

基于移动节点的无线传感器网络覆盖洞修复方法

王良民^{1,2}, 李菲¹, 秦颖^{1,3}

(1. 江苏大学 计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212013;

2. 东南大学 计算机科学与工程学院, 江苏 南京 210096; 3. 中国科学院 计算机网络信息中心, 北京 100190)

摘 要: 针对静态无线传感器网络中常常出现的覆盖洞问题, 采用了移动节点进行修复的思路, 提出了三角形贴片式的逐步增加移动节点方法。该方法利用覆盖洞边缘节点提供的辅助信息, 指导移动节点移动到“最佳”位置。首先从几何理论上分析了最佳位置的存在条件, 随后证明了在相关位置部署移动节点可以保证最低覆盖率大于 90%, 最后以仿真实验验证并分析了该算法的覆盖度、稳定性、冗余度等指标, 并从移动节点覆盖能力利用率的角度, 与相关工作进行了对比实验分析。

关键词: 无线传感器网络; 移动节点; 覆盖洞

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)04-0001-08

Resilient method for recovering coverage holes of wireless sensor networks by using mobile nodes

WANG Liang-min^{1,2}, LI Fei¹, QIN Ying^{1,3}

(1. Department of Computer Science, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Coverage holes directly reduce network performance and become a key problem of static wireless sensor networks. A hole-patching method was presented to get the resilient coverage, in which mobile nodes were guided by the boundary nodes of the coverage hole and patched uncovered area in the hole triangle by triangle. Based on geometry theories and mathematic deduction, the moving destination of the mobile nodes was proved to be optimal, and the coverage of the patched holes was higher than 90%. Simulation results show the coverage, stability and redundancy of the proposed method, and then the availability was compared with some related methods reported recently.

Key words: wireless sensor network; mobile node; coverage hole

1 引言

覆盖控制问题是无线传感器网络 (WSN, wireless sensor network) 中资源优化分配的重要手

段之一, 它反映了 WSN 所能提供的服务质量, 是其更好地完成环境感知、信息获取和传输任务的基础条件。然而, 由于网络随机部署以及网络能耗不均、攻击和故障等使得部分节点过早死亡, 导致网

收稿日期: 2010-10-12; 修回日期: 2011-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60703115); 博士后基金特别资助项目 (200801357); 江苏大学启动基金资助项目 (07JDG080)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60703115); The China Postdoctoral Science Foundation (200801357); The Talents Foundation of Jiangsu University (07JDG080)

络中部分区域形成覆盖洞。覆盖洞的出现,造成网络的覆盖度和连通性下降,也可认为是能量洞^[1]的一种特殊情形,严重地影响了网络的性能。

在静态网络中,为了避免覆盖洞的出现,多重覆盖^[2]是较为常见的解决方法,让被监控区域内每个点都至少被 k 个节点监测,这样即使个别节点死亡依然能保证网络监控、传输等基本任务的执行。然而 k 个节点冗余覆盖会造成节点成本增加,过度密集的节点分布也会造成资源浪费及通信干扰等。基于多重覆盖基础上的休眠—唤醒机制^[3]可节省资源耗费,但是,多重覆盖重数受资源和成本的限制, k 个节点依然存在被攻击后全部损坏的可能性。为弥补覆盖洞,文献[4]针对多重拓扑控制问题,提出当网络使用一段时间后,通过播撒的方式投放第二代节点。然而,播撒方式的随机性往往不能保证覆盖洞区域获得足够数量的新节点。

随着微电子技术的发展,移动传感器节点的造价逐步降低,利用节点的定向移动到指定位置,去填补覆盖洞、拓扑洞等受到了很多研究人员的重视^[5-12]。文献[5~9]均针对全为移动节点的无线传感器网络,其目标是在保证最小移动距离的前提下获得最高的覆盖度。其中 Wang 等^[6]分别针对最小的部署时间、最小的移动距离时获得目标区域的最大覆盖的两类目标提出了 3 种分布式协议,所提出的 3 个协议均基于 Voronoi 图来计算移动节点弥补覆盖洞的最佳目标位置。随后, Wang 等^[10]考虑到移动节点的代价相对昂贵,进而研究大部分静态节点中掺入少量移动节点的混合网络。为达到混合网络中节点覆盖度和节点代价的最佳平衡,他们提出一种 Bidding 协议来指挥移动节点运动以增加网络覆盖度。

现有工作中,节点移动位置的“最优”及覆盖度的“最佳”,均通过分析及仿真获得。本文针对掺入少量移动节点的混合网络,受计算机图形学中三角网格模型启发,从理论上证明了一种最优的节点移动位置,以及基于该位置部属移动节点拥有 90% 以上的覆盖率。在此基础上,提出了基于移动节点的三角形逐个贴片修补方法 (PATT, patching algorithm triangle by triangle based on mobile node),最后通过仿真实验给出了性能分析与比较。

