

基于 Voronoi 的无线传感器网络覆盖控制优化策略

赵春江^{1,2,3}, 吴华瑞^{1,2,3}, 刘强⁴, 朱丽^{1,2,3}

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097;
3. 农业部农业信息技术重点开放实验室, 北京 100097; 4. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054)

摘要: 针对无线传感器网络运行状态中存在覆盖空洞的问题, 提出了一种基于 Voronoi 有效覆盖区域的空洞检测修复策略。该策略以满足一定网络区域覆盖质量为前提, 在空洞区域内合理增加工作节点以提高网络覆盖率为优化目标, 采用几何图形向量方法对节点感知范围和 Voronoi 多边形的的位置特性进行理论分析, 力求较准确地计算出空洞面积, 找寻最佳空洞修复位置, 部署较少的工作节点保证整个网络的连通性。仿真结果表明, 该策略能有效地减少网络总节点个数和感知重叠区域, 控制网络中冗余节点的存在, 同时其收敛速度较快, 能够获得比现有算法更高的目标区域空洞修复率, 实现网络覆盖控制优化。

关键词: 无线传感器网络; 网络覆盖率; Voronoi; 覆盖质量; 覆盖空洞

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)09-0115-08

Optimization strategy on coverage control in wireless sensor network based on Voronoi

ZHAO Chun-jiang^{1,2,3}, WU Hua-rui^{1,2,3}, LIU Qiang⁴, ZHU Li^{1,2,3}

(1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China;
2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China;
3. Key Laboratories for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China;
4. School of Automation, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Coverage holes directly reduce network performance and become a key problem of wireless sensor network. A detect-repair scheme for area coverage in wireless sensor network with Voronoi was proposed. The strategy achieves the network coverage rate optimization balance with a prerequisite of an acceptable coverage quality of network area. It uses the geometry theories and vector algebra to analyse the sensing range of nodes and the position feature of Voronoi polygon. It can calculate the accurate area of holes and ensure the connectivity of networks with the least number of nodes. Simulation results show that the strategy can effectively reduce number of the nodes and the overlapped sensing regions and control redundant nodes. Meanwhile, the strategy has fast convergence speed. It not only realizes the control and optimization of the network coverage, but also outperforms existing algorithms with respect to the coverage of the target region.

Key words: wireless sensor network; the network coverage rate; Voronoi; quality of coverage; coverage holes

1 引言

覆盖率是无线传感器网络获取信息完整性和有效性的重要技术指标, 体现了无线传感器网络对物理世界的感知能力, 常用来描述服务质量(QoS,

quality of service)^[1]。为了达到对监测区域的充分覆盖, 往往通过密集部署来提高无线传感器网络的覆盖率。但是在这种部署策略下, 虽然覆盖率得到了保证, 但是网络中大量的传感器节点均存在感知区域重叠的状况, 由此带来信息数据冗余采集、信道

收稿日期: 2012-11-07; 修回日期: 2013-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271257, 61102126); 北京自然科学基金资助项目(4122034); 国家科技支撑计划基金资助项目(2011BAD21B02)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61271257, 61102126); The Natural Science Foundation of Beijing(4122034); The National Key Technology R&D Program (2011BAD21B02)

冲突加剧引发的能耗等问题^[2,3],且在环境监测中往往会考虑投入产出比的问题,在投入资金有限的情况下密集部署策略通常不被采纳。

目前针对覆盖控制的研究主要有 2 种方法,一种是研究节点的调度策略,让满足覆盖冗余的节点轮流进入休眠状态,实现网络覆盖率和连通性^[4]的保证;另一种是研究网络中空洞(coverage hole)侦测及修复策略,以 Voronoi 图为基础,将传感器节点的感知范围假想为一个圈,依据传感器节点具体的位置信息将监测区域划分为多个 Voronoi 多边形,因此覆盖控制问题演变为著名的几何问题:圆周覆盖(circle covering),即完全覆盖一个给定的多边形最少需要多少个圆周?而在研究空洞侦测及修复策略的文献中,Meguerdichian S 等提出了基于 Voronoi 图和 Delaunay 三角网的算法,并论证了采用该算法修复网络空洞所需多项式时间最坏和最好的情况,类似的研究如文献[5]所示。Liu C^[6]等将传感器节点随机划分为 k 个子集,每个子集中的传感器节点周期性地执行感知任务,但是存在由于子集分配的随机性导致覆盖率优劣不可预知。文献[7]融合了覆盖控制的 2 种方法,随机选取若干节点作为主节点,并以其为基础将监控区域划分为多个 Voronoi 多边形,将坐标位于同一个多边形内的节点划分为同一个子集,并处于休眠状态。然后静态地认定围绕主节点的 8 个固定距离的位置为最佳空洞修复位置,在子集中找寻位置坐标同这 8 个固定位置最接近的节点,唤醒并投入运行,以此达到增加覆盖率的目的。

