

基于移动节点的无线传感器网络 覆盖优化研究

邓亚平, 吴川平

(重庆邮电大学 计算机科学与技术学院, 重庆 400065)

摘要: 针对无线传感器网络中因节点的任意部署导致出现覆盖空洞的问题, 采用了移动节点进行修复的思想, 提出了一种基于向量代数的分布式方法来确定节点的移动方向和通过感知半径来确定节点的移动距离的节点移动方案。仿真实验结果表明, 该策略提高了网络的覆盖率, 减少了所需移动节点的个数和移动节点的能量消耗。

关键词: 覆盖空洞; 向量代数; 移动节点; 无线传感器网络

中图分类号: TP393.07

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)08-3137-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.088

Research on coverage optimization of wireless sensor networks based on mobile sensors

DENG Ya-ping, WU Chuan-ping

(College of Computer Science & Technology, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: There are coverage holes in wireless sensor networks because of random nodes deployment. This paper presented a distributed hole-patching method to repair coverage holes by using mobile nodes. It used the vector algebra to decide the direction of the mobile node, and used the sensing radius to decide the distance of the mobile node. The simulation results verify that the proposed solution outperforms others of the coverage rate, the number of the mobile nodes and the residual energy of the mobile nodes.

Key words: coverage holes; vector algebra; mobile nodes; wireless sensor networks

0 引言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)是由部署在监测区域内的大量微型传感器节点组成的,通过无线通信的方式构成一个多跳的自组织网络体系^[1]。每个传感器节点具备信号采集、数据处理、互相通信的功能,并直接嵌入到相应的设备或环境中,具备了很大的移动性和灵活性。无线传感器网络在工业、农业、交通、军事、安全、医疗、空间探测以及家庭和办公环境等方面具有很大的应用价值。尤其是在无人监测或在人类无法到达的恶劣环境中对事件的监测和跟踪方面显示出了巨大的优势,具备巨大的商业价值^[2]。

覆盖质量是无线传感器网络服务质量的重要度量指标。为了延长网络的生命周期,传感器网络选择部分节点处于活跃工作状态,而将其他节点转入休眠状态。当网络中某些节点因长期处于工作状态而能量耗尽或恶劣的目标区域环境破坏而失败,导致网络原有的覆盖区域缺失或者数据无法被发送到基站,这种现象称为覆盖空洞(coverage holes)^[3]。覆盖空洞的出现使得网络不能采集到完整有用的数据,甚至不能将数据进一步发送给基站,此时传感器网络的服务质量急速下降,不能完成对环境的有效监测。为了保证传感器网络的感知、通信等服务质量,必须激活网络中的部分节点来代替死亡的节点完成网

络的监测工作。

1 相关工作

针对无线传感器网络出现的覆盖空洞问题,一般有两种解决方案:a)移动一些节点到死亡节点处;b)启用死亡节点附近的冗余节点。文献[4]提出了三种不同的算法计算死亡节点的位置,采用将移动的传感器节点移动到死亡节点来修复覆盖空洞,在一定的时间内可以提高网络的覆盖率,但是移动传感器节点所需的能量大,易造成节点死亡。文献[5]提出了覆盖空洞修复算法,其思想是沿任意两个相邻空洞边界节点的连线组成的中垂线选取一点,同时这一点到两个节点的距离为节点的通信半径,然后移动节点到该点处来修复覆盖空洞,但这种算法的时间效率很低。文献[6]提出了一种基于移动节点的空洞修复策略,其思想是采用基于能量的虚拟力来移动传感器节点,选择移动节点的同时考虑节点的剩余能量,但该算法只考虑了节点之间的作用力而没有考虑边界和障碍物对节点的作用力,同时节点的感知半径随与基站的距离不同而不同,导致拓扑控制难度增加。

本文针对掺入移动节点的混合网络,采用向量代数方法来确定移动节点的移动方向,同时通过节点的感知半径来确定移动节点的移动距离。该策略有效地提高了网络的覆盖率,最后

收稿日期: 2011-12-11; 修回日期: 2012-01-13

作者简介: 邓亚平(1948-),男,重庆人,教授,硕士,主要研究方向为计算机网络与通信、网络信息安全;吴川平(1986-),男,四川巴中人,硕士,主要研究方向为计算机网络与通信(wcpstone@126.com)。