2 预备知识

首先,介绍本文所讨论的基于混合节点的无线传感器网络模型,然后在此模型的基础上对覆

盖洞修复问题进行了直观描述,最后在相关几何图形上得出 2 个理论结果,为后续修复算法提供理论保障。

2.1 网络模型

研究的传感器网络中有两类节点:静态节点和移动节点。其中静态节点同构,各节点具有相同的计算、通信能力和初始能量水平,且节点能量不能再补充;有若干移动节点可供调配使用,各移动节点与静态节点同构,有相同的计算能力、通信能力,不同的是它可以运动,且能量能得到补充。

采用对称通信信道假设,节点间的通信是相互的,节点本身没有 GPS 装置,但采用了定向天线和相关的无线定位算法,可协助各相邻节点之间在相互通信获得对方节点相对位置的信息。节点最大通信半径 R_c 是最大感知半径 R_{max} 的 2 倍,通信和感知范围可调。

假设移动节点在相关通信协议的支持下,可到达任何网络中其他节点指定的位置。此外,刘明等^[2]指出绝大部分应用并不要求传感器网络实现完全覆盖,为此,本文认为在一段时间间隔内产生少量的盲区是可以接受的,假设无线传感器网络的覆盖度达到 90% 时,就满足了可用性要求;而且仅在空洞面积大于空洞边缘节点所围多边形面积的 10% 时,才使用空洞修补算法。

2.2 问题描述

主要考虑无线传感器网络中已知覆盖洞存在时,如何用移动节点进行覆盖度修复。已知覆盖洞为一个不规则图形区域,如图 1 所示,洞的边缘有多个节点,形成一个封闭的不规则多边形。鉴于通信半径是感知半径的 2 倍,因而该多边形的任意 2 个相邻节点可以直接通信(证明见定理 2)。多边形的边数和形状因为覆盖洞的不同而不同,因此无法利用几何图形自身的规律来求解。

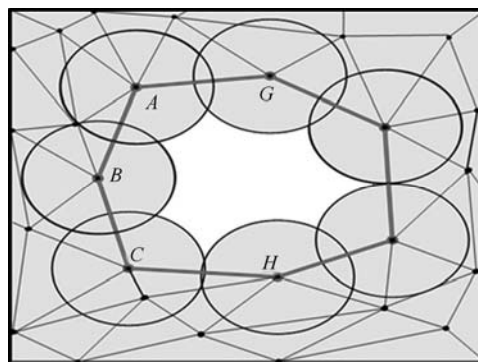


图 1 覆盖洞模型

受计算机图形学中三角形贴片法启发，可将多边形分解为多个三角形模型。如图2所示，A、B和C是覆盖洞边缘的3个相邻节点，E是待放置的移动节点。因为节点E的加入，覆盖洞的边缘多边形BCH...GAB将改变为ECH...GAE，从而覆盖洞面积就会减小。在此过程中，增加移动节点E修补了△ABE和△CBE拼接而成区域的网络覆盖。通过逐步增加移动节点进行修复，最终填满整个覆盖洞。

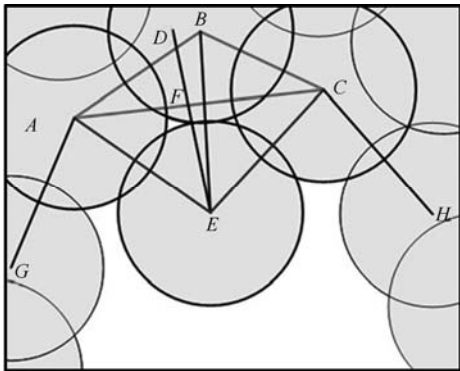


图2 几何模型

后续的算法就是基于覆盖洞边缘任意3个节点形成的△ABC设置移动节点E来修复覆盖洞中△ABE和△CBE 2个三角形片区。确定E的最优位置需要考虑2个方面因素：一方面，E要远离△ABC最大化E的感知范围，减少节点E与节点A、B、C感知范围中的重叠区域，也就是使△ABE和△CBE的面积最大化；另一方面，E又不能走得太远，以防止在四边形ABCE内留下较大的覆盖盲区，即△ABE和△CBE内要保证较高的覆盖率。

2.3 性质定理

定理1 若要保证修补覆盖空洞所需要的移动节点数最少，则依托△ABC增加的移动节点应放置在边AC的中垂线上。

证明 如图2所示，只有四边形ABCE的面积S₁达到最大，才能保证消除整个覆盖洞所用的移动节点数目最少。记△ABC的面积为S₂，△AEC的面积为S₃。故有S₁=S₂+S₃。