文献[7]的方法融合了覆盖控制的 2 种策略,属于未来的一种研究趋势。但其缺乏准确获知空洞信息方面的研究,静态的空洞修复方法也显得较为机械,容易造成网络中存在大面积的感知重叠现象。本文提出了一种动态获知空洞信息及修复的方法,通过研究节点感知区域与 Voronoi 多边形的几何位置特性,量化了两者间的各种几何关系,提炼出各种几何关系下空洞面积的计算方法,并通过对最佳修复点位置的论证得出修复各种空洞的策略。这样不仅可以克服静态空洞修复策略带来的感知重叠问题,而且可以在保证覆盖率的前提下减少网络中的节点数,延长网络生存期。

2 网络模型和问题描述

2.1 网络模型

假设 N 个感知半径为 R_s 的互不重叠的无线传

感器节点集 S 被随机部署在一个二维的监测区域 A 内,节点位置固定不变,其通讯半径为 R_c , $R_c = 2R_s$ 。节点 $S_i \in S$, 并以 S_i 为感知圆心形成圆形感知区域,假设节点具有如下性质。

1) 传感器节点随机部署在监测区域内,其位置固定不变,搭建无线自组织网络。

2) 节点的通信半径是感知半径的 2 倍,即 $R_c = 2R_s$,任意 2 个位于通信半径范围内的节点互为邻居节点。

3) 节点的感知覆盖区域 $x = pR_s^2$,当且仅当监测区域内任意节点 p 满足 $\|S_i p\| \leq R_s$ 时,称节点 p 被 S_i 覆盖。

4) 已知固定节点的精确位置信息。

5) 传感器节点初始能量为 W ,且具备同步时钟。

2.2 问题描述

由网络模型可知每个节点都能获取其自身以及 Voronoi 图中邻居节点的位置信息,节点的感知范围和其负责的 Voronoi 多边形存在 3 种可能的情况:1) 感知范围可能和 Voronoi 多边形的边有一个或两个交点;2) 感知范围可能完全囊括 Voronoi 多边形,反之也可能完全被 Voronoi 多边形所囊括;3) 由于是随机部署,节点的感知范围可能会有重叠。这些因素^[8,9]都是在估算空洞数额时应该考虑的因素。

Voronoi 多边形是计算几何中的数据结构,已被广泛应用于研究无线传感器网络覆盖性课题上,通过把感知区域分解为多个 Voronoi 多边形的方式可以直观地呈现覆盖率的优劣。对于每个传感器节点,它可以通过 Voronoi 近邻规则建立一个相应的 Voronoi 多边形。多边形的内点就是该传感器节点本身。如果该传感器的感知范围不能覆盖这个对应的 Voronoi 多边形,同时也没有具备更大感知范围的传感器覆盖该内点本身,那么这种情况就表明 Voronoi 多边形中存在空洞^[10]。圆周覆盖(circle covering)讨论的问题是:“如何用最少数量的圆完全覆盖一个给定的二维区域?”。以往文献已给出了一个如何用最少的圆周覆盖一个多边形的办法,在此基础上又进一步衍生出了应用于无线传感器网络的办法。本文提出了一个基于 Voronoi 图的计算几何方法来衡量空洞的确切数额,并在此基础上计算出最优的部署位置以及所需的最佳节点数量来实现最大化的覆盖。

3 空洞侦测修复策略

3.1 相关定义

定义 1 (覆盖集) 监测区域 A 被划分为不同 Voronoi 多边形区域, 传感器节点集 S 分别部署在这些区域中, 即 $S_i \in V_i(S, R_s, V)$, 其中, V_i 为 S_i 所在的 Voronoi 多边形区域。传感器节点集 $D \subseteq S$, 若 D 中的节点感知区域能将区域 A_1 完全覆盖且 $A_1 \in A$, 则 D 就是 A_1 的一个覆盖集。

定义 2 (虚拟节点) 感知区域被划分为数个大小不等、形状不一的 Voronoi 多边形, 节点随机部署在任意感知区域内, 故各个 Voronoi 多边形内包含的节点数量不一, 与节点 i 属于同一个 Voronoi 多边形的节点 j 被看作是一个虚拟节点, 感知范围的重叠部分即为该虚拟节点的感知范围。虚拟节点是否最终被设置为目标节点或最佳新增节点主要是依据节点 i 及其邻居 Voronoi 多边形的感知情况而定, 故 Voronoi 多边形内节点 i 的虚拟节点集定义为

