

一种混合异构传感网的覆盖洞修补算法

刘 军, 程良伦, 王建华, 王 涛

(广东工业大学 自动化学院, 广州 510006)

摘 要: 传感网感知节点部署的随机性以及节点能耗殆尽、损坏退出等问题使网络中存在覆盖洞, 利用移动节点来修补覆盖空洞是当前较为可行的方法. 假定网络在静态节点和移动节点处混合, 并且在节点感知半径异构的情况下, 研究如何通过移动节点重定位来修复感知覆盖洞, 同时兼顾移动距离或能耗最小以及修复后的感知覆盖率最大化来优化感知覆盖性能. 针对移动节点覆盖洞修补规划的NP-hard问题, 结合遗传算法, 提出一种覆盖洞修补算法来求解最优解. 仿真实验结果表明, 所提出的算法相比于同类算法能够更有效地修补漏洞并兼顾节点能耗以及感知覆盖率.

关键词: 传感器网络; 覆盖洞; 异构节点; 漏洞修补; 遗传算法

中图分类号: TP393.04

文献标志码: A

A coverage hole repair algorithm for hybrid heterogeneous sensor networks

LIU Jun, CHENG Liang-lun, WANG Jian-hua, WANG Tao

(Institute of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China. Correspondent: LIU Jun, E-mail: liujun7700@163.com)

Abstract: Coverage holes exist in the sense network due to random deployment of sensor nodes, node energy exhausted and damage, etc.. The method based on mobile nodes is feasible. It is assumed that sense nodes are heterogeneous with different sense radius and hybrid with static and mobile nodes. The main problem in this paper is how to schedule mobile sensor nodes in the proper position for repaired coverage holes while taking the minimum moved distance and the maximum coverage into account. It is a NP-hard problem that arranged mobile nodes repair coverage holes. Then a coverage hole repaired algorithm is present based on the genetic algorithm for optimal solutions. The simulation results show that the proposed algorithm can not only save more energy, but also obtain higher coverage compared with other similar algorithms.

Keywords: sensor network; coverage hole; heterogeneous nodes; hole repaired; genetic algorithm

0 引 言

网络覆盖是WSN的服务质量中一项重要内容, 它能反映传感网对物理空间的观察能力^[1]. 现实中, 感知节点可能由于高温、恶意攻击、恶劣环境、过度使用和能量缺失等多种原因而失效^[2]. 当网络中出现覆盖洞时, 网络无法有效观察目标区域中物理空间, 此时需要进行覆盖洞修补. 依据覆盖洞修补针对的对象不同分为静态、移动和混合网络3类. 其中混合传感器网络以静态感知节点为基础, 添加一定比例的移动节点作为辅助^[3]. 当静态网络中出现覆盖洞后, 通过移动节点去修补, 可以实现节点代价与覆盖率之间的平衡^[4]. 面向混合传感器网络覆盖修复也是大多学

者研究的共识^[5-14].

本文研究高效感知洞覆盖修补方法, 通过合理优化调度移动节点对覆盖洞进行修补, 并提出一种覆盖洞修补算法. 首先, 将移动感知节点与覆盖洞中目标位置的匹配问题转换为一个NP难的二分匹配问题; 然后, 将该问题构建为带约束的目标优化问题, 结合智能算法进行求解.

1 相关工作

关于覆盖洞修复问题, 许多学者已经进行了研究. 混合传感网中, 覆盖洞修补通过移动节点重新定位来实现, 如等级算法^[5]和三角形贴片修补算法^[6]

收稿日期: 2014-07-21; 修回日期: 2015-02-12.

基金项目: 国家自然科学基金广东联合基金重点项目(U1201251); 广东省自然科学基金博士启动项目(S2012040006666); 广州市科技计划项目(12C42111582); 广东省高校优秀青年创新人才培养计划项目(LYM11057).

作者简介: 刘军(1986—), 男, 博士生, 从事无线传感器网络、物联网的研究; 程良伦(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 从事无线传感器、物联网、信息物理融合系统的研究.