由于△ABC的面积S₂是确定的，所以要使得S₁最大，需要S₃取最大值。

过点E做边AC的垂线EF，垂足为F，则

$$S_3 = \frac{1}{2}(\overline{AC} \times \overline{EF})$$

其中， \overline{AC} 、 \overline{EF} 分别表示线段AC、EF的长度。

由于 \overline{AC} 为固定值，要使S₃最大，需 \overline{EF} 取最大值。

由于研究问题的对称性，不妨先假设 $\overline{AE} \leq \overline{CE}$ ，可以使问题讨论更为简单，又不失一般性。相应地，就有 $\overline{AF} \leq \overline{CF}$ 。由于 $\overline{AC} = \overline{AF} + \overline{CF}$ ，所以 $\overline{AC} \leq 2\overline{CF}$ ，即

$$\overline{CF} \geq \frac{\overline{AC}}{2}$$

作为新的边缘节点，移动节点E要保证与C的通信，故有 $\overline{CE} \leq R_C$ 。在△EFC中由勾股定理可知：

$$(\overline{EF})^2 = (\overline{CE})^2 - (\overline{CF})^2$$

从而在 \overline{CE} 取最大值R_C， \overline{CF} 取最小值 $\overline{AC}/2$ ， \overline{EF} 可取最大值，此时S₃最大。因为 $\overline{CF} = \overline{AC}/2$ ，故F为AC的中点，因此移动节点的位置E点位于AC的中垂线上，才可能获得最大的感知面积，此时覆盖洞修复所需要的移动节点数目最小。证毕#

定理2 无线传感器节点的通信半径R_C是感知半径R_S的2倍时，若△ABE 3个顶点之间可两两相互通信，则该三角形内感知覆盖面积S满足：

$$S \geq \frac{\pi}{2\sqrt{3}} S_{\triangle ABE}$$

即此时△ABE的备覆盖率不低于90%。

证明 如图3所示，节点A与E的通信半径R_C为感知半径R_S的2倍，显然，只要A在E的通信半径内，则线段AE上所有点都能被A或E所覆盖。若△ABE的3个顶点均能直接通信，则三角形三边的边长均不大于R_S。

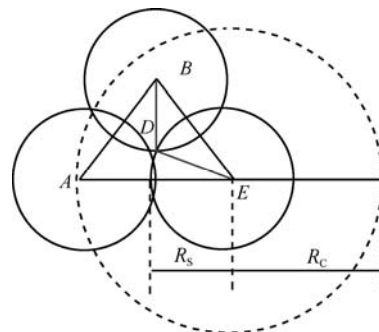


图3 通信半径与感知半径

不失一般性，记三角形某一顶点E顶角为∠E，其两邻接边分别为a和b，其对边为e，则三角形的面积S_{△ABE}=(absin∠E)/2。从而传感器节点E所覆盖的三角形内面积为(∠E×R_S²)/2，而其中E与A和B共辖的面积分别为S_{EA}和S_{EB}，若将共辖面积平均分配到各个节点身上，则节点E所覆盖的面积为

$$S_E = (\angle E \times R_s^2) / 2 - \frac{S_{EA}}{2} - \frac{S_{EB}}{2}$$

由 E 的一般性, 可同理求得 A、B 所辖的覆盖区域面积 S_A 和 S_B , 从而 $\triangle ABE$ 覆盖率为

$$p = \frac{S_E + S_A + S_B}{S_{\triangle ABE}}$$

根据 $a, b, e \leq R_c$, $\angle E + \angle A + \angle B = \pi$ 及三角形边角关系的约束条件, 可得 $a=b=e=R_c=2R_s$, $\angle E = \angle A = \angle B = \pi/3$ 时, p 取最小值。

此时有:

$$S_{EB} = S_{EA} = 2 \left(\frac{\angle E \times R_s^2}{2} - \frac{1}{2} \times \frac{a}{2} \times 2 \times \sqrt{R_s^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} \right)$$

从而可得:

$$p \geq \frac{\frac{3}{6} \pi R_s^2}{\frac{1}{2} R_c^2 \sin \frac{\pi}{3}} = \frac{\pi}{4 \times \sin \frac{\pi}{3}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}}$$

通过近似估算可得 p 的最小值为 0.906 899。证毕#

定理 1 确定了若想最大化移动节点的覆盖作用, 移动节点需要在三角形第三边中垂线上移动, 离开边界越远越好。而定理 2 则给出了这个移动距离的一个约束值——只要和第三边的 2 个节点能保持通信, 则覆盖率大于 90%。2 个定理都给选定移动节点的最优位置提供了理论上的基础。

3 覆盖洞修复算法 PATT

首先选择初始边缘节点 B, B 通过和左右相邻节点 A、C 通信, 获得 $\angle ABC$, 记为 θ , 若 $\theta < \pi$ 成立, 则通过相应的测距算法, 求出 AB、AC 的长度, 分别记为 x, y ; 否则, 重新选择边缘节点, 直到找到满足要求的点为止。由于覆盖洞的边缘节点, 组成一个封闭的多边形, 因此只要覆盖洞存在, 必然存在小于 π 的角, 从而能找到满足要求的点。

