

# 基于改进灰狼算法的无线传感网络节点覆盖优化方法

刘凯<sup>1</sup> 李婷<sup>1</sup>  
LIU Kai LI Ting

## 摘要

无线传感网络部署在动态环境中时,节点位置或环境条件可能随时间变化,节点位置的调整需要综合考虑覆盖范围、节点密度和网络连通性等多重因素,这使得节点覆盖优化问题涉及高维解空间。传统灰狼算法采用随机初始化时,初始解集分布不均,优化过程容易陷入局部最优,导致覆盖率下降。为此,文章提出一种基于改进灰狼算法的无线传感网络节点覆盖优化方法。根据区域覆盖原则和节点均匀分布要求,计算传感器扇形的覆盖范围半径并确定扇形内节点坐标位置,设计初始部署方案,并利用覆盖率指标筛选初始方案,确保初始解集的质量。采用改进的灰狼算法对选定的初始方案进行优化。在算法初始化阶段,引入 Tent 混沌映射技术确保初始解集的均匀分布,避免算法陷入局部最优。在迭代过程中,模拟狼群的捕食行为更新节点位置,实现节点在网络区域内的精细调整,逐步逼近最优解。引入莱维飞行机制实现大范围的跳跃搜索,增强全局搜索能力。通过预设的适应度函数评估每个灰狼个体的适应度值,指导算法的搜索方向。在达到最大迭代次数后,输出网络节点最优部署方案。实验结果表明,该方法能够显著提升无线传感网络的节点覆盖率,实现更加均匀且全面的网络覆盖,具有实际应用价值。

## 关键词

无线传感网络;节点覆盖优化;改进灰狼算法;最优部署方案;覆盖率

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.07.031

## 0 引言

无线传感器网络作为一种关键的信息采集和处理技术,在多个领域展现出广泛应用潜力。然而,节点覆盖率一直是制约其性能提升的关键因素。低覆盖率会导致监测区域出现盲区,影响数据准确性和完整性,同时造成资源浪费和能效降低。针对这一问题,许多学者展开了深入研究,提出了多种优化策略,但仍存在一定的局限性。其中,基于改进烟花算法的无线传感器网络覆盖优化策略,通过引入烟花算法

的爆炸搜索机制,对节点的位置进行优化调整,提高了节点的覆盖率<sup>[1]</sup>。在动态环境中,节点位置和环境条件不断变化,爆炸搜索的范围可能无法适应这种变化,导致新解生成局限于局部区域,难以跳出局部最优。基于邻居信息的无线传感网络节点覆盖优化方法,通过利用邻居节点的位置信息,对节点的部署进行调整,实现更加均匀的覆盖<sup>[2]</sup>。但该方法主要依赖邻居节点的位置信息进行局部调整,缺乏全局搜索能力,在高维解空间中容易陷入局部最优。基于多策略改进蝴蝶优化算法的无线传感网络节点覆盖优化,通过结合多种优化策略,对蝴蝶优化算法进行了改进,提高了节点的搜索效

1. 郑州工商学院信息工程学院 河南郑州 450000

[12] 沈涛,张秀再,许岱.改进 RT-DETR 的遥感图像小目标检测算法[J/OL]. 计算机科学,1-13[2025-03-11].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1075.tp.20250307.0953.002.html>.

[13] 宋佳.基于 FCN-DARG 的区域举证图斑和恢复属性提取技术[J].北京测绘,2024,38(12):1734-1738.

[14] 王元新,吕新荣,任鹏.基于 PSPNet 和 DBSCAN 的苔藓遥感影像快速解译方法设计[J].遥测遥控,2025,46(2):100-108.

## 【作者简介】

刘明阳(2004—),男,辽宁朝阳人,本科在读,研究方向:嵌入式系统开发、深度学习, email: lmy1211lmy@163.com.

陈美琳(2002—),女,河北沧州人,本科,研究方向:电子信息工程, email: cml\_0509@163.com.

