

1-8-2019

## Dynamic Covering Algorithm of Node Based on Virtual Force in Wireless Sensor Networks

Zhou Fei

*Chongqing Key Laboratory of Optical Communication and Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunication, Chongqing, 400065, China;*

Jianjun Gao

*Chongqing Key Laboratory of Optical Communication and Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunication, Chongqing, 400065, China;*

Xinyue Fan

*Chongqing Key Laboratory of Optical Communication and Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunication, Chongqing, 400065, China;*

Kangning An

*Chongqing Key Laboratory of Optical Communication and Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunication, Chongqing, 400065, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Dynamic Covering Algorithm of Node Based on Virtual Force in Wireless Sensor Networks

## Abstract

**Abstract:** Network coverage and node power consumption are two main performance indicators in wireless sensor networks (WSNs). Although many of the existing coverage methods have improved the two indicators, most of them have only improved for one performance, and the merits of another performance have not been discussed in detail. For this insufficient, an improved algorithm based on VFA is proposed. The WSN is divided into unit grids. *The nodes select the grid forces and other forces adaptively. Under the combined forces, the nodes are re-deployed and the dynamic coverage of WSN is further optimized, so that the WSN achieves a better coverage state. By modifying the force threshold, the energy consumption of the dynamic nodes is as small as possible.* The simulation results show that the algorithm can not only achieve large network coverage and less node power consumption, but also has the advantages of fast convergence speed and low computational complexity.

## Keywords

wireless sensor network, virtual force, binary sensing model, network cover

## Recommended Citation

Zhou Fei, Gao Jianjun, Fan Xinyue, An Kangning. Dynamic Covering Algorithm of Node Based on Virtual Force in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 2908-2917.

## 无线传感网络中基于虚拟力的节点动态覆盖算法

周非, 高建军, 范馨月, 安康宁

(光通信与网络重点实验室, 重庆邮电大学, 重庆 400065)

**摘要:** 网络覆盖率和节点功耗是 WSNs(Wireless Sensor Networks)中主要考虑的 2 个性能指标, 尽管现有的许多覆盖方法对这 2 个指标做了相应的提升, 但它们大多只针对一个性能进行改进, 而对另一个性能的优劣未作详细的讨论。针对这种不足, 提出了一种基于 VFA(Virtual Force Algorithm)的改进算法, 将 WSN 进行网格划分, 节点对网格的作用力和其它作用力进行自适应选择; 在所选合力作用下, 传感器节点进行重新部署, 进一步优化 WSN 的动态覆盖, 使 WSN 达到较优的覆盖状态; 同时, 通过对合力门限值的修正, 使动态节点的能耗尽可能较少。仿真结果表明, 该算法不但能实现较大的网络覆盖和较少的节点功耗, 而且还有收敛速度快, 计算量小, 冗余度低等优点。

**关键词:** 无线传感网络; 虚拟力; 二进制传感模型; 网络覆盖

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2018)08-2908-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808012

## Dynamic Covering Algorithm of Node Based on Virtual Force in Wireless Sensor Networks

Zhou Fei, Gao Jianjun, Fan Xinyue, An Kangning

(Chongqing Key Laboratory of Optical Communication and Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunication, Chongqing, 400065, China)

**Abstract:** Network coverage and node power consumption are two main performance indicators in wireless sensor networks (WSNs). Although many of the existing coverage methods have improved the two indicators, most of them have only improved for one performance, and the merits of another performance have not been discussed in detail. For this insufficient, an improved algorithm based on VFA is proposed. The WSN is divided into unit grids. The nodes select the grid forces and other forces adaptively. Under the combined forces, the nodes are re-deployed and the dynamic coverage of WSN is further optimized, so that the WSN achieves a better coverage state. By modifying the force threshold, the energy consumption of the dynamic nodes is as small as possible. The simulation results show that the algorithm can not only achieve large network coverage and less node power consumption, but also has the advantages of fast convergence speed and low computational complexity.

**Keywords:** wireless sensor network; virtual force; binary sensing model; network cover

## 引言

无线传感网络(WSN)具有对感知目标信息收



收稿日期: 2016-11-11 修回日期: 2017-02-23;  
基金项目: 国家自然科学基金(61471077);  
作者简介: 周非(1977-), 男, 湖北浠水, 博士, 教授, 研究方向为无线定位, 信号处理, 网络安全, 图像处理等; 高建军(1990-), 男, 山西朔州, 硕士生, 研究方向为无线传感网络。

集和处理的能力, 现已在环境监测<sup>[1-2]</sup>, 目标追踪<sup>[3]</sup>等领域得到广泛的应用。考虑到传感器数量和能量有限, 完成相同的任务, 用到的传感器越少越好。网络覆盖率<sup>[4]</sup>和节点能耗<sup>[5]</sup>是传感质量和传感效率的保证, 而节点的部署结构则直接影响着网络覆盖率和传感器能耗。近几年许多文献提出了移动自组织网络, 利用节点的动态部署实现无线传感网络的

