

文章编号: 2095-4980(2021)01-0145-05

## 移动 WSNs 中一种覆盖空洞的修复算法

曹 琰, 王自力

(驻马店职业技术学院 信息工程系, 河南 驻马店 463000)

**摘要:** 基于无线传感网络的应用依赖于节点对监测区域的可靠覆盖。由于能耗殆尽或故障, 节点感测能力可能失效, 形成覆盖空洞区域。为此, 提出基于模糊推理系统(FIS)的修复节点选取(FISS)算法。FISS 算法采用自适应感测半径调整策略, 利用节点的移动修复覆盖空洞。将节点的剩余能量和覆盖重叠率作为 FIS 的输入, 并由 FIS 估计节点成为修复节点的权值; 选择具有权值最高的节点作为修复节点, 同时依据修复节点的网络条件, 估算修复节点的移动方向和移动距离, 最终实现对覆盖空洞区域的修复。仿真结果表明, 提出的 FISS 算法有效提高了覆盖率, 并控制了能耗。

**关键词:** 移动无线传感网络; 覆盖空洞; 空洞修复; 感测半径; 模糊推理系统

**中图分类号:** TN711.1; TP393 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2020130

## A repair algorithm for coverage hole in mobile WSNs

CAO Yan, WANG Zili

(Department of Information Engineering, Zhumadian Career Technical College, Zhumadian Henan 463000, China)

**Abstract:** The work of Wireless Sensor Networks(WSNs) depends on reliable coverage of the area to be monitored. The problem of coverage holes arises when one or more nodes fail due to energy depletion or harsh physical environments. Therefore, Fuzzy Inference Systems(FIS)-repair node Selected(FISS) algorithm is proposed in this paper. FISS algorithm adaptively adjusts the sensing radius of node, and covers hole by moving nodes. The residual energy and coverage overlap rate of the nodes are taken as the input of FIS, and the output of FIS is to be the weight of the repair node. The node with the maximum weight is selected as the repair node. At the same time, according to the network conditions of the repair nodes, the movement direction and distance of the repair nodes are estimated. Finally, the repair of the covered void area is finally realized. Simulation results show that the proposed approach outperforms others in terms of coverage and energy consumption.

**Keywords:** mobile Wireless Sensor Networks; coverage hole; hole repair; sensing radius; Fuzzy Inference Systems

无线传感网络(WSNs)<sup>[1]</sup>是由具有感知、通信能力的节点构建的通信网络。这些节点感测环境数据, 再将数据传输至控制中心, 进而实现检测环境的目的。覆盖是节点感测环境数据的关键。为有效收集环境数据, 兴趣区域(Region of Interest, RoI)必须有节点覆盖, 即 RoI 内每一点至少在一个节点的覆盖范围内<sup>[2]</sup>。WSNs 的覆盖与部署节点的方式紧密相关。目前, 已有多个文献研究了如何部署节点, 提高覆盖率<sup>[3]</sup>。但只从部署节点方式优化覆盖性能并非最优的策略。原因在于: 即使在部署之初节点具有理想的感测能力, 但节点在工作一段时间后, 由于故障或能耗等原因, 节点无法感知环境, 仍形成覆盖空洞。相比于静态节点, 移动节点更有利于维护网络的覆盖性。节点再依据网络的覆盖性能进行移动, 可以修复覆盖空洞<sup>[4]</sup>。如, 在移动 WSNs 中, 选择部分节点进行移动, 修复覆盖空洞。如, 文献[5]利用模糊干扰系统选择修复的节点, 然后再利用这些修复节点移动, 进而修复覆盖空洞。通过节点的移动能够对覆盖空洞起到修复作用, 但只通过移动节点不能彻底解决覆盖空洞问题。原因在于: 即使节点移动, 但如果移动节点的感测能力出现故障, 甚至感测能力完全丧失, 移动节

收稿日期: 2020-03-29; 修回日期: 2020-04-29

基金项目: 河南省科技计划资助项目(182102210599); 校级教改资助项目(2019YBJG01)

作者简介: 曹 琰(1983-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为计算机网络信息安全及数据挖掘。email:zhang\_jiann@21cn.com