巩荣芬(1979—),通信作者(email: chu52\_2004@163.com),女,辽宁鞍山人,博士研究生,副教授,研究方向:模式识别与智能系统。

(收稿日期: 2025-03-11 修回日期: 2025-07-07)

率和覆盖率<sup>[3]</sup>。在动态环境中，节点位置和环境条件的变化可能导致优化目标函数发生变化，而蝴蝶优化算法无法快速适应这种变化，导致优化过程停滞，节点覆盖率提升有限。基于蛙跳算法的无线传感器网络节点重部署，通过模拟蛙跳的跳跃行为，对节点的位置进行迭代调整，实现了更加优化的覆盖<sup>[4]</sup>。但蛙跳算法主要依赖局部跳跃行为进行搜索，缺乏全局搜索能力，在高维解空间中容易陷入局部最优，无法持续保持高效的网络覆盖。

尽管上述方法在一定程度上提升了无线传感器网络节点的覆盖率，但在动态环境中仍存在初始解集分布不均、优化过程容易陷入局部最优以及动态适应性不足等问题，导致覆盖率仍有较大的提升空间。因此，本文提出基于改进灰狼算法的无线传感器网络节点覆盖优化方法，利用灰狼算法的智能搜索和群体协作机制调整节点位置，旨在实现更高的覆盖率和更优的网络性能。

### 1 无线传感器网络节点初始部署方案设计

在无线传感器网络（WSN）中，不同的应用场景，如环境监测、军事侦察、智能交通等，对网络覆盖范围、能耗、数据传输效率及整体性能有着各自独特需求。在某些场景中，目标区域可能随时间变化，如移动目标监测，因此部署方案须具备动态调整的能力。合理的初始部署能确保目标区域内的每个位置至少被一个传感器节点覆盖，避免覆盖盲区。因此，本研究在初始部署方案设计时，首先遵循传感器节点的均匀分布原则，确保网络区域内任意位置都能被至少一个节点感知。针对节点数量分布不均匀的情况，采用灵活可调的部署策略，通过调整节点数量或覆盖半径来适应不同的密度需求；通过覆盖率判断，识别并消除覆盖盲区，保证监测区域的全面覆盖。

在无线传感器网络节点密集度的设计上，本文采用灵活可调的策略，以适应不同场景下的密度需求，具体通过调整节点数量或覆盖半径来实现。同时，本文明确了每个传感器节点的信息采集范围，即每个节点覆盖一个固定的扇形区域，且其采集半径保持为常量。为了准确计算无线传感器网络中任意采集点被覆盖的概率，本文提出了基于各传感器采集概率乘积的计算方法。信息采集点被覆盖的概率可以通过公式表示：

$$F = 1 - \prod_{k=1}^N (1 - F_{kj}) \quad (1)$$

式中： $F_{kj}$ 表示无线传感器网络采集点 $k$ 被传感器节点 $j$ 覆盖的概率<sup>[5]</sup>。

在此基础上，本文通过计算各传感器扇形的覆盖范围半径，并依据该半径确定了扇形内各节点的坐标位置，设计了无线传感器网络节点的初始部署方案，具体用公式表示为：

$$(a_n, b_n) = (sc, hc) + (\Delta a_n, \Delta b_n) \quad (2)$$

式中： $(a_n, b_n)$ 表示扇形内无线传感网络节点 $n$ 的坐标； $c$ 表示节点 $n$ 所在扇形的半径； $s$ 和 $h$ 分别表示水平方向和垂直方向的调整参数； $(\Delta a_n, \Delta b_n)$ 表示在扇形内对无线传感网络节点进行微调的偏移量。

对式(2)所给出的部署方案，利用式(1)进行覆盖率判断，最终选择覆盖率超过50%的方案作为本文生成的无线传感网络节点初始部署方案。

### 2 基于改进灰狼算法的无线传感器网络节点部署方案优化

初始部署方案虽然满足覆盖率超过50%的要求，但基于固定规则（如均匀分布），无法适应复杂环境或动态需求。为此，在初始部署方案的基础上，采用了经过优化的灰狼算法（grey wolf aptimizer, GWO）来进行部署方案的优化。灰狼算法本身具有高效收敛性和简洁的参数配置。在算法初始化阶段，引入Tent混沌映射技术，使用Tent混沌映射生成一系列在无线传感网络空间内均匀分布的初始节点位置。在迭代流程中，基于节点与领导狼之间的相对位置以及相应的系数，更新无线传感网络节点的位置，模拟狼群的包围、狩猎和攻击行为，推动解集逐步逼近最优解，确保初始节点部署方案在解空间内均匀分布，有效缓解早熟收敛问题。通过不断优化和调整节点的位置，改进后的灰狼算法能够提高无线传感网络节点的覆盖率，优化整体布局。

