

异构无线传感器网络覆盖优化算法

杜晓玉^① 孙力娟^{*①②} 郭剑^① 韩崇^①

^①(南京邮电大学计算机学院 南京 210003)

^②(南京邮电大学江苏省无线传感网高技术重点实验室 南京 210003)

摘要: 针对异构传感网络节点在初始随机部署时产生覆盖盲区的问题,受简单随机抽样理论和最优化算法的启发,该文提出一种适用于感知半径异构的无线传感网覆盖优化算法。该算法以提高网络覆盖率和节点移动距离最小为优化目标,根据采样直线与平面感知圆的交点坐标之间的关系,建立了二次优化的数学模型。当平面中的多条采样直线段达到最优覆盖时,该文算法可以使平面的覆盖得到优化。实验证明,该算法能够有效提高异构网的覆盖率。

关键词: 无线传感器网络; 异构网; 网络覆盖; 最优化算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)03-0696-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00730

Coverage Optimization Algorithm for Heterogeneous WSNs

Du Xiao-yu^① Sun Li-juan^{①②} Guo Jian^① Han Chong^①

^①(College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

^②(Jiangsu High Technology Research Key Laboratory for Wireless Sensor Networks, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: For the problem of coverage blind area generated by randomly deploying the heterogeneous nodes in the initial stage, and inspired by simple random sampling in probability theory and optimization algorithm, a coverage optimization algorithm for heterogeneous sensing radius in Wireless Sensor Networks (WSNs) is proposed. To minimize the sensor nodes' moving distance and improve the coverage rate, a quadratic programming mathematic model is established according to the relationship between coordinates of the intersections that between the sensing circles and the sampling line segments. Meanwhile, the coverage of plane will be optimized when more line segments get optimizing coverage. Simulation results show that the algorithm improves the coverage rate of homogeneous networks effectively.

Key words: Wireless Sensor Networks (WSNs); Homogeneous networks; Network coverage; Optimization algorithm

1 引言

随着无线传感网技术和微电子制造的发展,由大量具有感知能力,计算能力和通信能力的微型传感器节点组成的无线传感器网络被应用到军事领域或民用领域,比如环境监测、工业控制、战场监视、高危环境的探测、生物医学、智能家居及健康监测等^[1-7]。网络覆盖是无线传感器网络的基本问题之一,它反映了传感器网络节点对指定的监控区域监控程度,在很大程度上影响了网络的成本以及网络在各种具体应用中的性能。

覆盖问题在多机器人系统以及计算几何等领域已进行了广泛的研究。无线传感器网络覆盖问题与计算几何中著名的艺术馆走廊的监控问题和圆周覆盖问题密切相关^[4]。艺术馆走廊的监控问题是考虑使用最少数量的摄像机,使得艺术馆走廊内任何角落都能至少被一台摄像机监视。2维平面上的艺术馆走廊监控问题的解决方法是用互不交叠的多个三角形模拟画廊,在每个三角形的任意一个顶点上安装一台摄像机就可以解决此问题,但3维空间中此问题是一个NP完全问题^[4]。监测区域的边界覆盖研究是栅栏覆盖研究的一个特例,文献[1]研究了圆形区域边界的节点覆盖调度问题,通过计算与区域边界相交的感知圆对监测区域的张角来计算覆盖整个圆周所需的最小数目的传感器节点。在一些无线传感器网络的监测应用中,随机部署的传感器节点不需要完全覆盖全部的监测区域,只需要监测区域内的

2013-05-23 收到, 2013-10-25 改回

国家自然科学基金(61171053, 61300239), 江苏省高校自然科学研究重大项目(11KJA520001), 教育部博士点基金(20113223110002)和江苏高校科技创新计划项目(CXZZ12_0481)资助课题

*通信作者: 孙力娟 sunlj@njupt.edu.cn

多个重点对象，这类问题称为多目标覆盖问题^[5, 6]。文献[5]设计了一个传感器节点的感知能耗模型并针对此模型，提出一种启发式分布贪婪算法来解决多目标覆盖问题，该算法以最大化覆盖目标的数量为优化目标建立数学模型，通过改变节点优先级的方式调整传感器节点的感知半径，从而节省网络能耗。文献[6]研究了通过调度传感器节点成多个节点集合，使得网络的生存寿命最长，且连通的目标覆盖问题，要求每个节点集合中的传感器节点既能覆盖目标，又能连通所有的活动传感器节点和汇聚节点。基于虚拟力的覆盖算法也是目前研究的热点^[7-12]，虚拟力算法的核心思想是假定传感器节点部署在虚拟力场中，节点与节点，移动节点与目标区域边界之间存在相互作用力，并基于运动图式理论来共同控制移动节点的运动，实现覆盖的优化。