<http://www.china-simulation.com>

• 2908 •

覆盖<sup>[6]</sup>和目标的追踪<sup>[7]</sup>。

Zou 等<sup>[8]</sup>将虚拟力的概念用于节点的动态分析中, 他们认为节点之间的受力与距离有关, 但没有考虑边界对节点力的作用和节点功耗优化问题。Howard 等<sup>[9]</sup>把势能概念运用到虚拟力的分析中, 它的优点是在恶劣环境下也能实现网络覆盖, 但没有考虑节点间的连通性问题, 而且该算法属于集中式算法, 计算复杂度高且不能快速收敛。文献[10-11]将 VFA 和 PSO(Particle Swarm Optimization)两种算法联系在一起形成 VF-PSO 算法, 在粒子进化过程中, 既改善了 VFA 算法中节点分布不均匀的缺点, 又解决了 PSO 算法中局部最优的难题, 但该算法的缺点是计算量大, 算法复杂度高, 收敛速度慢, 且该算法未对节点功耗作改进。文献[12]中 VF-BBO (Biogeography-Based Optimization)算法, 不但提高了 BBO 算法的收敛速度, 而且在网络覆盖率上也高于 BBO 算法, 这种算法的缺点是只考虑了网络覆盖率的性能, 未对节点功耗作相应的提高。Chen 等<sup>[13]</sup>提出了 IVFA (Improved Virtual Force Algorithm)和 EVFA (Exponential Virtual Force Algorithm)两种改进的虚拟力算法, 虽然一定程度上改进了传统算法的缺点, 但在网络覆盖率和节点功耗上却没有达到最优, 且未对传感范围内存在障碍物的情况进行分析。文献[14]运用了 OAVFA (Obstacle Avoidance Virtual Force Algorithm)对文献[13]做了改进, 提出了在存在障碍物的情况下实现网络最优覆盖的策略, 但该算法的计算量较大, 且收敛速度较慢。Yu 等<sup>[15]</sup>提出了基于相邻节点间的虚拟力算法, 提高了网络覆盖率并缩短了收敛时间, 但对节点功耗未做详细的改进, 且节点之间的冗余度较大。文献[16]提出了 DVFA (Distributed Virtual Forces Algorithm)模型, 在有障碍物的情况下实现了网络覆盖和节点间连通问题的优化, 但这种算法需要较多的传感器, 没有考虑节点功耗问题, 且计算时间较长。文献[17]用三种改变拓扑结构的算法与扩展匈牙利方法相互结合, 解决了静态目标节点的覆盖和网络的连通问题, 使得节点在整

个运动过程中, 功耗最小, 该算法的缺点是只做了对有限静态目标节点的覆盖研究, 未对整个网络进行覆盖检测。Xiaoping 等<sup>[18]</sup>分析了四种虚拟力模型在节点分布算法中的优劣, 并对多种参数进行了性能比较, 但未对覆盖率和功耗整体性能进行优化, 且没有对存在障碍物的情况进行分析。基于以上所提出的覆盖率, 功耗, 收敛速度, 算法复杂度和冗余度等问题, 本文提出了一种改进虚拟力算法, 在提高覆盖率的同时, 减少了节点的功耗和算法计算量, 并缩短了节点达到稳定状态的收敛时间。

## 1 相关工作

### 1.1 二进制传感模型

一般情况下, 传感区域定义为一个二维网格, 通过判断网格中心点和节点之间的距离, 修正传感器节点的位置, 以此来提高网络覆盖率<sup>[19]</sup>。每个传感器的监测范围是以节点为圆心, 半径为其感知距离(即探测距离)的一个圆形区域。通常情况下, 目标在探测距离内(被节点感知)记为 1, 超出探测距离(未被节点感知)记为 0, 因此这种感知模型称为二进制感知模型(也叫 0-1 感知模型)。

假设传感区域被划分为  $m \times n$  个网格, 每个网格的大小为 1, 则可用式(1)表示网格点  $G(x, y)$  是否被节点  $S_i(x_i, y_i)$  感知。

$$p(x, y, s_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \leq R_s \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $R_s$  为节点的传感半径,  $p(x, y, s_i)$  为单个网格是否被某一个节点覆盖的判断。

假设一个无线传感网络由  $N$  个移动节点组成(即  $s = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ ), 则传感网络中某个网格被覆盖的概率可用式(2)表示。

$$p(x, y, s) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p(x, y, s_i)) \quad (2)$$

式中:  $N$  表示节点个数,  $p(x, y, s)$  表示单个网格至少被一个节点覆盖的概率,  $p(x, y, s_i)$  表示单个网格被某一个节点覆盖的概率。

每个传感器的覆盖面积为  $A_{s_i} = \pi R_s^2$ ，因此传感区域内所有传感器的最大覆盖面积可用式(3)表示。

$$A_{max}(s) = \sum_{i=1}^N A_{s_i} \quad (3)$$

式中： $N$  为传感器个数； $R_s$  是传感半径。

则节点实际覆盖的总面积  $A_{cov}(s)$  与最大覆盖面积  $A_{max}(s)$  之间的关系可用式(4)表示。

$$A_{cov}(s) = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n p(x, y, s) \leq A_{max}(s) \quad (4)$$

式中： $m \times n$  为传感区域中的网格数， $p(x, y, s)$  为单个网格至少被一个传感器覆盖的概率，

$\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n p(x, y, s)$  表示被覆盖的网格总数，网格的面

积为单位 1。

同时未覆盖的面积如式(5)所示：

$$A_{uncov}(s) = A_{total} - A_{cov} \quad (5)$$

式中： $A_{total}$  表示整个网络的面积， $A_{cov}$  表示所有节点的实际覆盖面积。

目标 1：基于以上的介绍，整个传感区域的覆盖率可用式(6)表示。

$$R_{cov}(s) = \frac{A_{cov}(s)}{A_{total}} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n p(x, y, s)}{m \times n} \quad (6)$$

式中： $A_{total}$  是传感区域的总面积。本文算法，在迭代 50 次左右，覆盖率可超过 99.5%，远大于相同条件下，其它算法的覆盖率。

目标 2：为了便于计算，本文用所有节点的平均移动距离来代替能耗，如式(7)所示。

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{d_i^2}}{N} \quad (7)$$

式中： $d_i = \sqrt{(x_{final} - x_{initial})^2 + (y_{final} - y_{initial})^2}$  是第  $i$  个传感器初始位置  $s_i(x_{initial}, y_{initial})$  和最终位置  $s_i(x_{final}, y_{final})$  的距离。本文算法在迭代 70 次左右时，平均功耗不超过 0.02( $d_f=1.5$ ， $d_f$  是本文设定的合力门限值，决定着节点之间的重叠程度，以及节点的动态运动时间)，相同条件下，本文算法中节