$$N(i) = \{j \in N \mid i \in N, j \neq i\} \quad (1)$$

定义 3 (有效覆盖区域) 任意 Voronoi 多边形中, 假设目标节点 k 出现时, 节点 i 感知到 k 的存在, 则 k 被 i 覆盖, 若某一指定区域内所有节点均被 i 覆盖, 则该区域被称作节点 i 的覆盖区域 $Y(i)$ 。此时, 节点 i 的有效覆盖区域是节点覆盖区域 $Y(i)$ 与目标区域 W 或目标节点 k 的交集表示为 $z(i)$, 即

$$z(i) = Y(i) \cap W \quad (2)$$

定义 4 (空洞区域) 任意 Voronoi 多边形中, 节点 i 的空洞区域 $F(i)$, 假设目标监测区域 W 存在于节点 i 所在的 Voronoi 多边形 $V(i)$ 区域中, 且 W 区域未被节点 i 感知, 则空洞区域 $F(i)$ 可以表示为

$$F(i) = \{W \subset V(i) \mid W \cap Y(i) = \emptyset\} \quad (3)$$

定义 5 (覆盖率) 覆盖率 h 是某一时刻所有在监测区域 A 内运行节点的有效覆盖区域与监测区域的比值, 是衡量网络覆盖性能的重要指标之一。

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n x(i)}{A} \quad (4)$$

3.2 基于 Voronoi 有效覆盖区域的空洞侦测方法

由空洞区域的定义可知, 该区域主要是由监测区域中未被节点感知的区域覆盖, 同时也未被其他节点覆盖的区域组成, 整个空洞区域不属于

网络有效覆盖区域。如 Voronoi 多边形中存在一些无法被所有节点感知的区域, 这些区域就是本文将要寻找的空洞区域。本文将采用基于 Voronoi 图的方式来评估监测区域内的空洞情况, 利用几何分析对空洞位置进行侦测并获取空洞区域面积, 为空洞修复做准备。假设某一区域节点分布情况如图 1 所示。

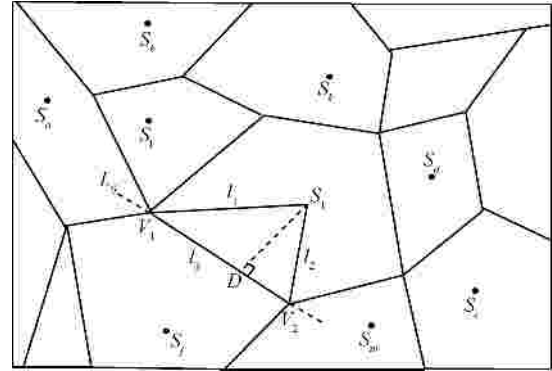


图 1 网络空洞估算示意

首先预计算 2 个节点间的 Voronoi 多边形边长度, 需要至少 3 个邻居节点的位置信息。如图 1 所示, S_i 的位置信息为 (x_i, y_i) , 它的 3 个邻居及其位置信息分别为 $S_j(x_j, y_j)$ 、 $S_k(x_k, y_k)$ 、 $S_l(x_l, y_l)$, 作者的目的是计算出三角形区域的大小。根据欧氏距离及覆盖区域分布性可知, Voronoi 多边形中空洞的面积 (假设节点的感知半径为 R_s , 以 S_i 为顶点的三角形两条边长度分别为 l_1 和 l_2 , 与其相邻的 Voronoi 多边形一边为 l_3 , 圆心角 $\angle l_1 S_i l_2$ 的弧度 a 为: $\arccos(\frac{l_1^2 + l_2^2 - l_3^2}{2l_1 l_2})$, 本文仅举例说明几种典型情况空洞面积, 其他情况下空洞面积同理可得。

如图 2 所示 当 $R_s = d(S_i, S_j)/2$ 且 $S_i V_3 = d(S_i, S_j)/2$ 时, 即节点感知区域位于 Voronoi 多边形内, 空洞面积为: $S_{F_{ij}} = \frac{l_3 d(S_i, S_j)}{4} - \frac{a R_s^2}{2}$ 。

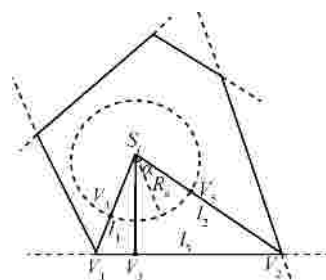


图 2 感知圆区域位于 Voronoi 内

如图 3 所示,当 $R_s \geq l_1$ 且 $R_s \geq l_2$ 时,即节点感知区域包含 Voronoi 多边形,由于 S_i 感知半径均大于三角形的两边,其对三角形的有效覆盖面积达 100%,该情况下空洞面积为 $S_{F_{ij}} = 0$ 。