异构无线传感器网络的异构特性体现在节点异构性、链路异构性和网络协议异构性3方面^[10, 13-16]。其中节点异构性又包括感知能力、计算能力、通信能力和能量等方面的异构性，通信能力、感知能力和能量对覆盖的影响最大。现有文献中关于随机部署的异构无线传感器网络覆盖问题的研究非常少，受到简单随机抽样^[17]和最优化算法^[17, 18]的启发，针对异构传感网络节点初始随机部署时产生覆盖盲区的问题，本文提出了一种基于采样的异构传感网覆盖优化算法(Coverage Optimization algorithm based on Sampling for Homogeneous WSNs, COSH)。以提高网络覆盖率和节点移动距离最小为优化目标，根据采样直线与平面感知圆的交点坐标之间的关系，建立二次优化的数学模型，在节点移动距离最小的情况下达到对线段的最优覆盖。当监测平面中多条采样直线段可以达到最优覆盖时，平面的覆盖可得到优化。本文主要创新点是：(1)通过对平面的采样，将2维平面的覆盖问题转化为1维直线的覆盖问题。(2)根据感知圆与采样直线交点坐标建立非线性二次优化数学模型，并采取约束条件紧缩的方法，将约束条件转化为线性约束，求解问题的次优解。

2 数学模型及假设

假设监测区域 H 为矩形， N 个半径异构的无线传感器节点随机分布在矩形区域 H 内，假设无线传感器网络具有以下性质：

(1)传感器节点感知半径异构，即传感器节点具有不同的感知半径，传感器节点的感知模型为二元感知模型，第 i 个传感器节点 C_i 的位置为 (x_i, y_i) ，感知半径为 r_i 。

(2)各传感节点的通信半径是其最大感知半径的两倍，无线传感器网络保证其连通性。

(3)覆盖算法执行之前，节点已准确定位，节点位置坐标已知^[19]。

(4)节点在平面上可以自由移动，并节点有充足的剩余能量移动到指定位置。

定义1 采样直线。 c 为在2维平面中任意一条直线，直线 c 与监测区域的边界相交于点 A 和点 B 。 AB 为监测平面的采样直线，如图1所示。

定义2 感知圆。传感器节点 C_i 位于2维平面中点 (x_i, y_i) ，传感半径为 r_i ，那么由 C_i 所涵盖的感知区域是一个以 (x_i, y_i) 为圆心，半径为 r_i 的圆，该圆称为感知圆，记为 S_i ，定义为

$$S_i = \left\{ (x, y) \mid \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} < r_i \right\} \quad (1)$$

定义3 覆盖率。已覆盖的区域 Q 的面积 $S(Q)$ 和节点部署区域 H 的面积 $S(H)$ 之比为覆盖率。

3 基于采样的覆盖增强算法

感知圆 S_i 的圆心到采样直线的距离小于感知圆的半径，圆与直线相交所形成的直线段被感知圆覆盖。将与直线相交的感知圆沿直线方向移动，根据感知圆与直线交点坐标建立最优化方程，在节点移动距离最小的情况下，感知圆对直线达到最大覆盖。因此2维平面的覆盖问题可转化为多个采样直线的覆盖优化问题，当多个采样直线达到覆盖优化时，2维监测平面可以达到覆盖增强效果。

如图2所示，矩形 $EFGH$ 为2维监测平面，分别沿 x 轴和 y 轴方向对监测平面进行直线采样，采样直线平行于 x 轴或者 y 轴。 AB 为平面中一条平行于 x 轴的采样直线，直线方程为 $y = y_0$ 。 (S_1, S_2, \dots, S_n) 为 n 个与直线相交的感知圆，对应的传感器节点位置坐标为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ，其中 $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ ，感知圆的半径为 (r_1, r_2, \dots, r_n) 。假设感知圆点 S_i 与采样直线的交点为 $(x_{il}, y_0), (x_{ih}, y_0)$ ，交点坐标满足不等式 $x_{il} < x_{ih}$ 。称 (x_{il}, y_0) 为感知圆点 S_i 与采样直线的下交点， (x_{ih}, y_0) 为上交点，如图3所示。