点的能量消耗较 IVFA 算法降低了约 93.3%，较 EVFA 算法降低了约 92%，较 OAVFA 算法降低了约 83.3%；若  $d_f=2$  时，在迭代 60 次左右，功耗降为 0，即节点达到绝对平衡。

## 1.2 传统虚拟力模型

传统虚拟力是将节点抽象成势力场中的粒子，它们对周围的节点有力的作用。按照一定的规则设定传感器节点间力的作用和距离之间的关系，在合力作用下移动节点，有效的避免节点分布过度密集或稀疏。

虚拟力算法采用距离阈值  $D_{th}$  调整节点间相互作用力来实现覆盖。式(8)~(9)是节点  $j$  对节点  $i$  施加的虚拟力分析，

$$\vec{F}_{ij} = \begin{cases} w_a(d_{ij} - D_{th}), \alpha_{ij} & \text{if } d_{ij} > D_{th} \\ 0 & \text{if } d_{ij} = D_{th} \\ w_r d_{ij}^{-1}, \alpha_{ij} + \pi & \text{if } d_{ij} < D_{th} \end{cases} \quad (8)$$

$$\vec{F}_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N \vec{F}_{ij} \quad (9)$$

式中： $w_a$ ， $w_r$  是虚拟力系数， $d_{ij}$  是节点  $s_i$  到节点  $s_j$  之间的距离， $\alpha_{ij}$  是从节点  $s_j$  到节点  $s_i$  的方向， $F_i$  是传感区域内所有其它节点对节点  $s_i$  的合力。

图 1 是在  $N=40$ ， $RIO=100 \times 100$  的传感区域内，迭代次数  $t=300$ ， $w_a=1$ ， $w_r=1000$ ， $D_{th} = \sqrt{3}R_s$ ， $R_s=10$  的条件下的节点在传统虚拟力作用下的运动轨迹图。从图中可以看到，由于没有边界条件的限制，许多节点在虚拟力的作用下运动出界，不但浪费传感器，而且需要耗费大量的能耗。本文在传统虚拟力算法的基础上作了适当的改进，不但提高了无线传感网络的覆盖率，而且使节点在运动过程中实现能耗最小化，同时，减小了节点间的冗余覆盖，用最短的时间去实现节点的快速收敛，并对传感区域中存在障碍物的情况做了详细的分析，对覆盖率、功耗、收敛时间等性能做了讨论。现将传统虚拟力算法的缺点总结如下：

(1) 传感器出界是传统虚拟力算法最主要的缺陷；

- (2) 传感器无法达到稳定状态;  
 (3) 无效移动增加了额外的功耗, 缩短了节点的寿命;  
 (4) 约束条件太少, 使得覆盖率不能保证。

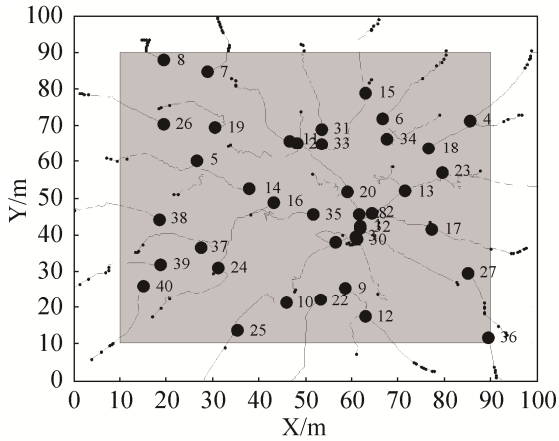


图1 节点在虚拟力作用下的运动轨迹

Fig. 1 Motion trajectories of nodes under the action of virtual forces

通过对传统虚拟力算法的分析, 本文将用改进后的算法克服节点在覆盖过程中存在的缺点, 并且通过与其它几种改进的虚拟力算法进行性能比较, 体现本论文算法在覆盖率、功耗、收敛时间等方面的有效性。

## 2 基于虚拟力的稳定分布算法

为了有效的提高节点覆盖的收敛速度, 增大无线传感网络的覆盖率, 同时减少节点的能量消耗, 本文对虚拟力算法做了相应的改进, 有效的解决了以上所提出的问题。

### 2.1 基本假设

- (1) 个传感器的传感范围都是半径为  $R_s$  的圆; 所有传感器都有相同的传感半径  $R_s$  和通信半径  $R_c$ ;  
 (2) 所有的传感器都是可移动, 随机分布在传感区域之内, 其初始位置可通过 GPS 或其它定位设备获取;  
 (3) 传感范围内障碍物的位置已知, 并且可以

- 被传感器检测到, 但传感器不能跨越障碍物;  
 (4) 传感区域设置为 2 维网络。

### 2.2 虚拟力分析

- (1) 未覆盖网格对传感器节点的引力

由式(5)中  $A_{uncov}$  可知初始时刻未被覆盖的网格及其相应的坐标, 为了增加无线传感网络的覆盖率, 假设这些未覆盖的网格在一定范围内对节点产生一个引力作用, 使其快速收敛, 可用式(10)表示。

$$\vec{F}_{ik} = \begin{cases} k_A(d_{ik} - R_c) \left( \frac{uncov(k) - s(i)}{d_{ik}} \right) & \text{if } R_s \leq d_{ik} \leq R_c \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $k$  为未覆盖网格数,  $k_A$  是比例系数,  $d_{ik} = \sqrt{(x(i,1) - uncov(k,1))^2 + (x(i,2) - uncov(k,2))^2}$  是节点与未覆盖网格的距离,  $uncov(k)$  是未覆盖网格的坐标,  $s(i)$  是节点的坐标,  $R_s$  和  $R_c$  分别表示节点的传感半径和通信半径。

