

文章编号: 2095-4980(2017)06-0958-07

## 一种新的异构无线传感网覆盖优化算法

吴熙曦, 贺赞贻, 刘佳

(中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137000)

**摘要:** 针对异构传感器节点在网络初期部署中产生大量覆盖面积冗余的问题, 结合相关几何图形知识, 以提高网络覆盖率、改善节点分布均匀度为优化目标, 提出一种基于节点定向移动来减少节点两两之间覆盖冗余面积的网络覆盖优化算法。算法预先设立判定门限, 通过判定两两节点之间覆盖冗余面积与设定门限的大小关系, 对节点实施有向性偏移, 逐一减少节点之间的覆盖冗余面积。理论分析与实验仿真证明, 该算法能够有效提高异构传感器网络部署中的覆盖率, 优化节点分布均匀度将近 8.7, 尤其在大型传感器网络的节点部署中具有极强实用性。

**关键词:** 无线传感器网络; 异构传感器; 几何图形; 覆盖冗余面积; 判定门限

**中图分类号:** TN926; TP393      **文献标志码:** A      **doi:** 10.11805/TKYDA201706.0958

## A new coverage optimization algorithm for heterogeneous WSNs

WU Xixi, HE Zanyi, LIU Jia

(Ordnance Test Center in Baicheng, Baicheng Jilin 137000, China)

**Abstract:** Considering the problems that a large area of redundant coverage for heterogeneous sensor nodes in the initial network deployment, combining with relevant knowledge of geometry, and aiming at improving network coverage rate and the uniformity distribution of nodes, a coverage optimization algorithm based on reducing the area covered by redundancy between any two nodes through the nodes directional movement is proposed. The algorithm establishes decision threshold in advance. It makes the nodes implementation on directional shift by determining the magnitude of redundant coverage area with set threshold between any two nodes, and reduces the area of each overlap redundancy between nodes. Theoretical analysis and experimental simulation shows that the algorithm can effectively improve the deployment coverage of heterogeneous sensor network and optimize the distribution degree for nodes, especially with strong practicality for nodes deployment in large-scale sensor networks.

**Keywords:** Wireless Sensor Networks(WSNs); heterogeneous sensor; geometry; redundant coverage area; decision threshold

随着电气、通信、人工智能等高新技术的发展, 环境感知、医疗保健、交通控制甚至战场预警等众多领域越来越贴近人们的现实生活<sup>[1]</sup>, 这些应用通常离不开无线传感器网络(WSNs)。无线传感器以其低功耗、易组网, 较强的感知、通信、信息处理能力, 在众多场合得到广泛推广<sup>[2]</sup>。作为“组网”的关键前提技术, 寻求合适的无线传感器网络覆盖部署策略是研究组网技术的首要问题, 决定着网络正常运行的成本代价、感知能力、通信保障以及监控追踪等服务目标的改善<sup>[3]</sup>。网络覆盖问题是无线传感器网络相关问题研究中的一个核心问题。

网络覆盖问题是指如何确保部署节点形成的覆盖范围达到监测环境的要求<sup>[4]</sup>, 网络覆盖通常分为确定性覆盖与随机性覆盖 2 种, 确定性覆盖细分为如何用固定的节点数达到最大的覆盖率与如何用最少的节点数达到目标覆盖率 2 种; 随机性覆盖指在特定环境中实施节点均匀分布后通过调节节点的状态切换等手段实现降低节点能耗以延长网络生命周期等目标的优化。文献[5]提出节点自适应传感半径调整算法, 在不影响覆盖性能的前提下, 从降低节点覆盖的冗余度出发, 有效实现了节点最佳覆盖范围的选择以及对覆盖的控制, 在降低节点能耗, 提高覆盖率方面起到明显的改善作用; 通过引入惯性权重因子<sup>[6-7]</sup>、自适应变异算子以及收缩因子等基于粒子群算法的改进策略同样具有很强代表性<sup>[8-9]</sup>, 如线性递减方法<sup>[10]</sup>、模糊自适应方法<sup>[11]</sup>以及带压缩因子的粒子群优化(Particle