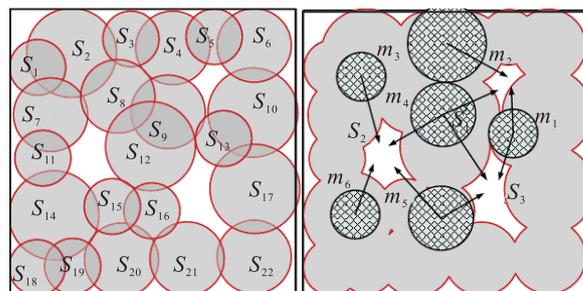
等. 文献 [6] 提出了一种三角形逐个贴片修补方法 (PATT), 该方法基于三角网络模型理论和覆盖洞边界节点寻找到最优修补位置, 然后移动节点去覆盖, 最终实现最低覆盖率大于 90%; 文献 [7] 提出了一种不需要地理信息的基于三角形网格 (ATN) 的空洞探测算法和空洞修复 (TNR) 算法; 文献 [8] 以覆盖洞边界节点的感知覆盖弧为边界, 提出了一种分布式空洞修复算法, 并给出了修复原则; 文献 [9] 基于节点精确位置信息, 通过节点重定位进行均匀分布优化覆盖; 文献 [10-11] 都是基于 Voronoi 图优化覆盖, 文献 [11] 中的节点以分布式向自身 Voronoi 最远边移动, 从而优化节点分布, 该算法需要节点全部具有移动能力, 且不够精确; 文献 [12] 针对全移动异构感知节点随机分布覆盖效率不高的问题, 结合遗传算法求解最优分布组合排列; 文献 [13] 针对全移动节点提出了一种轻量级的分布式洞检测与处理 (HEAL) 方法, 首先通过加百利图识别覆盖洞, 然后基于虚拟力进行愈合; 文献 [14] 通过移动节点之间的级联运动对远处的覆盖洞进行修复, 算法整体移动距离有增加, 但平衡了各节点的能耗; 文献 [15] 提出了一种异构传感器网络的覆盖洞愈合的自适应近似算法.

以上方法大多是针对具有相同感知半径和通信半径的节点分布的覆盖洞修补. 本文针对覆盖洞修复愈合问题进行研究, 假定感知覆盖洞都被识别. 针对覆盖洞的识别方法已经有许多^[16-17]. 文献 [16] 针对传感器网络覆盖问题提出了覆盖洞识别, 通过网络拓扑结构和计算几何方法来识别感知洞; 文献 [17] 基于 GlobeCom 针对网络连通性, 提出了网络覆盖洞的识别方法. 基于以上研究, 针对异构感知节点覆盖场景, 本文提出一种基于遗传算法的覆盖洞修补算法.

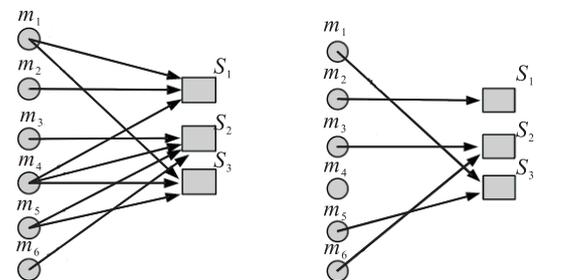
2 问题模型

假定静态与动态节点混杂, 网络在初始化部署后, 整个网络能够连通, 每个节点通过与周围邻居节点交换信息得知自身位置以及网络周围节点位置, 以构造拓扑图. 利用覆盖洞识别算法^[18-19]识别出覆盖洞后, 洞边界节点向周围广播信息, 识别出周围一定范围内的移动节点, 标识为 S_i^n , 表明这些移动节点可以移动到该覆盖洞范围内以实现对该覆盖洞的修补. 对于 22 个异构节点随机部署, 如图 1(a) 所示.

通过调度周围移动节点来实现对于覆盖洞的修补过程需要考虑保证覆盖洞的最大修补效率以及节点能耗之间的平衡. 此问题归咎为覆盖洞的最大覆盖最小能耗修补 (CHRMEMC) 问题, 即理想情况下, 通过方法调度周围的移动节点来修补覆盖洞, 以实现最大化覆盖和最小化能耗.



(a) 22 节点随机分布图 (b) 移动节点与覆盖洞分布图



(c) 移动节点与覆盖洞匹配结果 (d) 移动节点与覆盖洞匹配最优结果

图 1 移动节点漏洞修复二分匹配示意图

由于存在某一移动节点既属于漏洞 n , 也属于漏洞 m_1, m_2, \dots , 同时包含多个漏洞的潜在修复节点身份. 如图 1 所示, 存在 3 个大小不一的覆盖洞, 另外有 5 个感知半径异构的移动节点随机分布于目标区域, 对覆盖洞进行修补. 多个移动节点与多个漏洞匹配以及在匹配过程中如何考虑最大覆盖以及最小移动距离的约束问题, 是本文要研究的核心关键问题, 这可以转化为一个带约束的二分匹配问题.

