

一种改进的虚拟力重定位覆盖增强算法

周非 郭浩田* 杨伊

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

摘要: 在移动无线传感网络(MWSN)的部署问题中最关键的是如何提供最大的区域覆盖范围。针对现有的覆盖控制算法存在覆盖率不理想、部署效率低、能耗过高的问题, 该文提出了一种高效部署策略。第1阶段利用Voronoi图获得整个网络的覆盖孔, 检测Voronoi多边形内的未覆盖区域, 并提供虚拟力驱动传感器移动, 同时采用动态调整策略改变移动步长, 从而减少能量损耗; 第2阶段提出一种检测机制, 利用Delaunay三角网检测传感器之间的局部覆盖孔并进行修复。仿真结果表明, 该算法在提高网络覆盖率的同时加快了收敛速度, 为部署移动无线传感网络提供了新的解决思路。

关键词: 移动无线传感网; 网络覆盖; 虚拟力; voronoi图; delaunay三角

中图分类号: TN915.1; TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)09-2194-07

DOI: 10.11999/JEIT190662

An Improved Virtual Force Relocation Coverage Enhancement Algorithm

ZHOU Fei GUO Haotian YANG Yi

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The most critical issue in the deployment of Mobile Wireless Sensor Networks (MWSN) is how to provide maximum regional coverage. To solve the problem that the existing coverage control algorithm has unsatisfactory coverage, low deployment efficiency and high energy consumption, an efficient deployment strategy is proposed. The first stage uses the Voronoi diagram to obtain the coverage hole of the entire network, and detects the uncovered area in the Voronoi polygon, and provides virtual force to drive the sensor movement, and uses the dynamic adjustment strategy to change the moving step size, thereby reducing energy loss; The second stage proposes a detection mechanism that uses a Delaunay triangulation to detect local coverage holes between sensors and repair them. The simulation results show that the algorithm accelerates the convergence speed while improving the network coverage, and provides a new solution for deploying mobile wireless sensor networks.

Key words: Mobile Wireless Sensor Network (MWSN); Network coverage; Virtual force; Voronoi graph; Delaunay triangle

1 引言

近年来, 移动无线传感网(Mobile Wireless Sensor Networks, MWSN)广泛应用于各个领域, 包括战场监控、环境监测、目标跟踪、精准农业以及物联网等^[1]。在MWSN中覆盖控制是一个重要问题, 主要针对如何根据传感器的拓扑结构进行有效地部署来进行区域监测。对于在大规模分布式自组

织网络中, 传感器需要获取邻居信息进行有效快速地动态部署, 因此提供一种高覆盖率、低能耗以及较强鲁棒性的算法至关重要。

在MWSN领域国内外学者提出了多种覆盖控制算法提高网络的覆盖率, 最常用的有智能群算法、虚拟力算法(Virtual Force Algorithm, VFA)、几何算法以及混合算法等^[2]。Hacioglu等人^[3]提出了一种基于聚类的路由方法, 它最大限度地降低了集群之间的通信成本, 并最大化了每个集群中的节点数量。Alia等人^[4]通过结合自适应长度编码动态调整节点的最佳数量和位置, 从而实现覆盖最大化。为了在覆盖范围和能量消耗之间进行更好的权衡, 文献^[5]提出了一种基于Voronoi图的多目标免疫算法。

收稿日期: 2019-08-30; 改回日期: 2020-02-27; 网络出版: 2020-04-15

*通信作者: 郭浩田 17784456880@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61471077)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61471077)

Xu等人^[6]提出一种静态网络混合搜索算法，利用遗传算法和差分算法的混合算子提高种群的多样性，然后利用粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)解决局部最优问题。

