

无线传感器网络中基于 μ 律爆炸算子的 烟花虚拟力混合覆盖策略

滕志军^{1,2}, 李 哲^{2†}, 王幸幸², 杜春秋², 李 梦²

(1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室, 吉林 吉林 132012;

2. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 针对烟花算法在无线传感器网络节点部署过程中易陷入局部最优导致节点分布不均匀、后期收敛速度慢等问题, 本文提出一种基于 μ 律爆炸算子的烟花虚拟力混合算法(μ FW-VFA)。首先, 采用 μ 律特性曲线重新定义爆炸算子, 增强烟花间的差异性, 通过动态调整 μ 值使烟花爆炸的数目和幅度随迭代次数动态调整, 以平衡烟花局部和全局的寻优能力。其次, 引入虚拟力调节停滞烟花内传感器节点的位置信息, 加速烟花种群进化, 增强算法跳出局部最优的能力, 提高算法收敛速度。仿真实验表明, 经 μ FW-VFA部署后, 网络的重叠区域和监测盲区显著减少, 有效提升了网络覆盖率并压缩节点移动距离。

关键词: 无线传感器网络; μ 律爆炸算子; 烟花算法; 虚拟力; 覆盖率

引用格式: 滕志军, 李哲, 王幸幸, 等. 无线传感器网络中基于 μ 律爆炸算子的烟花虚拟力混合覆盖策略. 控制理论与应用, 2023, 40(5): 817–824

DOI: 10.7641/CTA.2021.10415

Fireworks virtual force mixture covering strategy based on μ -law explosion operator in wireless sensor networks

TENG Zhi-jun^{1,2}, LI Zhe^{2†}, WANG Xing-xing², DU Chun-qiu², LI Meng²

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012, China;

2. College of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012, China)

Abstract: The firework algorithm is easy to fall into a local optimum in the application of node coverage for wireless sensor networks. In order to solve the problems of uneven distribution of nodes and slow convergence, a novel hybrid firework-virtual force algorithm based on the μ -law is proposed. Firstly, redefine the explosion operator with the aid of μ -law so that the number and amplitude of fireworks explosions will be dynamically adjusted by resizing the value of μ in different iterations, which means that fireworks are more diverse. Secondly, the virtual force is introduced to adjust the position information of sensor nodes in the stagnant fireworks, which can accelerate the evolution of the fireworks population. Through the above approaches, the improved algorithm can jump from the local optimal solution and accelerate convergence. Accordingly, the algorithm can avoid an uneven distribution of nodes in the application of node coverage. Simulation experiments demonstrate that the algorithm can significantly reduce the overlapping areas and monitoring blind areas of the network, and meanwhile, the algorithm effectively increases the node coverage and compresses the node moving distance.

Key words: wireless sensor networks; μ -law explosion operator; fireworks algorithm; virtual force; coverage rate

Citation: TENG Zhijun, LI Zhe, WANG Xingxing, et al. Fireworks virtual force mixture covering strategy based on μ -law explosion operator in wireless sensor networks. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(5): 817–824

收稿日期: 2021–05–17; 录用日期: 2021–12–23.

[†]通信作者. E-mail: 1761669036@qq.com; Tel.: +86 13844232747.

本文责任编辑: 陈积明.

国家自然科学基金青年科学基金项目(61501107), 吉林省教育厅“十三五”科学研究规划项目(JJKH20180439KJ)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation Youth Science Foundation Project (61501107) and the 13th “Five-Year” Scientific Research Planning Project of Jilin Province Department of Education (JJKH20180439KJ).

1 引言

近年来,无线传感器网络凭借其组网灵活、部署简单、适应性强被广泛应用在军事侦察、环境监测、智能家居等领域^[1-3].但由于节点一般采用空中随机抛洒的部署方式,易在局部区域产生监测盲区或节点密集度高的冗余区,监测盲区使无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)达不到对监测区域的有效覆盖,影响监测质量,冗余区则会导致节点进行无意义的监测和转发数据,徒增网络功耗,降低网络的寿命,更可能会由于节点的不规则分布出现网络连通性受阻,导致整个网络瘫痪.因此节点覆盖成为整个无线传感器网络建立的一个主要问题^[4-5].

目前,动态传感器节点部署方式分为虚拟力算法^[6-7]、计算几何算法^[8-9]和智能优化算法^[10-12].由于智能算法中的生物群体与WSN传感器节点非常相似,因此智能算法成为了解决WSN网络节点部署的基本方法. Houssein等^[13]利用莱维飞行概念提出一种新的智能算法,并将其应用到WSN节点部署中,仿真表明算法提升了覆盖性能,最小化了传感器节点之间的重叠. Miao等^[14]将具有增强层次结构的灰狼算法应用到WSN节点优化部署中,通过引入自适应权重来调整灰狼的层次结构,增强了全局搜索的能力. Aparajita等^[15]将萤火虫算法与Voronoi图和k-means算法相结合应用在动态WSN节点部署中,减少了节点移动消耗的能量,但算法的复杂度较高,节点部署时间少. Deepa等^[16]提出一种嵌入莱维飞行机制的鲸鱼优化算法,该算法通过莱维飞行显著提升算法全局搜索能力,极大增强节点覆盖效率,但增加了节点的移动距离. 周非等^[17]采用Voronoi图内未覆盖网格点对传感器节点进行虚拟力驱动的同时,利用Delaunary三角对传感器节点进行重定位对网络进行优化,仿真表明该算法在提高覆盖率的同时加快了收敛的速度,但增加了节点的能耗.