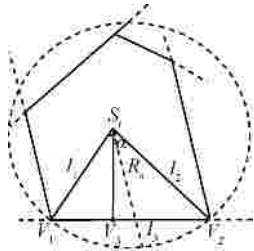


图 3 Voronoi 位于感知圆区域内

3.3 空洞修复策略

针对无线传感器网络的覆盖特性^[11,12],结合基于 Voronoi 有效覆盖区域空洞检测方法,本文提出了空洞修复策略。利用空洞检测方法检测出空洞对应的位置信息及空洞面积大小,建立 Voronoi 多边形节点边权图 $G(V, E)$ 。 V 为 Voronoi 多边形顶点集, E 则为多边形的边集。空洞修复策略利用边权图 G 在相邻两边的角平分线上确定新节点的部署位置,从而设置新的节点来对空洞区域进行修复操作。

定理 1 假设 Voronoi 内存在一定数量空洞,且 S_i 为 Voronoi 内某节点,若部署新节点来对该区域空洞进行最大范围的修复操作,那么新节点必位于 S_i 和 Voronoi 边集构成夹角的角平分线上。

证明

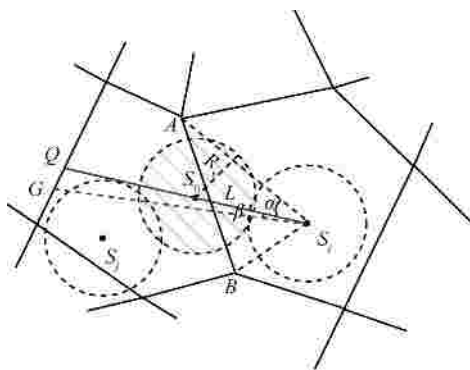


图 4 空洞修复位置

如图 4 所示, $S_i \in V_i(S, R_s, V)$ 、 $S_j \in V_j(S, R_s, V)$, 且 V_i 与 V_j 相邻,其公共边集区域为 AB ,此时 V_j 内存在空洞区域,若使新增节点 S_0 最大范围修复空洞面积,则当且仅当 $b = 0$ 时, S_0 修复有效空洞面积

G 取最大值,即

$$G = pR_s^2 - 2R_s^2 \arccos\left(\frac{L}{R_s} \sin a\right) + 2(R_s^2 - L^2 \sin^2 a)^{\frac{1}{2}} L \sin a$$

此时 S_iQ 和 S_iG 重合,且该新增节点恰好位于两条射线夹角的角平分线上。

3.4 空洞侦测修复准则

空洞修复策略是基于各节点有效覆盖范围及侦测空洞面积情况而进行的。根据空洞面积的大小决定是否增加虚拟节点来覆盖该空洞。根据定理 1 可知,虚拟节点最佳位置的圆心必定处于节点与端点所构成图形的角平分线上,所以进行修复策略必须满足以下条件。

- 1) 新设置的节点 p 必位于 2 个相邻 Voronoi 多边形公共边与其中一多边形内节点组成的角平分线上。
- 2) 节点 p 一定在 Voronoi 多边形内。
- 3) 将新添节点 p 设置为虚拟节点并将其加入到虚拟节点集中,采用迭代方法确定虚拟节点最终的最佳位置。
- 4) 虚拟节点与相邻 2 个 Voronoi 多边形内静态节点间的关系满足: $d(A, p) = \min\{2R_s, d(A, B)\}$ 。

假定节点 A 是位于 Voronoi 多边形内的一个静态节点,其 Voronoi 多边形存在空洞区域,若设置虚拟节点 p 来提高 Voronoi 多边形之内或其周围区域的覆盖率,则该虚拟节点 p 与 A 节点所在的 Voronoi 多边形及其相邻 Voronoi 多边形内静态节点 B 的关系必满足: $d(A, p) = \min\{2R_s, d(A, B)\}$ 。

$$5) \text{ 虚拟节点数量 } k \text{ 满足: } k = \frac{R_s}{x(1 - e^{-n})}$$

其中, R_s 代表感知半径, e 为整个覆盖区域, n 是同一 Voronoi 多边形节点个数, x 代表覆盖强度。

3.5 空洞侦测修复算法

基于上述工作,算法在保证节点覆盖区域最大化的情况下,构建虚拟节点集合,从虚拟节点集中选取最佳节点作为最终被部署在网络中的新增节点,其保证新增节点数目的最小化,达到控制网络容量、减少网络能耗和延长网络生存时间的目的。基于 Voronoi 侦测空洞修复算法具体分为以下 2 个阶段。