本文的问题可归结为: 假定目标区域存在 n 个覆盖洞, m 个移动节点, 第 i 个覆盖洞的有效移动节点集合 M_i . m 个移动节点如何分配使得覆盖效率和能耗整体效能最大化. 该问题可退化为二分匹配问题, 而二分匹配问题是已经证明过的 NP 难问题. 对于 NP 难问题, 难以在多项式时间内寻找到最优解, 因此本文考虑采用进化算法来寻找次优解.

3 基于遗传算法的漏洞修补方法

进化算法是解决组合优化问题的有效工具, 本文提出采用遗传算法来求解覆盖洞修补的最佳方案, 即基于遗传算法的覆盖洞修复方法 (GACHR). N 为种群数量, 构成 $N/2$ 对的随机组合, 然后通过交叉变异, 生成 $N/2$ 个的后代. 在实验中, 种群数量设为 50, 即 $N = 50$, 算法最大迭代数为 1 000.

3.1 覆盖洞修补的候选位集编码机制

假定区域中存在覆盖洞 h 共 N 个, 则对应种群中的个体由 N 个基因组成, 每个基因对应覆盖洞的移动节点选择组合. 由于每个覆盖洞的周围移动节点选择存在不确定性, 且每个覆盖洞周围移动节点组合不同, 每个基因的信息表示为其该覆盖洞的一种修复方

案,即一组移动节点组合编号,用一个长度为 N 的位串 $(h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_N)$ 来表示, h_i 对应一个覆盖洞的移动节点组合. 第 i 个基因表示为

$$G_i = \{S_1^1, S_2^1, \dots, S_{n_1}^1; S_1^2, S_2^2, \dots, S_{n_2}^2; \dots; S_1^i, S_2^i, \dots, S_{n_i}^i; \dots; S_1^n, S_2^n, \dots, S_{n_n}^n\},$$

上标为覆盖洞编号,下标为对应覆盖洞的修补方案中移动节点的编号. 因此,图 1 中的 3 个覆盖洞的最优方案为 $G_i = \{m_4; m_3, m_6; m_1, m_5\}$, 如图 2 所示.

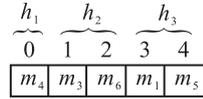


图 2 3 个覆盖洞移动节点修复编码组合

该编码法省去了编码/解码操作,简化了遗传算法,且有较好的空间有效性、完整性、非冗余性、公正性、位置性和继承性.

3.2 遗传算子

本文算法主要采用选择、交叉和变异 3 个基本遗传算子.

3.2.1 选择

选择算子结合精英选择算法和轮盘赌法来选择下一代父体. 首先,选择最优个体直接保留到下一代,剩下的通过一种随机采样式方法进行选择操作. 基本思想是个体被选中的概率与其适应度大小成正比. 设群体数量为 N , 令个体 i 的适应度为 F_i , 则个体 i 被选中的概率 P_i 为

$$P_i = F_i / \sum_{i=1}^N F_i. \quad (1)$$

3.2.2 交叉

交叉算子时需要考虑不同基因中移动节点的约束,如通过基因交叉,造成某移动节点包含多次,这样所产生的新染色体不能构成有效解,导致降低搜索能力. 选取交叉概率 $P_c = 0.6$. 一对父个体表示为 S_a 和 S_b , 交叉后的子个体为 S_c . 具体方法是将父体中共有的洞修补方案遗传给子个体 S_c . 由适应度函数和选择算子可知,适应度越高,即修补方案越好的个体被选中作为父个体的概率越大,父体中共有的修补方案越有可能代表个体的“好”性状. 对于其他洞的非共有方案如何构造成一个联合修补方案,需要合适选择将其构造成一个合法的修补方案. 下面给出算法伪码. 本交叉算子具有单亲交叉算子的优点,可保留最大化形状,提高收敛速度.

算法 1 交叉算法.

输入: 父代染色体 T_a, T_b ;

输出: 子代染色体 T_c .