Rout等人^[7]提出避障虚拟力算法(Obstacle Avoidance Virtual Force Algorithm, OAVFA)，当环境存在障碍物时能够有效进行动态部署改善网络覆盖率，但是该算法收敛速度慢。Mahboubi等人^[8]提出了两种新颖的虚拟力Voronoi图覆盖算法，分别是顶点虚拟力算法和边缘虚拟力算法，利用Voronoi图性质改善了虚拟力算法陷入震荡状态的缺点，较好地提高了网络覆盖率。Habibi等人^[9]提出了一种基于Voronoi的策略，通过梯度非线性优化方法更新传感器的位置，使得局部覆盖尽可能地增加。Lee等人^[10]提出质心和双质心方案，但是没有考虑邻居节点的位置，不能保证高效的部署。Fang等人^[11]利用Voronoi图的盲区来改善覆盖空洞，有效地提高了网络覆盖范围，但是增加了节点的能耗，且算法复杂度较高。文献^[12]研究了一种基于Voronoi图的安全性部署算法，可以使用较低成本解决网络安全性能，使网络更加健硕。为了找到最短的路径来修复覆盖空洞，文献^[13]提出了一种基于Delaunay三角的无坐标机制，可以在不知道传感器确切位置的情况下找到治疗覆盖孔的局部最短路径。文献^[14]用Delaunay三角定位网络覆盖空洞，找到覆盖孔的边界，但是没有提出如何解决覆盖空洞。文献^[15,16]在文献^[14]的基础上解决了网络覆盖空洞的问题，但是该算法没有针对小面积局部覆盖孔提供解决思路。基于以上存在的覆盖率低，功耗过大，收敛速度较慢，算法复杂度过高和冗余度大等问题，本文提出了一种改进的虚拟力重定位算法，在保持较低能耗的同时提高网络覆盖率，并加快了收敛速度，使节点达到平衡状态。

本文内容安排如下，第2部分介绍系统模型以及分析现有算法的不足；第3部分针对现有算法的不足提出改进算法；第4部分对改进的算法进行仿真，并与现有的算法进行对比，通过改变仿真参数，从不同角度分析所提出算法的优点；最后对本文进行总结。

2 网络模型及问题描述

2.1 网络模型

在矩形监控区域A内，划分成 $m \times n$ 个网格，随机播撒 N 个移动传感器 $s = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ ，第 i 个传感器的位置表示为 $s_i = (x_i, y_i)$ ，传感器的感测半径为 R_s 。这里采用布尔磁盘感知模型(即二进制传感模型)，传感器与每个目标点的距离为

$$d(s_i, t_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

若 $d(s_i, t_j) \leq R_s$ 则目标点 t_j 被覆盖，节点 s_i 对目标点 t_j 的感知度记为1；否则目标点 t_j 未被覆盖，节点 s_i 对目标点 t_j 的感知度记为0。感知度 $p(s_i, t_j)$ 为

$$p(s_i, t_j) = \begin{cases} 1, & d(s_i, t_j) \leq R_s \\ 0, & d(s_i, t_j) > R_s \end{cases} \quad (2)$$

(1) 网络覆盖率：覆盖率是评估MWSN部署算法的最重要性能指标之一，网络覆盖率可用式(3)表示，其中 $A_{cov}(s)$ 为传感器覆盖面积， A_{total} 为检测区域面积。

$$R_{cov}(s) = \frac{A_{cov}(s)}{A_{total}} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n p(x, y, s)}{m \times n} \quad (3)$$

(2) 传感器能耗：传感器的能耗主要包含传感器的移动能耗，传感能耗和通信能耗，而能量消耗最多的来源于传感器的移动，因此只考虑传感器的移动能耗。对于 N 个传感器的平均移动距离表示为

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{d_i^2}}{N} \quad (4)$$

其中 d_i 表示第 i 个传感器的每次移动前初始位置与移动后的最终位置的距离。

(3) 网络冗余度：冗余表示传感器的重叠程度，冗余越大，表示传感器分布不均匀，冗余度表示为

$$R_r = \frac{A_r}{A_{cov}} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n p_r(x, y, s)}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n p(x, y, s)} \quad (5)$$

其中 $p_r = (x, y, s)$ 表示为网格点 (x, y) 既能被传感器 s_i 感测又能被 s_j 感测。

2.2 问题描述

传统虚拟力算法将传感器抽象成势力场中的粒子，它受到邻居传感器的引力和斥力，通过合力的作用下进行移动部署，通常采用固定步长限制传感器的移动距离，由于约束条件的不足导致在部署后期会产生节点震荡现象，造成传感器的无效移动。而传统Voronoi图算法仅利用Voronoi多边形的形心指引传感器移动，无法提供稳定有效地部署，因此本文将Voronoi图作为约束条件，在虚拟力的作用下加快网络部署。同时采用非线性递减策略代替固定移动步长，从而减少能量消耗。

考虑到网络的整体覆盖效果，需要减少网络局

部覆盖孔,即相邻传感器之间不能覆盖的区域,如图1所示(阴影部分),此时利用voronoi图无法探测到局部覆盖孔,因此这里提出一种检测机制,利用Delaunay三角网构造空圆,检测传感器之间的缝隙,最后通过空圆的虚拟吸引力修复传感器之间的覆盖孔,进一步提高网络覆盖率和均匀度。这里做出以下基本假设。