Tent混沌映射的具体实现过程可以通过公式进行表示：

$$x_{i,j}^{(n+1)} = \begin{cases} x_{i,j}^{(n)}, & 0 \leq x_{i,j}^{(n)} < r \\ \frac{1-x_{i,j}^{(n)}}{1-r}, & r \leq x_{i,j}^{(n)} \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $x_{i,j}^{(n)}$ 表示第 $n$ 次迭代时第 $i$ 个无线传感网络节点部署方案的第 $j$ 维的值； $r$ 表示一个常数，通常取值为0.5或小于1的正数。

通过Tent混沌映射的迭代计算，能够生成一系列在无线传感网络空间内均匀分布的初始节点位置的坐标。

在改进灰狼算法的迭代流程中，无线传感网络节点的位置更新基于其与领导狼之间的相对位置以及相应的系数。这一过程模拟了狼群在狩猎时的包围、狩猎和攻击行为，推动解集逐步逼近最优解。无线传感网络节点位置的更新过程用公式表示为：

$$x_i^{(t+1)} = X_{\text{lead}} + \mathbf{Z} \cdot \left| \mathbf{B} \cdot (X_{\text{lead}} - x_i^{(t)}) \right| \quad (4)$$

式中： $x_i^{(t)}$ 表示无线传感网络节点 $i$ 在第 $t$ 次迭代时的位置； $X_{\text{lead}}$ 表示领导狼的位置； $\mathbf{Z}$ 和 $\mathbf{B}$ 表示系数向量，用于控制搜索的方向和步长。

基于前述生成的初始部署方案和改进灰狼算法的优化机

制, 本文进一步应用改进的灰狼算法在初始方案中找出无线传感网络节点的最优部署方案。具体流程如图 1 所示。

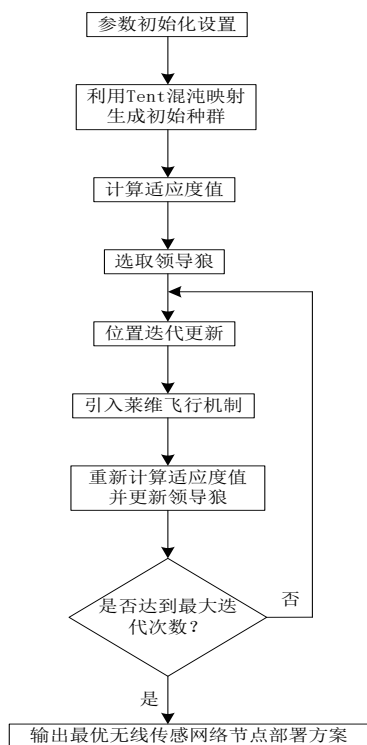


图 1 输出无线传感网络节点最优部署方案

在进行参数初始化设置时, 根据无线传感网络节点的实际部署需求, 设定灰狼种群规模为  $pop$ , 以充分探索节点部署的解空间。将问题求解的维数设为 2, 表示无线传感网络节点的二维坐标信息。同时, 将最大迭代次数设为  $T_{max}$ , 确保改进的灰狼算法能够在有限的时间内找到无线传感网络节点的最优部署方案。此外, 对改进的灰狼算法中的关键参数  $Z$  和  $B$  进行初始化赋值, 和控制节点位置的更新步长和收敛速度。利用式 (3) 的 Tent 混沌映射随机产生一系列灰狼个体, 形成初始种群, 这些个体代表可能的无线传感网络节点部署方案。

计算每个无线传感网络节点部署方案的适应度函数, 挑出适应度值排名前三的无线传感网络节点部署方案作为领导狼<sup>[6]</sup>。利用式 (4) 的无线传感网络节点位置更新机制, 不断进行重复迭代, 逐步逼近更优解空间<sup>[7]</sup>。每次迭代后, 重新计算适应度值并更新领导狼及其无线传感网络节点位置信息。