Begin:

$T_c \leftarrow \text{null}$

$T_c \leftarrow (T_a \cup T_b)$ (将 T_a 和 T_b 公共基因遗传给 T_c)

while (T_c 中存在多余洞方案) **do**

 令方案不同的洞集合为 T_s ;

for ($\forall i \in S$)

if $T_{S_i} > T_{S_j}$

$T_c \leftarrow T_{S_i}$;

else

$T_c \leftarrow T_{S_j}$;

 输出 T_c

End

在交叉时考虑修补方案的优劣,对于不同子洞集合的修补方案,同时考虑移动距离和覆盖效果的因素,以保证能耗最小和覆盖最大化的目标.

3.2.3 变异

假定突变率 p_m 固定在 $0.1/n$, 其中 n 为覆盖洞总数.

算法 2 变异算法.

输入: 染色体 T_c ;

输出: 染色体 T'_c .

Begin:

 依据变异率 p_m , 在 T_c 中随机选取一组基因 (覆盖洞) M ;

for ($\forall h \in M$)

while (h 中存在多余洞覆盖方案集合 Γ') **do**

 在 Γ' 中随机选取一修补方案 h' ;

$h \leftarrow h'$;

 删除其他基因段中与该修补方案中的重复节点;

 输出 T'_c

End

3.3 适应度函数

本文求解的优化修补方案需要考虑移动能耗和覆盖率. 因此,在满足移动距离约束下,移动距离越小,修补后整体的洞越小,修补方案适应度值越高. 适应度函数可定义为

$$f(G) = \alpha \sum_{i=0}^n L_i + \beta (C_b - C_a). \quad (2)$$

其中: L_i 为第 i 移动节点在本方案中所移动的距离; C_a 为修补后的覆盖洞; C_b 为修补前的覆盖洞; α, β 分别为关于能耗和覆盖的权重.

采用蒙特卡洛方法估计整个区域覆盖效率,通过在区域中重复地随机抽样来近似估计整个区域覆盖效率. 因此有

$$\text{area}(X) = \iint_A I_X(x, y) dx dy = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\text{area}(A)}{L} \sum_{l=1}^L I_X(\tilde{x}_l, \tilde{y}_l), \quad (3)$$

其中 $I_X(\cdot)$ 在区域 A 指示函数定义如下：

$$I_X(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } (x, y) \in X; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

这里，若随机采样的数量 L 增加，则结果会更加精确，然而更多的采样将导致计算量的增大和计算成本的增加，因此采用 100 000 次随机采样。

4 性能评估

4.1 仿真环境

在 Matlab 7.1 环境下评估算法的性能。在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的区域中随机部署若干的静态节点，漏洞识别后由随机部署的移动节点去修补。分别设定不同的静态与移动节点比例场景下的比例，异构感知节点每个实验中有 3 类不同的半径节点，其比例分别为 0.8。通信半径为感知半径的两倍，传感器节点能够自定位。移动节点的最大移动距离为 40 m。假定按照约束条件随机生成 50 组初始解，解数量不够的按最大组合数计算。算法最大迭代次数为 1 000。其中移动节点部署数量组合，其静态节点、动态节点以及混合节点的数量比例如表 1 所示。

表 1 不同测试场景节点数量分布组合

Instance	r_1	n_1	m_1	r_2	n_2	m_2	r_3	n_3	m_3	n	α
T1-S1-0.7	14.00	5	2	11.20	5	2	8.96	7	2	17	0.68
T1-S2-0.7	12.00	6	3	9.60	8	4	7.68	10	6	24	0.69
T1-S3-0.7	10.00	8	4	8.00	12	6	6.40	16	10	36	0.70
T1-S4-0.7	8.00	12	6	6.40	18	9	5.12	27	27	57	0.70
T1-S5-0.7	6.00	22	11	4.80	32	16	3.84	47	25	101	0.70
T2-S1-0.9	14.00	6	1	11.20	7	1	8.96	10	1	23	0.90
T2-S2-0.9	12.00	7	1	9.60	11	2	7.68	14	3	32	0.89
T2-S3-0.9	10.00	11	2	8.00	14	3	6.40	21	4	46	0.90
T2-S4-0.9	8.00	16	3	6.40	23	4	5.12	34	6	73	0.90
T2-S5-0.9	6.00	28	6	4.80	41	8	3.84	1	12	130	0.90

表 1 中： r_1 、 r_2 和 r_3 是 3 种类型的感知节点半径； n_1 、 n_2 和 n_3 是 3 种类型节点的数量； n 是所有感知节点数量； α 是初始部署因子，为初始静态节点覆盖面积占整个区域的比例。由表 1 可以看出，感知节点半径越小，所需要的节点数量越多。从空洞修复后节点移动距离、区域覆盖率等方面进行比较，对比算法有 TNR 修补算法^[7]和 HEAL 算法^[13]。