点也无法修复覆盖空洞。针对移动 WSN 网络的覆盖问题，研究人员提出不同的覆盖修复策略。如，文献[6]提出基于粒子群优化的能效覆盖(Particle Swarm Optimization-based Energy Efficiency Coverage, PSO-EEC)策略。PSO-EEC 策略将监测区域细分为网格，并利用节点的能耗情况对节点的感测半径进行调整；文献[7]利用基于级联的邻居节点覆盖空洞修复(Cascaded Neighbor Intervention-based coverage hole Repair, CNIR)策略，利用节点的能量和邻居节点数选择修复节点，再修复覆盖空洞区域；文献[8]提出基于虚引力和斥力的覆盖空洞修复(Virtual Attractive and Repulsive forces-based repair Coverage hole, VARC)策略。

为此，针对移动 WSNs 网络，可以通过自适应调整移动节点的感测半径，修复覆盖空洞。本文提出基于模糊推理系统(FIS)的修复节点选举算法(FISS)。当检测到覆盖空洞时，先调整节点的感测半径，并选择一个节点移动，通过移动节点修复覆盖空洞区域。仿真结果表明，提出的 FISS 算法有效提高了对监测区域的覆盖率。

### 1 网络模型

在区域  $\ell \times \ell$  内部署  $n$  个移动节点，构成节点集  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 。采用圆型的感测模型，即节点  $s_i$  的感测区域就是以节点  $s_i$  为圆心，以感测半径  $r$  为半径的圆型区域，如图 1 所示。考虑布尔感测模型，如果事件位于节点感测区域内，则节点就能感测到该事件<sup>[9]</sup>。

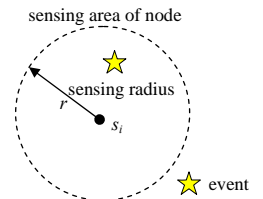


Fig.1 Sensing model of node  
图 1 节点感测模型

每个节点能感测、存储和处理一定量的数据，并由电池供电，节点能够移动。同时节点通过控制发射功率，调整感测半径，令  $r_{\min}, r_{\max}$  表示最小、最大的感测半径。为了保持网络的连通，节点的通信半径  $R$  是感测半径  $r$  的两倍，即  $R = 2r$ 。此外，节点通过定位算法<sup>[10]</sup>能够获取一跳邻居节点内的节点位置。

### 2 FISS 算法

FISS 算法主要由三部分构成：覆盖空洞区域检测、修复节点的选举和覆盖空洞的修复。

#### 2.1 覆盖空洞区域检测

每个节点周期地向邻居节点广播 Hello 消息， $s_i \in S$  广播的 Hello 包含以下信息： $\langle i, p_i, E_i, r_i, List_i \rangle$ 。其中  $i, p_i, E_i, r_i$  和  $List_i$  分别表示节点  $s_i$  的 ID 号、位置、剩余能量、感测半径和邻近交点的列表(邻近交点的定义见下文)。考虑二维平面，则  $p_i = (x_i, y_i)$ 。

如果节点感测半径  $r_i$  小于  $r_{\min}$ ，则定义该节点无法感测环境(该节点称为失效节点)，即形成覆盖空洞区域(Coverage Hole Area, CHA)。在这种情况下，节点  $s_i$  的邻居节点  $s_j \in N_i$  就需估计 CHA 位置<sup>[11]</sup>，其中  $N_i$  表示节点  $s_i$  的邻居节点集。一旦发现失效节点，其邻居节点  $s_j$  就计算离失效节点位置最近的与其他节点的覆盖区域的交点。假定节点  $s_i$  失效，其邻居节点  $s_j$  有 3 个邻居节点  $\{s_1, s_2, s_3\} \in N_j$ ，如图 2 所示。邻居节点  $s_j$  与节点  $s_1, s_2, s_3$  均存在 2 个交点。而节点  $s_j$  只计算离失效节点  $s_i$  最近的 2 个交点。令  $\{O_{j,i}^1, O_{j,i}^2\}$  表示这 2 个交点，将这 2 个交点称为节点的邻近交点。

计算 2 个圆的交点坐标过程如下：对于给定的 2 个圆，圆心分别为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 。  $r_1, r_2$  分别为这 2 个圆的半径。令  $O_a(x_a, y_a), O_b(x_b, y_b)$  表示这 2 个圆的交点坐标。依据式(1)至式(3)便可计算  $(x_a, y_a), (x_b, y_b)$ 。

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) + \arccos\left(\frac{-r_2^2 + r_1^2 + r_3^2}{2r_1r_3}\right) \\ r_3 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\ \theta_2 = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) - \arccos\left(\frac{-r_2^2 + r_1^2 + r_3^2}{2r_1r_3}\right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_a = x_1 + r_1 \cos \theta_1 \\ x_b = x_1 + r_1 \cos \theta_2 \\ y_a = x_1 + r_1 \sin \theta_1 \\ y_b = x_1 + r_1 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\quad (3)$$

