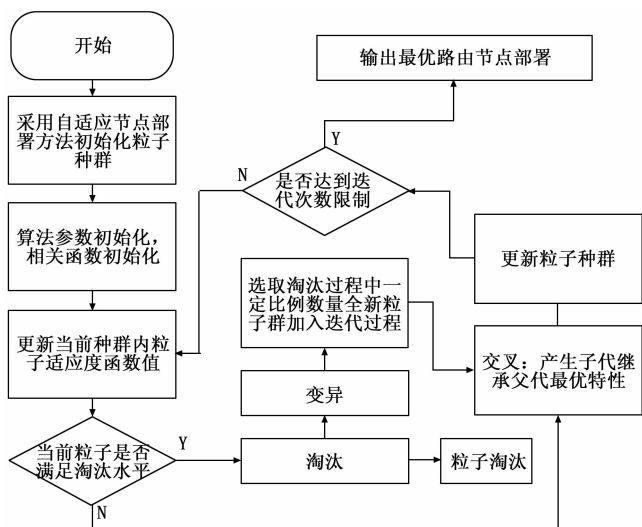


图 2 路由节点部署总体流程图

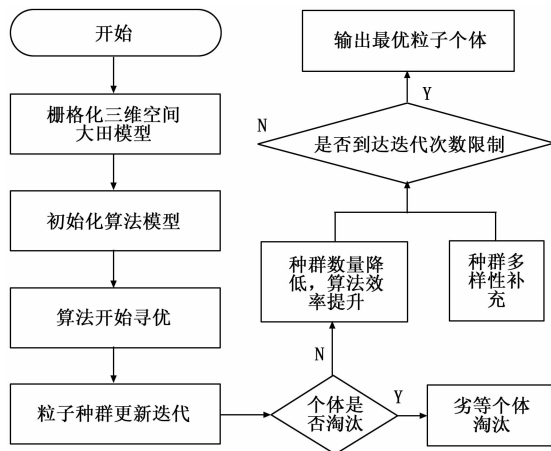


图 3 优化 HPSO 流程图

HPSO 粒子更新表达式如下：

$$V^{k+1} = \omega V^k + l1r1(A_{id}^k - B^k) + l2r2(A_{sid}^k - B^k) \quad (16)$$

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{t * (\omega_{\max} - \omega_{\min})}{t_{\max}} \quad (17)$$

上式即在常规粒子群算法基础上，使惯性权重线性递减，随着迭代的进行，算法搜索越来越精确。

2.1.2 HPSO 淘汰机制

本方法中采用基于优化 HPSO 结合 ADS。本文 HPSO 在优化过程中，随着算法中各个粒子个体适应度值的不断趋优，在算法中采用了淘汰机制，如下式：

$$\begin{cases} fitness_n > fitness_{n+1} \\ fitness_n \leq fitness_{n+1} \end{cases} \quad (18)$$

即子代适应度值优于父代时，子代保留，否则，子代淘汰。在本方法中的淘汰机制中粒子种群进化所需的淘汰比例式如下：

$$W = \frac{V}{n^\beta} - W_0 \quad (19)$$

其中， W 为每代中的淘汰比例， W_0 为淘汰个数最小阈

值, n 为当前迭代的顺序数; β 用于控制在种群迭代过程中淘汰的数量随迭代顺序数变化水平; V 为常数。

2.1.3 HPSO 多样性补充机制

每一代粒子在淘汰过后, 种群多样性迅速下降, 本方法在下一代种群中加入按照一定淘汰比例的随机生成全新粒子, 以补充种群多样性。

$$K = N \cdot \omega \quad (20)$$

即在原有种群中加入 P_1 到 P_K 的个体, 其中 K 与 N 的关系满足 ω 的正比例关系。

2.2 ADS 算法设计

本方法中, ADS 主要采用建立当前节点可视空间范围的方法。在进行路由节点自适应部署时, 从终端传感器节点开始, 采取可视域确立下一节点的方法。从起点起依次进行操作, 在部署完节点后每次与终点进行距离判断, 当与终点距离大于阈值时继续部署, 直至距离终点的长度小于阈值时将当前节点直接与终点相连接。ADS 具体步骤如下:

- 1) 初始化相关参数, 根据实际通信能力确定通信距离阈值。
- 2) 在起点处建立自适应节点部署可视域模型, 确定算法内节点的空间可视域。
- 3) 在已确立的可视域内建立可视域内节点选择模型, 进行第一个路由节点的部署。
- 4) 从起点依次进行所有路由节点的相邻部署。每次进行部署时, 对当前节点与终点的距离进行计算。当此距离大于节点通信最大距离时, 继续进行下一节点的部署。
- 5) 当距离终点的距离小于最大通信距离时, 则不再进行继续部署, 当前节点即为最后一个通信节点。

2.2.1 自适应节点部署可视域模型

在已知当前节点部署坐标后, 下一节点进行自适应部署过程时, 需要在节点可视域内进行部署。路由节点的可视域如图 4 所示。

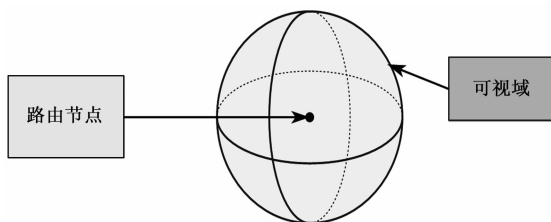


图4 节点可视域示意图

可视域范围如下式:

$$\begin{cases} l_{x\min} < x < l_{x\max} \\ l_{y\min} < y < l_{y\max} \\ l_{z\min} < z < l_{z\max} \end{cases} \quad (21)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 < d_{\max}^2 \quad (22)$$

即可视域内最远坐标小于节点有效通信距离。

2.2.2 可视域内节点选择模型

在已知当前节点部署坐标后, 下一节点进行自适应部

署过程时, 需要在节点可视域内进行部署。

方法中通过当前路由节点与汇聚节点的坐标位置关系, 先缩减可视域范围, 并依据节点实际可部署范围建立可行点集。通过对可行点集内启发函数的计算, 根据选择概率确定下一节点的坐标。缩小可视域范围如图 5 所示。

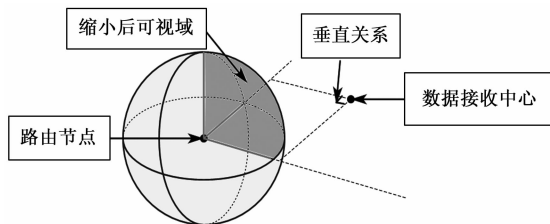


图5 节点缩小后可视域示意图

根据路由节点部署限制范围得到的可行点集原理图如图 6 所示。

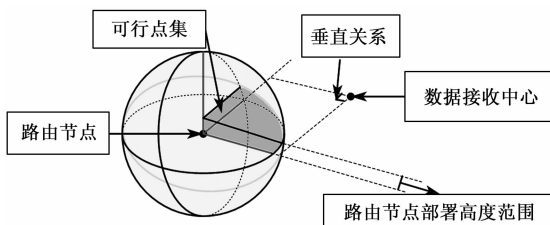


图6 节点可视域内可行点集示意图

启发函数如下式:

$$H(i, j, k) = D(i, j, k)^{w_1} \cdot S(i, j, k)^{w_2} \cdot Q(i, j, k)^{w_3} \quad (23)$$

式中, $D(i, j, k)$ 代表当前节点到下一节点的距离, $Q(i, j, k)$ 代表下一节点到目标节点间的距离, $S(i, j, k)$ 计算式如下:

$$S(i, j, k) = \frac{d - d_{i, i-1}}{d} \quad (24)$$

式中, $d_{i, i-1}$ 代表当前节点可视域和上一节点可视域重合的范围。在完成启发函数的计算后, 选择概率计算方法如下:

$$p(i, u, v) = \frac{\text{fitness}_i \cdot H(i, j, k)}{\sum_{i=1}^n \text{fitness}_i \cdot H(i, j, k)} \quad (25)$$