烟花算法^[18](fireworks algorithm, FWA)是模拟烟花在空中爆炸这一物理现象提出的新型智能优化算法,凭其优越的寻优性能被广泛应用于路径规划^[19]、资源分配^[20]、数据聚类、预测^[21]等优化问题.但是基本FWA与其他群智能算法一样在求解优化问题时仍易陷入局部最优、求解精度低等问题,因此,国内外学者对FWA进行改进使其能更好的应用到优化问题的求解.如薛裕颖等^[22]提出具有量子行为的烟花算法以解决机器人路径规划问题,提高了规划路径的安全度和光滑度. Zhang等^[23]将具有增强信息交互的烟花算法应用到高速列车调度问题,通过爆炸算子和迁移算子相结合与采用新的种群选择策略来增强信息共享,提高种群的多样性并抑制早熟,提高了列车运行的经济效益. Tuba等^[24]将增强型烟花算法应用到无线传感

器网络节点部署中,通过改进变异算子和选择策略增强了算法后期的局部寻优能力,提升了网络监测质量.

针对烟花算法后期烟花差异性不明显导致的寻优性能低的问题,本文提出基于 μ 律爆炸算子的烟花虚拟力相结合的WSN覆盖策略(WSN coverage strategy based on μ -law firework virtual force hybrid algorithm, μ FW-VFA),仿真表明,本文算法在进行节点部署时相比于其他算法覆盖率更高,节点分布更加均匀,且各节点移动距离更加均衡.

本文主要的工作如下:

1) 对烟花算法的爆炸算子进行改进,引入非均匀量化中的 μ 率思想来将烟花的适应度值转变为适应度等级来增强各烟花之间的差异性,且随着迭代次数动态调整 μ 值使得各等级烟花的爆炸数目和幅度动态进行调整,提升了算法的寻优能力与精度.

2) 引入虚拟力算法来加速烟花种群的进化,增强算法跳出局部最优能力,群智能算法后期在解决优化问题时,易陷入并很难跳出局部最优,因此本文引入虚拟力算法,当判断算法陷入局部最优后调用虚拟力来加速烟花种群进化,从而提高节点部署效率.

2 覆盖模型

设 N 个移动传感器节点随机分散在二维无障碍规则的监测区域内,所有传感器节点构成一个集合 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_n\}$,部署在监测区域中的第 i 个节点可以表示为

$$I_i = \{x_i, y_i, r_s\}, \quad (1)$$

其中: (x_i, y_i) 为传感器 I_i 的坐标; r_s 为感知半径; 通信半径为 r_c ,且满足 $r_c \geq r_s$. 在移动过程中,每个传感器可以自行感知其监控范围内的其他传感器,获取其位置信息.

本文采用布尔感知模型来计算覆盖率,如果感知目标在以传感器节点为圆心的圆形区域内,则传感器节点的感知概率为1,否则传感器节点的感知概率为0.因此,传感器节点 I_i 对像素点 p 的感知概率可表述为

$$C_p(I_i, p) = \begin{cases} 1, & d(I_i, p) \leq r_s, \\ 0, & d(I_i, p) > r_s, \end{cases} \quad (2)$$

式中 $C_p(I_i, p)$ 为传感器节点 I_i 对像素点 p 的监测质量.

$$d(I_i, p) = \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2}. \quad (3)$$

为了方便覆盖率的计算,通常将覆盖区域离散为 $K \times J$ 个像素点. 设 p 的坐标为 (X, Y) , $d(I_i, p)$ 表示 p 到传感器 I_i 的欧氏距离.

节点部署过程中,像素点可能处于多个传感器监测范围之内,故其联合感知概率计算如下:

$$C_p(I) = 1 - \prod_{I_i \in I} \{1 - C_p(I_i, p)\}, \quad (4)$$

其中 $C_p(I)$ 为所有传感器节点对点 p 同时监测时的联

合感知概率.

监测区域覆盖率 p_s 为

$$p_s = \frac{\sum_{j=1, k=1}^{K \times J} C_p(I)}{K \times J}. \quad (5)$$

节点平均移动距离 L 为

$$L = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i^j - x_i^{j-1})^2 + (y_i^j - y_i^{j-1})^2}}{N}, \quad (6)$$

式中: M 表示迭代次数, N 为传感器节点数目.

3 基于烟花-虚拟力的节点部署算法

3.1 基于 μ 律爆炸算子的烟花改进算法

基本烟花算法在每次迭代得到的烟花适应度值极易受目标函数和搜索空间的影响导致产生的火花数目和爆炸幅度不稳定, 最优烟花体现不出自身优势, 算法极易陷入局部最优, 收敛速度减慢. 针对上述问题, 本文提出了一种基于 μ 律爆炸算子的烟花改进算法, 引入非均匀量化的 μ 律特性曲线, 将烟花的适应度值转化为适应度等级来定义基于适应度等级的爆炸算子.

1) 适应度等级量化.

首先将烟花的适应度值进行排序得到烟花等级, 然后采用非均匀量化的 μ 律公式求得烟花不同等级相对应的量化值, 具体计算公式如下:

$$T_a(t) = \frac{\lg(1 + \mu|2^{-t+1}|)}{\lg(1 + \mu)}. \quad (7)$$

式(7)是将适应度值转化适应度等级量化值的传递函数, 其中: t 是根据适应度值排序后的烟花的序号, μ 是传递函数的形状参数.

由图1可知, μ 值接近0时为均匀量化, μ 值越大量化效果越强. μ 随迭代次数的改变使不同等级烟花的量化值 $T_a(t)$ 差异越明显, 导致不同等级烟花爆炸产生火花数目和幅度随迭代次数动态调整, 适应度较差的烟花随着迭代次数的增加火花越来越少, 爆炸半径越来越大, 适应度较优的烟花随着迭代次数的增加火花越来越多, 爆炸半径越来越小, 可提高全局搜索在算法初期的执行速度, 并加强算法后期的局部搜索能力, 更好平衡算法的开采性和探索性.