通过仿真实验给出了性能分析与比较。

2 修复策略

无线传感器网络是由节点的随机部署自组织形成的,覆盖空洞的产生不可避免。如果忽略了覆盖空洞的存在,则会造成大量的数据丢失、网络生存时间缩短和大量冗余节点的浪费。本文提出的策略是利用冗余移动节点来修复覆盖空洞。

2.1 网络模型

传感器网络中存在静态节点和移动节点两类节点。其中静态的节点同构,各个节点具有相同的计算、通信和初始能量水平,节点能量不能再补充。存在若干的移动节点可供调配使用,其与静态节点具有相同的计算、通信和初始能量水平。节点采用布尔感知模型,节点的通信半径(R_c)为感知半径(R_s)的两倍,每个节点具有唯一的 ID 用来标志节点,网络中同一点处不同时存在两个节点,本文采用了文献[7]的覆盖空洞检测方法。

如图 1 所示,节点 1 与覆盖空洞有两个兴趣点 M 和 N ,即所谓的 boundary gap point。同理,节点 2、4、5、6 和 7 均存在这样的点,则通过这些兴趣点围成的多边形近似于覆盖空洞。设覆盖空洞周围有 n 个节点, A_i 表示节点 i 感知范围的大小, A_h 表示覆盖空洞的面积大小,则由失败节点 i 产生的覆盖空洞 A_h 可以近似表示为

$$A_h = A_i - (A_i \cap A_0 + A_i \cap A_1 + \cdots + A_i \cap A_n) = A_i - \sum_{j=0}^n A_i \cap A_j \quad (1)$$

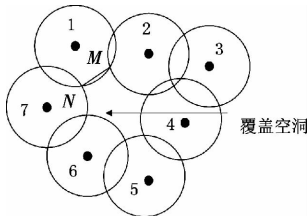


图1 覆盖空洞示例

2.2 移动策略

覆盖空洞的确定是修复空洞的基础。覆盖空洞确定后,本文采用将移动节点移动到覆盖空洞中进行修复的策略,首先确定移动节点的移动方向。

算法 1 移动节点的移动方向计算方法。

a) 选择一个源节点标记为 S , 此源节点同时满足为冗余节点和移动节点两个条件。

b) 选择源节点 S 与覆盖空洞所形成的兴趣点, 如图 2 中的 P_a 和 P_b 所示, 其中 S, P_a 和 P_b 坐标分别为 (x, y) 、 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 。

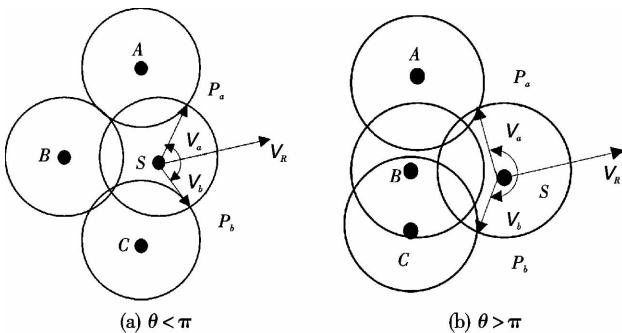


图2 节点移动方向判断示例

c) 构造向量 $V_a = (x_1 - x)i + (y_1 - y)j$ 和向量 $V_b = (x_2 - x)$

$i + (y_2 - y)j$;

d) 构造向量 $V_R = V_a + V_b$ 。

通过上面的四步就可以确定所选的源节点 S 移动的方向。在构造向量 V_R 的过程中会出现两种情况。如图 2 所示, 假设向量 V_a 和 V_b 的夹角为 θ , 那么 θ 存在两种可能: $\theta < \pi$ 和 $\theta > \pi$ 。当 $\theta < \pi$ 时, 节点移动的方向为正确的方向; 当 $\theta > \pi$, 节点移动的方向为向量 V_R 的反方向。