由第 2 节的预备知识可知, 覆盖洞修复算法主要采用三角形分解法, 以不断填充的三角形区域来补洞。而为了使用最少的移动节点达到最大的覆盖率, 需要寻找移动节点的最优位置。如图 2 所示, 要依托 $\triangle ABC$ 扩充覆盖面积时, 定理 1 表明移动节点应在 AC 的中垂线 EF 上, 且离 B 的直线距离越远越好; 定理 2 要求移动节点能和 A、C 保持通信。

在这些基本思想的指导下, 如节点 B 能确定 $\angle ABE$ 的大小 φ 及线段 BE 的长度 f , 则可以最终确定 E 的位置。设节点通信半径为 R_c , B 通过初始化操作, 获得 x, y, θ 后, 下面介绍求解 φ 和 f 的移动节点位置计算算法。

如图 2 所示, AC 与其中垂线 DE 交于 F, 而 EA 和 EC 之间长度为保持最大通信距离的 R_c 。从而可在 $\triangle ABC$ 中用余弦定理求得 AC 的长度与 $\angle BAC$:

$$\overline{AC} = \sqrt{x^2 + y^2 - 2xy \cos \theta}$$

$$\angle BAC = \arccos \left(\frac{x^2 + (\overline{AC})^2 - y^2}{2x \overline{AC}} \right)$$

其中, \overline{AC} 表示线段 AC 的长度。

F 为 AC 中点, 且 $\triangle AFD$ 为直角三角形, 则有:

$$\overline{AD} = \frac{\overline{AF}}{\cos \angle BAC} = \frac{\overline{AC}}{2 \cos \angle BAC}$$

$$\overline{DF} = \overline{AD} \times \sin \angle BAC = \overline{AD} \times \sqrt{1 - \cos^2 \angle BAC}$$

$$\angle EDB = \pi - \angle EDA$$

$$= \pi - \angle FDA$$

$$= \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \angle BAC \right)$$

$$= \frac{\pi}{2} + \angle BAC$$

而利用 $\triangle EFA$ 为直角三角形, 可得:

$$\overline{EF} = \sqrt{(\overline{AE})^2 - (\overline{AF})^2} = \sqrt{R_c^2 - \left(\frac{\overline{AC}}{2}\right)^2}$$

由 A、B、D 共线可得:

$$\overline{DB} = \overline{AB} - \overline{AD} = x - \overline{AD}$$

由 E、F、D 共线可得:

$$\overline{DE} = \overline{DF} + \overline{EF}$$

在三角形 $\triangle DEB$ 中, 使用余弦定理有:

$$\overline{BE} = \sqrt{(\overline{DE})^2 + (\overline{DB})^2 - 2(\overline{DE} \times \overline{DB}) \cos \angle EDB}$$

为保证节点 B、E 之间的通信以及 $\triangle AEB$ 内的覆盖率, 要求 BE 长度不超过 R_c 。所以, 最终 BE 的长度 f 为

$$f = \min(R_c, \overline{BE})$$

而在 f 值最后确定后, 可在 $\triangle DEB$ 用, 用余弦

定理求 $\angle ABE$ 的值 φ 为

$$\varphi = \angle ABE = \angle DBE = \arccos \left(\frac{(\overline{DB})^2 + f^2 - (\overline{DE})^2}{2f\overline{DB}} \right)$$

由上述过程知节点 B 通过初始化操作, 获得 x 、 y 、 θ 后, 可得算法 1 求出 φ 和 f , 确定节点 E 的位置。算法 1 的计算公式中, 以下标表示每步求值结果, 可清楚地看出求解在计算上的串行性。

算法 1 移动节点位置计算方法。

step 1 计算 AC 的长度平方值 f_1 , 计算公式为:

$$f_1 = x^2 + y^2 - 2xy \cos \theta。$$

step 2 计算 $\angle BAC$ 的余弦值 f_2 , 计算公式为:

$$f_2 = \frac{x^2 + f_1 - y^2}{2xy}。$$

step 3 计算 AD 的长度值 f_3 , 计算公式为:

$$f_3 = \frac{\sqrt{f_1}}{2} \times f_2。$$

step 4 计算 DB 的长度值 f_4 , 计算公式为:

$$f_4 = x - f_3。$$

step 5 计算 $\angle EDB$ 的余弦值 f_5 , 计算公式为:

$$f_5 = \sqrt{1 - f_2^2}。$$

step 6 计算 DF 的长度值 f_6 , 计算公式为:

$$f_6 = f_3 \times f_5。$$

step 7 计算 EF 的长度值 f_7 , 计算公式为:

$$f_7 = \sqrt{R_c^2 - \left(\frac{f_1}{2}\right)^2}。$$

step 8 计算 BE 的长度值 f , 计算公式为:

$$f = \sqrt{f_4^2 + (f_6 + f_7)^2 - 2f_4(f_6 + f_7)f_5}。$$

如果 $f > R_c$, 则取 $f = R_c$; 否则保持值 f 。

step 9 计算 $\angle ABE$ 的角度值 φ , 计算公式为:

$$\varphi = \arccos \left(\frac{f_4^2 + f^2 - (f_6 + f_7)^2}{2 \times f \times f_4} \right)。$$