2) 基于适应度等级的爆炸算子.

为了体现烟花间的差异性, 增强最优烟花的寻优能力, 构建烟花爆炸的数目和幅度与适应度等级的关系式如下:

$$S_t = m \frac{T_a(t)}{\sum_{t=1}^T T_a(t)}, \quad (8)$$

$$A_t = A \frac{T_a(T - t + 1)}{\sum_{t=1}^T T_a(T - t + 1)}. \quad (9)$$

式(8)、式(9)分别为爆炸火花数目生成公式和爆炸幅度公式. S_t 是适应度排序为 t 的烟花的火花数目; A_t 是适应度排序为 t 的烟花的爆炸范围; T 为烟花总数目; m, A 分别为爆炸总数目和总幅度.

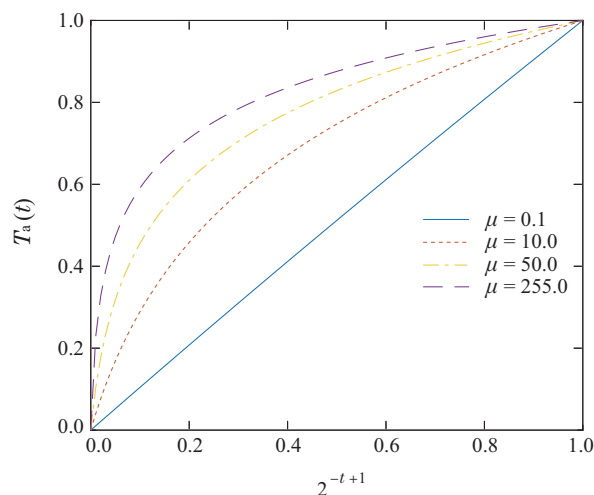


图1 μ 律曲线

Fig. 1 μ -law curves

3.2 引入虚拟力算法

针对烟花算法在优化网络覆盖率极易陷入局部最优、后期收敛速度慢等问题, 本文在改进爆炸算子的基础上加入虚拟力算法来对处于停滞状态的烟花中的传感器节点位置信息进行调整, 加速烟花种群的进化, 增强烟花算法跳出局部最优的能力, 提高烟花算法的寻优速度和精度.

虚拟力算法借鉴物理中带电粒子存在的引力斥力原理, 把传感器节点比作带电粒子来进行节点的部署, 当节点间距离较远时产生引力, 反之则产生斥力. 节点间相互作用力的关系如式(10)所示:

$$F_{ij} = \begin{cases} \omega_a(D_{th} - d_{ij}); \alpha_{ij} + \pi, & d_{ij} < D_{th}, \\ 0; & \text{其他}, \\ \omega_b(d_{ij} - D_{th}); \alpha_{ij}, & D_{th} < d_{ij} < r_c, \end{cases} \quad (10)$$

其中: ω_a, ω_b 分别为斥、引力系数; α_{ij} 为节点 i 到节点 j 的方向角; d_{ij} 为节点 i 与 j 间的欧氏距离; D_{th} 为节点间距离阈值.

为了防止节点移动到覆盖区域外, 边界需对节点施以斥力, 具体关系如式(11)所示:

$$F_{i,B} = \begin{cases} 0; & d_{i,B} \geq D_{thB}, \\ \omega_a(D_{thB} - d_{i,B}); \alpha_{iB} + \pi, & d_{i,B} < D_{thB}. \end{cases} \quad (11)$$

边界对传感器节点的合力 F_i^c 为

$$F_i^c = F_{iUB} + F_{iDB} + F_{iLB} + F_{iRB}. \quad (12)$$

$F_{iUB}, F_{iDB}, F_{iLB}, F_{iRB}$ 分别为监测区域的4个边界对节点的作用力. 故传感器节点所受合力 F_i 为

$$F_i = \sum_{j=1, i \neq j}^N F_{ij} + F_i^c. \quad (13)$$

传感器节点 i 在合力 F_i 的驱动下按照式(14)–(15)进行节点的位置更新.

$$x_{i\text{new}} = x_{i\text{old}} + \frac{F_{ix}}{|F_i|} \times W \times e^{-\frac{1}{|F_i|}}, \quad (14)$$

$$y_{i\text{new}} = y_{i\text{old}} + \frac{F_{iy}}{|F_i|} \times W \times e^{-\frac{1}{|F_i|}}, \quad (15)$$

式中: F_{ix} 与 F_{iy} 分别为 F_i 在水平和垂直方向上的分解力, W 为节点移动的最大距离.

3.3 烟花-虚拟力(μ FW-VFA)相结合节点覆盖算法

烟花虚拟力混合覆盖策略是把覆盖率 P_s 做为目标函数进行寻优, 通过将WSN中节点的位置寻优过程抽象为烟花爆炸和带电粒子相互作用力这两种物理现象, 来不断对传感器的节点位置进行调整, 以获得最优的节点部署方案, 使WSN中节点分布更加均匀, 减少网络的冗余区域和监测盲区. μ FW-VFA的流程图如图2所示.