假设1:所有传感器具有相同的传感范围 R_s 和通信范围 R_c ,其中 $R_c \geq 2R_s$ 。

假设2:传感器之间的通信图是连接的,每个传感器可以获得其他传感器的信息(例如它们的位置),并准确地计算其Voronoi多边形。

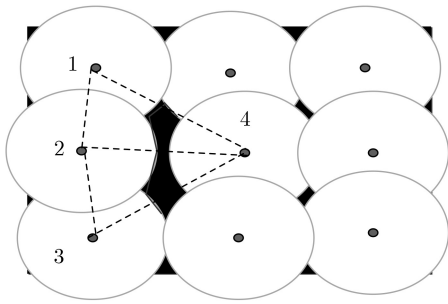


图1 局部覆盖孔

3 改进的虚拟力重定位覆盖增强算法

为了提供更稳定的分布式覆盖控制算法,以增强覆盖率为目标,同时加快收敛速度以及减少传感器的能耗,本文在传统算法的基础上做出相应地改进,有效地解决了以上问题。

3.1 基于Voronoi图的虚拟力重定位算法

考虑一组传感器随机部署在监测区内,监测区被划分成 n 个Voronoi多边形,在每一个Voronoi多边形内只有一个节点且该Voronoi多边形内的点到该传感器节点距离最近,可用式(6)表示为

$$\prod i = \{x \in \mathbb{R}^2 | d(x, s_i) < d(x, s_j), j \in n := \{1, 2, \dots, N\}, i \neq j\} \quad (6)$$

此时每个传感器只需要考虑自己的Voronoi多边形覆盖情况,因此提出Voronoi多边形内部的未覆盖网格点对传感器产生的虚拟引力,即根据Voronoi多边形顶点的覆盖情况分为以下两种情形。

情况1:在一个Voronoi多边形内,第 i 个Voronoi多边形的顶点为 $V_i = \{V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{il}\}$,传感器的感知半径为 R_s ,如果Voronoi多边形顶点到传感器的距离均小于 R_s ,则该Voronoi多边形不存在盲区,因此传感器受到的网格点的吸引力为0。此时计算Voronoi多边形的形心 C_x, C_y

$$\left. \begin{aligned} C_x &= \frac{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^n (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)}{M} \\ C_y &= \frac{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^n (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)}{M} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 x_i, y_i 为多边形顶点坐标, M 为 n 边形面积,形心对传感器产生虚拟引力 $F_{c_i s_i}$,计算式为

$$M = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (8)$$

$$F_{c_i s_i} = (c(i) - s(i)) \left(\frac{c(i) - s(i)}{d} \right) \quad (9)$$

传感器下一时刻的位置更新式为

$$\left. \begin{aligned} x(i, 1) &= \begin{cases} x_{\text{old}}(i, 1), & \text{fitness}(t+1) < \text{fitness}(t) \\ x_{\text{old}}(i, 1) + \frac{F_x}{F_{c_i s_i}} \cdot \alpha, & \text{fitness}(t+1) \geq \text{fitness}(t) \end{cases} \\ x(i, 2) &= \begin{cases} x_{\text{old}}(i, 2), & \text{fitness}(t+1) < \text{fitness}(t) \\ x_{\text{old}}(i, 2) + \frac{F_y}{F_{c_i s_i}} \cdot \alpha, & \text{fitness}(t+1) \geq \text{fitness}(t) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 x_{old} 为传感器上一时刻位置坐标, $\text{fitness}(t)$ 为适应度函数值,即在 t 时刻的网络覆盖率, α 为移动步长,这里采用非线性递减函数 $\alpha = 1.5 - \sqrt{2t/t_{\max}}$ 。这样能够保证加快网络收敛,而随着 t 的增加,减少步长能够缓解传感器震荡现象,避免传感器的无效移动从而减少能耗。为了更详细描述该算法下面举例说明。

从图2(a)中可以发现传感器 S_i 将Voronoi多边形 V_i 顶点全部覆盖,根据形心计算式(8)得到Voronoi多边形的形心 C_i 坐标,传感器 S_i 受到形心 C_i 的虚拟吸引力 F 。根据位置更新式(10)得到下一时刻传感器的位置如图2(b)所示,其新的位置对Voronoi多边形而言覆盖的更加均匀,因此有利于全局网络的覆盖。