Swarm Optimization, PSO)算法等。当前网络覆盖主要分为同构与异构 2 种, 异构网络主要采用同构中应用较成熟的智能算法覆盖优化, 实用性不强, 且在大型的异构网络覆盖面临算法复杂度过高, 优化时间过长, 覆盖效果不佳等问题, 当前尚没有大型异构网络环境提出的能够快速优化异构网络覆盖的算法。结合异构传感器网络覆盖盲区多样的特点, 提出一种基于节点定向移动的异构覆盖优化算法(Coverage Optimization algorithm based on Moving Directionally for Homogeneous WSNs, COMDH), 算法在迭代过程中逐一通过两两节点的冗余面积判定并进行定向节点移动策略, 最终完成对异构无线传感器网络(Heterogeneous Wireless Sensor Networks, HWSNs)的覆盖优化。

## 1 数学模型及假设

### 1.1 节点感知模型

布尔(0-1)模型是一种明确节点感知范围的模型, 对研究二维平面异构传感器的覆盖问题具有简单实用的特点。假定节点覆盖的目标区域为二维平面, 传感器节点用  $p_1, p_2, \dots, p_n$  表示, 感知半径分别为  $r_1, r_2, \dots, r_n$ , 对应的节点坐标为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ , 则目标节点  $z(x_p, y_p)$  被节点  $p_i$  检测的概率为:

$$C_z = \begin{cases} 1, & d(p_i, z) \leq r \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $d(p_i, z) = \sqrt{(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2}$  为感知节点与目标点之间的距离;  $r$  为传感器节点的感知半径。

目标节点  $z$  被整个监测区域内的传感器节点同时进行检测的联合检测概率为:

$$C_z(s_{\text{all}}, z) = 1 - \prod_{i \in n} (1 - C_z(p_i, z)) \quad (2)$$

式中:  $s_{\text{all}}$  为对目标节点进行感知测量的传感器节点集合;  $n$  代表部署的传感器节点数目。

### 1.2 节点覆盖率

节点采用 1.1 中所描述的感知模型, 为对优化目标进行性能评价, 将监测区域进行网格划分( $k \times l$ ), 并将其离散成对应的像素点。本文中, 网络覆盖率定义为满足式(2)要求的网格数量与总的网格数量的比值, 即:

$$\text{coverage}(z) = \frac{\sum_{x_p=1}^k \sum_{y_p=1}^l C_z(s_{\text{all}}, z)}{k \times l} \quad (3)$$

如果目标区域中的任一像素点都能够被至少 1 个节点的感知覆盖, 则称该区域实现完全覆盖, 出现在任何网格点上的目标都能够被检测到。

### 1.3 节点均匀性

均匀性是衡量无线传感器网络覆盖性能的一个重要指标<sup>[12]</sup>。节点整体分布均匀化有利于网络工作运行中节点能耗的均衡性, 有利于延长网络的整体生命周期, 均匀性对于一些灾害多发、战场侦察等恶劣环境极为重要, 可降低多次重复布设的危险性。通过计算节点间距离的标准差来衡量节点均匀性。

$$U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i; \quad U_i = \left( \frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^{k_i} (D_{i,j} - M_i)^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

式中:  $U$  为均匀度, 其值越小, 说明网络的节点均匀性越好;  $k_i$  为节点  $i$  的邻居节点数, 如果节点  $i$  的圆心处在节点  $j$  的感知半径内, 则认为节点  $i$  为节点  $j$  的邻居节点;  $D_{i,j}$  为节点  $i$  和节点  $j$  圆心之间的距离;  $M_i$  为节点  $i$  与邻居节点之间距离的均值。

### 1.4 模型假设条件

假定目标布设区域为矩形  $Z$ , 网络为事件驱动型网络, 传感器数量为  $n$ , 异构传感器具有不同的感知半径  $r_i$ 。初始阶段所有节点随意播撒在目标区域  $Z$  中。为了便于理论分析及仿真验证, 假定所有异构传感器节点满足以下条件:

1) 所有节点的通信半径不小于 2 倍的感知半径, 即  $r_c \geq 2r_s$  ( $r_c$  与  $r_s$  分别代表节点的通信半径与最大感知半径)。已证明在节点通信半径不小于 2 倍感知半径的情况下, 若能实现对区域的全覆盖, 则认为该部分节点必连通<sup>[13]</sup>。

2) 节点初始布设后进行 ID 编号, 并能够通过 GPS 定位或相关定位算法获取自身位置坐标信息, 所有节点坐标信息能够进行实时获取并进行相关信息存储。

3) 节点能够沿其设定的直线进行精确位置调整, 忽略误差影响。

4) 所有异构传感器节点均依据二元感知模型对监测区域内的事件进行感知。

## 1.5 相关定义

**定义 1:** 两圆相交, 以两圆心确定一条直线, 该直线与两圆覆盖重叠区域分别相交于两点, 定义该两点间的线段为冗余直径。

**定义 2:** 两圆相交, 定义以两圆圆心确定的直线为运动轴。

**定义 3:** 每次覆盖冗余面积判定过程中, 除去参照节点, 参与判定的其余节点为判定节点, 判定节点中满足移动条件的节点为定向移动节点。

**定义 4:** 将目标区域离散网格化, 如果某个网格不能被任一节点所覆盖, 则该网格定义为空白网格, 所有空白网格组成的区域为空白区域。

## 2 基于节点定向位移调整的部署优化算法

### 2.1 算法思想

#### 2.1.1 思想依据

节点初始部署后具有极大的随机性, 如图 1 所示, 节点感知区域的覆盖重叠产生大量的覆盖冗余面积, 也导致了大量覆盖空洞出现。COMDH 算法从降低覆盖冗余区域面积的角度出发, 改善目标区域的整体覆盖效果, 具体实施方法如图 2 所示, 当 2 个存在重叠覆盖区的节点  $p_1, p_2$  满足判定门限时, 定向移动节点(定义 3)  $p_2$  沿运动轴方向进行定向移动, 达到减少覆盖冗余面积的目的。

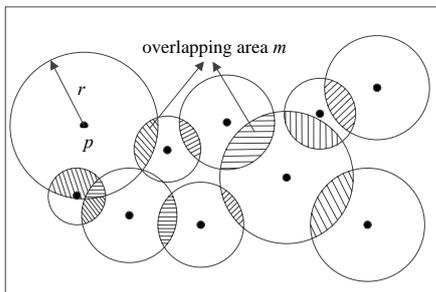


Fig.1 Schematic diagram of node initial layout  
图 1 节点初始布设示意图

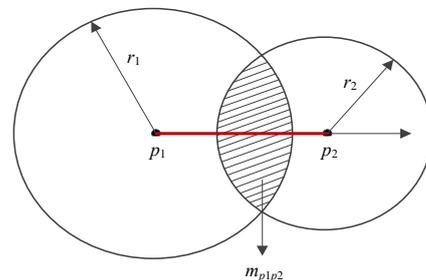


Fig.2 Schematic diagram of node position adjustment  
图 2 节点位置调整示意图

**定理 1:** 两圆  $p_1, p_2$  相交,  $p_1, p_2$  的半径固定, 则重叠部分阴影面积只与两圆心之间的距离有关。

**证明:** 如图 2 所示, 圆  $p_1, p_2$  相交, 阴影部分为  $m_{p_1 p_2}$ , 面积为  $s_0$ 。圆  $p_1$  沿  $p_1 p_2$ (长度为  $l$ ) 连线反向移动距离  $m$ , 阴影部分面积变为  $s_1$ ; 圆  $p_2$  沿  $p_1 p_2$ (长度为  $l$ ) 连线反向移动距离  $m$ , 阴影部分面积变为  $s_2$ ; 圆  $p_1, p_2$  沿  $p_1 p_2$ (长度为  $l$ ) 连线分别反向移动距离  $m_1, m_2, (m_1 + m_2) = m$ , 阴影部分面积变为  $s_3$ 。