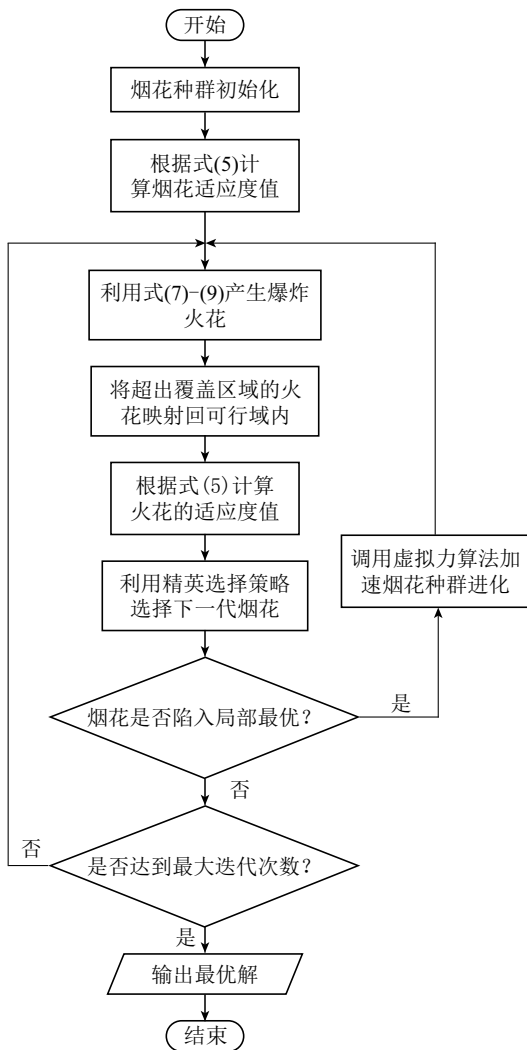


图2 μ FW-VFA节点部署流程图

Fig. 2 Node deployment process of μ FW-VFA

μ FW-VFA在节点优化部署中, 假设群体中有 T 个

烟花, 每个烟花代表一种节点的部署方式, 其由 N 个传感器节点组成, 烟花 H_i 的位置表示为 $I = \{x_{i1}, y_{i1}, x_{i2}, y_{i2}, \dots, x_{iN-1}, y_{iN-1}, x_{iN}, y_{iN}\}$. 算法的具体伪代码如下:

输入: 传感器节点数目 N , 监测区域边长 a , 感知半径 r_s , 最大迭代次数 $\psi_{\max}$, 烟花数目 T , 爆炸火花总数目 m , 爆炸火花总幅度 A , 形状参数 μ , 引力因子, 虚拟力最大步长 W

输出: 覆盖率, 传感器节点位置信息, 节点平均移动距离

算法描述

- 1) 根据传感器节点集合 I 初始化烟花种群;
- 2) for gen=1: $\psi_{\max}$ //执行循环;
- 3) 根据式(5)计算每个烟花的适应度值;
- 4) 将各烟花按适应度值的优劣进行排序;
- 5) 根据式(7)–(9)计算烟花的爆炸数目和爆炸幅度并生成子代火花;
- 6) 执行烟花算法的映射策略 //将超出可行域的火花映射回可行域内;
- 7) 根据式(5)计算每个子代火花的适应度值矩阵;
- 8) 执行烟花算法的精英选择策略 //选择下一代烟花;
- 9) 通过当前最优烟花的适应度值与前5代最优烟花的适应度值进行比较, 来判断算法是否陷入局部最优. 若是, 则引入虚拟力算法, 调整烟花的位置信息. 若否, 则继续执行下一步;
- 10) end //结束循环.

4 仿真分析

4.1 实验环境

为了验证本文所提改进的 μ FW-VFA算法对无线传感器网络覆盖有效性, 在MATLAB R2016a上进行仿真实验, 为分析网络的覆盖率、节点平均移动距离, 本文选择FWA、 μ 律烟花算法(μ -law firework algorithm, μ FWA)、虚拟力算法(virtual force algorithm, VFA)、莱维飞行算法(levy flight distribution algorithm, LFD)^[13]和增强型灰狼算法(enhanced grey wolf algorithm, GWO-EH)^[14]算法与本文算法进行对比分析. 具体的参数设置如表1所示, 对比算法中涉及的参数与其文献中对应的参数相同.

表1 仿真实验参数

Table 1 Simulation experiment parameters

参数	设定值
监测区域/m	50×50
传感器数量	35
感知半径/m	5
通信半径/m	10
烟花数目	8
爆炸火花总数目	50
爆炸火花总幅度/m	20
虚拟力最大步长/m	0.5
μ 的取值范围	[1, 255]

4.2 仿真结果及性能分析

1) 覆盖优化性能比较.

图3是实验初始阶段通过随机抛洒方式产生的节点分布图,覆盖率为65.92%,从图中可以看出节点分布随机性比较大,存在大量的监测盲区区和重叠区域.

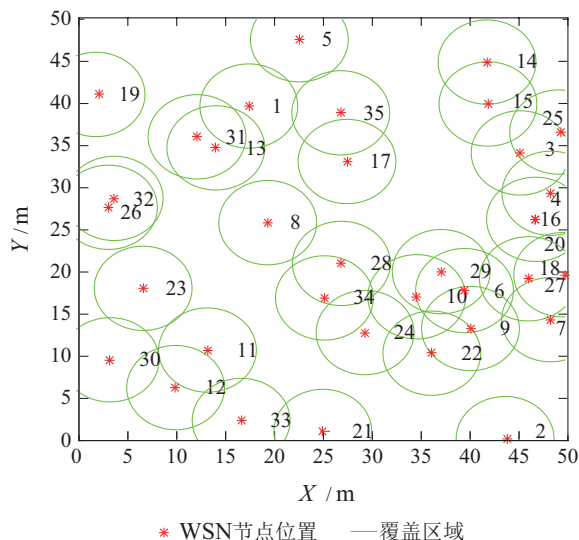


图3 初始网络覆盖区域

Fig. 3 Initial network coverage area

图4是FWA算法部署后的节点分布情况,网络覆盖率为75.64%,从图4可以看出,经FWA对节点进行部署后,覆盖区域得到一定的改善,但在局部区域仍存在冗余节点,造成此现象的原因主要是基于适应度值的爆炸算子使得最优烟花产生的火花爆炸不充分,导致局部冗余重叠区域比较严重.