4.2 性能分析

取 10 次实验平均值作为实验结果。其中 S5-0.9 的 130 个节点在本文算法的实际部署效果如图 3 所示。由图 3 可以看出，移动节点通过重定位优化部署，大多数覆盖洞都已经被覆盖，且在移动节点对覆盖洞修复时考虑了覆盖洞的大小以及距离。

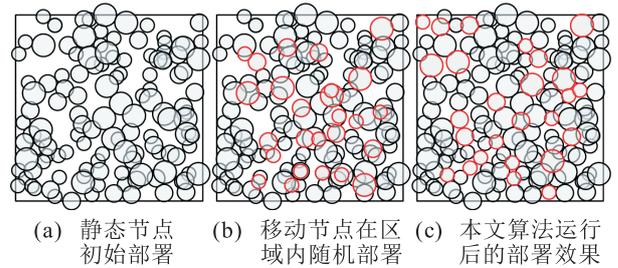
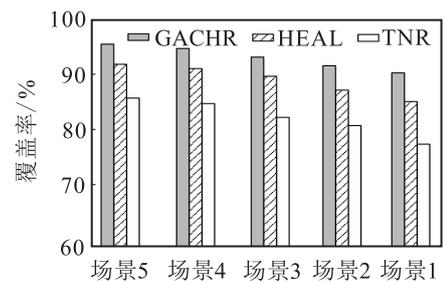
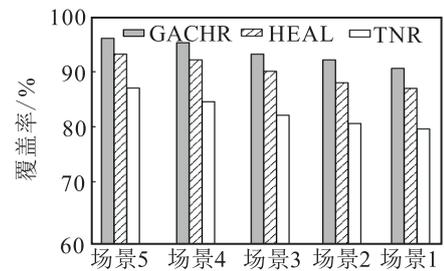


图 3 130 个节点 T2-S2-0.9 时感知节点部署示意图

由图 4 可以看出，本文算法能够达到更好的覆盖率；GACHR 算法使得覆盖率都达到了 90% 以上且优于其他两种算法；TNR 算法由于受移动节点数量限制，且节点不能随意移动，其修复后的覆盖率不如另

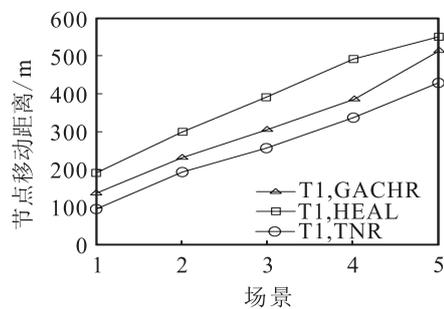


(a) 各算法在实验组 1 的覆盖率

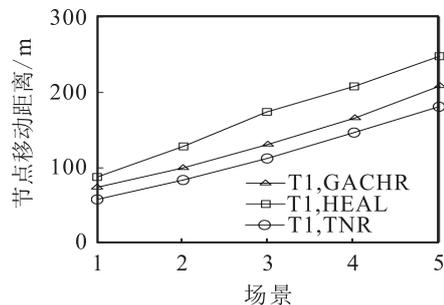


(b) 各算法在实验组 2 的覆盖率

图 4 各实验场景下覆盖率



(a) 实验组 1 的节点移动距离比较



(b) 实验组 2 的节点移动距离比较

图 5 节点移动距离比较

外两种算法的修复后效果; HEAL 算法通过虚拟力策略也能实现较好的覆盖效果. 此外, 可以看出当节点为感知半径小的组合时, 其修复后的覆盖效果优于半径大时的效果, 这得益于感知半径小. 因此, 在同样区域中节点数量越多, 移动感知节点随机分布时越均匀, 修复时的效果越好.

GACHR 算法在实验 1 中的 5 种不同场景中所有移动节点总计移动距离为 135 m、229 m、304 m、391 m 和 507 m; 在实验 2 中的 5 种场景对应的移动距离为 73 m、101 m、133 m、172 m 和 207 m. 由图 5 可见, 整体移动距离能耗可保证在较优的范围内. 本文提出的算法相比于其余两种算法能耗居于二者之间, 主要由于 TNR 算法节点移动是基于最近原则, 因此移动距离较小; HEAL 算法是基于虚拟力的分布式算法, 其运行分步实现, 移动距离大于二者.