两圆半径固定, 且圆心之间的距离都为  $l + m$ , 由圆的相对移动性容易得到  $s_1 = s_2 = s_3$ , 定理 1 得证。

#### 2.1.2 节点移动策略

由定理 1 可知, 节点两两双向移动与单节点移动, 可以达到同样的冗余面积消减效果, 当采用节点两两双向移动方案时, 每当 2 个节点执行 1 次移动策略后, 即需获取 1 次节点新的坐标信息, 无形加大了算法计算量, 且同一节点在不断判定过程中, 重复移动容易导致算法优化效果振荡, 影响优化效果稳定性, 基于以上分析, COMDH 算法采用单节点移动策略。

同时为了弱化节点在多次判定之间振荡移动的影响, 对初始部署后的节点, 根据横坐标由小到大进行 ID 编号(1~N), 这样在每次判定过程中尽量保持参照节点处于低坐标, 判定节点处于高坐标, 定向移动节点大致向高坐标方向偏移, 刻意消减同一节点在不同参照节点判定下出现左右振荡移动情况的影响。

假定传感器节点感知范围为圆形, 因此在定向移动节点进行移动时, 应当避免达到相切甚至相离的效果, 这样会在消减覆盖冗余面积的同时增大覆盖空洞面积。因此, 算法采用定向移动节点沿运动轴移动  $2/3$  冗余直径

的策略。

参照节点与判定的节点的关系，可分为以下 3 种情况：

1)  $|r_1-r_2|<L<r_1+r_2$ ；圆  $p_1, p_2$  为相交关系，如图 3 所示，按照之前提到的移动策略，对定向移动节点进行位置更新；

2)  $L \geq r_1+r_2$ ，则圆  $p_1, p_2$  为相离或外切关系，不需执行移动策略；

3)  $L \leq |r_1-r_2|$ ，则圆  $p_1, p_2$  为包含或内切关系，采取被包含圆“跳出”包含圆的解决策略，圆  $p_2$  空白区域(定义 4)随机寻找新的位置。

2.1.3 边界限定策略

假定圆  $p_1, p_2$  圆心坐标分别为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ ， $\tan \theta = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ ，

$\theta = \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ ， $Y = \frac{2}{3} d \sin \theta$ ， $X = \frac{2}{3} d \cos \theta$ ， $d$  为冗余直径(定义 1)  $CD$  长度，当满足  $X > x_{\max} - x_2$  或  $Y > y_{\max} - y_2$  其中

一个条件时，判定节点越界，越界节点放弃当前位置坐标，在空白区域(定义 4)随机生成新的位置。如图 4 所示，节点由于横轴边界条件限制，计算位置  $N$  “回归”到真实位置  $M$ 。同理，纵轴边界条件限制效果相似。

式(5)为 COMDH 算法优化目标，分别为最大化覆盖面积与节点均匀性。

$$\begin{cases} \max \text{coverage}(z) \\ U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i; \quad U_i = \left( \frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^{k_i} (D_{i,j} - M_i)^2 \right)^{1/2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \text{s.t.} & 0 \leq x_{i+1} + \frac{2}{3} r_i \sin \arctan \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \leq x_{\max} \\ & 0 \leq y_{i+1} + \frac{2}{3} r_i \cos \arctan \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \leq y_{\max} \\ & 0 \leq x_{i+2} + \frac{2}{3} r_i \sin \arctan \frac{y_{i+2} - y_i}{x_{i+2} - x_i} \leq x_{\max} \\ & 0 \leq y_{i+2} + \frac{2}{3} r_i \cos \arctan \frac{y_{i+2} - y_i}{x_{i+2} - x_i} \leq y_{\max} \\ & \vdots \\ & 0 \leq x_n + \frac{2}{3} r_i \sin \arctan \frac{y_n - y_i}{x_n - x_i} \leq x_{\max} \\ & 0 \leq y_n + \frac{2}{3} r_i \cos \arctan \frac{y_n - y_i}{x_n - x_i} \leq y_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)为 COMDH 算法限定条件，防止在优化过程中产生违背限定条件的非法解，即所有定向移动节点必须在目标区域内活动，不能越界。