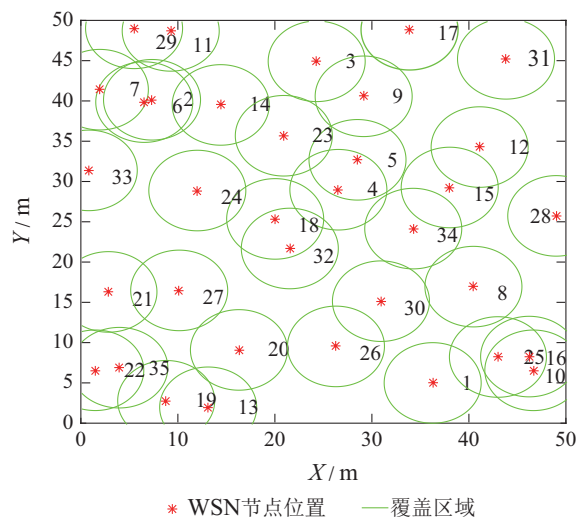


图4 FWA算法优化后节点分布

Fig. 4 Node distribution optimized by FWA

图5是基于 μ 律爆炸算子的烟花算法节点部署分布图,覆盖率为88.16%,相较于图4,通过将适应度值转化为适应度等级,突出了最优烟花与普通烟花的差异性以及动态调整形状参数 μ 平衡了全局和局部的寻优

能力后,覆盖性能得到了较大的提升,但有少量的节点间距离较近,存在一定的冗余区,仍需进一步改善.

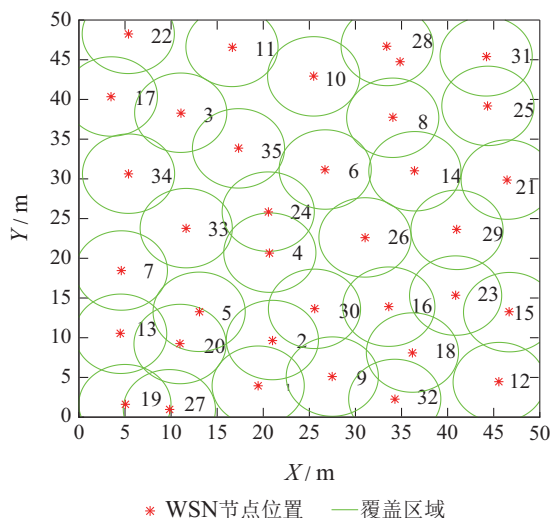


图5 μ FWA算法优化后节点分布

Fig. 5 Node distribution optimized by μ FWA

图6是经虚拟力优化后的节点分布图,覆盖率为85.55%,从图可以看出节点分布较为均匀,但存在一定的覆盖空洞且覆盖率略差于 μ FWA,产生这一现象的主要原因是虚拟力模型的参数凭人为经验设定,节点之间达不到真正意义上的平衡,导致后期的稳定性比较差.

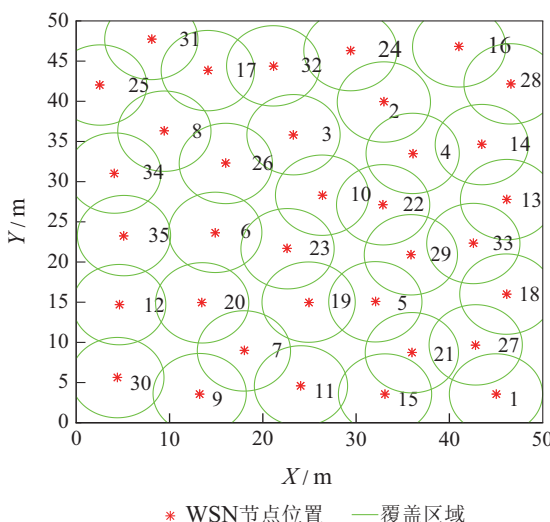


图6 VFA算法优化后节点分布

Fig. 6 Node distribution optimized by VFA

图7为无线传感器网络经LFD算法部署后的节点分布结果,覆盖率为86.31%,网络中节点未覆盖的区域较大、节点分布不均匀,造成这一现象的原因是LFD算法在位置更新时采用莱维飞行策略,随机性比较大,导致算法后期的局部寻优能力并不是很强.

图8为经GWO-EH算法部署后的节点分布,覆盖率为90.72%,GWO-EH通过采用基于适应度值的自

适应权重增强狼群的引导力, 以及改进领先狼的位置更新公式更有利于算法的全局搜索, 从图8可以看出, 通过GWO-EH算法部署后的网络覆盖率得到明显提升, 但仍有少量节点间重叠区域较大且有少量的监测盲区.