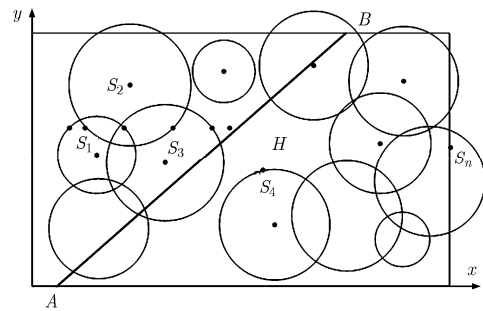


图1 采样直线

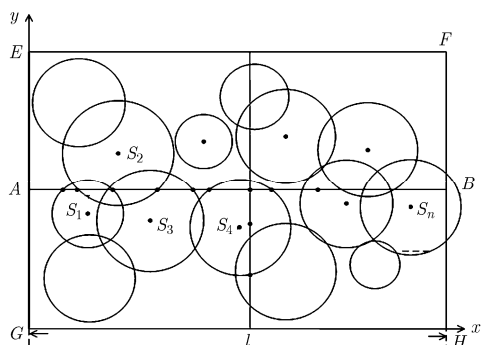


图 2 异构网采样示意图

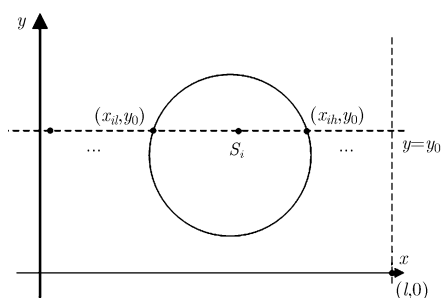


图 3 感知圆与采样直线相交

n 个感知圆与直线相交所形成的线段可以表示成集合： $X_1 = \{x | x_{1l} \leq x \leq x_{1h}\}$ ， $X_2 = \{x | x_{2l} \leq x \leq x_{2h}\}$ ， \dots ， $X_n = \{x | x_{nl} \leq x \leq x_{nh}\}$ 。若直线 AB 被感知圆完全覆盖，这些线段集合的并集要包含线段集合 $X = \{x | 0 \leq x \leq l\}$ ，其中 l 为区域的长度，即 $\bigcup_{i=1}^n X_i \supset X$ 。采取感知圆仅沿采样直线的方向左右移动的策略， Δd_i 为第 i 个节点的移动距离，移动之后第 i 个感知圆与直线相交的线段可表示为： $X'_i = \{x | x_{il} + \Delta d_i \leq x \leq x_{ih} + \Delta d_i\}$ 。覆盖优化算法可描述为采样直线完全被覆盖的条件下，最小化感知圆的移动距离之和，如式(2)所示。

$$\left. \begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n \Delta d_i^2 \\ & \text{s.t. } \bigcup_{i=1}^n X'_i \supset (0, l) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

若直线 AB 被感知圆完全覆盖，每个感知圆与采样直线的下交点位于至少一个感知圆的上交点的左侧，而上交点位于至少一个感知圆的下交点的右侧，同时，至少有一个感知圆的下交点位于左边界的左侧，并且至少有一个感知圆的上交点位于右边界的右侧。约束条件可写为

$$\left. \begin{aligned} & \min(x_{1l} + \Delta d_1, x_{2l} + \Delta d_2, \dots, x_{nl} + \Delta d_n) < 0 \\ & x_{2l} + \Delta d_2 < x_{1h} + \Delta d_1 \\ & x_{3l} + \Delta d_3 < \max(x_{1h} + \Delta d_1, x_{2h} + \Delta d_2) \\ & \vdots \\ & x_{nl} + \Delta d_n < \max(x_{1h} + \Delta d_1, x_{2h} + \Delta d_2, \dots, \\ & \quad \quad \quad x_{(n-1)h} + \Delta d_{n-1}) \\ & \max(x_{1h} + \Delta d_1, x_{2h} + \Delta d_2, \dots, x_{nh} + \Delta d_n) > l \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

上述问题为非线性二次规划问题，非常难以求解，采取约束条件紧缩的方法，将约束条件转化为线性的约束条件，求可行解。

定理 1 感知圆顺序不变时，对采样直线完全覆盖所需移动距离之和小于顺序改变时移动的距离之和。

证明 如图 4 所示，假设在 x 轴区间 $(l, 0)$ 内存在有两个感知圆 S_1, S_2 ，其圆心分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 。其中 $x_1 < x_2$ 。两个感知圆与 x 轴的交点为 $(x_{1l}, y_0), (x_{1h}, y_0)$ 和 $(x_{2l}, y_0), (x_{2h}, y_0)$ ，交点坐标满足如式(4)的不等式。