定理 3 算法 1 所获得的节点位置 E , 可使得四边形 $ABCE$ 的面积最大化, 且其覆盖率大于 90%。

证明 算法 1 所确定节点 E 的位置在 AC 的中垂线上, 且能保持和节点 A 、 C 通信的最大距离 R_c 。此时, 若沿 DF 方向继续移动, 可扩大四边形 $ABCE$ 的面积, 但 EA 、 EC 的长度将大于 R_c , 节点间不能通信, 因此, 由定理 1 可知, 此时实现了保持节点通信时四边形 $ABCE$ 的面积最大化。

由算法 1 可知, 但 EA 、 EC 的长度等于 R_c , 而

step8 则保证了 BE 的长度不超过 R_c , 由定理 2 可知, 此时三角形 ABE 和 BCE 内的覆盖率均大于 90%, 从而新增四边形 $ABCE$ 区域内的感知覆盖率大于 90%。证毕#

在定理 3 和算法 1 的支持下, 通过逐步逐个节点地重复执行, 就得到了基于移动节点的三角形逐个贴片修补方法(PATT)。具体过程如下: 完成算法 1 后, 节点 B 根据计算输出 φ 和 f , 移动节点 E 到指定位置; 更新覆盖洞边缘信息, 重新执行算法初始化程序, 寻找新的节点 B , 第二轮执行算法 1, 直到找不到合适的 B 终止算法。

由于定理 3 保证了每次新增节点 E 所补充区域的覆盖率都大于 90%, 所以当算法结束时, 填满后, 整个修补区域的覆盖率将达到 90%, 满足文献[2]所提出的可用性要求。此外, 每步使得四边形 $ABCE$ 的面积最大化, 则和定理 1 一起保证了 PATT(即通过更新边缘信息, 重复执行算法 1 是空洞覆盖率大于 90% 时所需要移动节点数目最少)。

4 算法性能分析

算法的最优性和最低覆盖率得到了相关的证明, 这一节, 首先对 PATT 的算法覆盖度、稳定性和冗余性等进行了仿真验证, 然后对相关工作进行了分析和实验对比。

4.1 算法性能

在 matlab6.5 中完成了第一组 3 个实验, 分别验证了 PATT 修复区域的网络覆盖度、PATT 的算法稳定性和冗余度。在这组实验中, 假设已知覆盖洞, 其面积为 S , 移动节点的感知半径为 7.5m, 最大通信半径为 15m, 要修补空洞需要移动节点数目为 M 。

4.1.1 覆盖度验证

覆盖度定义为已被覆盖的空洞区域面积与覆盖洞总面积的比值, 如式(1)所示:

$$C = \frac{\left(\bigcup_i S_i \right) \cap S}{S} \quad (1)$$

其中, 已被覆盖的空洞区域面积为空洞区域内所有移动节点覆盖区域交集的面积。选取一个各边长均为 15m 的正二边形作为要修补覆盖空洞, 这时空洞面积 $S=708\ 994\text{m}^2$ 。使用本文中的算法(PATT)修补该覆盖空洞, 每放置一个节点后, 用式(1)计算当前覆盖度。图 4 给出了增加移动节点

数与覆盖度的关系。从图 4 可以看出，随着所放置的移动节点数目的增加，覆盖度呈近似线性增长，这说明每一个移动节点的添加都会使覆盖空洞的面积减小，使用该算法放置的移动节点不会出现重复覆盖的情况。当移动节点数目达到 5 970 时，此时对应的覆盖度为 0.998 48，与定理 3 的结论一致。

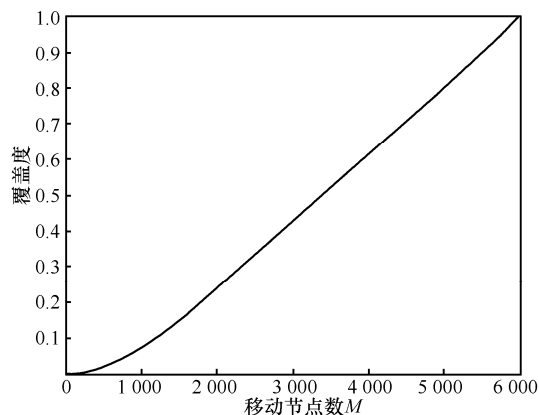


图 4 移动节点数与覆盖度的关系

4.1.2 稳定性分析

图 5 针对不同面积 (S 值) 覆盖洞，计算修补它所需的移动节点数目 M。随着空洞面积的增加，移动节点数目呈线性增长。这说明算法具有很好的稳定性——所需移动节点数目增长速度与面积增长速度相同。