为了增强改进灰狼算法的探索能力, 本文引入莱维飞行机制。通过比较随机数与预设概率的大小, 决定是否对当前的无线传感网络节点部署方案执行莱维飞行操作, 以解决传统方法容易陷入局部最优解的问题。这一概率  $P(t)$  可以通过公式表示为:

$$P(t) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{T_{max}}, & t < T_{max} \\ 0, & t \geq T_{max} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $t$  表示迭代次数。

每次莱维飞行优化后, 对灰狼个体进行排序, 并保留前 3 个个体的适应度值作为后续迭代的比较依据。

当迭代到一定程度时, 检查当前迭代次数是否达到  $T_{max}$ 。如果还未达到, 那么返回到式 (4) 的位置更新。如果已达到, 则输出此时的无线传感网络节点部署方案, 即为本文的最优无线传感网络节点部署方案。

### 3 实验

#### 3.1 实验准备

在对无线传感网络节点进行覆盖优化实验之前, 本文首先采用 MATLAB 作为仿真平台, 模拟无线传感网络的运行和节点覆盖情况。并根据无线传感网络的特点, 设定了一系列的实验参数, 具体如表 1 所示。

表 1 无线传感网络参数表

序号	参数名称	参数值
(1)	网络区域大小	100 m × 100 m
(2)	节点总数	50 个
(3)	节点感知半径	10 m
(4)	节点通信半径	20 m
(5)	初始节点部署方式	随机部署
		采用一阶无线电能消耗模型
(6)	节点能量模型	发送能耗: 50 nJ·bit <sup>-1</sup> ·m <sup>2</sup> 接收能耗: 50 nJ/bit
(7)	数据包大小	256 bit/s
(8)	数据发送频率	1 次/min
(9)	网格大小	1 m × 1 m

根据表 1 的参数, 对无线传感网络的实际运行状态进行模拟。

#### 3.2 实验方案设计

为了验证研究方法的优越性, 本文设计对比实验。将本文提出的改进灰狼算法作为方法 1, 基于改进烟花算法的无线传感器网络覆盖优化策略作为方法 2, 基于邻居信息的无线传感网络节点覆盖优化方法作为方法 3, 基于多策略改进蝴蝶优化算法的无线传感网络节点覆盖优化作为方法 4。

在 MATLAB 仿真环境中, 根据表 1 所列的参数, 构建一个 100 m × 100 m 的二维网络区域, 并随机部署 50 个无线传感网络节点。每个节点具有 10 m 的感知半径和 20 m 的通信半径, 采用一阶无线电能消耗模型模拟节点的能量消耗情况。为评估节点的覆盖情况, 将网络区域划分为 1 m × 1 m 的网格, 并计算被感知网格数与总网格数的比例作为覆盖率指标。对于每种方法, 本文将在相同的仿真条件下进行多次实验, 以获取稳定的实验结果。

### 3.3 实验结果及分析

在完成了实验准备和方案设计之后，本文进一步实施了对比实验，并对实验结果进行了详细的分析。四种不同覆盖优化方法的节点部署结果如图 2 所示。

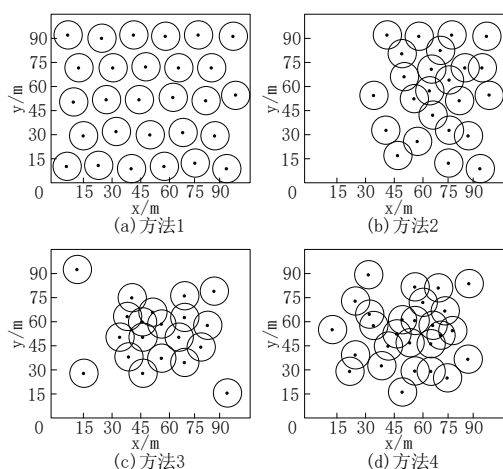


图 2 四种覆盖优化方法节点部署对比图

从图 2 中可以看出，相比其他方法，通过应用本文的改进灰狼算法后，无线传感网络的节点分布最均匀，基本不存在覆盖盲区，同时有效避免了节点过度集中现象的发生。这一优势主要源于引入 Tent 混沌映射技术，确保初始解集的均匀分布，为后续优化提供了良好基础。在迭代过程中，模拟狼群的捕食行为更新节点位置，逐步逼近最优解。这种智能优化机制使得节点能够在网络区域内进行更加精细的位置调整。这种调整不仅优化了节点的整体布局，还确保每个节点都能以最大的感知范围覆盖网络区域，有效减少了未被感知的区域，达到了更优的布局。