- (2) 传感器节点之间的力

传感区域内节点之间的受力如式(11)所示。

$$\vec{F}_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } d_{ij} > R_c \\ k_B(s(i) - s(j)) \left( \frac{s(i) - s(j)}{d_{ij}} \right) & \text{if } R_c \geq d_{ij} > d_1 \\ 0 & \text{if } d_1 \geq d_{ij} > d_2 \\ k_C(s(i) - s(j)) \left( \frac{s(i) - s(j)}{d_{ij}} \right) & \text{if } d_{ij} \leq d_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $k_B$  和  $k_C$  是比例系数,  $s(i)$  和  $s(j)$  是节点坐标,  $d_1$  和  $d_2$  是所设的门限值, 它们之间的范围越大, 越容易达到平衡, 但相应的受力会减少, 本论文中假设  $d_1 = \sqrt{3}R_s + 1$ ,  $d_2 = \sqrt{3}R_s - 5$ ,  $d_{ij} = \sqrt{(x(i,1) - x(j,1))^2 + (x(i,2) - x(j,2))^2}$  是节点之间的距离。

- (3) 障碍物的斥力

由于节点不能运动到障碍物内部, 所以一定条件下障碍物会对节点产生斥力, 如式(12)所示。

$$\vec{F}_{io} = \begin{cases} 0 & \text{if } d_{io} \geq d_o \\ k_D(s(i) - s(o)) & \text{if } d_{io} < d_o \end{cases} \quad (12)$$

式中： $k_D$ 是比例系数， $s(i)$ 是节点的坐标， $s(o)$ 是障碍物边界的坐标， $d_{io}$ 是节点到障碍物之间的垂直距离， $d_o$ 是所设的靠近障碍物的门限值。

(4) 边界的斥力

为了防止节点运动出界，在一定范围内，节点会受到边界的斥力，如公式(13)所示，

$$\overline{F}_{ib} = \begin{cases} 0 & \text{if } d_{ib} \geq d_b \\ k_E(s(i) - s(b)) & \text{if } d_{ib} < d_b \end{cases} \quad (13)$$

式中： $k_E$ 是力的系数， $d_{ib}$ 是节点到传感边界的垂直距离， $d_b$ 为靠近边界的门限值， $s(i)$ 是节点坐标， $s(b)$ 是边界坐标。

节点所受x方向合力可用式(14)表示，

$$F_x = F_{ikx} + F_{ijx} + F_{iox} + F_{ibx} \quad (14)$$

式中： $F_{ikx}$ 表示未覆盖网格k对节点i在x方向的引力作用， $F_{ijx}$ 表示节点j对节点i在x方向的作用力， $F_{iox}$ 表示障碍物o对节点i在x方向的斥力作用， $F_{ibx}$ 表示边界b对节点i在x方向的斥力作用， $F_x$ 表示节点i在x方向所受的合力。

节点所受y方向合力可用式(15)表示，

$$F_y = F_{iky} + F_{ijy} + F_{ioy} + F_{iby} \quad (15)$$

式中： $F_{iky}$ 表示未覆盖网格k对节点i在y方向的引力作用， $F_{ijy}$ 表示节点j对节点i在y方向的作用力， $F_{ioy}$ 表示障碍物o对节点i在y方向的斥力作用， $F_{iby}$ 表示边界b对节点i在y方向的斥力作用， $F_y$ 表示节点i在y方向所受的合力。

则节点所受合力如式(16)所示。

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (16)$$

2.3 坐标的更新

在合力  $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$  作用下，节点每次迭代都按照式(17)~(18)实现坐标的更新，为了快速和稳定的覆盖，在节点所受合力满足一定条件后，坐标将不在更新，如下所示。

$$x(i,1) = \begin{cases} x_{old}(i,1) & F < d_f \\ x_{old}(i,1) + \frac{F_x}{F} \cdot \max\_step \cdot e^{-\frac{1}{F}} & \text{other} \end{cases} \quad (17)$$

$$x(i,2) = \begin{cases} x_{old}(i,2) & F < d_f \\ x_{old}(i,2) + \frac{F_y}{F} \cdot \max\_step \cdot e^{-\frac{1}{F}} & \text{other} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $x(i,1)$ ， $x(i,2)$ 表示节点更新后的横坐标和纵坐标， $x_{old}(i,1)$ 和 $x_{old}(i,2)$ 表示前一时刻节点的横坐标和纵坐标， $\max\_step$ 表示节点每次运动的最大步长， $F_x$ ， $F_y$ ， $F$ 分别表示节点i所受x方向的合力，y方向的合力，以及最终的合力， $d_f$ 是节点所受合力的门限值，适当的  $d_f$ 可以让节点快速收敛，并且减少能量的消耗。

为了确保节点在每次作用力下的运动一定在传感范围内，本文又增加了一项约束条件，即式(19)~(20)所示，在这个约束条件的确保下，传感器节点一定不会出界，而是在传感区域内，在合力的作用下快速收敛，达到更高的覆盖率。

$$x(i,1) = \begin{cases} x_{min} + 1.5 & \text{if } x(i,1) < x_{min} \\ x_{max} - 1.5 & \text{if } x(i,1) > x_{max} \end{cases} \quad (19)$$

$$x(i,2) = \begin{cases} y_{min} + 1.5 & \text{if } x(i,2) < y_{min} \\ y_{max} - 1.5 & \text{if } x(i,2) > y_{max} \end{cases} \quad (20)$$

式中： $x_{min}$ ， $x_{max}$ ， $y_{min}$ ， $y_{max}$ 表示传感区域的四个边界值， $x(i,1)$ 和 $x(i,2)$ 表示i点更新之后的横坐标和纵坐标。

2.4 算法实现过程的伪代码

算法 1 为基于无线传感网络的节点自适应动态分布算法，伪代码如下：

```

Input:  $R_s, R_c, RIO=100 \times 100, d_1, d_2, d_o, d_b, \max\_step, d_f, k_A, k_B, k_C, k_D, k_E, N, t, F$ ;
Output:  $R_{cov}, \bar{D}$ ;
Initialized localization of  $N; k \leftarrow 0; F \leftarrow 0$ ;
For each  $k_i (1 \leq i \leq 100 \times 100)$ 
  For each  $j (1 \leq j \leq N)$ 
    If  $dist(k_i, j) \geq R_s$  then
       $k = k + 1$ ;
    End if
  End for