3.5.1 空洞侦测阶段

在空洞侦测阶段,生成静态节点子集 S ,各节点获取自身信息并在其通信范围内通过广播邻居

发送消息获得其邻居节点信息。对监测区域内设置的任意静态节点 i ，其邻居节点 $N(i)$ 定义为

$$N(i) = \{j \in S \mid d(i, j) \leq 2R_s, i \in S, j \neq i\} \quad (5)$$

其中， $d(i, j)$ 表示节点 i 和节点 j 之间的距离， R_s 表示节点的感知半径。

针对各静态节点位置信息，利用 3.2 节中基于 Voronoi 有效覆盖区域的空洞侦测方法来判别覆盖空洞。节点 i 通过邻居节点相关信息，结合 Voronoi 覆盖性质和欧氏距离以及感知范围内节点信息，得到节点 i 及邻居 Voronoi 覆盖空洞的数目和面积。

3.5.2 空洞修复阶段

选取任意空洞所在的多边形中的静态节点，将其自身信息及所获空洞信息广播消息至其他静态子节点，确定虚拟节点子集，建立虚拟节点与所在多边形边权覆盖关系，计算当前区域网络有效覆盖率，从虚拟节点中找出一个能最大限度减少其空洞面积的最佳节点。假设网络初始运行时，所有静态节点都处于运行状态。算法步骤如下。

Step1 选取相邻 3 个 Voronoi 多边形区域，静态节点 $S_1 \in V_1(S, R_s, V)$ 、 $S_2 \in V_2(S, R_s, V)$ 、 $S_3 \in V_3(S, R_s, V)$ 。以 S_1 为例，根据空洞侦查方法得知 S_1 和 S_2 间空洞面积即 $S_{F_{12}}$ ，由对称原理可知仅位于 $S_1 \in V_1$ 部分的空洞面积为 $\frac{1}{2}S_{F_{12}}$ ，故 V_1 内测空洞面积为

$$S_{F_1} = \frac{1}{2}(S_{F_{12}} + S_{F_{13}})。同理可知 S_{F_2} 、 S_{F_3} 。$$

Step2 通过上述方法，节点 S_1 可以估算出其 Voronoi 多边形内的空洞面积，当空洞面积满足 $S_{F_1} \leq pR_s^2$ 时，则从静态子集中任意选取节点 S_1 ，找到该节点所在的 Voronoi，在该多边形的边集中选取 e_{12} 及与边集相关联的顶点 v_1 ，建立节点边权覆盖图 $G(V, E)$ 。根据 3.2 节提出的节点筛选准进行空洞修复策略，即在虚拟节点中找出一个能最大限度减少其空洞面积的最佳节点。

Step3 空洞修复策略。按顺序对 Voronoi 多边形的各个顶点进行编号，从 1~ N 。

- 1) 从顶点 1 开始，在虚拟节点中选取最靠近其角平分线的顶点，并假定它为虚拟最优节点。
- 2) 估算出该虚拟节点工作后空洞面积的大小。
- 3) 判断顶点 1 和顶点 2 之间的边长是否大于

R_s ，如果大于则选择顶点 3，否则选择顶点 2，重复执行上述过程，直到节点 N 被选择。

3.6 算法正确性分析

结论 1 如果 $R_c \geq 2R_s$ 且 $V_n(S, R_s, V)$ 所在覆盖区域均满足修复准则，则节点集 S 构成覆盖连通网络。

任意相邻节点 $S_i \in V_i(S, R_s, V)$ 、 $S_j \in V_j(S, R_s, V)$ 与其 Voronoi 公共边集均构成连通图 Φ ，其中， Φ 与 $V_n(S, R_s, V)$ 所在 Voronoi 具有公共边 L ，边端点为 p 、 q ，根据定理 1，虚拟节点集 $H = \{h_i\}$ 中点所过的直线必过 L ，相交于 m ， $\|s_i h_i\| \leq R_s$ 且 $\|s_j h_j\| \leq R_s$ ， H 节点集均位于角平分线上且 $\|s_i h_j\| \leq R_c$ ，由此可知，连通图 Φ 中任意通路均在通信范围之内，并构成通信链路，节点集 S 为覆盖连通。

结论 2 n 个静态节点覆盖区域，求解任意 Voronoi 空洞计算复杂度为 $O(n)$ ，与节点密度无关。

初始化求解 $V_n(S, R_s, V)$ ，任意 Voronoi 内节点空洞计算与其邻居节点有关，通过相邻节点间欧式距离关系，结合节点边权覆盖图 $G(V, E)$ ，依次确定节点间空洞范围，与其他节点分布状况无关。循环重构 $V_n(S, R_s, V)$ 的计算复杂度均为 $O(n)$ ；循环选定虚拟节点子集 W ，且该子集 W 中子元素 $W_n \in V_n(S, R_s, V)$ ，此次循环次数 $k \leq n$ ，其计算复杂度为 $O(n)$ 。综上所述，求解任意 Voronoi 空洞计算复杂度为 $O(n)$ ，且与节点密度无关。