节点的移动方向确定后, 本文采用通过节点移动后的位置与先前邻居节点的距离来确定节点的移动长度。移动到最优位置需要考虑两个方面的因素: a) 要保证节点移动后不会出现新的覆盖空洞; b) 节点要尽量覆盖更多的空洞, 同时减少与邻居节点的重叠区域。如图 3 所示, 假设源节点 S 从先前的位置点 M 移动到最优位置点 N 处, 移动的长度为 d 。依次计算出节点移动后与每个邻居节点的距离, 选出长度最短和最长的节点与点 N 来构成一个三角形, 如图 4 中的 $\triangle BNC$ 和 $\triangle BNA$, 其中最远点 B 与最近点 C 形成的 $\triangle BNC$ 即为选取的三角形。定理 1 证明了在移动方向上存在最优位置点 N , 使网络覆盖率至少达到 90% [8]。

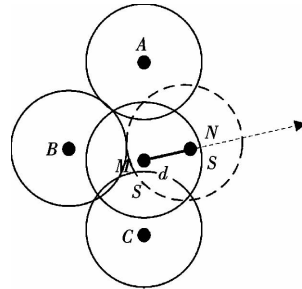


图3 节点移动距离形成图

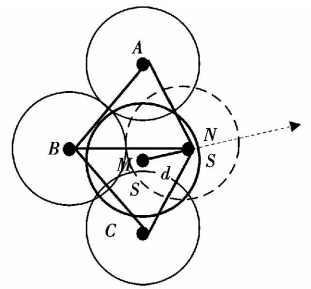


图4 最优位置与邻居节点构成的三角形

定理 1 若 $\triangle BNC$ 三个顶点之间可以两两互相通信, 则该三角形内感知覆盖面积 A 满足

$$A \geq \frac{\pi}{2\sqrt{3}} S_{\triangle BNC} \quad (2)$$

此时 $\triangle BNC$ 的覆盖率不低于 90%。

证明 如图 5 所示, 节点 A 与 C 的通信半径 R_c 为感知半径 R_s 的 2 倍, 显然只要 A 在 C 的通信半径内, 则线段 AC 上所有的点都能被 A 或 C 所感知, 假设 $\triangle ABC$ 的三个顶点都能直接通信, 则三边的边长均小于或等于感知半径 R_s 。不失一般性, 设三角形的某一个顶点 C 的顶角为 $\angle C$, 与 $\angle C$ 相邻的两条边记为 a 和 b , 对边为 c , 那么三角形的面积 $S_{\triangle ABC} = (ab \times \sin(\angle C))/2$ 。由图 5 可知, $a = b = R_s$, 传感器节点 C 所覆盖的三角形内的面积可以表示为 $(R_s^2 \times \sin \angle C)/2$ 。节点 C 与节点 A 和 B 的共同覆盖的面积分别记为 S_{CA} 和 S_{CB} , 则节点 C 所覆盖的面积可以表示为

$$S_C = (\angle C \times R_s^2)/2 - \frac{S_{CA}}{2} - \frac{S_{CB}}{2} \quad (3)$$

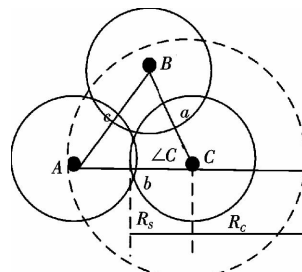


图5 感知半径 R_s 与通信半径 R_c

同理可得节点 A 和 B 的覆盖面积 S_A 和 S_B , 由此可得出 $\triangle ABC$ 的覆盖率为

$$p = \frac{S_A + S_B + S_C}{S_{\triangle ABC}} \quad (4)$$

根据 $a, b, c \leq R_c$, 三角形的内角和为 π 及三角形边与角的约束关系可得, 当 $a = b = c = R_c$, 即为等边三角形时, $S_{\triangle ABC}$ 取得最大值, 同时 S_A, S_B 和 S_C 为最小, 这时 p 取得最小值。其中 S_{CA} 和 S_{CB} 的值为

$$S_{CA} = S_{CB} = 2 \left[\frac{\angle C \times R_s^2}{2} - \frac{1}{2} \times \frac{a}{2} \times 2 \times \sqrt{R_s^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} \right] \quad (5)$$

可得 p 的表达式如式(6)所示。从而可得 p 的最小值为 $\frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0.906$ 。证明完毕。

$$p \geq \frac{\frac{1}{2} \pi R_s^2}{\frac{1}{2} R_c^2 \sin \frac{\pi}{3}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \quad (6)$$