```

```

End for
For t=0:300
  For each  $i(1 \leq i \leq N)$ 
    For each  $k_g(1 \leq g \leq k)$ 
      If  $dist(i, k_g)$  similar to (10) then
        Calculate  $F_{ik}$ ;
      End if
       $F_i = F \cup \{F_{ik}\}$ ;
    End for
  For each  $j(1 \leq j \leq N)$ 
    If  $dist(i, j)$  similar to (11) then
      Calculate  $F_{ij}$ ;
    End if
     $F_i = F_i \cup \{F_{ij}\}$ ;
  End for
  For each  $o$ 
    If  $dist(i, o)$  similar to (12) then
      Calculate  $F_{io}$ ;
    End if
     $F_i = F_i \cup \{F_{io}\}$ ;
  End for
  For each  $b(1 \leq b \leq 4)$ 
    If  $dist(i, b)$  similar to (13) then
      Calculate  $F_{ib}$ ;
    End if
     $F_i = F_i \cup \{F_{ib}\}$ ;
  End for
  If  $F_i \geq d_f$  then
    Update  $(x, y)$  similar to (17)(18);
  End if
  Make sure not out similar to (19)(20);
  Update  $R_{cov}(t), \bar{D}(t)$  similar to (6)(7);
  End for
  Return  $R_{cov}, \bar{D}$ ;
End for

```

算法 1 主要通过无线传感网络的覆盖率和节点功耗等性能评估本文算法的优点。首先, 计算初始时刻的未覆盖网格数  $k$  及其坐标; 其次, 对每个

节点进行受力分析, 通过式(10)~(13)分别进行未覆盖网格对节点的引力, 节点之间的作用力, 障碍物对节点的斥力以及边界对节点的斥力分析; 最后, 当每个节点的所有受力都分析完成后, 求出该节点的合力  $F_i$ , 与本文设定的合力门限值  $d_f$  进行比较, 若合力  $F_i$  大于  $d_f$ , 则利用式(17)~(18)更新节点的坐标, 否则不更新, 每更新完一个节点位置后, 利用式(19)~(20)再次进行出界判断, 确保节点未出界; 每次迭代完成后, 将此时的网络覆盖率和节点功耗分别存储在  $R_{cov}(t)$  和  $D(t)$  中, 并重新用计算未覆盖网格数  $k$  及其坐标; 取迭代次数  $t=300$ , 之后通过比较  $R_{cov}$  和  $\bar{D}$  在迭代过程中的变化, 展示本算法在以上所提性能及收敛速度等方面的优点。由于本文提出了合力门限值的概念, 在低于合力门限值的条件下, 节点将不会运动, 避免了震荡现象的发生, 大大减少了计算量, 降低了计算复杂度, 且由于本文提出了多种力的相互作用, 使得节点在迭代 60 次左右就会实现平衡, 具体分析将在下节的仿真中展示。

### 3 仿真分析和性能评估

仿真环境如下: Matlab8.3, 为了更好的与 IVFA, EVFA 和 OAVFA 的性能进行比较, 本文所用相关参数如下,  $R_s=10$ ,  $R_c=2R_s$ , 传感区域为  $RIO=100 \times 100$ ,  $d_1=\sqrt{3}R_s+1$ ,  $d_2=\sqrt{3}R_s-5$ ,  $d_o=d_b=\sqrt{3}/2R_s$ ,  $d_f=1.2$ ,  $\max\_step=0.5$ ,  $k_A=-0.005$ ,  $k_B=0.01$ ,  $k_C=0.2$ ,  $k_D=k_E=0.8$ ,  $N=40$ ,  $t=300$ 。

#### 3.1 算法分析

图 2~5 是利用以上参数所仿真的传感器节点在各种虚拟力作用下的运动过程图, 图 2 为初始分布图, 图 3 为迭代 50 次后的节点分布图, 图 4 为迭代 300 次后的节点分布图, 图 5 为在迭代过程中的网络覆盖率变化图。