情况2:在一个Voronoi多边形内,如果存在Voronoi多边形的顶点未被传感器覆盖,则一定存在盲区。此时传感器根据Voronoi顶点坐标信息计算出Voronoi多边形内的未覆盖网格点个数 k 以及坐标信息,假设每个未覆盖网格点会产生虚拟吸引力,则合力为 F_{uncov}

$$F_{\text{uncov}} = \frac{\|\text{uncov}(k) - s(i)\| \left(\frac{\text{uncov}(k) - s(i)}{d_{ik}} \right)}{\sum(k)}, \quad \text{uncov}(k) \in G(i) \quad (11)$$

传感器下一时刻沿着合力方向移动，移动距离为 $\beta \cdot F_{\text{uncov}}$ (这里 $\beta = \alpha$)，具体分析如图3所示。

在图3(a)中，传感器 S_1 没有将Voronoi多边形全部覆盖，此时传感器根据Voronoi顶点坐标计算出Voronoi多边形内的未覆盖网格点的个数以及坐标，然后计算出未覆盖网格点对传感器的虚拟吸引力，进行坐标更新，传感器在下一时刻的位置如图3(b)所示，此时修复了一部分Voronoi多边形内的覆盖空洞。伪代码如表1所示。

3.2 基于Delaunay三角的局部覆盖空洞修复算法

基于Voronoi图的虚拟力重定位算法很好地解决了网络覆盖率以及收敛速度，但是在传感器之间仍存在覆盖空洞，网络均匀度较低的问题。因此提出一种检测制，利用Delaunay三角检测出传感器之间的覆盖孔，然后对覆盖孔进行修复。

在执行基于Voronoi图的虚拟力重定位算法过程中，如果覆盖率不再增长，此时有可能是传感器局部收敛，部分传感器重叠覆盖。因此程序进入检

测系统，根据网络拓扑结构构造Delaunay三角网。由于Delaunay三角形的外接圆是不包含任何其他三角形的顶点的圆，因此将其称为空圆。

定理1 传感器节点根据邻居节点的位置信息计算出空圆的圆心坐标 S_h 及半径 R_h ，如果空圆的半径 R_h 满足 $R_h > R_s$ ，则在空圆中存在未覆盖的区域。

证明 如果空圆半径 R_h 大于传感器感测半径 R_s ，则空圆的圆心超出网络中任何节点的感测范围。因此，将存在至少一个未覆盖的区域。如果存在未覆盖区域，则该区域中的任何点与网络中的任何传感器节点之间的距离大于 R_s 。因此，可以找到一个空心圆，其圆心位于未覆盖区域内，其半径大于感测半径。 证毕

每个节点与邻居构成的空圆不止一个，因此假设此时某个空圆的圆心对节点产生的虚拟吸引力为 $F_{h_i s_i}$

$$F_{h_i s_i} = \|h(i) - s(i)\| \left(\frac{h(i) - s(i)}{d} \right) \quad (12)$$

方向为 $S_h - S_i$ ，大小为 $\varphi \cdot F_{h_i s_i}$ (φ 为比例系数，令 $\varphi = 0.1$)，如果传感器下一时刻能够改善覆盖率则