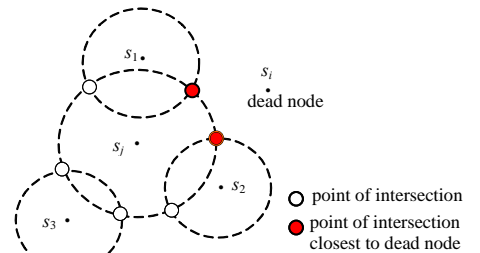


Fig.2 Example of computing intersection point  
图 2 计算交点图例

图 3 为 CHA 区域边界的交点。CHA 边界的节点分别计算离失效节点最近的交点，记为  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7$ 。

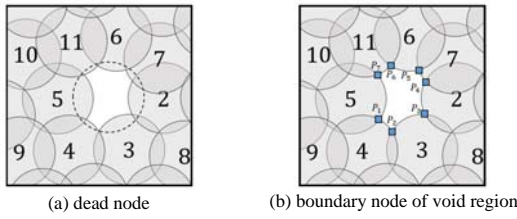


Fig.3 Neighbor intersection points on boundary of coverage hole  
图 3 覆盖空洞边界的邻近交点

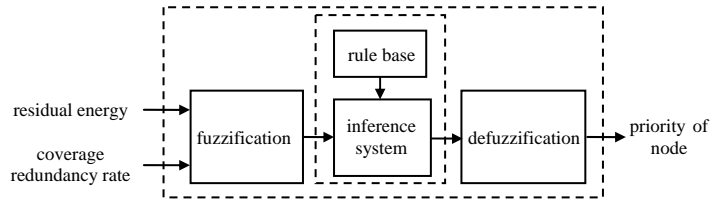


Fig.4 Election repair node framework based on FIS system  
图 4 基于 FIS 系统的选举修复节点框架

### 2.2 修复节点的选取

FISS 算法利用 FIS 选择修复节点。将节点的剩余能量和覆盖重叠率作为 FIS 系统的输入。然后，通过 FIS 系统评估成为修复节点的优先级。最终，选择具有优先级最高的节点作为修复节点，如图 4 所示。

#### 2.2.1 输入值

将节点的剩余能量和覆盖重叠率作为 FIS 系统的输入，节点的剩余能量对节点覆盖性能有重要影响。若节点能量消耗殆尽，节点就无法工作。为此，将节点剩余能量  $E_i$  作为 FIS 的输入，并优先选择剩余能量大的节点作为修复节点。

通过 Monte Carlo 算法<sup>[12]</sup>估计节点覆盖重复率。优先选择覆盖重复率大的节点  $\rho_i$  作为修复节点。

#### 2.2.2 隶属函数

将剩余能量和覆盖重复率值转化为语言值，用低(low)、中(medium)和高(high)表示，它们的隶属函数如图 5 所示。再依据 2 个输入值，并结合 FIS 的规则库，推导出输出值，如表 1 所示，输出值转化为{very low, low, medium, high, very high}。最后，将输出值转化精确数值。该精确数值表示节点成为修复节点的权值。最终，选择具有权值最高的节点作为修复节点。

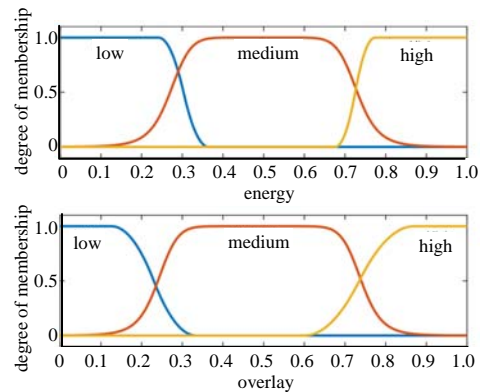


Fig.5 Membership functions of input values  
图 5 输入值的隶属函数

表 1 FIS 规则库

rule number	input variables		output eligibility
	energy	overlap	
1	low	low	very low
2	low	medium	very low
3	low	high	low
4	medium	low	low
5	medium	medium	high
6	medium	high	high
7	high	low	medium
8	high	medium	high
9	high	high	very high