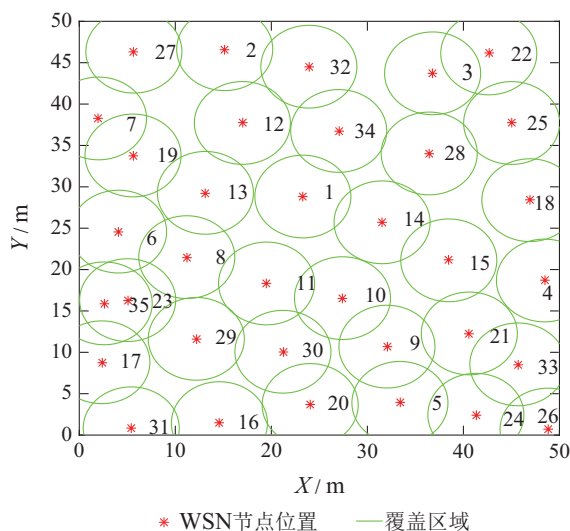


图7 LFD算法优化后节点分布

Fig. 7 Node distribution optimized by LFD

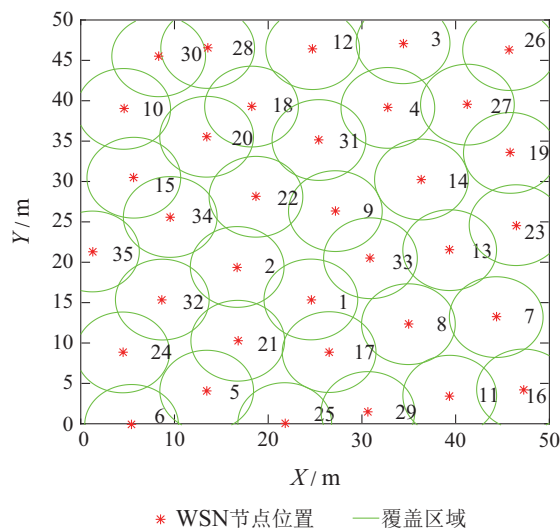


图8 GWO-EH算法优化后节点分布

Fig. 8 Node distribution optimized by GWO-EH

图9为应用本文所提算法(μ FW-VFA)后的节点分布情况, 覆盖率为92.88%, 相较于 μ FWA和VFA, 本文算法通过在 μ FWA的基础上引入VFA调整了节点间的距离, 减少了冗余区域和覆盖空洞. 本文算法相较于随机部署, FWA, VFA, μ FWA, LFD与GWO-EH算法部署, 覆盖率提升分别为26.96%, 17.24%, 7.33%, 4.72%, 6.57%, 2.16%, 说明本文所提算法节点分布的均匀度更好、覆盖空洞更少、网络监测质量更好.

通过图10各算法迭代次数与覆盖率优化曲线可以看出, 算法在覆盖率寻优的过程中, 覆盖率曲线会在

一段时间内不发生改变, 处于一条直线, 陷入停滞, 且各算法停滞时间也不同, 停滞阶段就表明算法陷入局部最优, 停滞时间则反映的是算法跳出局部最优的能力, 停滞的时间越长表明算法跳出局部最优的能力越弱. 在算法收敛速度上, 由图10可知, 传统烟花算法FWA难以跳出局部最优导致覆盖率较低, VFA前期节点部署效果明显但在后期稳定性比较差, μ FWA虽然能够得到较高的覆盖率, 但算法在优化的过程中容易陷入停滞且停滞的时间比较长, LFD算法的整体寻优性能相对较差, GWO-EH算法虽前期进行全局搜索的时间较长, 但算法后期局部寻优能力相较于其他对比算法最优. 而本文所提的算法在基本烟花算法的框架下定义新的爆炸算子并引入虚拟力来加速烟花种群的进化, 加快了算法的收敛速度和收敛精度.

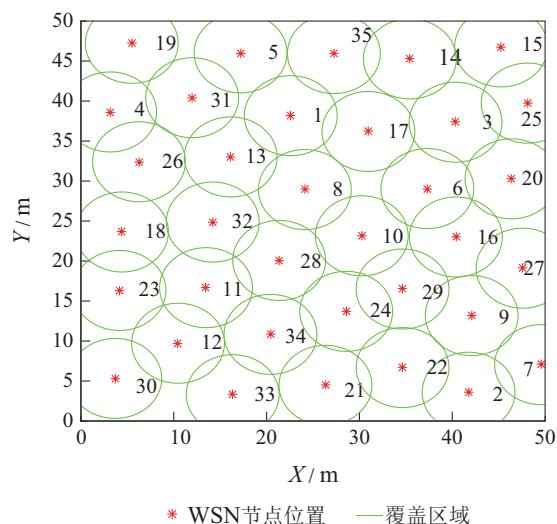


图9 μ FW-VFA算法优化后节点分布

Fig. 9 Node distribution optimized by μ FW-VFA

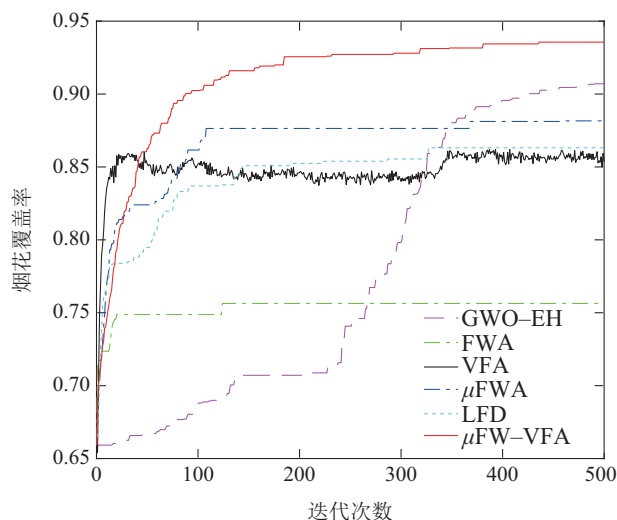


图10 覆盖率随迭代次数变化

Fig. 10 The change of coverage with iterations

表2为本文算法与对比算法各运行500次迭代时算法的运行时间对比分析, 其中VFA运行时间最少,

FWA 次之, μ FWA略高于FWA, 是对传统烟花算法的爆炸算子进行了改进所导致的, 而本文所提算法 μ FW-VFA较高于VFA和 μ FWA, 增加的时间主要来自于对虚拟力算法的调用, LFD略高于本文所提算法, GWO-EH部署时间最长, 其主要原因是 α 狼的更新采用莱维飞行策略随机性很强, 需要在每次迭代中搜索多次来保证 α 狼的质量, 从而牺牲了运行时间. 虽然本文算法 μ FW-VFA在500次迭代的运行时间高于FWA, μ FWA, VFA, 但从图10能够看出本文算法在覆盖率得到了较大的提升.