$$x_{1h} - x_{1l} + x_{2h} - x_{2l} > l \quad (4)$$

传感器节点沿直线方向左右移动，若移动之后感知圆对监测区域内的直线完全覆盖，则两感知圆

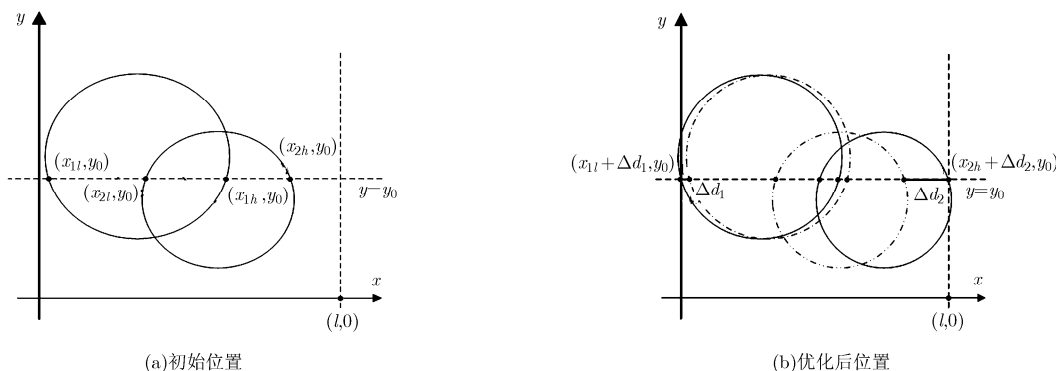


图 4 感知圆位置变化图

对采样直线的覆盖线段必定存在重叠部分。假设覆盖优化之后感知圆的圆沿 x 轴的排列顺序未变，则 $x_1 + \Delta d_1 < x_2 + \Delta d_2$ ，同时 $x_{2h} + \Delta d_2 \geq l$ ， $x_{1l} + \Delta d_1 \leq 0$ 。即

$$|\Delta d_1| + |\Delta d_2| \geq l - x_{2h} + x_{1l} \quad (5)$$

此时最小移动距离之和 Δd_{\min} 为 $l - x_{2h} + x_{1l}$ 。

若感知圆沿着 x 轴方向的排列顺序发生了变化，优化后节点 1 在节点 2 右侧，即 $x_1 + \Delta d_1 > x_2 + \Delta d_2$ 。同理，根据圆的位置关系可以推导出完全覆盖时最小移动距离之和 $\Delta d'_{\min}$ 为 $l - x_{1h} + x_{2l}$ ，则有

$$\Delta d'_{\min} - \Delta d_{\min} = x_{2h} + x_{2l} - x_{1h} - x_{1l} \quad (6)$$

根据圆的性质可得

$$x_2 = \frac{x_{2l} + x_{2h}}{2} \geq x_1 = \frac{x_{1l} + x_{1h}}{2} \quad (7)$$

即 $x_{2l} + x_{2h} - x_{1l} - x_{1h} \geq 0$ ， $\Delta d'_{\min} > \Delta d_{\min}$ 。因此节点顺序不变时完全覆盖所需的移动距离之和小于顺序改变时节点移动的距离之和，以此类推，若有 n 个感知圆与采样直线相交，可分解为多个成对的感知圆移动组合，则执行覆盖优化算法之后每一对感知圆的位置顺序不变，从而总体节点的顺序不变化。

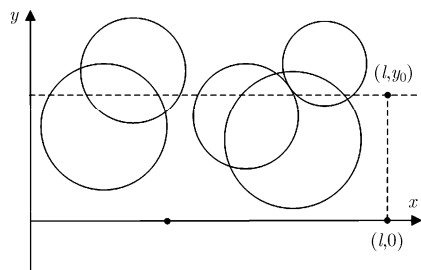
证毕

感知圆 S_i 与直线段相交所形成的线段长度为 $x_{ih} - x_{il}$ ， n 个感知圆与直线 AB 相交的线段的总长度 L 为 $\sum_{i=1}^n (x_{ih} - x_{il})$ 。如果 L 大于采样直线的长度 l ，采样直线可以完全被覆盖，如图 5 所示，优化之后感知圆在采样直线方向的相对位置顺序不改变， S_i 与直线段相交的坐标应满足如式(8)和式(9)的不等式：

$$x_{il} + \Delta d_i \leq x_{(i-1)h} + \Delta d_{i-1} \quad (8)$$

$$x_{ih} + \Delta d_h \geq x_{(i+1)l} + \Delta d_{i+1} \quad (9)$$

如图 5(b)所示，优化之后感知圆对采样直线完全覆盖，即任意一个感知圆与直线相交的下交点位于前一感知圆的上交点的左侧，而上交点位于下一感知圆的下交点的右侧，优化算法为