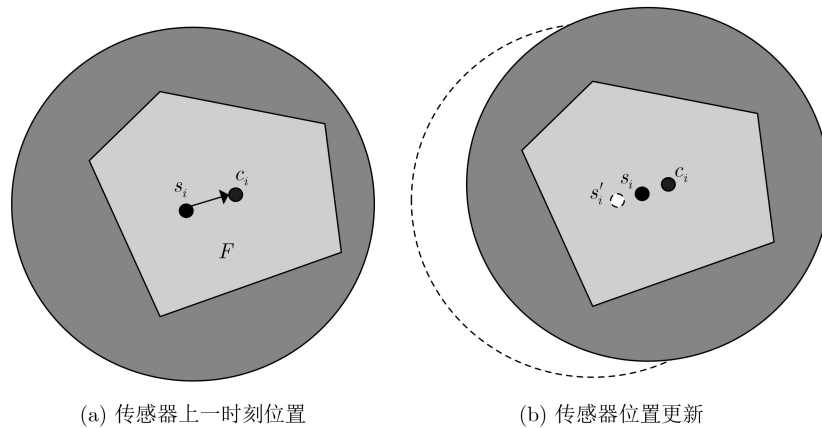


图 2 基于形心传感器移动示意图

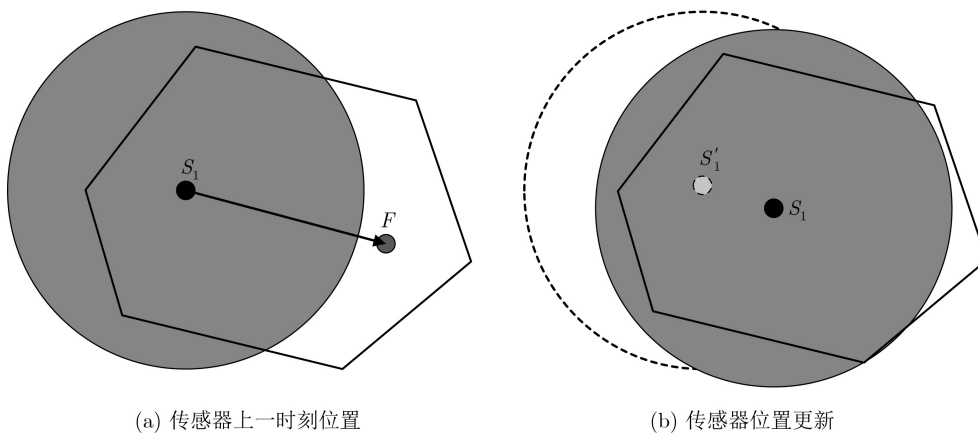


图 3 基于虚拟力传感器移动示意图

进行位置更新, 否则计算下一个空圆产生的虚拟吸引力。如图4所示

在图4(a)中根据传感器坐标信息构造 $\Delta S_1 S_2 S_3$, 空圆为 S_h , 并且空圆的半径 r_h 大于感测半径 R_s , 所以在3个传感器之间存在覆盖空洞。依次计算出空圆圆心对传感器产生的虚拟吸引力, 如果覆盖率增加并进行位置更新, 否则传感器位置保持不变。如图4(b)所示, 有效地修复了传感器之间的覆盖孔。伪代码如表2。

4 仿真分析

为了验证本文算法的有效性, 分析了网络覆盖率、能耗以及冗余度等性能指标。选用MATLAB2016b作为仿真工具。相关参数设置如下: $R_s = 6$, $R_c = 2R_s = 12$, $RIO = 50 \times 50$, $N = 30$, $\alpha = \beta = 1.5 - \sqrt{2t/t_{\max}}$, $\varphi = 0.1$, $t_{\max} = 100$ 。

表1 基于Voronoi图的虚拟力重定位算法

Randomly deploy N sensors in the monitoring area;
Repeat
Construct Voronoi polygons based on the position of the sensors;
For each $i(1 \leq i \leq N)$
For each $j(1 \leq j \leq \text{vertex}(i))$ // vertex: the number of Voronoi polygon vertices;
If $\text{dist}(i, j) < R_s$ //case 1: Voronoi polygon vertices are all covered;
Calculate the force of the centroid on the sensor and the position of the sensor;
Else //case 2: Voronoi polygon vertices are not all covered;
Calculate F_{unmov} and the position of the sensor at the next moment;// F_{unmov} :the force of the uncovered grid point on the sensor;
End for
End for
Sensor location update;
End for
Until termination criterion is met

4.1 本文算法分析

图5是利用改进的虚拟力重定位算法所仿真的运动过程图, 图5(a)为传感器初始分布图, 传感器部署不均匀有很多覆盖空洞。图5(b)为迭代100次后的传感器分布图, 可以看出传感器均匀分布, 监控区域基本全部覆盖, 达到了较满意的覆盖效果。图5(c)是传感器的位置变化图, 圆圈代表传感器原始位置, 三角代表传感器最终位置。可以看出传感器的运动过程较为稳定, 基本解决节点震荡现象。

图6是基于Voronoi图的虚拟力重定位算法和融合了覆盖漏洞检查算法的比较, 证明了本文所提出的检查机制是有效的, 可以修复传感器之间的覆盖空洞, 进一步提高网络的覆盖率, 使网络拓扑结构变得更加均匀。从图中可以发现迭代30次之后, 节点覆盖率基本达到稳定的状态, 收敛速度很快, 网络覆盖率从63.31%提高到99.03%。

本文算法还进行了鲁棒性测试, 图7是本文通

表2 基于Delaunay三角的局部覆盖空洞修复算法

Construct a Delaunay triangulation based on the position of the
sensors;
For each $j(1 \leq j \leq \text{TRI}(i))$ // TRI: the number of Delaunay triangles
Calculate empty circle center coordinates and radius;
If there is a gap between the sensors:
Calculate the force of the centroid of the empty circle on the sensor and the position of the sensor circle on the sensor;
If $\text{fitness}(x(t)) \geq \text{fitness}(x(t-1))$
Sensor location update;
Break;
Else
Sensor position unchanged;
End if
End if
End for