表2 部署时间对比

Table 2 Deployment time comparison

部署策略	部署时间/s
FWA	32.000980
μ FWA	34.056486
VFA	30.143668
μ FW-VFA	38.661498
LFD	40.293223
GWO-EH	53.203204

2) 节点移动距离.

节点移动距离也是衡量无线传感器网络覆盖性能的指标, 无线传感器网络建立的能耗主要来源为节点的移动. 图11是各节点移动距离对比图, 表3为各算法节点的平均移动距离和方差.

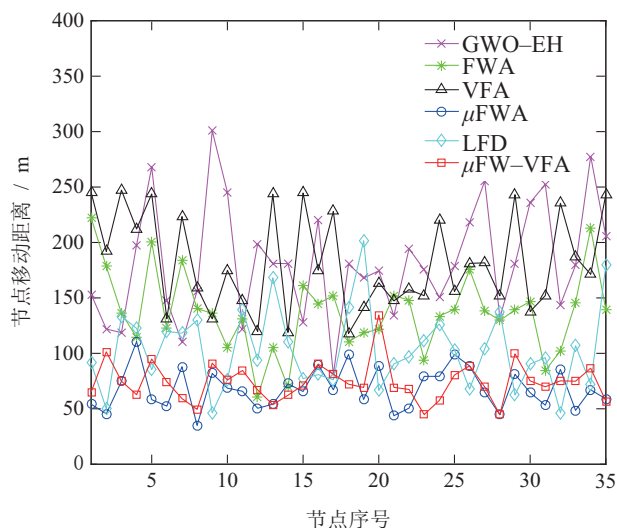


图11 各节点移动距离对比图

Fig. 11 Comparison of the moving distance for each node

从图11和表3可以看出, VFA的节点距离最大, 主要是其节点之间无法达到真正意义上的平衡, 稳定性差. GWO-EH算法平均移动距离次之是其 α 狼的更新采用莱维飞行, 对其他狼引入随机因子导致. FWA平均移动距离略高原因是其烟花种群的更新受爆炸算子的爆炸幅度影响, 基本的爆炸算子幅度不稳定, 易

受目标函数与搜索空间的位置而剧烈波动, LFD算法的平均移动距离小于FWA, μ FWA的节点移动距离最小. 相较于 μ FWA, 本文算法节点的移动距离主要增加在引入虚拟力去加快了算法的收敛速度, 由图11知本文算法通过引入虚拟力虽增加了约6 m的节点平均移动距离, 但从图10可以看出本文算法覆盖率提升4.72%且加快了算法的收敛速度.

表3 平均移动距离和方差

Table 3 The average of distance traveled and the variance of distance traveled

部署策略	平均移动距离/m	各节点距离方差
FWA	137.0821	6.6045
μ FWA	68.2908	4.2111
VFA	182.2155	5.9990
LFD	103.4792	6.0300
GWO-EH	181.9533	7.2056
μ FW-VFA	74.1941	4.2706

部署后各节点的剩余能量与各节点的移动距离密切相关, 因此各节点移动距离的均衡性直接影响WSN网络的生命周期, 均衡性差会导致移动距离大的节点较快死亡, 影响网络的监测质量, 甚至出现连通性受阻导致网络瘫痪. 图11是6种算法的节点移动距离对比, 结合表3和图11可以得出, 本文算法与 μ FWA算法在进行节点优化部署时各节点移动的距离比较均衡, 而其他算法的均衡性相对较差.

5 结论

本文针对无线传感器网络动态节点覆盖优化问题, 提出一种基于 μ 律爆炸算子的烟花虚拟力的混合算法, 该算法将 μ 律特性曲线作为转移函数, 将基于适应度值的爆炸算子转化为基于适应度等级的爆炸算子, 增强了最优烟花与普通烟花的差异性, 同时动态调整 μ 的值平衡了算法的局部和全局搜索能力. 其次针对智能优化算法易陷入局优、后期收敛速度慢的问题, 引入虚拟力算法来加速烟花种群的进化. 仿真实验表明, 与其他5种算法在相同测试条件下, 本文算法在网络覆盖率和平均移动距离等方面都具有较好的性能. 下一阶段, 将进一步对 μ FW-VFA算法进行改进优化, 验证其在三维传感器网络覆盖的有效性.

参考文献:

- [1] XU Y, DING O, QU R, et al. Hybrid multi-objective evolutionary algorithms based on decomposition for wireless sensor network coverage optimization. *Applied Soft Computing*, 2018, 68(3): 268 – 282.
- [2] REN S, XU Z, YANG L. Wireless sensor network coverage optimization based on fruit fly algorithm. *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, 2018, 14(6): 58 – 70.