2.2 COMDH 步骤描述

- 1) 布设环境进行节点初始化设置。确定布设区域大小、节点数量，对初始环境实现节点随机播撒部署；
- 2) 对所有节点按照 2.1.2 节中描述规则进行 ID 标号  $p_n$ ，记录其位置坐标具体信息；
- 3) 计算所有节点两两之间的重叠覆盖区域面积  $m_{p_a p_b}$  ( $p_a, p_b$  代表不同的节点标号， $a, b$  取  $1, 2, \dots, n$ )；
- 4) 两节点若为包含关系，则被包含节点执行“跳出”策略，即随机移动到空白区域；
- 5) 参照节点与其所有对应判定节点进行重叠面积关系判定，若  $m_{p_a p_b} > M$  ( $M$  为判定门限)，则判定节点为定向移动节点， $p_b$  沿运动轴定向移动，否则位置保持不变，存储节点坐标信息；
- 6) 若节点出界，则采用节点“回归”策略，即随机移动到空白区域，继续执行算法；
- 7) 判断算法是否满足终止条件，若满足，迭代终止，输出最终节点坐标位置；否则，返回步骤 3)。

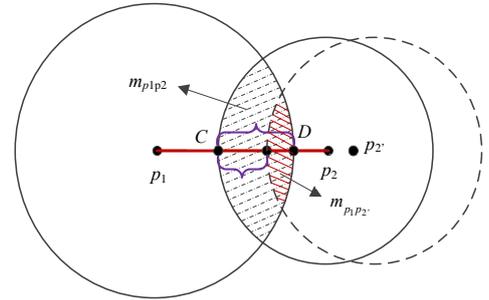


Fig.3 Schematic diagram of node position optimization  
图 3 节点位置优化示意图

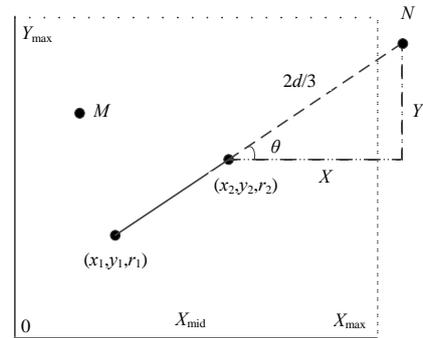


Fig.4 Schematic diagram of limited cross-border route node  
图 4 节点越界路径限定示意图

### 3 实验环境与仿真分析

#### 3.1 仿真环境参数设置

在 MATLAB 平台下进行仿真实验, 采样节点为目标区域内所有节点。场景设置为  $x \times y = 300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$  的二维平面区域, 传感器半径的最大感知半径为 40 m, 最小感知半径为 15 m, 所有节点的感知半径在区间 [15,40] 随机获取, 组建异构传感器网络, 与文献[14]中的虚拟力算法比较。判定门限分别设定为 600,500,400,300,200,100, 每种门限下算法均迭代 6 次。

#### 3.2 网络覆盖率优化效果对比

图 5 与图 6 分别为网络初始分布图与优化分布图, 部署节点数目为 40, 判定门限为 400, 算法迭代 6 次。由于初始采用随机播撒方式, 形成大量的覆盖冗余与空洞区域, 如图 5 中出现较多节点重叠所示。经过 COMDH 算法 6 次迭代优化后, 节点分布变得均匀, 覆盖冗余面积与覆盖空洞区域明显减少, 直观可见, 网络覆盖率得到明显提高, 如图 6 所示。