(a)优化前

$$\left. \begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n \Delta d_i^2 \\ & \text{s.t. } x_{1l} + \Delta d_1 \leq 0 \\ & \quad x_{2l} + \Delta d_2 \leq x_{1h} + \Delta d_1 \\ & \quad x_{3l} + \Delta d_3 \leq x_{2h} + \Delta d_2 \\ & \quad \vdots \\ & \quad x_{nl} + \Delta d_n \leq x_{(n-1)h} + \Delta d_{n-1} \\ & \quad x_{nh} + \Delta d_n \geq l \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

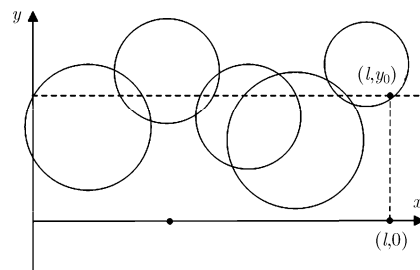
如图 6 所示，如果 $L < l$ ，即达不到完全覆盖的理想情况，式(10)的最优化问题无解，此时无法达到最优覆盖。当覆盖圆与直线段 AB 相交所形成的线段互不相交时，即任意一个感知圆与直线相交的下交点位于前一感知圆的上交点的右侧，而上交点位于下一感知圆的下交点的左侧时，感知圆对直线段的覆盖区域达到最大，最优化算法为

$$\left. \begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n \Delta d_i^2 \\ & \text{s.t. } x_{1l} + \Delta d_1 \geq 0 \\ & \quad x_{1h} + \Delta d_1 \leq x_{2l} + \Delta d_2 \\ & \quad x_{2h} + \Delta d_2 \leq x_{3l} + \Delta d_3 \\ & \quad \vdots \\ & \quad x_{(n-1)h} + \Delta d_{n-1} \leq x_{nl} + \Delta d_n \\ & \quad x_{nh} + \Delta d_{n-1} \leq l \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

4 算法流程图

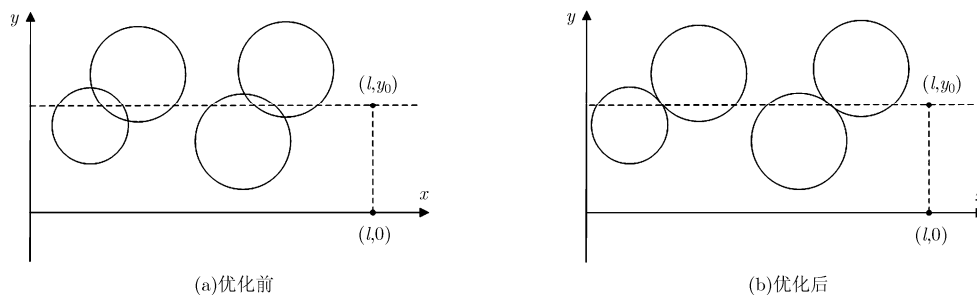
N 个传感器节点随机分布在长为 l ，宽为 w 的区域内，节点半径为 r_i ($i = 1, 2, \dots, N$)， $r \leq r_i \leq R$ ， r 为所有传感器节点感知半径的最小值， R 为传感器节点感知半径的最大值。采样直线的初始位置为 $y = y_0$ ，采样的步长为 d 。单次覆盖优化算法的函数为

$$C = \text{function cover} (\text{line}, C_n, E_v) \quad (12)$$



(b)优化后

图 5 $L > l$ ，覆盖优化前后对比图

图 6 $L < l$, 覆盖优化前后对比图

line 为采样直线的直线方程, C_n 为节点的坐标和半径的集合, E_v 为边界参数, 是监测区域的边界位置, 表示了采样直线最大的采样值。若采样直线的与 x 轴平行, 则直线方程为 $y=y_i$, $E_v=l$; 若与 y 轴平行, 直线方程为 $x=x_j$, $E_v=w$ 。集合 C 为函数的输出, 是所有节点新的坐标值。单次覆盖优化算法函数 cover 的流程图如图 7 所示。

纵向直线采样的覆盖优化算法与横向采样类似, 将算法中对交点的横坐标计算替换为交点的纵坐标计算即可。横向覆盖优化和纵向覆盖优化之间存在相互影响, 当采样步长较小时, 相邻两条采样直线的优化结果也会相互影响, 因此采用多次迭代的方法, 使覆盖率达到一个稳定值。算法的伪码如表 1 所示。