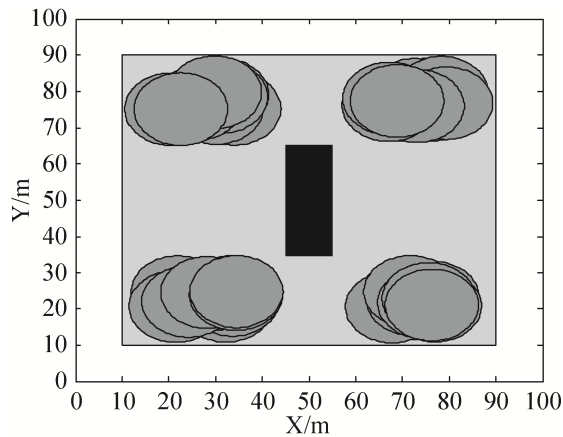


图2 节点初始分布图

Fig. 2 Node initial distribution diagram

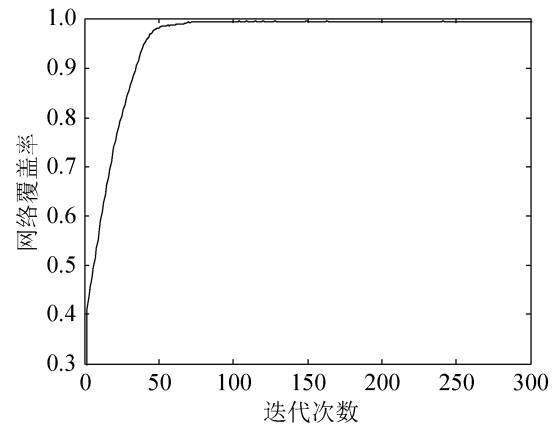


图5 节点覆盖率变化图

Fig. 5 Node coverage variation diagram

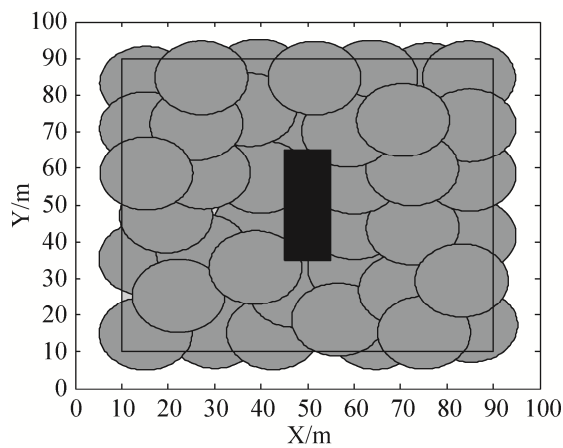


图3 节点迭代50次后的分布图

Fig. 3 Distribution diagram of nodes after 50 iterations

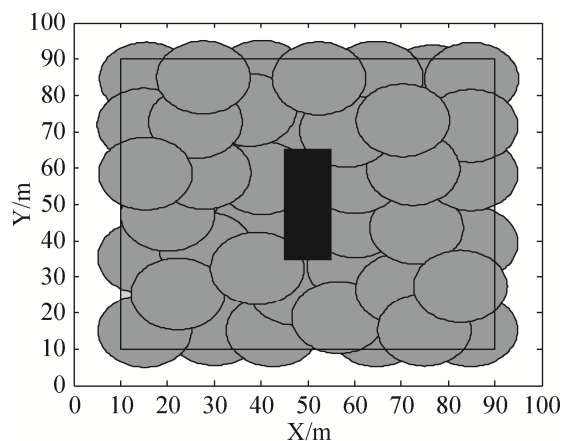


图4 节点迭代300次后的分布图

Fig. 4 Distribution diagram of nodes after 300 iterations

从图2, 图3和图4的节点运动过程中可以看到, 图2经过50次迭代后, 节点分布如图3所示, 而图4是经过300次迭代后的节点分布, 图3和图4中的节点分布几乎没有改变, 说明节点在迭代50次就几乎达到平衡状态。而从图5中更能清晰的看到, 传感器节点在迭代超过60次之后几乎已经达到覆盖的稳定状态, 收敛速度较快, 而且网络覆盖率可以达到99.5%以上, 若取恰当的合力门限值, 传感器节点的功耗可以在约60次迭代后降为0, 即传感器节点达到绝对平衡, 这将在稍后的仿真中给出详细分析。

### 3.2 多种算法的性能比较

为了体现本文算法的优势, 本节将用相同的参数对同样是对虚拟力算法改进的几种算法(包括IVFA, EVFA, OAVFA)进行仿真对比, 从覆盖率, 收敛速度, 功耗等多方面做出分析, 从而体现出本文算法在多种性能上的优势。图6是在其它参数不变的情况下, 传感器节点数分别为 $N=20, 30, 40$ 时的多种算法的覆盖率仿真对比图。

从图6可知, 随着节点数的增加, 各种算法的覆盖率随之增加, 但是在传感器数量相同的条件下, 本文所提出的算法覆盖性能更好, 覆盖率分别可达到88%, 97%, 99.5%。当传感器降为20的时候, 可以看到本文的算法仍然能达到88%左右的覆盖, 而其他几种算法的覆盖性能则明显降低。

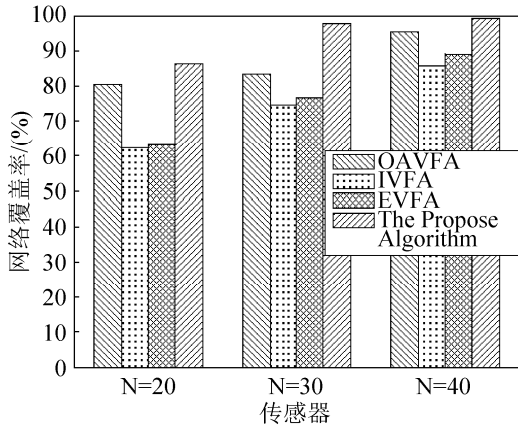


图6 不同节点下, 四种算法的覆盖率比较  
Fig. 6 Coverage comparison of four algorithms under different nodes

一般情况, 传感区域中运动的节点越多, 能量消耗越大, 所以图7取  $N=40$ , 比较四种算法在相同条件下的功耗, 可以明显的看到, 本文算法中的节点消耗的能量远远低于其它算法, 几乎可以稳定在 0.04 以下, 如果取适当的合力门限值, 节点功耗最终降为 0, 达到绝对平衡, 传感器停止运动, 下一小节将用仿真图详细介绍。

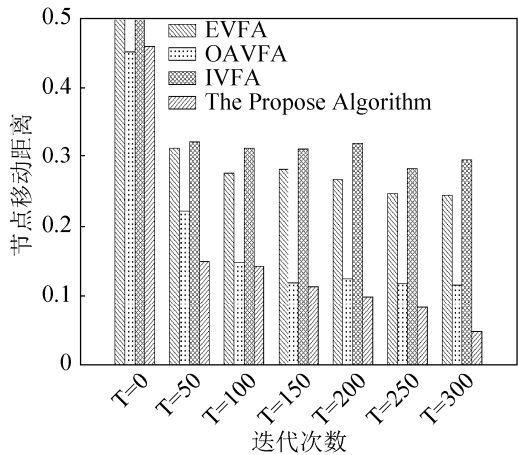


图7  $d_f=1$  时的功耗对比图  
Fig. 7 Power consumption comparison diagram at  $d_f=1$

### 3.3 虚拟力门限对性能的影响

本文中合力控制着传感器的运动, 同时与节点的功耗有关, 合力越大, 节点运动时间越长, 能量消耗越大。适当的合力门限值会使节点作更少的无效移动, 减少节点的能量消耗。取  $N=40$ , 不同合力门限值下的节点能量消耗分析如下。