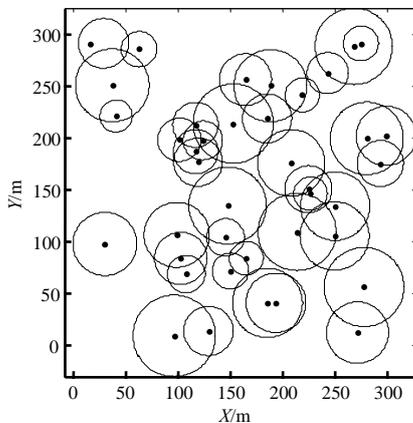


Fig.5 Network layout of random distribution  
图5 随机分布网络布局图

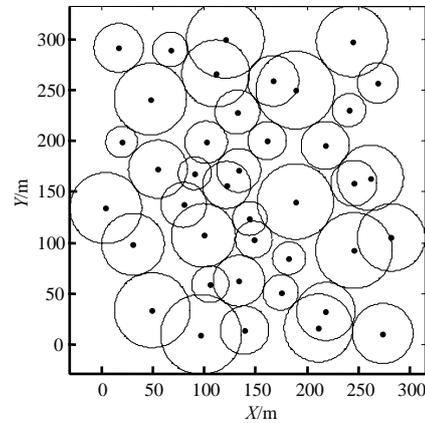


Fig.6 Layout of COMDH algorithm optimization  
图6 COMDH算法优化布局图

图 7~图 8 是在节点数分别为 40 和 50 两种情况下 COMDH 算法迭代 6 次得到的覆盖率变化对比曲线, 2 种节点数目下判定门限均为 400, 为更好地分析该算法的性能, 与同样进行 6 次迭代的虚拟力算法<sup>[14]</sup>进行优化效果对比分析。

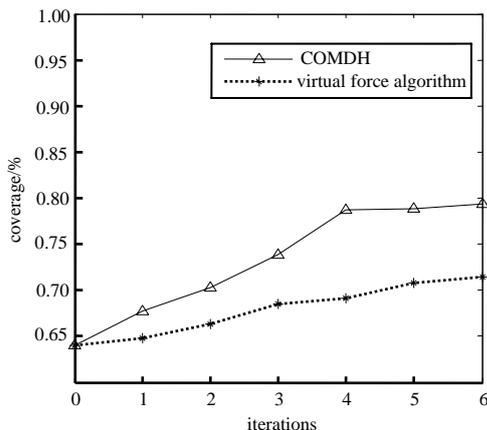


Fig.7 Curves of coverage changes(40 nodes)  
图7 覆盖率变化曲线(40个节点)

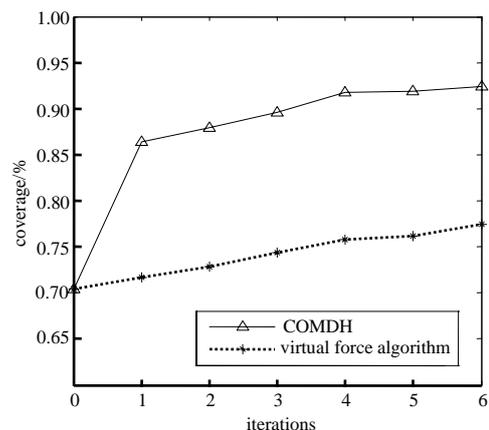


Fig.8 Curves of coverage changes(50 nodes)  
图8 覆盖率变化曲线(50个节点)

观察图 7~图 8, 经过 COMDH 算法的 6 次迭代后, 2 种情况网络覆盖率分别在初始覆盖基础上提高了 15.35%, 21.97%, 对比同等迭代次数下的虚拟力优化算法, 覆盖率分别提高了 7.95%, 14.95%, 说明本文算法与对比的虚拟力算法相比, 在同等迭代次数下, 网络覆盖率优化效果要明显高于虚拟力算法。且该算法在迭代 4 次后即可获得覆盖率的较优值, 而虚拟力算法则要经过迭代 10 次后方可得到最优值, 综合比较可见, COMDH 算法在覆盖率改善、优化效率上都要好于对比的虚拟力算法。

图 9 是不同节点数量下得到的 3 种方法覆盖率对比曲线，判定门限为 400，3 种方法分别为随机部署、虚拟力算法、COMDH 算法。由 3 条曲线呈上升趋势可知，随着节点数量的增多，3 种方法的网络覆盖率都得到优化提高。但通过 3 条曲线对覆盖率优化的效果对比可知，在同一节点数量下，COMDH 算法所对应的覆盖率都要高于虚拟力算法与随机部署 2 种情况，综合可知，COMDH 算法的覆盖优化性能远高于虚拟力算法与随机部署。