5 仿真分析

为了验证 COSH 算法的有效性, 本文利用

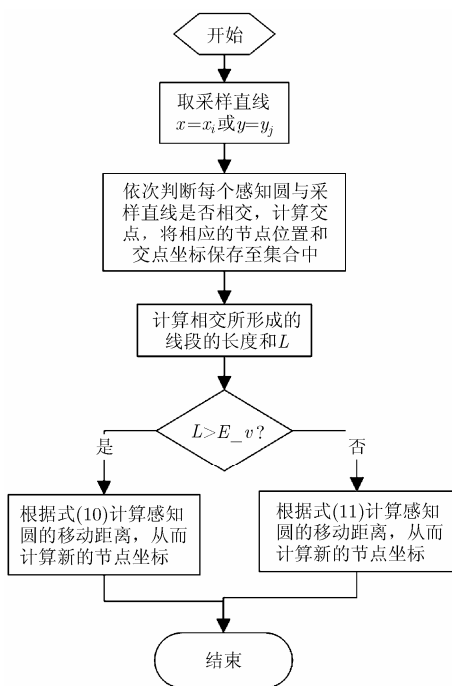


图 7 单次覆盖优化算法的流程图

表 1 COSH 算法伪码

```

输入: 传感器节点坐标及半径的集合  $C_n = \{(x_1, y_1, r_1), (x_2, y_2, r_2), \dots, (x_N, y_N, r_N)\}$ , 监测区域  $w \times l$ , 迭代次数  $m$ , 采样步长  $d$ , 初始化采样直线  $x=x_0, y=y_0$ 。
输出: 节点的坐标及半径集合  $C_n$ ;
(1) line_y=y_0; line_x=x_0;
(2) while iterative < m
(3)   while line_y < w
(4)     C=coverage(y=line_y, C_n, l);
(5)     %执行流程图 7 所示的覆盖优化算法。
(6)     line_y= line_y+d;
(7)     C_n= C;
(8)   end
(9)   while line_x < l
(10)    C=coverage(x=line_x, C_n, l);
(11)    line_x= line_x+d;
(12)    C_n= C;
(13)  end
(14) end

```

Matlab 进行仿真实验。在实验中, 无线传感器节点随机分布在长度为 300 m, 宽度为 300 m 的部署区域中。节点的最大感知半径 R 为 40 m, 最小值感知半径 r 为 15 m, 每个传感器节点的感知半径为区间 $[15, 40]$ 内的随机数。图 8 为 40 个传感器节点的随机分布在部署区域中的网络布局图, 图中数字为节点的 ID 号。设定采样步长为 20 m, 经过 2 次 COSH 算法的迭代计算, 新的网络布局如图 9 所示。由仿真图可以看出, 经过 COSH 算法优化之后节点较为均匀的分布在监测区域内, 覆盖冗余及覆盖盲区的现象均有所减少。

为进一步验证算法的性能, 通过实验对文献[7]所提出的虚拟力算法和 COSH 算法的收敛速度及覆盖率进行比较, 图 10~图 12 节点数目分别为 40, 50,

60 时覆盖率随迭代次变化的对比图，图 13 为随机部署，6 次迭代的虚拟力算法和 2 次迭代的 COSH 算法覆盖率随传感器节点数量变化的仿真图。由仿真结果可以看出，COSH 算法的收敛速度要远远高于虚拟力算法，COSH 算法可在 3 次迭代以内达到最佳覆盖率，但虚拟力覆盖通常经过 10 次迭代计算才能达到最佳覆盖率，从数据上看，COSH 算法覆盖优化效果远高于虚拟力算法。

COSH 的覆盖优化效果不仅和迭代次数有关，也受到采样直线步长的影响，图 14 为 COSH 算法在不同节点数目的情况下覆盖率随采样步长的变化图。当采样步长较小时，两次采样直线之间距离较小，优化结果会相互影响，因此在计算量增加的情

况下覆盖率反而有所下降。采样步长过大时，无法对整个监测区域的覆盖情况进行优化，同样覆盖率也不能得到有效的提高。综合两方面的因素考虑，我们选择采样步长为 $R/2$ 。图 15 为 COSH 算法在不同节点数目的情况下，每次迭代优化时节点的平均移动距离的变化图。由图中可以看出算法，第 1 次迭代优化移动距离最大，随着迭代次数的增加，节点的平均移动距离减少，并收敛于稳定值。这表明算法的收敛速度很快，经过 2~3 次迭代就可以达到较优的覆盖效果。结合图 10~图 13 分析，3 次迭代之后节点位置在小范围内微调，但对覆盖率的提高影响不大，在满足覆盖要求的前提下算法可在 3 次迭代之内完成。