4 仿真实验分析

实验平台由 C++ 语言实现，同时通过仿真工具量化真实环境性能。实验场景设置如下：在目标区域 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 内随机部署 60 个的静态传感器节点，每个节点的感知半径 R_s 均为 5 m，根据比例关系通信半径 R_c 为 10 m，节点能耗模型即节点在工作、空闲和休眠状态的能量消耗比率为 20:4:0.01。在无线网络运行期间，对不同时间段里节点工作状态进行采样，从以下 3 方面验证算法性能，即：1) 固定节点与新增节点部署关系；2) 网络节点数量；3) 网络覆盖质量。

为评估本文所提空洞侦测修复策略的性能，本文将其与文献[7]中 LIN 提出的空洞修复策略 PAL (proposed approach of lin) 做比较，为方便将本文所提空洞侦测修复策略命名为 EECHS (estimation and enhancing of coverage holes strategy)。

4.1 节点部署

监测区域网络初始状态节点覆盖如图 5(a)所示,在网络运行时间及各项参数均一致的情况下,分别运行 2 种不同的空洞探测修复算法,当网络节点状态变化稳定后,对网络覆盖情况进行采样。2 种算法随着部署节点个数的增加,其网络覆盖率逐渐提高,如图 5(b)和图 5(c)所示,PAL 算法中的覆盖率相比 EECHS 算法要低,其主要原因是其在空洞侦测阶段对空洞面积估算不准确,以至于后期无法对空洞面积进行有效修复。

图 6 是网络运行一段时间后,2 种算法空洞覆盖率接近时的网络覆盖图,对比图 6(a)和图 6(b)可知,在节点初始部署相同的情况下,采用 EECHS 算法的网络节点位置分布更均匀,其网络覆盖也较为平衡,有效地减少了感知重叠区域。

4.2 节点的数量

在网络运行过程中会出现闭合的覆盖空洞区域,图 7 给出了不同空洞修复过程中新增节点和空洞面积之间的关系。新增节点数量不仅和空洞面积有关,同时也和空洞修复算法中新增节点的位置部署有