5 结 论

本文假定在感知节点混杂异构的场景下, 研究了通过移动节点来重定位实现感知空洞的修复. 通过与同类型算法进行比较, 本文算法在感知覆盖率和节点能耗均衡方面具有一定优势. 由于本文算法是一种集中式算法, 在大规模的复杂场景应用中具有一定局限性, 下一步工作将考虑研究如何通过分布式算法进行感知洞优化覆盖.

参考文献(References)

- [1] Wang Xinbing, Han Sihui, Wu Yibo, et al. Coverage and energy consumption control in mobile heterogeneous wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2013, 58(4): 975-988.
- [2] Hossain A, Chakrabarti S, Biswas P K. Impact of sensing model on wireless sensor network coverage[J]. *Wireless Sensor Systems*, 2012, 3(2): 272-281.
- [3] Mei Y, Xian C, Das S, et al. Repairing sensor network using mobile robots[J]. *Computer Communication*, 2007, 30(13): 2615-2626.
- [4] Wang G, Cao G, Berman P, et al. Bidding protocols for deploying mobile sensors[J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2007, 6(5): 563-576.
- [5] Jian Z, Wu J. A hierarchical structure based coverage repair in wireless sensor networks[C]. *IEEE 19th Int Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Cannes*, 2008: 1-6.
- [6] 王良民, 李菲, 秦颖. 基于移动节点的无线传感器网络覆盖洞修复方法[J]. *通信学报*, 2011, 32(4): 1-8.
(Wang L M, Li F, Qin Y. Resilient method for recovering coverage holes of wireless sensor networks by using mobile nodes[J]. *J on Communications*, 2011, 32(4): 1-8.)
- [7] 刘全, 杨凯, 伏玉琛, 等. 一种三角形网格空洞修复算法[J]. *电子学报*, 2013, 41(2): 209-213.
(Liu Q, Yang K, Fu Y C, et al. An algorithm for hole recovery in wireless sensor networks based on triangle net[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(2): 209-213.)
- [8] 苏瀚, 汪芸. 传感器网络中无需地理信息的空洞填补算法[J]. *计算机学报*, 2009, 32(10): 1957-1970.
(Su H, Wang Y. A self-healing algorithm without location information in sensor networks[J]. *Chinese J of Computers*, 2009, 32(10): 1957-1970.)
- [9] Rasan K P, Jang Z T. Vector method based coverage hole recovery in wireless sensor[C]. *Proc of the Communication Systems and Networks. New York: IEEE*, 2010: 1-9.
- [10] 徐鹏飞, 陈志刚. 无线传感器网络中的分布式 Voronoi 覆盖控制算法[J]. *通信学报*, 2010, 31(8): 25-34.
(Xu P F, Chen Z G. Distributed voronoi coverage algorithm in wireless sensor networks[J]. *J on Communications*, 2010, 31(8): 25-34.)
- [11] 王瑞, 谢维信. 传感器网络高阶模糊覆盖分析[J]. *电子学报*, 2007, 35(12A): 109-112.
(Wang R, Xie W X. Analysis of higher order fuzzy coverage for sensor networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(12A): 109-112.)
- [12] Yourim Yoon, Yong-Hyuk Kim. An efficient genetic algorithm for maximum coverage deployment in wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans on Cybernetics*, 2013, 43(5): 1473-1483.
- [13] Mustapha Reda Senouci, Abdelhamid Mellouk, Khalid Assnoute. Localized movement-assisted sensor deployment algorithm for hole detection and healing[J]. *IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 25(5): 1267-1277.
- [14] Liu Xiangai, Feng Yanli, Lü Qingcong. Cascaded movement strategy for repairing coverage holes in wireless sensor networks[C]. *Int Conf on Information Technology, Computer Engineering and Management Sciences. Nanjing*, 2011, 2: 108-111.
- [15] Shen Yilin, Nguyen D T, Thai M T. Adaptive approximation algorithms for hole healing in hybrid wireless sensor networks[C]. *IEEE Proc on INFOCOM. Turin*, 2013: 1178-1186.
- [16] Ghrist R, Muhammad A. Coverage and Hole-detection in Sensor Networks via Homology[C]. *The 4th Int Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Los Angeles*, 2005: 254-260.
- [17] Feng Yan, Martins P, Decreusefond L. Connectivity-based distributed coverage hole detection in wireless sensor networks[C]. *Global Telecommunications Conf. Texas*, 2011: 1-6.