从定理1可知, 三角形内的覆盖率约为三角形面积的90%, 这样保证了冗余节点移动后既不会出现较大的覆盖冗余又修复了较大的覆盖空洞。假设节点的移动距离为 d , 向量 V_R 和 V_{MC} 的夹角为 θ_1 , 由定理1可知当 $NC = R_c$ 时, 覆盖率取得最大值, 点 C 的坐标记为 (x_3, y_3) , 点 M 和点 C 的距离 $d_1 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2}$ 。

算法2 移动节点的移动距离计算方法。

a) 计算向量 $V_{MC} = (x_3 - x)i + (y_3 - y)j$ 。

b) 计算出夹角 θ_1 的大小, $\cos(\theta_1) = \frac{V_R \cdot V_{MC}}{|V_R| \times |V_{MC}|}$, 其中向量 V_R 和 V_{MC} 已经求出。

c) 如图6所示, 根据三角形已知两边和其夹角求对边的公式可得, $|MC| = d_1$, $|MN|$ 即是移动的距离 d , $NC = R_c$, 则移动距离 d 为

$$d = d_1 \times \cos(\theta_1) + \sqrt{R_c^2 - d_1^2 + (d_1 \times \cos(\theta_1))^2} \quad (7)$$

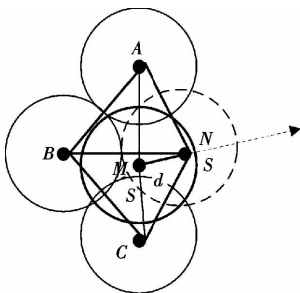


图6 移动距离计算

通过算法1和算法2即可得出第一轮边缘节点 S 的移动方向 V_R 和移动距离 d 。待节点移动到指定位置后, 更新覆盖空洞的边缘信息, 寻找新一轮的边缘节点 S ; 重新初始化算法1和算法2, 执行下一轮覆盖空洞的修复工作。当找不到合适的源节点或覆盖空洞已被修复时, 结束覆盖空洞的修复工作。

3 仿真实验与性能分析

对文中提出的覆盖空洞修复策略进行了仿真实验, 根据文献[9]提出的理论: 无线传感器网络的覆盖率为100%是不可能的, 当覆盖率大于等于70%时, 网络才是有效的。仿真平台采用 NS-2.27, 传感器区域大小为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$, 静止节点50个, 移动节点50个, 节点感知半径为5 m, 通信半径为10 m, 移动节点的初始能量为50 J。

混合网络中通常是以静态网络为基础网络, 再部署一定量的移动节点作为辅助^[10]。在检测到覆盖空洞时, 让移动节点去修复空洞所在的区域, 这样就可以实现节点代价与覆盖率之间的平衡, 此方法比重新播撒二代节点的方法更好, 并且有些应用领域还不能定向地布撒节点, 因此, 该方法更加具备适用性。为了达到95%以上的覆盖率, 至少每个网格中应存在一个节点。图7(a)表示修复前的网络覆盖情况, 可知此时的覆盖率为65%, 小于70%, 因此网络不能有效地提供服务; 图7(b)表示经过节点移动到覆盖空洞处后网络的覆盖情况, 覆盖空洞得到了明显的修复, 覆盖率达到96%。

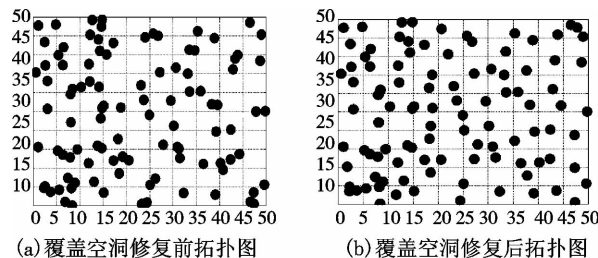


图7 覆盖空洞修复效果对比

文中提出的节点移动策略比文献[6]中提出的 EVFA 算法能更快地实现覆盖空洞的修复, 缩短了网络覆盖空洞的修复时间, 当仿真轮数超过10轮时, 如图8所示, 本文算法使得网络覆盖率达到96%, 而采用 EVFA 算法的网络覆盖率为94%, 实验数据验证了在相同的时间内本文算法具有更高的空洞修复率。