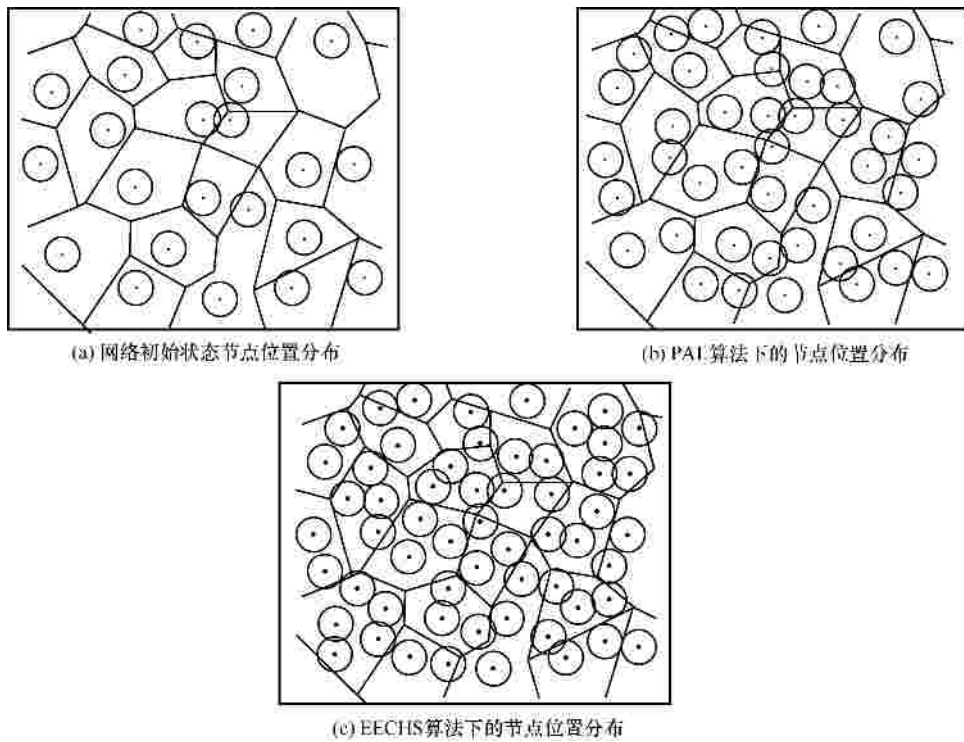


图 5 工作节点位置分布

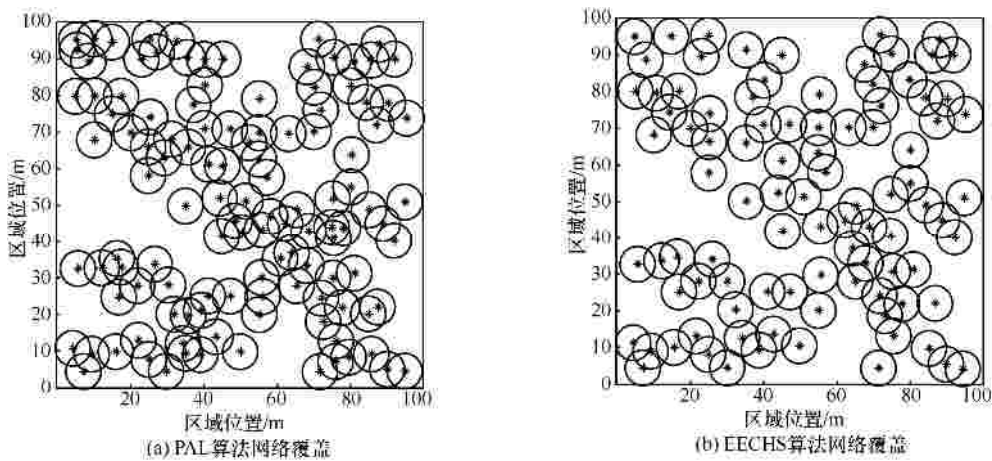


图 6 网络覆盖图

很大关系。虽然在空洞修复过程中，节点的个数随着空洞面积的增加而增加，但从图 7 中可以明显地看出在相同的空洞面积下，EECHS 算法新增节点数量明显少于 PAL 算法，并且随着空洞面积的扩大，其优越性越突出。EECHS 算法对新增节点位置进行最优选择，对节点位置进行合理部署，有效地避免了用较多新增节点对小面积空洞修复的情况，减少了冗余节点部署，在一定程度上降低了整个无线网络的运行开销。

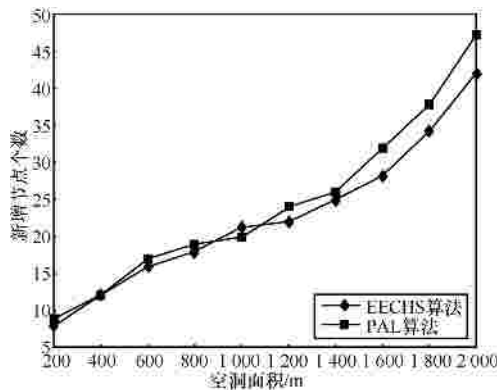


图 7 不同空洞面积下的移动节点数

4.3 随机部署网络的覆盖质量

网络覆盖率是衡量网络覆盖质量的一个重要指标。正常状态运行的网络覆盖率随着节点数量的增加呈线性增长趋势，图 8 给出了 2 种算法情况下网络节点总数和网络覆盖率的变化状况。

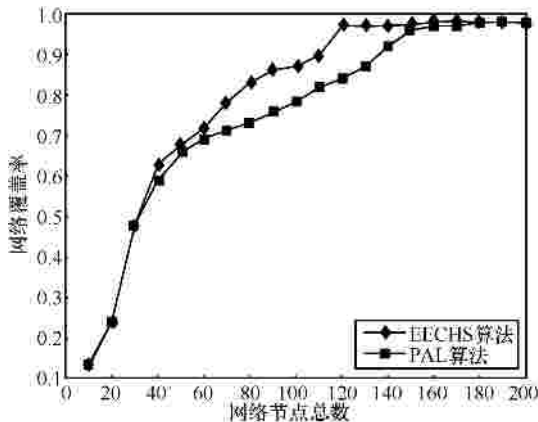


图 8 不同覆盖率下的网络节点总数

图 9 则给出 2 种算法中网络覆盖率随网络时间变化趋势。从图 8 和图 9 中可以看出，在网络运行初期，网络节点分布情况相同，即网络中静态节点设备数量和位置均相同，故 2 种算法分布率相同。当网络运行到后期，开始新增节点来填补网络空洞时，2 种算法中网络覆盖率发生较大变化，EECHS

算法在节点总数达到 120 时其网络覆盖率接近 97%，覆盖盲区的面积不到 3%，而 PAL 算法则还需继续安置节点至 150 个时才达到 97%，从以上实验数据可知，PAL 算法中，当网络覆盖整个目标区域时即网络覆盖率收敛于 100%，其网络覆盖冗余程度较大，网络覆盖质量低于 EECHS 算法。