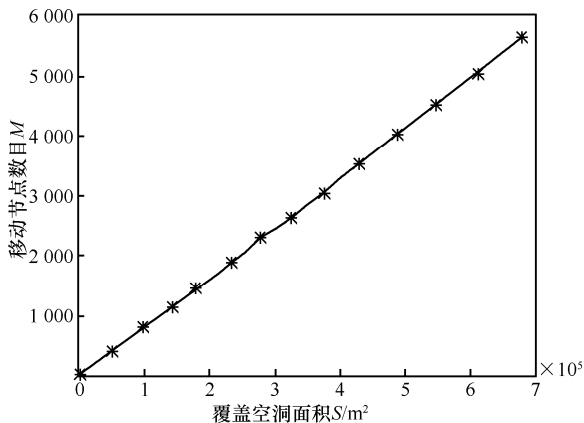


图 5 算法稳定性

4.1.3 冗余度分析

针对不同的覆盖洞面积 S，使用本文算法修复后，以式(2)计算出冗余度——所用移动节点的覆盖面积之和与覆盖空洞总面积的比值。

$$R = \frac{M \times \pi R_c^2}{S} \tag{2}$$

图 6 给出了覆盖洞面积与冗余度的关系。从图 6 可以看到，该算法的节点冗余度介于 1.1~1.45 之间，考虑到单个节点感知范围是圆形的，而任何一个圆与其内接四边形的面积比近似为 1.57，因此这个冗余度是相当小的。

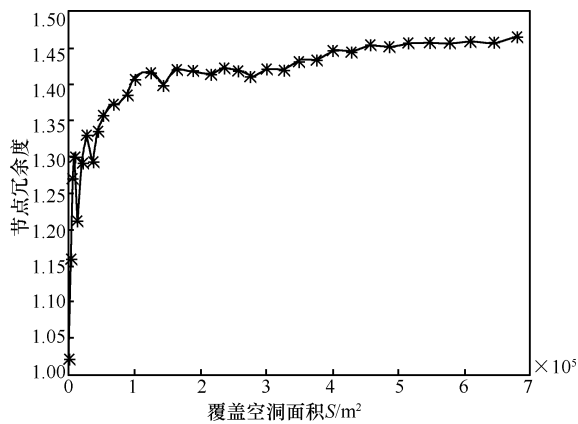


图 6 算法冗余度分析

此外，图 6 中，当覆盖洞面积较小时，面积变化及洞的边缘情况对冗余度均有较大影响，因此对应的节点冗余度变化很剧烈；但随着覆盖空洞面积的变大，这种影响越来越小。从图中可以看出，当覆盖空洞面积达到 10⁵ m² 时，移动节点冗余度介于 1.35~1.45 之间。随着面积的继续增大，节点的冗余度稳定在 1.45 左右，这也说明算法有较好稳定性。

4.2 相关工作与比较分析

当前有关覆盖洞修复的方法，按照所针对的无线传感器网络可以分为 3 类，分别是静态网络、动态网络和混合网络。在静态网络中，常用的修复方法是多重覆盖和休眠-轮值机制以及播撒第二代节点的做法。动态网络中的研究可以分为两类：一类是基于“虚拟力”的方法，如文献[5]和文献[7]分别用虚拟力方法填补“洞”及修复网络连通性中的“岛”；另一类是基于几何图形的方法，以图的规则和规律对移动节点建模，指导移动节点的运动路径与目标位置，如基于 Voronoi 图的方法^[6]和基于基本几何图形分析的向量方法^[9]。DCM 方法^[8]也是利用已知拓扑结构的几何规则，但是该文让故障节点在“离开”前决定邻居节点的移动，这对故障节点提出了很高的要求。

混合网络中通常是以静态网络为基础网络，少量移动节点作为辅助^[11]。在出现覆盖洞时，让少量移动节点去修复“洞”所在区域，这样可以实现节点代价与覆盖率之间的一种平衡^[10]。总体来说，

在静态节点中引入移动节点的覆盖洞修复方法，比重新播撒二代节点的方法可靠性更高，鉴于所使用节点数目较少，与随机播撒常常造成节点分布不均的“浪费”比起来，能节约节点成本。相对于全是移动节点的传感网络来说，网络造价低，而且基于局部的修复算法，相对于重新部署移动节点的覆盖修复算法，能耗成本也很低。