- [3] HANH N T, BINH H, HOAI N X, et al. An efficient genetic algorithm for maximizing area coverage in wireless sensor networks. *Information Sciences*, 2019, 48(8): 58 – 75.
- [4] WANG F, HU H. Coverage hole detection method of wireless sensor network based on clustering algorithm. *Measurement*, 2021, 179(5): 109449.
- [5] LI Jianpo, ZHANG Qinhu, ZHANG Zhantu, et al. Congestion control and energy optimization routing algorithm for wireless sensor networks. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2020, 40(4): 69 – 74.
(李建坡, 张庆华, 张展图, 等. 基于拥塞控制的无线传感器网络能耗优化路由算法. 东北电力大学学报, 2020, 40(4): 69 – 74.)
- [6] LIU C, ZHAO Z, QU W, et al. A distributed node deployment algorithm for underwater wireless sensor networks based on virtual forces. *Journal of Systems Architecture*, 2019, 97(8): 9 – 17.
- [7] WANG J, GUO H. Virtual force field coverage algorithms for wireless sensor networks in water environments. *International Journal of Sensor Networks*, 2020, 32(3): 174 – 181.
- [8] CHAKRAKRABORTY S, GOYAL N K, MAHAPATRA S, et al. A monte-carlo markov chain approach for coverage-area reliability of mobile wireless sensor networks with multistate nodes. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 193: 106662.
- [9] KARATAS M, ONGGO B S. Optimising the barrier coverage of a wireless sensor network with hub-and-spoke topology using mathematical and simulation models. *Computers & Operations Research*, 2019, 106(6): 36 – 48.
- [10] LIU Haoran, ZHAO Heyao, DENG Yujing, et al. Coverage control algorithm for wireless sensor networks based on non-cooperative game. *Journal on Communications*, 2019, 40(1): 75 – 82.
(刘浩然, 赵赫瑶, 邓玉静, 等. 基于非合作博弈的无线传感器网络覆盖控制算法. 通信学报, 2019, 40(1): 75 – 82.)
- [11] TANG Wei, WU Shuang, LI Rui, et al. Optimization of regional cooling pipe network based on genetic algorithm. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2020, 40(6): 86 – 91.
(唐伟, 吴爽, 李睿, 等. 基于遗传算法的区域供冷管网优化研究. 东北电力大学学报, 2020, 40(6): 86 – 91.)
- [12] TENG Z J, LV J L, GUO L W, et al. Particle swarm optimization algorithm based on dynamic acceleration factor in wireless sensor network. *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, 2018, 9(5): 1245 – 1254.
- [13] HOUSSEIN E H, SAAD M R, HASHIM F A, et al. Lévy flight distribution: A new metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, 94(6): 103771.
- [14] MIAO Z, YUAN X, ZHOU F, et al. Grey wolf optimizer with an enhanced hierarchy and its application to the wireless sensor network coverage optimization problem. *Applied Soft Computing*, 2020, 96(2): 1 – 21.
- [15] APARAJITA C, DEBASHIS D. Energy-efficient coverage optimization in wireless sensor networks based on voronoi-glowworm swarm optimization-K-means algorithm. *Ad Hoc Networks*, 2021, 122(1): 102660.
- [16] DEEPA R, VENKATARAMAN R. Enhancing whale optimization algorithm with levy flight for coverage optimization in wireless sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 2021, 94: 107359.
- [17] ZHOU Fei, GUO Haotian, YANG Yi. An improved virtual force relocation coverage enhancement algorithm. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(9): 2194 – 2220.
(周非, 郭浩田, 杨伊. 一种改进的虚拟力重定位覆盖增强算法. 电子与信息学报, 2020, 42(9): 2194 – 2220.)
- [18] TAN Y, ZHU Y. Fireworks algorithm for optimization. *Advances in Swarm Intelligence*. New York: Springer, 2010.
- [19] WEI X, LIU L, WANG Y, et al. Reentry trajectory optimization for a hypersonic vehicle based on an improved adaptive fireworks algorithm. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 2018: 8793908.
- [20] ASAJU L B, AMINU A A, PETER B S. Training of neural network for pattern classification using fireworks algorithm. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, 2018, 9(1): 208 – 215.
- [21] SHAO Jingfeng, MA Chuangtao. Intelligent control model for yarn quality based on multi-process knowledge association. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(6): 840 – 849.
(邵景峰, 马创涛. 一种多工序知识关联的纺纱质量智能控制模型. 控制理论与应用, 2018, 35(6): 840 – 849.)
- [22] XUE Yuying, ZHANG Xiangyin, ZHANG Guoliang, et al. Path planning and smoothing based on quantum behaved fireworks algorithm for mobile robot. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(9): 1398 – 1408.
(薛裕颖, 张祥银, 张国梁, 等. 基于量子行为烟花算法的机器人路径规划及平滑. 控制理论与应用, 2019, 36(9): 1398 – 1408.)
- [23] ZHANG B, ZHENG Y, ZHANG M. Fireworks algorithm with enhanced fireworks interaction. *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*, 2017, 14(1): 42 – 55.
- [24] TUBA E, TUBA M, SIMIAN D. Wireless sensor network coverage problem using modified fireworks algorithm. *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. New York: IEEE, 2016: 696 – 701.

作者简介:

滕志军 教授, 目前研究方向为无线通信技术, E-mail: tengzhijun@163.com;

李哲 硕士研究生, 目前研究方向为无线通信技术, E-mail: 1761669036@qq.com;

王幸幸 硕士研究生, 目前研究方向为无线通信技术, E-mail: 1471385830@qq.com;

杜春秋 硕士研究生, 目前研究方向为无线通信技术, E-mail: 2912289944@qq.com;

李梦 硕士研究生, 目前研究方向为无线通信技术, E-mail: 15765594470@163.com.