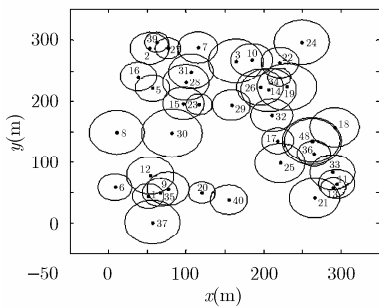


图 8 随机分布网络布局图

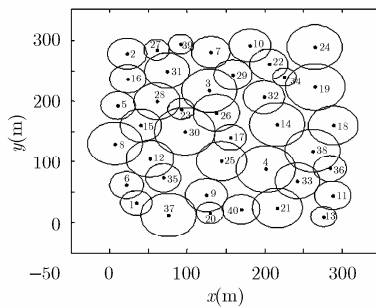


图 9 COSH 算法网络布局

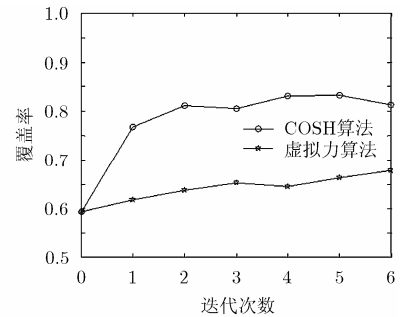


图 10 覆盖率随迭代次数的变化(40 个节点)

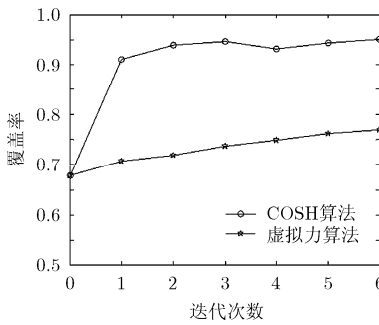


图 11 覆盖率随迭代次数的变化(50 个节点)

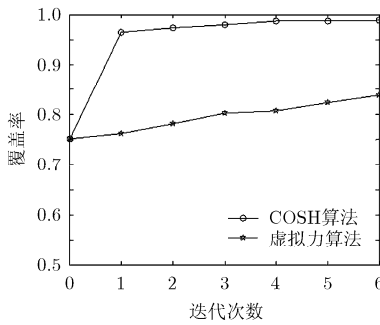


图 12 覆盖率随迭代次数的变化(60 个节点)

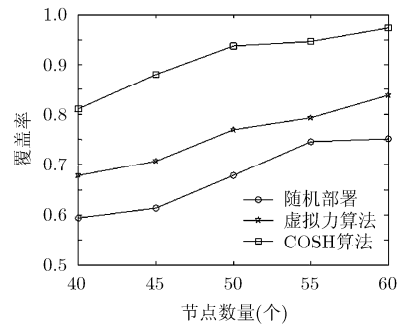


图 13 覆盖率随节点数量的变化

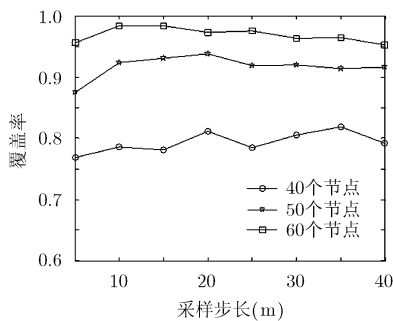


图 14 覆盖率随采样步长的变化

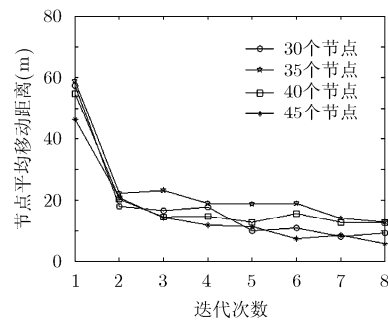


图 15 平均节点移动距离随迭代次数的变化

6 结束语

针对异构传感网络节点初始随机部署时产生覆盖盲区的问题,本文提出一种适用于异构网络的采样覆盖优化算法。通过对监测平面进行直线采样,对采样直线的覆盖进行优化。根据直线段与平面感知圆的交点坐标之间的关系,以提高网络覆盖率和节点移动距离最小为优化目标,建立二次优化的数学模型,在节点移动距离最小的情况下达到对直线段的最优覆盖。多条采样直线段可以达到最优覆盖时,平面的覆盖可得到优化。由实验结果可以看出,该算法可有效地提高异构网的覆盖率。经过2~3次迭代计算,异构网的覆盖率可提高20%左右,并且该算法的收敛速度和覆盖的优化效果要高于普通的优化算法。