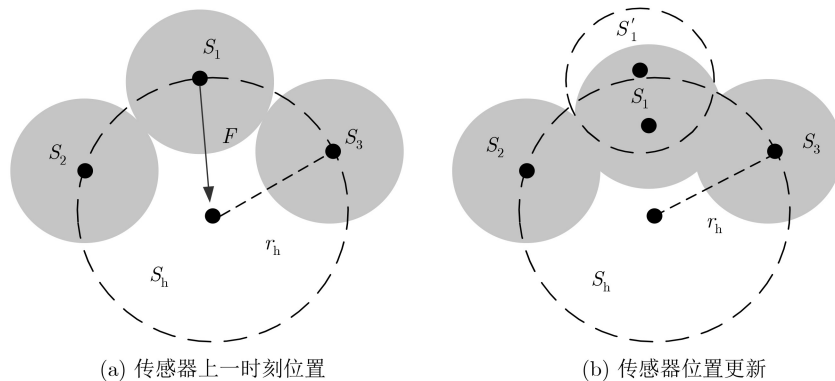


图4 基于检测机制漏洞修复示意图

过蒙特卡洛实验仿真100次，网络的平均覆盖率达到98.67%，可以看出算法有较强的鲁棒性，在不同的随机部署条件下都能达到较高的覆盖率。

4.2 不同算法的性能比较

本节采用相同的参数与其它覆盖算法(VEVF, BCBS和DCBC)进行仿真对比，分别从网络覆盖率，节点能耗以及网络冗余度等方面进行分析，从而体现出本文算法在多种性能上的优势。

图8是传感器节点数分别为 $N=20, 25, 30$ 情况下的4种算法性能对比图。图8(a)是网络覆盖率对比图，随着传感器节点个数的增多，4种算法的覆盖率都在增加，但是在相同传感器个数情况下，该文算法的覆盖率最优，覆盖率分别可以达到84.60%，

94.41%，99.03%。图8(b)是节点能耗对比图，随着传感器数量的增多，传感器的平均移动距离都有减少，尽管本文算法能耗率略高于VEVF算法，但是综合考虑本文算法能耗在可以接受范围内。图8(c)是网络冗余度对比图，可以观察到随着传感器节点的增多，4种算法的网络冗余度都随之变大，但是本文算法相对于其它算法的冗余度最小。

因为本文考虑了全局网络拓扑结构，更加有效利用Voronoi图辅助虚拟力进行快速部署，同时提出Voronoi多边形内未覆盖网格对传感器的作用力解决了Voronoi形心不能提供可靠位置的缺陷，因此保证了网络的高覆盖率。并且在传感器的移动过程中采用了非线性递减策略有效缓解了节点振荡现