为了进一步验证 4 种方法的性能，本文对它们的节点覆盖率进行了统计，结果如图 3 所示。

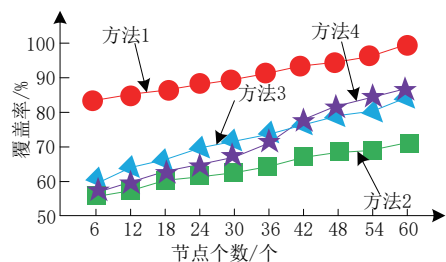


图 3 四种覆盖优化方法节点覆盖率对比结果

从图 3 中可以看出，在不同的节点数量下，本文方法的节点覆盖率都显著优于对比方法。这一优异结果主要得益于采用改进的灰狼算法对初始部署方案的优化。以覆盖率超过 50% 的方案作为初始部署方案，在此基础上引入 Tent 混沌映射技术，确保初始解集均匀分布，增加算法多样性。在迭代过程中，模拟狼群的捕食行为更新节点位置，逐步逼近最优解。同时，引入莱维飞行机制，实现大范围跳跃搜索，避免

算法陷入局部最优，增强全局搜索能力。这种智能优化机制使得节点在网络区域内进行精细调整，优化整体布局，提高节点利用率，确保网络区域得到更加全面和均匀地覆盖。

### 4 结语

本文研究基于无线传感网络的动态环境特性和覆盖需求，设计了符合区域覆盖原则和节点均匀分布要求的初始部署方案，并通过覆盖率指标筛选确保了初始方案的质量。为了进一步优化节点覆盖率和部署策略，采用改进的灰狼算法，引入了 Tent 混沌映射技术以保证初始解集的均匀分布，提升了算法的全局搜索性能。同时，莱维飞行机制的加入增强了算法的探索能力，有效避免了陷入局部最优。通过迭代过程中灰狼个体位置的精细调整，并综合考虑节点间的距离均衡性和覆盖连贯性，最终得出了节点分布均衡且覆盖率最大化的无线传感网络节点最优部署方案。实验结果表明，本文提出的改进灰狼算法使得无线传感网络节点分布更均匀，且节点覆盖率显著提升。该算法有效减少了覆盖盲区，提高了网络的整体性能。

### 参考文献：

- [1] 张军悛, 张翠萍, 谢凤玲. 基于改进烟花算法的无线传感器网络覆盖优化策略[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(11): 127-130.
- [2] 张雪梅, 张起贵. 基于邻居信息的无线传感网络节点覆盖优化方法[J]. 传感技术学报, 2023, 36(9): 1478-1483.
- [3] 韦修喜, 彭茂松, 黄华娟. 基于多策略改进蝴蝶优化算法的无线传感网络节点覆盖优化[J]. 计算机应用, 2024, 44(4): 1009-1017.
- [4] 徐逸夫, 段隆振. 基于蛙跳算法的无线传感器网络节点重部署[J]. 计算机仿真, 2021, 38(10): 328-332.
- [5] 谢珊, 马琳娟, 苏鑫, 等. 无线传感器网络覆盖优化的混沌交叉人工蜂群算法[J]. 南京理工大学学报, 2024, 48(3): 360-366.
- [6] 张士荣, 赵俊杰, 谈发明. 基于多策略混合改进 HHO 算法的 WSN 节点覆盖优化[J]. 计算机工程与设计, 2024, 45(2): 328-338.
- [7] 孟建军, 马军惠, 陈晓强, 等. 双线轨道无线传感网络节点优化部署策略[J]. 无线电工程, 2023, 53(11): 2725-2730.

### 【作者简介】

刘凯(1995—), 女, 河南郑州人, 硕士, 助教, 研究方向: 智能优化算法、深度学习、数据挖掘。

李婷(1996—), 女, 山西长治人, 硕士, 助教, 研究方向: 机器学习、数据挖掘。

(收稿日期: 2025-03-07 修回日期: 2025-07-03)