参考文献

- [1] Khedr A M and Osamy W. Minimum perimeter coverage of query regions in a heterogeneous wireless sensor network[J]. *Information Sciences*, 2011, 181(15): 3130-3142.
 - [2] Bai Xiao-le, Yun Zi-qiu, Dong Xuan, et al. Optimal multiple-coverage of sensor networks[C]. 30th IEEE International Conference on Computer Communications, Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2011), Shanghai, 2011: 2498-2506.
 - [3] Ammari H M and Das S K. A study of k -coverage and measures of connectivity in 3D wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2010, 59(2): 243-257.
 - [4] Marengoni M I C, Draper B A, Hanson A, et al. A system to place observers on a polyhedral terrain in polynomial time[J]. *Image and Vision Computing*, 2000, 18(10): 773-780.
 - [5] Qun Zao and Gurusamy M. Lifetime maximization for connected target coverage in wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(6): 1378-1391.
 - [6] Naderan M, Dehghan M, and Pedram H. Sensing task assignment via sensor selection for maximum target coverage in WSNs[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2013, 36(1): 262-273.
 - [7] Yi Zou and Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces[C]. The 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, San Francisco, USA, 2003: 1293-1303.
 - [8] 周浦城, 崔逊学, 王书敏, 等. 基于虚拟力的无线传感器网络覆盖增强算法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(5): 1416-1419.
Zhou Pu-cheng, Cui Xun-xue, Wang Shu-min, et al. Virtual force-based wireless sensor network coverage-enhancing algorithm[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(5): 1416-1419.
 - [9] 李明, 石为人. 虚拟力导向差分算法的异构移动传感网络覆盖策略[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1043-1051.
Li Ming and Shi Wei-ren. Virtual force-directed differential evolution algorithm based coverage-enhancing algorithm for heterogeneous mobile sensor networks[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(5): 1043-1051.
 - [10] 黄帅, 程良伦. 一种基于虚拟力的有向传感器网络低冗余覆盖增强算法[J]. 传感器技术学报, 2011, 24(3): 418-422.
Huang Shuai and Cheng Liang-lun. A low redundancy coverage-enhancing algorithm for directional sensor network based on fictitious force[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2011, 24(3): 418-422.
 - [11] Huang Jun-jie, Sun Li-juan, Wang Ru-chuan, et al. Improved virtual potential field algorithm based on probability model in three-dimensional directional sensor networks[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, DOI:10.1155/2012/942080.
 - [12] Huang Jun-jie, Huang Hai-ping, Sun Peng, et al. Probability model based coverage-enhancing algorithm for WSNs of nodes' adjustable movement pattern[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, DOI:10.1155/2012/570643.
 - [13] 洪榛, 俞立, 张贵军. 多级异构无线传感网高效动态聚簇策略研究[J]. 自动化学报, 2013, 39(4): 454-460.
Hong Zhen, Yu Li, and Zhang Gui-jun. Efficient and dynamic clustering scheme for heterogeneous multi-level wireless sensor networks[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 454-464.
 - [14] 李明. 异构传感器网络覆盖算法研究[D]. [博士学位], 重庆大学, 2011.
Li Ming. Study on coverage algorithms for heterogeneous wireless sensor networks[D]. [Ph.D. dissertation], Chongqing University, 2011.
 - [15] Kumar D, Aseri T C, and Patel R B. EEHC: energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2009, 32(4): 662-667.
 - [16] 王明慈, 沈恒范. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社, 2007: 119-145.
 - [17] Cardei M, Thai M T, Ying-shu L, et al. Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks[C]. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005), Miami 2005: 1976-1984.
 - [18] Sengupta S, Das S, Nasir M D, et al. Multi-objective node deployment in WSNs: in search of an optimal trade-off among coverage, lifetime, energy consumption, and connectivity[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26(1): 405-416.
 - [19] Kashi S S and Sharifi M. Coverage rate calculation in wireless sensor networks[J]. *Computing*, 2012, 94(11): 833-856.
- 杜晓玉: 女, 1979年生, 讲师, 研究方向为无线传感器网络定位及覆盖研究。
孙力娟: 女, 1963年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线传感器网络、演化计算。
郭剑: 男, 1978年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为无线传感器网络、无线多媒体传感器网络。