从以上仿真结果可知, 由于本文仿真中假设节点最大移动步长为 0.5, 所以节点在最开始的移动距离为 0.5。从图7~9中, 我们可以看到, 随着迭代次数的增加, 节点的移动距离在逐渐减小; 同时随着合力门限值  $d_f$  的增加, 节点收敛速度越来越快, 这就说明节点达到平衡状态的时间越来越短, 当合力门限值  $d_f=2$  时, 节点在迭代 50 次后, 功耗降为 0, 也就是说在迭代 50 次之后, 节点达到绝对平衡。

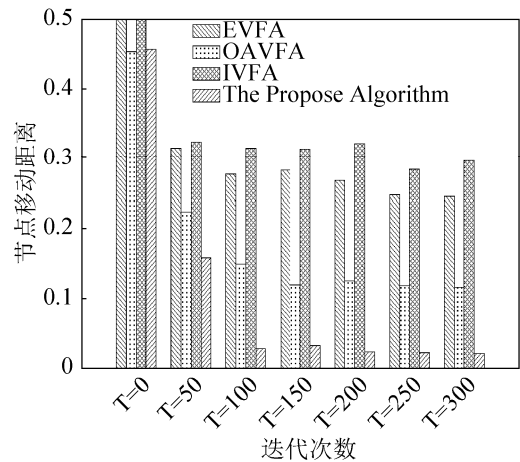


图8  $d_f=1.5$  的功耗对比图  
Fig. 8 Power consumption comparison diagram at  $d_f=1.5$

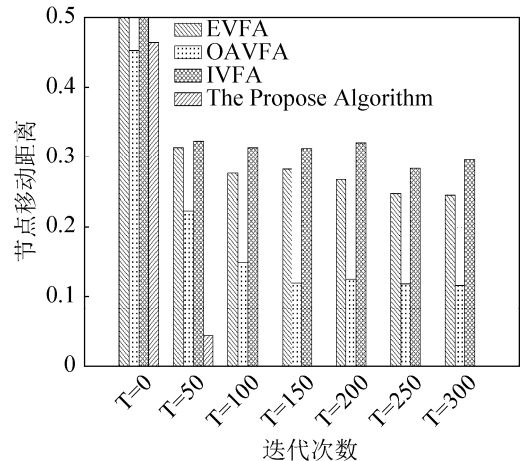


图9  $d_f=2$  时的功耗对比图  
Fig. 9 Power consumption comparison diagram at  $d_f=2$

从图10中可以很清晰的看到, 合力门限值  $d_f$  越大, 网络覆盖率越低。取  $N=40$  时, 当  $d_f=1$  时, 覆盖率超过 99.5%, 而当  $d_f=2$  时, 覆盖率为 98%

左右；结合图7和图9可以知道， $d_f$ 为1时，功耗为0.03左右，达到动态平衡，而 $d_f$ 为2时，功耗降为0，达到绝对平衡，也就是说合力门限值越大，节点能耗越多。所以在实际应用中对合力门限值的选择应同时考虑两个方面，遵循一定的原则：从以上仿真图可以知道，当一个传感区域中存在大量的传感器时，我们应该选择尽可能大的合力门限 $d_f$ ，如 $d_f=2$ ，这样能减少节点的运动，降低能耗，延长节点的寿命，同时由于存在大量的传感器，能保证良好的覆盖率；当传感区域中存在较少的传感器时，我们应该选择较小的合力门限 $d_f$ ，如 $d_f=1$ ，这样能使节点分布更加均匀，提高了网络覆盖率，虽然节点能耗略有增加，但整体效果能达到较优的状态；假如在一个大型的传感网络中，由于某种特殊情况，部分节点失效，当节点数低于一定数量时，则合力门限 $d_f$ 将从原来较大的值下调到较小的值，以保证网络整体达到较优的状态。

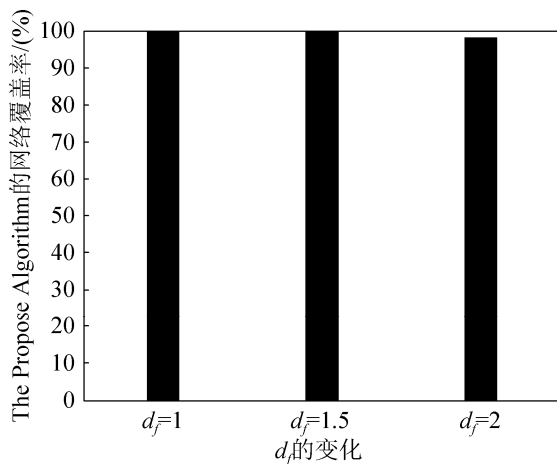


图10 不同合力门限值下的覆盖率比较

Fig. 10 Comparison of coverage ratio under different resultant threshold values

## 4 结论

本文研究了无线传感网络的网络覆盖优化问题，提出了一种基于虚拟力的节点自适应部署算法。该算法首先通过计算初始时刻未被覆盖的单位网格数，使这些网格在一定范围内对节点产生引力作用，在引力和其它虚拟力的作用下，传感器节点

快速收敛，达到最优覆盖的状态；其次通过设置合力门限值，灵活的控制节点在运动过程中所消耗的能量，找到最优的合力门限值，使节点能耗达到最小，与现有的算法相比，本文算法还有计算量小，收敛速度快和冗余度低的优点。大量的仿真结果表明，本文所提的算法能够实现无线传感网络中网络覆盖率和节点功耗同时达到最优，具有收敛速度快，计算量小，冗余度低的优点，即使在节点密度较低的环境下同样表现良好，具有较好的可扩展性。然而本文未对传感区域中存在大量失效传感器的情况进行讨论，且没有对传感区域中存在移动的障碍物进行分析，这将可能成为我们下一步研究的方向。