由上式可以得到下一节点的具体部署坐标。

3 实验与结果分析

本文实验硬件环境为 Inter Core™ i5—4210M CPU @ 2.60 GHz, 运行内存 16 G。采用 Matlab 仿真平台。

3.1 算法参数初始化设定

基于优化 HPSO 算法结合 ADS 的初始化参数设定如表 1 所示。

3.2 结果与分析

实验节点包括 49 个终端传感器和一个汇聚节点。部署区域为 200×200 m 范围, 路由节点通信范围最大为 75 m, 汇聚节点最大通信范围 100 m, 终端节点最大通信距离 50 m, 空间路由节点部署如图 7 所示。

表 1 算法参数

参数	说明	取值
ω_{1x}, ω_{2x}	一、二级通信关系距离成本常数	2.5、1.5
ω_{1c}, ω_{2c}	一、二级通信关系组网结构功耗成本常数	1.5、3.5
R_{1d}, R_{2d}	一、二级通信关系单位距离通信功耗	0.05、0.02
R_{1si}, R_{2si}	一、二级通信关系单位组网结构发送节点功耗	0.02、0.01
R_{1ri}, R_{2ri}	一、二级通信关系单位组网结构接收节点功耗	0.05、0.04
P_{1c}, P_{2c}	一、二级通信关系单位组网结构接收节点功耗成本	0.01、0.01
a_x, b_x	一、二级通信关系距离单位功耗所需成本	0.02、0.01
k_{hmax}, k_{rmax}	汇聚节点、路由节点最大通信数量	8、6
a_c, b_c	一、二级通信关系组网结构成本常数	5、3
α, β	通信距离成本和组网机构成本权重	0.8、0.2
d_{1L}, d_{2L}	一级、二级通信关系自由空间损耗常数	30、25