混合网络移动性集中在少数节点上，利用静态阶段辅助进行几何定位，就显得更为重要。HPA^[12]与本文算法非常相似，视覆盖洞周围节点形成一个多边形，然后将移动节点定位在中垂线上。所不同的是，该文中垂线是直观地定位于相邻节点构成的邻接边上，而本文方法是基于相邻 3 个节点构成的三角形的第三边上，而且本文这种选取方法通过了相关几何规则的证明，为最佳定位位置。

第二组仿真实验为演示、验证本文算法与 HPA 的不同，在一片区域中随机部署 28 个传感器节点形成一个覆盖洞，检测出覆盖洞边缘多边形有 20 个定点，随机地选取一点分别利用 PATT 算法和 YAO^[12]的 HPA 算法来弥补这个随机点所在区域的覆盖空洞。本文方法是用了 14 个移动节点，而 HPA 算法一共使用了 16 个节点，图 7 给出了修复效果示意图。

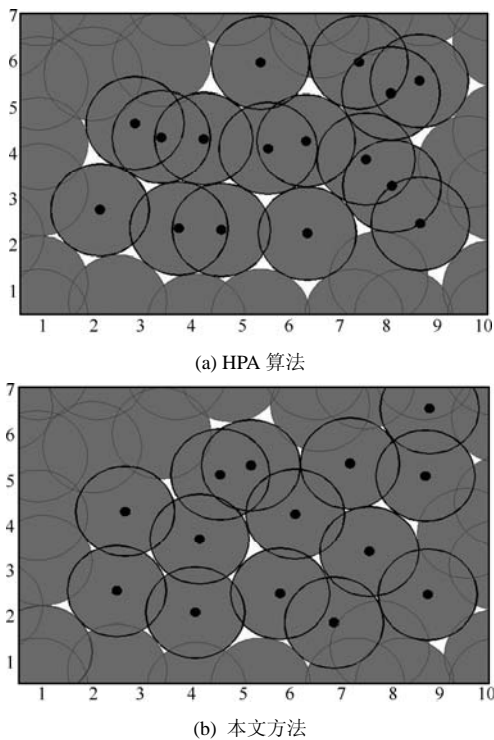


图 7 修补效果示意图

在此实验中，进一步研究节点利用率。定义每一个移动节点感知范围的利用率为

$$A = \frac{C_0}{\pi R_C^2}$$

其中， C_0 为新增节点的实际利用面积，它等于节点的感知圆的面积 πR_C^2 减去它与其他节点感知圆相交的面积。图 8(a)分别给出了 HPA 和本文算法在选取相同起始点时，第一个移动节点所在位置，从图中可以看出，本文方法中的移动节点覆盖利用率较高，实际计算表明本文算法中第一个节点的利用率为 88.286%，而 HPA 算法为 77.216%，这表明在相同条件下，本文算法对移动节点的利用率较高，这验证了定理 1 的结论——三角形第三边的中垂线为最佳位置。图 8(b)则显示了 2 个算法完成整个实验时，每个节点的利用率比较。为使得图示更具有直观效果，图中按照节点利用率从高到低排列。从图中可以看出，多数情况下本文算法中移动节点覆盖利用率均高于 HPA。实际上，部署了第一个移动节点之后，空洞边界条件已经发生了变化，单个节点的利用率已经不具有对比意义。而在相近的覆盖效果（如图 7 所示）下，本文方法少用了 2 个移动节点，已经很好地说明了本文方法对移动节点具有更高的利用率。

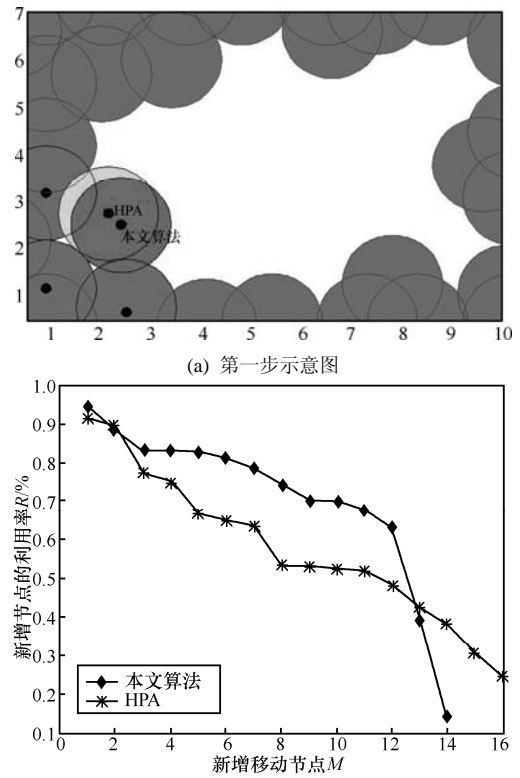


图 8 移动节点利用率对比

构建了 14 组不同面积的覆盖洞边缘多边形，2 个算法一起修复，统计其所需要的移动节点数目，图 9 显示除面积小时所需节点数目相等外，本文算法在所用节点数目均少于 HPA，且随着面积的增长，这种趋势越来越明显。