图 10 为覆盖率随判定门限变化得到的曲线。判定门限过大，导致部分存在较大冗余面积的节点无法执行覆盖策略，算法性能得不到正常发挥。如图 10 中 3 条仿真曲线所示，当门限超过 400 时，覆盖优化率开始下降。然而判定门限并不是越小越好，门限过小，会导致节点在消除部分冗余面积后形成更大的冗余面积，且随着算法迭代的进行，导致大量的圆重复移动，使得网络覆盖率不升反降，门限 100~400 过程中覆盖率处于上升趋势。经过实验仿真可知，当门限值设定为 400 时，更有利于网络覆盖率的效果改善。

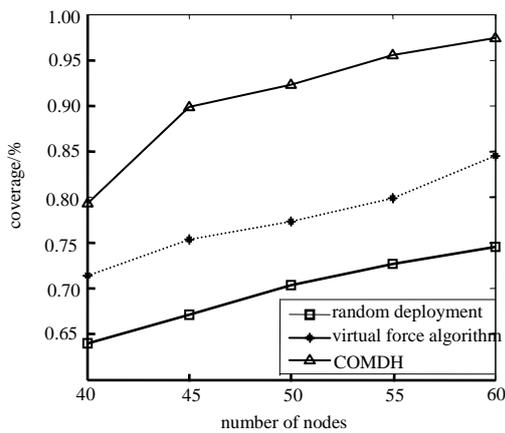


Fig.9 Coverage rate changes with the number of nodes  
图 9 覆盖率随节点数量变化

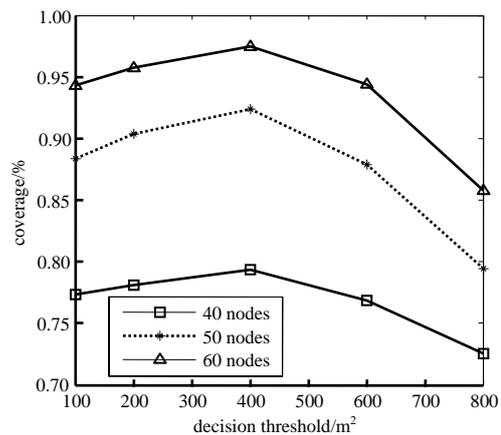


Fig.10 Coverage rate changes with decision thresholds  
图 10 覆盖率随判定门限变化

### 3.3 网络节点均匀度优化分析

根据式(4)对 3 种方法的网络节点均匀度进行计算，统计情况如表 1 所示。

网络节点均匀度能够反映网络中节点分布的均匀性，节点分布越均匀，说明对覆盖重叠面积消除成果越明显，网络的覆盖优化效果越良好。式(4)已有描述，所得  $U$  值越小，说明网络节点覆盖效果越好。随机部署情况下节点分布极不均匀，6 次迭代虚拟力算法使得网络均匀度降低至 5.846 2，已有较明显的改善效果。本文提出的 COMDH 算法最终使得网络节点均匀度降低至 2.263 1，比随机部署与虚拟力算法分别降低了 8.7,3.6 左右，改善效果明显，节点的分布更趋于均匀化，间接说明网络覆盖率提高效果明显，达到了网络覆盖优化的目的。

表 1 网络节点均匀度

random deployment	COMDH(4)	virtual force(6)
10.997 4	2.263 1	5.846 2

## 4 结论

针对异构无线传感器网络中节点随机部署产生大量覆盖冗余面积的问题，以网络覆盖率为主要优化目标，提出一种通过节点两两之间逐一消减冗余面积的算法(COMDH)。算法改变了以往单纯依靠智能算法优化解决覆盖优化的问题，面对大型异构网络覆盖，从几何图形角度进行切入，提出一种简单高效的异构覆盖优化算法，算法思想简单，复杂度低，且覆盖快速高效。算法在较少的迭代次数下即可达到理想的网络覆盖率，相比于随机部署、对比算法均明显提高了网络的节点覆盖率。作为另一优化目标，网络节点的均匀度改善效果明显。综上，算法在收敛速度、网络覆盖率以及节点均匀度方面都要明显优于对比的虚拟力优化算法，尤其适用于大型无线传感器网络的组网覆盖。

### 参考文献：

[ 1 ] 肖甫,王汝传,孙力娟,等. 一种面向三维感知的无线多媒体传感器网络覆盖增强算法[J]. 电子学报, 2012,40(1):167-172. (XIAO Fu,WANG Ruchuan,SUN Lijuan,et al. Coverage-enhancing algorithm for wireless multi-media sensor networks based on three-dimensional perception[J]. Acta Electronica Sinica, 2012,40(1):167-172.)