### 2.3 移动方向及移动距离的计算

确定修复节点后，需明确修复节点移动方向及移动距离。

首先，修复节点计算与邻居节点的交点坐标。如果与邻居节点的覆盖区域无交点，该修复节点就不再移动，呆在原地；若存在交点，就计算移动方向和移动距离。修复节点计算自己的 2 个邻近交点。令  $\{P_1, P_2\}$  表示节点  $s_i$  的 2 个邻近交点。节点  $s_i$  先计算这 2 个邻近交点连线的中间点  $M_i$  的坐标  $(x_{mid}, y_{mid})$ 。然后，将节点  $s_i$  连续至中间点  $M_i$  的方向作为节点移动方向  $d_{dir}$ 。如图 6(a)所示。

然后，获取邻居节点的邻近交点，再计算这些邻近交点沿着  $d_{dir}$  反向到节点  $s_i$  的覆盖区域边界的距离，假定存在  $k$  个距离，即  $D_1, D_2, \dots, D_k$ 。再从中选择最小的距离作为节点  $s_i$  移动距离  $d_{mov}$ ：

$$d_{mov} = \min_{1 \leq j \leq k} D_j \tag{4}$$

如图 6(b)所示，3 个邻近交点分别计算离节点  $s_i$  边界的距离  $D_1, D_2, D_3$ ，再选择最小的距离作为移动距离。算法 1 给出计算移动方向和移动距离的过程。

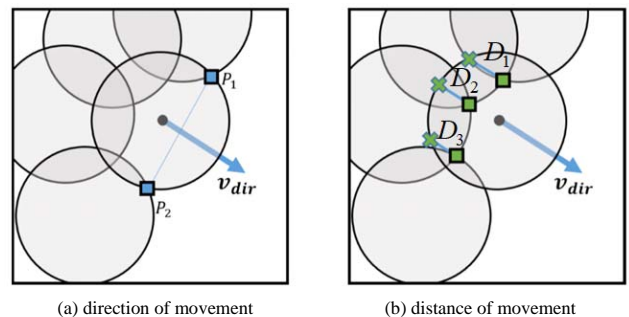


Fig.6 Calculating the direction and distance of movement  
图 6 计算移动方向和移动距离

Algorithm1: calculate distance and direction

Input: bounding intersection points, list of neighbors

Output:  $d_{\text{mov}}$ : moving distance;  $\mathcal{G}_{\text{dir}}$ : direction vector

1. Calculate neighbors' intersection points inside current node's radius
2. if (Number of points <1) then
3. return  $d_{\text{mov}} \neq \phi$ ;  $\mathcal{G}_{\text{dir}} \neq \phi$
4. End if
5. Calculate midpoint of bounding intersection points
6. Calculate direction vector  $\mathcal{G}_{\text{dir}}$
7. For each of neighbors' intersection points do
8. Calculate distance from that point to node radius edge
9. End for
10.  $d_{\text{mov}}$  = minimum distance
11. Return  $d_{\text{mov}}, \mathcal{G}_{\text{dir}}$

## 2.4 覆盖空洞的修复

当检测覆盖空洞区域后, 修复节点先调整自己的感测半径。修复节点通过控制发射功率, 实现对感测半径的调整, 如式(5)所示:

$$P_{\text{acq}}(r) = P_{\text{max}} \left( \frac{r}{r_{\text{max}}} \right)^2 \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{max}}$  为最大的发射功率;  $r$  为当前节点的感测半径;  $P_{\text{acq}}(r)$  表示感测半径为  $r$  时的发射功率。

修复节点先将自己的感测半径调整到最大。然后, 再计算邻近交点坐标, 并通过交点坐标判断是否将覆盖空洞区域进行覆盖。若未能覆盖, 则利用算法 1 计算移动方向以及移动距离, 进而完成覆盖区域。

## 3 性能分析

### 3.1 仿真平台

利用 Matlab R2105a 建立仿真平台, 90 个传感节点随机分布于 300 m×300 m 方形区域, 使节点较均匀地分布于监测区域内。节点的初始感测半径  $r = 25$  m,  $r_{\text{max}} = 35$  m,  $P_{\text{max}} = 300$  mW。传感节点的初始能量不同, 能量在 1~100 J 范围内随机设定。此外, 节点每移动 1 m 消耗 1 J。选择 PSOC, CNIR 和 VARC 算法作为参照, 并分析它们的能耗、覆盖率性能。