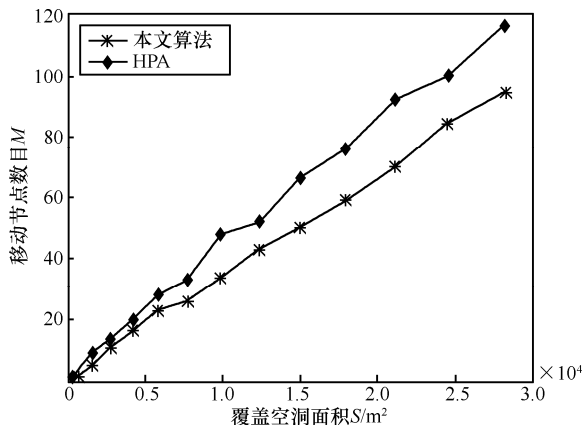


图 9 修复不同面积时需要的节点数

5 结束语

无线传感器网络中常常出现覆盖洞问题，如部署时播撒不均、使用中能耗不均以及故障、入侵等各种内外因素。覆盖洞不仅会造成传感器采集信息时在监控区域中形成盲点，更会造成数据传输及相关网络服务的故障，进而影响整个网络性能。本文采用移动节点修复覆盖洞，提出了三角形贴片式的逐步增加移动节点方法(PATT)，从理论上证明了该方法的最优性，且算法能保证覆盖区域的不低于 90% 的覆盖率，并仿真实验分析了该算法的性能。利用移动节点来修复覆盖洞，可以节省成本，延长网络寿命。需要说明的是，本文方法是建立在已知覆盖洞及其边缘节点的基础上，而覆盖洞及其边缘的检测正是下一步工作，拟利用移动节点的机动性来协助检测工作。

参考文献:

[1] 吴小兵, 陈贵海. 无线传感器网络中节点非均匀分布的能量空洞问题[J]. 计算机学报, 2008, 31(2): 253-261.
WU X B, CHEN G H. The energy hole problem of non-uniform node distribution in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(2):253-261.

[2] 刘明, 曹建农, 郑源等. 无线传感器网络多重覆盖问题分析[J]. 软件学报, 2007, 18(1): 127-136.
LIU M, CAO J N, ZHENG Y, et al. Analysis for multi-coverage problem in wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2007,

18(1):127-136.

[3] 胥楚贵, 邓晓衡, 邹豪杰. 无线传感器网络覆盖空洞修复策略[J]. 传感技术学报, 2010, 23(2):256-259.
XU C G, DENG X H, ZOU H J. Repair policies of coverage holes in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2010, 23(2):256-259.

[4] WANG L, GUO Y, ZHAN Y. Security topology control method for wireless sensor networks with node-failure tolerance based on self-regeneration[J]. Eurasip Journal of Wireless Communications and Networking, 2010, 2010(201416):1-11.

[5] ZOU Y, CHAKRABARTY K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces[A]. INFOCOM2003[C]. 2003. 1293-1303.

[6] WANG G, CAO G, PORTA T. Movement-assisted sensor deployment[J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2006, 5(6):640-652.

[7] ZHOU S, WU M, SHU W. Finding optimal placements for mobile sensors: wireless sensor network topology adjustment[A]. IEEE 6th CAS Symposium on Emerging Technologies: Mobile and Wireless Communication[C]. Shanghai, China, 2004. 529-532.

[8] SEKHA A, MANOJ B, MURTHY C. Dynamic coverage maintenance algorithms for sensor networks with limited mobility[A]. Proceedings of the 3rd IEEE Int'l Conf on Pervasive Computing and Communications[C]. Kauai, Island, 2005. 51-60.

[9] SAHOO P, TASAI J, KE H. Vector method based coverage hole recovery in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Communication Systems and Networks[C]. India, 2010. 243-251.

[10] WANG G, CAO G, BERMAN P, et al. Bidding protocols for deploying mobile sensors[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(5):563-576.

[11] MEI Y, XIAN C, DAS S, et al. Repairing sensor network using mobile robots[J]. Computer Communication, 2007, 30 (13):2615-2626.

[12] YAO J, ZHANG G, KANNO J. Decentralized detection and patching of coverage holes in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the SPIE Defense and Security[C]. Orlando, Florida, 2009. 7352.

作者简介:



王良民 (1977-), 男, 安徽潜山人, 博士, 江苏大学副教授, 主要研究方向为无线传感器网络、信息安全与可生存技术等。

李菲 (1987-), 女, 山东泰安人, 江苏大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络可生存技术。

秦颖 (1987-), 女, 山西大同人, 中国科学院硕士生, 主要研究方向为信息网络规划研究和应用系统设计。