## 参考文献:

- [1] Huang R, Song W Z, Xu M, et al. Real-World Sensor Network for Long-Term Volcano Monitoring: Design and Findings[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems (S1045-9219), 2011, 23(2): 321-329.
- [2] Mainwaring A, Culler D, Polastre J, et al. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring[J]. Proceedings of the First Acm International Workshop on Wireless Sensor Networks & Applications, 2002, 4(28): 88-97.
- [3] Blumrosen G, Hod B, Anker T, et al. Enhancing RSSI-based tracking accuracy in wireless sensor networks[J]. Acm Transactions on Sensor Networks (S1550-4859), 2013, 9(3): 50-67.
- [4] Liu B, Dousse O, Nain P, et al. Dynamic Coverage of Mobile Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems(S1045-9219), 2013, 24(2): 301-311.
- [5] Lu M, Wu J, Cardei M, et al. Energy-Efficient Connected Coverage of Discrete Targets in Wireless Sensor Networks[J]. International Journal of Ad Hoc & Ubiquitous Computing(S1743-8225), 2009, 4(3/4): 137-147.
- [6] Haeri N. Coverage Problems in Sensor Networks[M]. Springer New York, 2013, 86(1): 899-927.
- [7] Chin J C, Dong Y, Hon W K, et al. On Intelligent Mobile Target Detection in a Mobile Sensor Network[C]// Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007. MASS 2007. IEEE International Conference on. 2007: 1-9.
- [8] Zou Y, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces[C]// Joint Conference

- of the IEEE Computer & Communications Societies. IEEE, 2003, 2: 1293-1303.
- [9] Howard A, Matarić M J, Sukhatme G S. Mobile Sensor Network Deployment using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to the Area Coverage Problem[M]//Distributed Autonomous Robotic Systems 5. Springer Japan, 2002: 299-308.
- [10] Wang X. Dynamic Sensor Deployment Strategy Based on Virtual Force-Directed Particle Swarm Optimization in Wireless Sensor Networks[J]. Acta Electronica Sinica (S0372-2112), 2007, 35(11): 2038-2042.
- [11] 张云亚, 纪志成. 虚拟力导向多粒子群算法的 WSNs 部署策略[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2012, 11(4): 428-431.
- Zhang Y Y, Ji Z C. Virtual Force Based Multiple Particle Swarm Optimization for Deployment Strategy in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Jiangnan University(Natural Science Edition), 2012, 11(4): 428-431.
- [12] Song M, Yang L, Li W, et al. Improving wireless sensor network coverage using the VF-BBO algorithm[C]// 2013 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM), IEEE, 2013: 318-321.
- [13] Chen J, Li S, Sun Y. Novel Deployment Schemes for Mobile Sensor Networks[J]. Sensors(S1424-8220), 2007, 7(11): 2907-2919.
- [14] Rout M, Roy R. Dynamic deployment of randomly deployed mobile sensor nodes in the presence of obstacles[J]. Ad Hoc Networks(S1570-8705), 2016, 46(8): 12-22.
- [15] Yu X, Huang W, Lan J, et al. A Novel Virtual Force Approach for Node Deployment in Wireless Sensor Network[C]//IEEE, International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems. IEEE Computer Society, 2012: 359-363.
- [16] Mahfoudh S, Khoufi I, Minet P, et al. Relocation of Mobile Wireless Sensors in the Presence of Obstacles [C]//International Conference on Telecommunications, 2013: 1-5.
- [17] Liao Z, Wang J, Zhang S, et al. Minimizing Movement for Target Coverage and Network Connectivity in Mobile Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems(S1045-9219), 2015, 26(7): 1971-1983.
- [18] Ren X, Cai Z, Li Z, et al. Performance Analysis of Virtual Force Models in Node Deployment Algorithm of WSN[C]//International Colloquium on Computing, communication, Control, and Management. 2010: 1-9.
- [19] Qu Y, Georgakopoulos S V. Relocation of wireless sensor network nodes using a genetic algorithm[C]//Wireless and Microwave Technology Conference. IEEE, 2011: 1-5.
- [12] Caceres M A, Penna F, Wymeersch H, et al. Hybrid Cooperative Positioning Based on Distributed Belief Propagation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications(S0733-8716), 2011, 29(10): 1948-1958.
- [13] Li B, Wu N, Wang H, et al. Gaussian message passing-based cooperative localization on factor graph in wireless networks[J]. Signal Processing(S1053-5888), 2015, 111(C): 1-12.
- [14] Li W, Yang Z, Hu H. Sequential Particle-Based Sum-Product Algorithm for Distributed Inference in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 2013, 62(1): 341-348.
- [15] Movaghati S, Ardakani M. Particle-Based Message Passing Algorithm for Inference Problems in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Sensors Journal(S1530-437X), 2011, 11(3): 745-754.
- [16] Dauwels J, Korl S, Loeliger H A. Particle Methods as Message Passing[C]// IEEE International Symposium on Information Theory. 2006: 2052-2056.
- [17] Chiou Y S, Tsai F. A reduced-complexity data-fusion algorithm using belief propagation for location tracking in heterogeneous observations.[J]. IEEE Transactions on Cybernetics(S1083-4419), 2014, 44(6): 922-935.
- [18] 占荣辉. 非线性滤波理论与目标跟踪应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- Zhan Rong Hui. Application of nonlinear filtering theory and target tracking [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [19] Briers M, Doucet A, Singh S S. Sequential auxiliary particle belief propagation[C]// International Conference on Information Fusion, 2005: 705-711.
- [20] Geman S, Geman D. Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions, and the Bayesian Restoration of Images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 1984, 6(6): 721-741.

(上接第 2907 页)