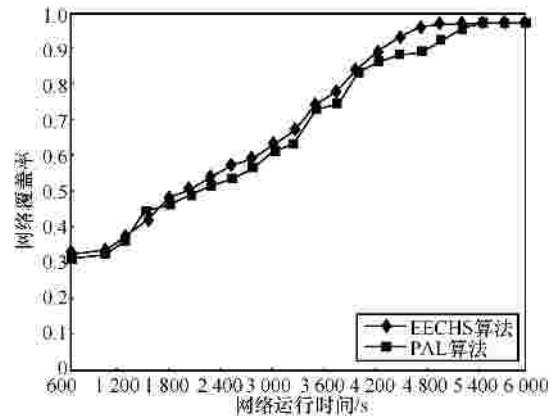


图 9 不同时间下的网络覆盖率

5 结束语

无线传感器网络具有拓扑变化、动态节点、随机部署等特性，这些特性通常会使监测区域产生网络覆盖空洞，覆盖空洞不仅会使监测区域产生盲区，降低监测质量，而且会影响整个网络性能。本文提出了一种基于 Voronoi 图的空洞面积计算方法以及相应的空洞修复策略，可以较为准确地计算网络空洞面积以及最佳的修复位置。实验结果表明，在同样的节点部署和子集划分的基础上，较之 Lin 的方法，本文方法减少了空洞计算误差对节点调度带来的影响，避免了最佳节点选取的单一性，实现了最佳节点部署，使得传感器网络对监测区域的覆盖率达到实际需求，有效地提升了网络覆盖率、延长了网络生存期，减少了冗余节点的部署，在一定程度上降低了监测成本。值得注意的是，虽然本文研究的是基于静态节点的覆盖控制策略，但该策略可以计算出空洞最佳修复位置，因此同样适用于提升动态节点的无线传感器网络覆盖率，并达到更优的空洞修复效果。

参考文献：

[1] 陆克中, 冯禹洪, 毛睿等. 有向传感器网络覆盖增强问题的贪婪迭代算法[J]. 电子学报, 2012, 40(4):688-693.
 LU K Z, FENG Y H, MAO R, et al. A greedy iterative algorithm of

- coverage enhancing problem in directional sensor networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(4):688-693.
- [2] CHEN A, KUMAR S, LAI T H. Local barrier coverage in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(4):491-504.
- [3] WANG P, BOHACEK S. Practical computation of optimal schedules in multihop wireless networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19(2):305-318.
- [4] 孟凡治, 王换招, 何晖. 基于联合感知模型的无线传感器网络连通性覆盖协议[J]. *电子学报*, 2011, 39(4):1-6.
- MENG F Z, WANG H Z, HE H. A greedy iterative algorithm of coverage enhancing problem in directional sensor networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(4):1-6.
- [5] VELTRI G, HUANG Q, QU G, *et al.* Mini-mal and maximal exposure path algorithms for wireless embedded sensor networks[A]. *Proc of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*[C]. California, USA, 2003. 40-50.
- [6] LIU C, WU K, XIAO Y, *et al.* Random coverage with guaranteed connectivity: joint scheduling for wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans Parallel Distrib Syst*, 2006, 17(6):562-575.
- [7] LIN J W, CHEN Y T. Improving the coverage of randomized scheduling in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions Wireless Communications*, 2008, 7(1):4807-4812.
- [8] 罗卿, 林亚平, 王雷等. 传感器网络中基于数据融合的栅栏覆盖控制研究[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(4):825-831.
- LUO Q, LIN Y P, WANG L, *et al.* Barrier coverage control based on data fusion for wireless sensor network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4):825-831.
- [9] HEFEEDA M, AHMADI H. Energy-efficient protocol for deterministic and probabilistic coverage in sensor networks[J]. *Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2010, 21(5):579-593.
- [10] YAO J X, ZHANG J Y, KANNO J, *et al.* Decentralized detection and patching of coverage holes in wireless sensor networks[A]. *Proc of SPIE*[C]. Orlando, USA, 2009.735201-7352010.
- [11] MIAO H W, CHIA C O, WU X W, *et al.* Coverage-hole trap model in target tracking using distributed relay-robot network[A]. *Proc of ACM Symposium on Applied Computing*[C]. Sieme, Switzerland, 2010. 1299-1304.
- [12] ZHANG C, ZHANG Y C. Localized algorithms for coverage bound-ary detection in wireless sensor networks[J]. *Wireless Networks*, 2009, 15(1):3-20.

作者简介：



赵春江(1964-),男,河北定兴人,国家农业信息化工程技术研究中心主任,主要研究方向为农业智能信息处理与控制技术。

吴华瑞(1975-),男,山东冠县人,国家农业信息化工程技术研究中心研究员,主要研究方向为智能系统和无线传感器网络。

刘强(1969-),男,四川内江人,电子科技大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为地理信息系统。

朱丽(1982-),女,甘肃金昌人,硕士,国家农业信息化工程技术研究中心研究实习生,主要研究方向为嵌入式系统。