- [ 2 ] BAI Xiaole,YUN Ziqiu,DONG Xuan,et al. Optimal multiple-coverage of sensor networks[C]// 30th IEEE International Conference on Computer Communications. Shanghai,China:[s.n.], 2011:2498–2506.
- [ 3 ] SIDDAPPA M,RAJU C. Survey on efficient coverage and connectivity of wireless sensor networks using intelligent algorithm[J]. Information Technology and Computer Science, 2012,4(5):39–45.
- [ 4 ] AMMARI H M. Coverage in wireless sensor networks:a survey[J]. Network Protocols and Algorithms, 2010,2(2):27–53.
- [ 5 ] 韩志杰,吴志斌,王汝传,等. 新的无线传感器网络覆盖控制算法[J]. 通信学报, 2011,32(10):174–184. (HAN Zhijie, WU Zhibin,WANG Ruchuan,et al. Novel coverage control algorithm for wireless sensor network[J]. Journal on Communications, 2011,32(10):174–184.)
- [ 6 ] ZHAN Zhihui,ZHANG Jun,LI Yun,et al. Adaptive particle swarm optimization[J]. IEEE Trans. Systems,Man and Cybernetics, Part B(Cybernetics), 2009,39(6):1362–1381.
- [ 7 ] 赵志刚,黄树运,王伟倩. 基于随机惯性权重的简化粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2014,31(2):361–363. (ZHAO Zhigang,HUANG Shuyun,WANG Weiqian. Simplified particles warm optimization algorithm based on stochastic inertia weigh[J]. Application Research of Computers, 2014,31(2):361–363.)
- [ 8 ] 申元霞,王国胤,曾传华. 相关性粒子群优化模型[J]. 软件学报, 2011,22(4):695–708. (SHEN Yuanxia,WANG Guoyin, ZENG Chuanhua. Correlative particle swarm optimization model[J]. Journal of Software, 2011,22(4):695–708.)
- [ 9 ] 高卫峰,刘三阳. 一种高效粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2011,26(8):1158–1162. (GAO Weifeng,LIU Sanyang. An efficient PSO[J]. Control and Decision, 2011,26(8):1158–1162.)
- [10] KHARE A,RANGNEKAR S. A review of particle swarm optimization and its applications in solar photovoltaic system[J]. Applied Soft Computing, 2013,13(5):2997–3006.
- [11] VALDEZ F,MELIN P,CASTILLO O. An improved evolutionary method with fuzzy logic for combining particle swarm optimization and genetic algorithms[J]. Applied Soft Computing, 2011,11(2):2625–2632.
- [12] 刘维亭,范洲远. 基于混沌粒子群算法的无线传感器网络覆盖优化[J]. 计算机应用, 2011,31(2):338–340. (LIU Weiting, FAN Zhouyuan. Coverage optimization of wireless sensor networks based on chaos particle swarm algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2011,31(2):338–340.)
- [13] 冯琳,冉晓旻,梅关林. 基于改进粒子群算法的无线传感网络覆盖优化[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3): 486–490. (FENG Lin,RAN Xiaomin,MEI Guanlin. WSN coverage optimization by improved artificial PSO algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3):486–490.)
- [14] ZOU Y,CHAKRABARTY K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces[C]// The 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications,IEEE Societies. San Francisco,USA:IEEE, 2003:1293–1303.

#### 作者简介:



吴熙曦(1990–),女,成都市人,硕士,助理工程师,主要研究方向为网络信息安全。email:1107662015@qq.com.

贺赞贻(1988–),女,湖南省安化县人,助理工程师,主要研究方向为网络安全。

刘佳(1981–),女,吉林省白城市人,工程师,主要研究方向为信息工程数据挖掘。