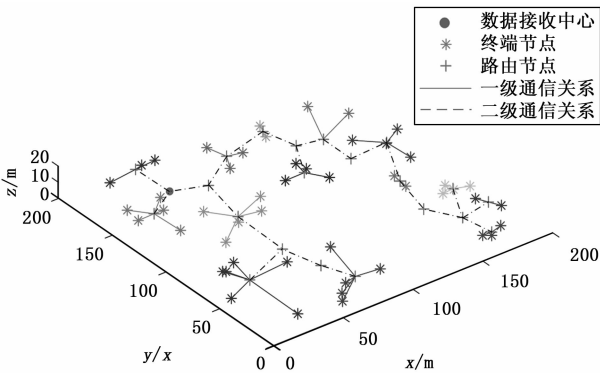


图 7 空间路由节点部署图

在上述实验的基础上，本文分别采用 ADS 与 GA 和 AIA 与本文方法进行对比试验^[23-24]。

3 种方法进行三十次算法迭代后得到的通信距离变化过程如图 8 所示。

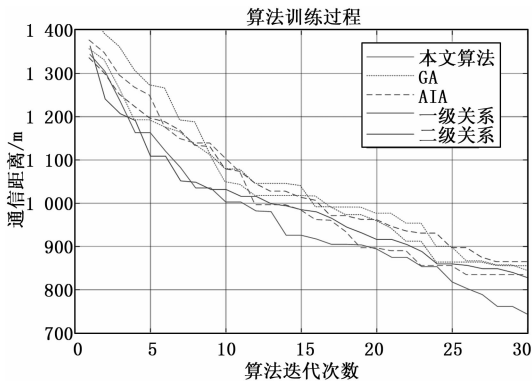


图 8 通信距离变化过程图

由图 8 可得，3 种方法在刚开始迭代时并未出现明显差距，随着迭代的进行，本文方法较其他两种方法通信距离

更低，随着迭代次数的增加，本文方法的寻优精确度越来越高。

3 种方法得到的一级通信关系、二级通信关系距离如图 9 所示。

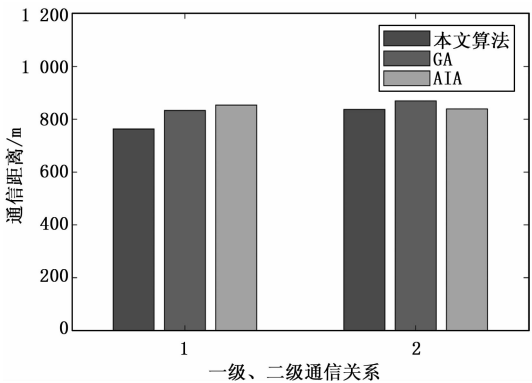


图 9 3 种方法一级、二级通信关系图

由图 9 可得，较 GA 与 AIA，本文方法的一级、二级通信关系的通信距离均是最小。

由表 2 数据可得，本文方法具有最低的自由空间损耗，即本文方法所部署得到的路由节点网络结构通信质量较好。

表 2 3 种方法实验结果

方法	一级通信关系功耗		二级通信关系功耗		自由空间损耗	总成本	寻优时间/s
	通信距离	组网结构	通信距离	组网结构			
本文方法	5.85	2.21	2.56	8.75	106.41	14.18	42
GA	5.67	2.58	3.00	9.63	109.66	15.29	48
AIA	6.39	2.69	2.88	9.28	111.04	15.67	56

本文方法相较于 GA 和 AIA，在保证通信质量的基础上，路由节点部署成本可降低 8%~10%，算法迭代效率（寻优时间）可提升 14%~33%。

4 结束语

近些年来，无线通信技术的不断发展，致使了无线通信网络的不断成熟。无线通信网络中，节点部署是影响其特性是否良好的关键因素之一。高效的节点部署可以降低网络成本，提高网络通信质量。节点部署的核心即以已知环境作为条件进行最佳的网络结构寻优。对于一个无线通信网络，一般其汇聚节点位置最先确定，终端节点的部署主要取决于网络功能与环境间的相互影响，则需要进行部署的即为无线网络内的路由节点。

本方法首先用自适应性的节点部署顺序，将 HPSO 进行初始化处理，并加入淘汰机制有效提高了整体算法的寻优效率。本方法较 AIA 和 GA 而言，降低了节点部署的成本条件下，提高了算法效率。同时本方法结果中通信负载大的路由节点较少，将总通信任务尽可能均匀分布，提高了节点寿命。

参考文献:

- [1] 李明, 胡江平, 曹晓莉. 异构传感网成本优化的节点部署策略[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 04 (10): 11-13.
- [2] 张耀, 王珂琦. 无线通信网络非等间距节点负载部署研究仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38 (2): 141-144.
- [3] 孙环, 陈宏滨. 基于萤火虫算法的无线传感器网络节点重部署策略[J]. 计算机应用, 2021, 41 (2): 492-497.
- [4] 马千里, 袁易, 申朝晖. 异构无线传感器网络中继节点部署算法[J]. 计算机工程, 2020, 46 (12): 171-178.
- [5] 宋晓雪, 魏路, 林水生. 无线自组网的自适应同步技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40 (9): 2113-2118.
- [6] 陈畅, 陈珉, 刘威. 基于多目标优化的无线传感网无干扰簇算法[J]. 武汉大学学报(理学版), 2020, 66 (2): 167-176.
- [7] 吴海燕, 陈海英. 基于图论的光传感器节点部署优化研究[J]. 激光杂志, 2020, 41 (6): 116-120.
- [8] 陈欣, 葛耿育, 刘银梅, 等. 基于BBO算法的WSN覆盖与连接节点部署方案[J]. 计算机应用研究, 2021, 38 (1): 260-263.
- [9] 宋伟奇, 王代远. 基于节点优化的无线传感网络拓扑控制方法研究[J]. 广西民族大学学报(自然科学版), 2019, 25 (3): 80-83.
- [10] 韦运玲. 自适应人工免疫网络算法的无线传感网络拓扑结构优化[J]. 电子测量技术, 2020, 43 (1): 85-89.
- [11] MAHESWARI D U, SUDHA S, MEENALACHANI M. Fuzzy based adaptive clustering to improve the lifetime of wireless sensor network [J]. China Communications, 2019, 16 (12): 56-71.
- [12] XUN BIAN, ZHANG CHAOMIN, ZHAO JINWEN. Research on new college Chinese teaching strategy based on SNS network platform and improved particle swarm optimization [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2020, 2020 (3): 15-19.
- [13] PHOEMPHON S, SO-IN C, LEELATHAKUL N. A hybrid localization model using node segmentation and improved particle swarm optimization with obstacle-awareness for wireless sensor networks [J]. Pergamon, 2020, 143: 113-144.
- [14] LIU P, XIE M, BIAN J, et al. A Hybrid PSO-SVM Model
无线电教学平台[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [13] PENG S, MORTON Y. A USRP2-based reconfigurable multi-constellation multi-frequency GNSS software receiver frontend [J]. GPS Solutions, 2013, 17 (1): 89-102.
- [14] WELCH T B, SHEARMAN S. Teaching software defined radio using the USRP and LabVIEW [C] //2012 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP), IEEE, 2012.
- [15] 李红娟, 胡圣波. 基于USRP+GNU Radio的RFID平台的研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2013, 31 (5): 87-91.
- [16] 杨宇红, 袁焱, 田砾. 通信原理实验教程: 基于NI软件
- Based on Safety Risk Prediction for the Design Process in Metro Station [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17 (5): 1714.
- [15] ARUNA R, SUBRAMANIAN R, SENGOTTUVELAN P, et al. Optimized energy efficient route assigning method using related node discovery algorithm in MANET [J]. Cluster Computing, 2019, 22 (1): 45-56.
- [16] JAYACHITRA S, NELSON KENNEDY BABU C. Secured QoS Routing and Data Communication in Mobile Ad Hoc Network [J]. Asian Journal of Research in Social Sciences and Humanities, 2016, 6 (8) 3-9.
- [17] 刘鹏, 孟欣, 唐苏琼, 等. 基于自适应果蝇优化算法的分层异构无线传感器网络三维优化部署[J]. 传感技术学报, 2020, 33 (7): 1033-1040.
- [18] 胡坚, 胡峰俊, 张红, 等. 基于改进布谷鸟搜索算法对水质监测无线传感器部署的优化[J]. 浙江农业学报, 2020, 32 (5): 897-903.
- [19] 马千里, 袁易, 申朝晖. 异构无线传感器网络中继节点部署算法[J]. 计算机工程, 2020, 46 (12): 171-178.
- [20] 张桂红. 遗传算法在海上无线传感器优化配置中的应用[J]. 舰船科学技术, 2019, 41 (22): 148-150.
- [21] 金合丽, 刘半藤, 陈唯, 等. 基于遗传算法的水下传感器网络节点部署算法研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32 (7): 1083-1087.
- [22] MOHAMMADI SOLMAN, FARAHANI GHOLAMREZA. A new algorithm inspired by Impala Mexican Wave with variable stride for relay node placement as a nested reverse p-median problem in disjoint wireless sensor networks [J]. Wireless Networks, 2021, 2 (10): 1-17.
- [23] GANESAN T, et al. A novel genetic algorithm with CDF5/3 filter-based lifting scheme for optimal sensor placement [J]. International Journal of Innovative Computing and Applications, 2021, 12 (2-3): 12-15.
- [24] MAHSA ZAMENI and AREF REZAEI and LEILI FARZIA-VASH. Two-phase node deployment for target coverage in rechargeable WSNs using genetic algorithm and integer linear programming [J]. The Journal of Supercomputing, 2021, 77 (4): 4172-4200.
- [17] 闫为国. 基于LabVIEW的虚拟频谱分析仪的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [18] 裘伟廷. 基于LabVIEW的虚拟仪器和虚拟实验[J]. 现代科学仪器, 2002 (3): 20-23.
- [19] 韩保坤. 基于GNU Radio的MPSK通信系统设计和实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
- [20] 王晓丽. 基于USRP的软件无线电实验平台设计[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [21] 苟双全, 郭文龙, 陈军. 巴克码检测模型分析及仿真设计研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2013 (6): 30-31.