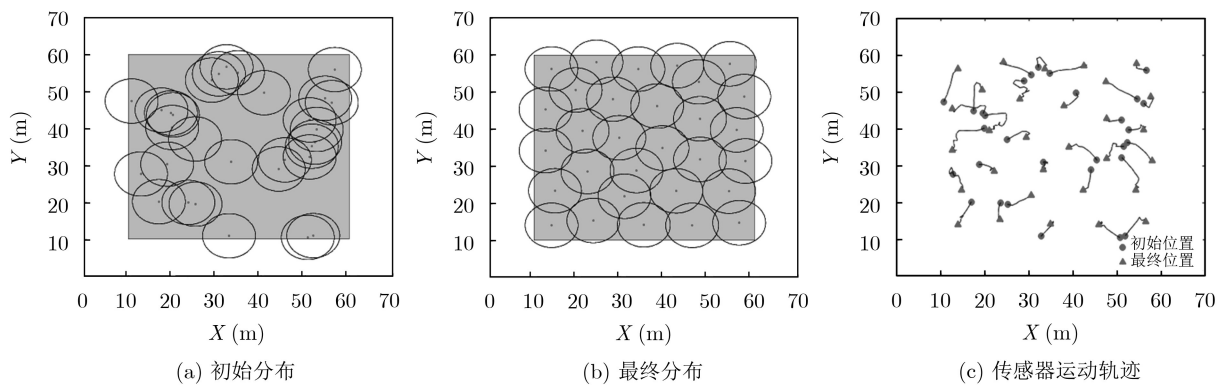


图5 传感器运动过程图

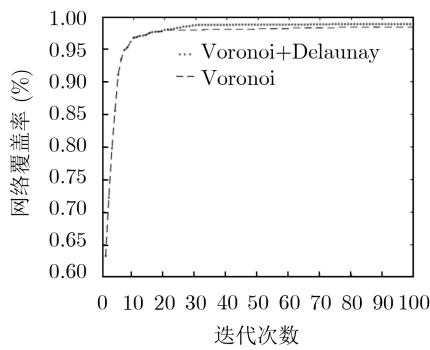


图6 覆盖率变化图

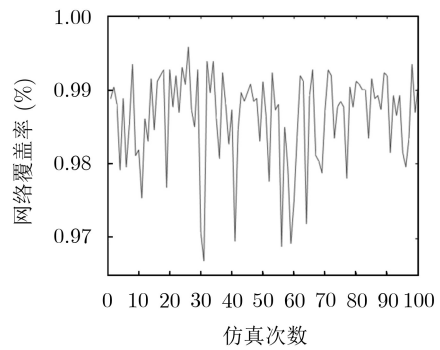


图7 单次蒙特卡洛仿真覆盖率变化曲线

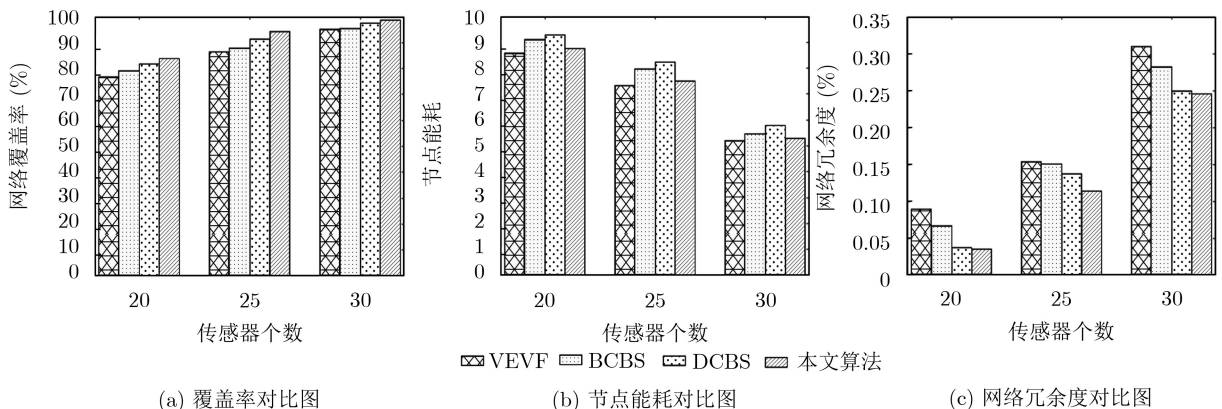


图8 不同节点个数，4种算法性能对比图

象,减少能耗。最后利用检测机制修复传感器之间的局部覆盖孔,使传感器部署更加均匀,减少网络重叠覆盖区域,最大化利用传感器节点。

5 结束语

本文研究了移动无线传感网络的网络覆盖优化问题,提出了一种改进的虚拟力重定位覆盖增强算法。本算法首先利用传感器的位置信息构造Voronoi图,通过Voronoi图多边形内的未覆盖网格点进行虚拟力驱动,改善了传统算法收敛速度慢的同时还提高了网络覆盖率;然后提出一种检测机制修复网络的局部覆盖孔,利用Delaunay三角构造出空圆对传感器进行重定位,进一步提高网络的覆盖率以及网络的均匀度;最后,为了减少传感器的移动能耗,提出非线性递减策略限制传感器的移动步长,相对于传统的固定步长而言,在部署过程中可以加快收敛速度,同时可以减少震荡现象,从而减少能耗。与现有的算法相比,本文算法具有较好的鲁棒性,在网络覆盖率,节点能耗以及冗余度等性能指标都展现了算法的优越性。在未来的研究工作中主要考虑在真实场景中如果存在障碍物,如何有效地进行避障覆盖,并且平衡传感器的能耗和覆盖率的关系。