如图9所示, 本文提出的节点移动策略比文献[6]中提出的 EVFA 算法使用了更少的移动节点来实现覆盖空洞的修复工作, 减少了节点因移动带来的能量损耗, 让更多的节点处于休眠状态, 提高了整个网络的能量水平, 有利于网络下一步的工作, 同时延长了整个网络的生命周期。

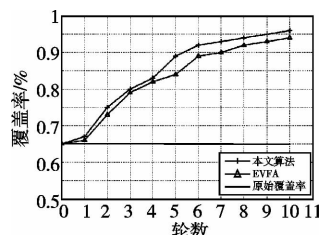


图8 网络覆盖率

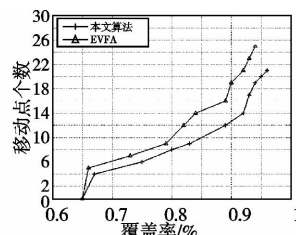


图9 移动节点个数

本文节点移动策略的能量分析与文献[6]中提出的 EVFA 方法相比较如图10所示。可以看出, 本文的策略使得节点移动后剩余的能量更多, 从而减少了节点因移动带来的能量损耗, 提高了整个网络的能量水平, 使得网络具有更高的可靠性和服务质量。

图11针对不同的网络覆盖率, 计算修复它所需的移动节点的数目 N 。当覆盖空洞的面积不断减少时, 移动节点数目呈线性减少; 同理可得, 随着覆盖空洞面积的增加, 所需移动节点的个数也会呈线性增加。这表明算法具有较好的稳定性, 有利于网络的扩展。

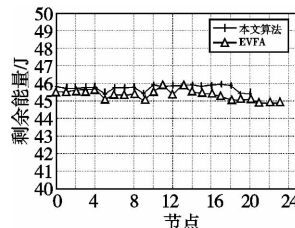


图10 节点剩余能量

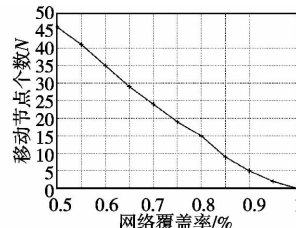


图11 网络覆盖率与移动节点个数的关系

$$B_2 = [0.3157 \quad 0.3847 \quad 0.2416 \quad 0.0581 \quad 0]$$

$$B_3 = [0.2554 \quad 0.3681 \quad 0.2824 \quad 0.0941 \quad 0]$$

$$B_4 = [0.2435 \quad 0.3081 \quad 0.3363 \quad 0.1121 \quad 0]$$

$$B_5 = [0.3256 \quad 0.3628 \quad 0.2457 \quad 0.0659 \quad 0]$$

$$B_6 = [0.2100 \quad 0.6700 \quad 0.1200 \quad 0 \quad 0]$$

由此得到一级模糊关系矩阵 $R = [B_1 B_2 B_3 B_4 B_5 B_6]^T$, 则评价结果矩阵

$$B = W \circ R = [0.2781 \quad 0.4047 \quad 0.2483 \quad 0.0689 \quad 0]$$

按照最大隶属原则, 上述结果表明 QChat 业务质量为好。按照模糊分布原则, 综合评价结果 B 直观地表示了各评价等级的百分比, 反映了评价对象在不同等级上的评价情况。

6 结束语

本文简要介绍了 QChat 业务, 构建了一套用户感知体系下的 QChat 业务质量评价指标体系, 介绍了 AHP 作为获取权重方法的模糊综合评价模型, 将该模糊综合评价方法应用于用户感知体系下的 QChat 业务质量评价, 给出了一套完整的 QoS 业务评价实例, 目前该评价方法已在开展 QChat 业务的多个地区得到应用。随着 3G 以及 LTE 的商用, 今后将有更多的要求有 QoS 保证的分组域业务推向市场, 如何进一步完善现有的指标体系, 掌握 QoS 业务对现有业务的影响, 对分析业务问题、提高网络质量有着重要意义。

参考文献:

- [1] 刘辉. 美国 Nextel 公司 iDEN 网络运营模式研究[J]. 电信技术, 2005(8): 7-10.
- [2] 逢丹. 一键通重生[N]. 通信产业报, 2009-05-18(B08).
- [3] 黄玲, 李洪. QChat 在 CDMA 网络中的应用[J]. 电信技术, 2009(8): 91-93.
- [4] QUALCOMM Inc. QChat 3.2 Guidelines for 3G 1x EV-DO infrastructure vendors[S]. 2008.
- [5] 张高记, 范九伦. QChat 平台性能指标研究[J]. 西安邮电学院学报, 2011, 16(3): 101-104.
- [6] 常静, 陈利兵, 张国洪. TD-SCDMA 网络用户感知评估体系的实施[J]. 电信工程技术与标准化, 2011, 24(3): 38-41.
- [7] 庄锁法. 基于层次分析法的综合评价模型[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2000, 23(4): 582-590.
- [8] 魏倩. 基于模糊层次分析法的网络信息安全评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 27.
- [9] 上海贝尔阿尔卡特. Qchat 高性能一键通业务[J]. 通信世界, 2008(41): 17.
- [10] 裴宏江, 孟家香. 浅谈基于 CDMA2000 网络的数字集群技术及其应用[J]. 科技情报开发与经济, 2011, 21(1): 129-131.
- [11] 朱红梅. 基于 CDMA2000 1x EV-DO Rev. A 的手机对讲业务 Qchat 的探讨[J]. 移动通信, 2010, 34(21): 53-56.
- [12] 位莅, 吕雪峰, 王治国. TD-SCDMA 客户感知评估体系研究[J]. 移动通信, 2011, 35(3): 58-65.
- [13] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990: 20-21.
- [14] 刘丽华. AHP 法在移动通信企业用户信用管理中的应用[J]. 西安邮电学院学报, 2007, 12(2): 13-15, 21.
- [15] 叶珍. 基于 AHP 的模糊综合评价方法研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 7-11.
- [16] 许树柏. 实用决策方法: 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988: 16-17.
- [17] LOI S L. Quadratic approximation and its application to acceleration of convergence[D]. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, 1992: 132-188.
- [18] 胡淑礼. 模糊数学及其应用[M]. 成都: 四川大学出版社, 1994: 156.
- [19] 钱颂迪, 胡运权, 李维铮, 等. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 25-27.

(上接第 3139 页)

4 结束语

无线传感器网络中时常出现覆盖空洞的现象, 覆盖空洞不仅会造成传感器不能有效地采集到监控区域中完整的信息, 还会造成数据传输和相关网络服务故障等问题。本文提出一种基于移动节点的覆盖空洞修复策略, 并从理论和实验上证明了此方法的优越性, 利用移动节点来修复空洞可以节省成本, 同时改善了网络的服务质量。后期工作为研究在三维场景中无线传感器网络覆盖空洞修复策略。

参考文献:

- [1] 王伟, 林峰, 周激流. 无线传感器网络覆盖问题的研究进展[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(1): 32-35.
- [2] HILL J L. System architecture for wireless sensor networks[D]. Berkeley: University of California, 2003: 11-17.
- [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]. 传感器技术学报, 2010, 23(2): 256-258.
- [4] WANG Gui-ling, CAO Gou-hong, LA PORTA T F. Movement-assisted sensor deployment[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2006, 5(6): 640-652.
- [5] YAO Ji-xing, ZHANG Gu-yu, KANNO J, et al. Decentralized detection and patching of coverage holes in wireless sensor networks[C]//Proc of International Conference on Intelligent Sensing, Situation Management, Impact Assessment, and Cyber-sensing. 2009: 202-223.
- [6] YOO Y, AGRAWAL D P. Mobile sensor relocation to prolong the lifetime of wireless sensor networks[C]//Proc of IEEE Vehicular Technology Conference. 2008: 193-197.
- [7] YAN Feng, MARTINS P, DECREUSEFOND L. Connectivity-based distributed coverage hole detection in wireless sensor networks[C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. 2011: 102-108.
- [8] 王良民, 李菲, 秦颖. 基于移动节点的无线传感器网络覆盖空洞修复方法[J]. 通信学报, 2011, 32(4): 1-8.
- [9] PATIKH S, VOKKARANE V, XING Liu-dong, et al. Node-replacement policies to maintain threshold-coverage in wireless sensor networks[C]//Proc of the 16th International Conference on Computer Communications and Networks. 2007: 760-765.
- [10] MEI Yong-guo, XIAN Chang-jiu, DAS S, et al. Repairing sensor network using mobile robots[J]. Computer Communication, 2007, 30(13): 2615-2626.