参考文献

- [1] YUE Yinggao and HE Ping. A comprehensive survey on the reliability of mobile wireless sensor networks: Taxonomy, challenges, and future directions[J]. *Information Fusion*, 2018, 44: 188–204. doi: [10.1016/j.inffus.2018.03.005](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.03.005).
- [2] ETANCELIN J M, FABBRI A, GUINAND F, *et al.* DACYCLEM: A decentralized algorithm for maximizing coverage and lifetime in a mobile wireless sensor network[J]. *Ad Hoc Networks*, 2019, 87: 174–187. doi: [10.1016/j.adhoc.2018.12.008](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.12.008).
- [3] HACIOGLU G, KAND V F A, and SESLI E. Multi objective clustering for wireless sensor networks[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 59: 86–100. doi: [10.1016/j.eswa.2016.04.016](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.04.016).
- [4] ALIA O M and Al-AJOURI A. Maximizing wireless sensor network coverage with minimum cost using harmony search algorithm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(3): 882–896. doi: [10.1109/jsen.2016.2633409](https://doi.org/10.1109/jsen.2016.2633409).
- [5] ABO-ZAHHAD M, SABOR N, SASAKI S, *et al.* A centralized immune-Voronoi deployment algorithm for coverage maximization and energy conservation in mobile wireless sensor networks[J]. *Information Fusion*, 2016, 30: 36–51. doi: [10.1016/j.inffus.2015.11.005](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2015.11.005).
- [6] XU Ying, DING Ou, QU Rong, *et al.* Hybrid multi-objective evolutionary algorithms based on decomposition for wireless sensor network coverage optimization[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 68: 268–282. doi: [10.1016/j.asoc.2018.03.053](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.03.053).
- [7] ROUT M and ROY R. Dynamic deployment of randomly deployed mobile sensor nodes in the presence of obstacles[J]. *Ad Hoc Networks*, 2016, 46: 12–22. doi: [10.1016/j.adhoc.2016.03.004](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.03.004).
- [8] MAHBOUBI H and AGHDAM A G. Distributed deployment algorithms for coverage improvement in a network of wireless mobile sensors: Relocation by virtual force[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2017, 4(4): 736–748. doi: [10.1109/TCNS.2016.2547579](https://doi.org/10.1109/TCNS.2016.2547579).
- [9] HABIBI J, MAHBOUBI H, and AGHDAM A G. A gradient-based coverage optimization strategy for mobile sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2017, 4(3): 477–488. doi: [10.1109/TCNS.2016.2515370](https://doi.org/10.1109/TCNS.2016.2515370).
- [10] LEE H J, KIM Y H, HAN Y H, *et al.* Centroid-Based movement assisted sensor deployment schemes in wireless sensor networks[C]. The 70th Vehicular Technology Conference Fall, Anchorage, USA, 2009. doi: [10.1109/VETECE.2009.5379087](https://doi.org/10.1109/VETECE.2009.5379087).
- [11] FANG Wei, SONG Xinhong, WU Xiaojun, *et al.* Novel efficient deployment schemes for sensor coverage in mobile wireless sensor networks[J]. *Information Fusion*, 2018, 41: 25–36. doi: [10.1016/j.inffus.2017.08.001](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2017.08.001).
- [12] BARTOLINI N, BONGIOVANNI G, PORTA T L, *et al.* Voronoi-based deployment of mobile sensors in the face of adversaries[C]. 2014 IEEE International Conference on Communications, Sydney, Australia, 2014: 532–537. doi: [10.1109/ICC.2014.6883373](https://doi.org/10.1109/ICC.2014.6883373).
- [13] QIU Chenxi and SHEN Haiying. A delaunay-based coordinate-free mechanism for full coverage in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 25(4): 828–839. doi: [10.1109/TPDS.2013.134](https://doi.org/10.1109/TPDS.2013.134).
- [14] LI Wei and ZHANG Wei. Coverage hole and boundary nodes detection in wireless sensor networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2015, 48: 35–43. doi: [10.1016/j.jnca.2014.10.011](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2014.10.011).
- [15] JOSHITHA K L and JAYASHRI S. A novel redundant hole identification and healing algorithm for a homogeneous distributed Wireless Sensor Network[J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 104(4): 1261–1282. doi: [10.1007/s11277-018-6079-5](https://doi.org/10.1007/s11277-018-6079-5).
- [16] SO-IN C, NGUYEN T G, and NGUYEN N G. An efficient coverage hole-healing algorithm for area-coverage improvements in mobile sensor networks[J]. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2019, 12(3): 541–552. doi: [10.1007/s12083-018-0675-8](https://doi.org/10.1007/s12083-018-0675-8).

周非:男,1977年生,博士,教授,研究方向为无线定位、信号处理、图像处理等。

郭浩田:男,1994年生,硕士,研究方向为无线传感网络。

杨伊:女,1992年生,硕士,研究方向为无线传感网络。