### 3.2 仿真结果

#### 3.2.1 网络覆盖性能

首先分析失效节点数对网络覆盖率影响, 如图 7 所示, 其中失效节点数从 5 至 85 变化。本文从 90 个节点中随机选择部分节点, 使感测半径小于最小值, 成为失效节点。从图 7 可知, 相比于 VARC, CNIR 和 PSOC 算法, 提出的 FISS 算法的覆盖率得到有效提高。这是因为 CNIR 和 VARC 算法通过节点移动修复覆盖空洞。PSOC 算法通过调整节点感测半径修复覆盖空洞。而 FISS 算法先通过调整感测半径, 再移动节点, 进而对覆盖空洞区域进行修复。

若以 90% 的覆盖率为覆盖要求: 当失效节点大于 23 个时, VARC 算法的覆盖率低于 90%; 当失效节点大于 27 个时, CNIR 和 PSOC 算法的覆盖率低于 90%; 直到失效节点达到 55 个时, FISS 算法的覆盖率才低于 90%。图 8 为不同节点密度下 FISS 算法的覆盖率, 其中节点密度分别为 90、60 和 30。从图 8 可知, 在同一个区域(300 m×300 m)内, 节点密度越小, 覆盖率性能越低。

#### 3.2.2 能耗

图 9 为总体能耗随失效节点数的变化情况。从图 9 可知, VARC 算法的能耗最高, 特别是当失效节点数高于 30 后, VARC 算法的能耗特别严重, 而 PSOC 算法的能耗最低。这是因为 PSOC 算法未允许节点移动, 并且在维持覆盖要求条件下, 尽可能地控制感测半径。由于保持短的感测半径, 并控制了节点移动所消耗的能量, CNIR 算法的能耗较低。FISS 算法的能耗高于 CNIR 算法, 这主要是因为 FISS 算法既要调整感测半径, 又要驱动节点移动, 增加了节点能耗。

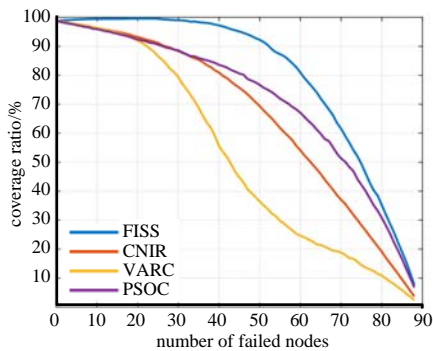


Fig.7 Coverage ratio with number of failed nodes

图 7 覆盖率随失效节点数的变化

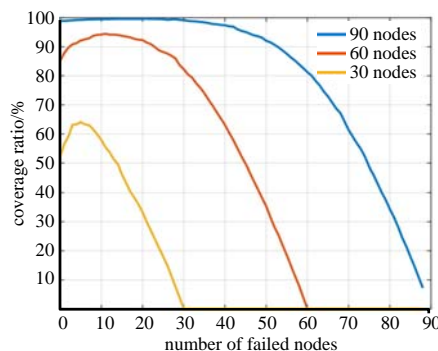


Fig.8 Coverage ratio of FISS algorithm with node density

图 8 FISS 算法的覆盖率随节点密度的变化

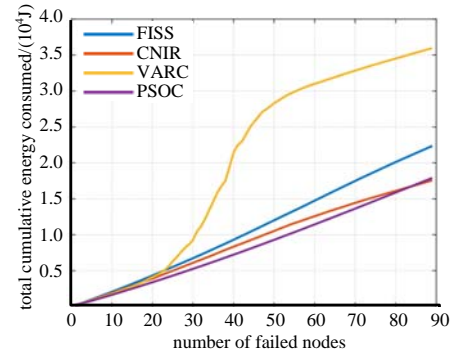


Fig.9 Total cumulative energy consumed with number of failed node

图 9 能耗随失效节点数的变化情况

#### 4 结论

针对移动 WSNs 的覆盖空洞问题,提出了基于模糊推理系统的修复节点选取算法 FISS。FISS 算法采用调整感测半径和驱动移动节点 2 个策略对覆盖空洞进行修复。将节点剩余能量和覆盖重叠率作为 FIS 的输入,再由 FIS 评估节点成为修复节点的权值,进而产生最优的修复节点。仿真结果表明,提出的 FISS 算法有效提高了覆盖率,但其能耗并没有得到有效控制。尽管 FISS 算法的能耗低于 VARC,但仍高于 CNIR 和 PSOC 算法。

此外,本文只通过实验仿真分析了 FISS 算法在覆盖率和能耗方面的性能,未进行理论分析。后期,拟利用图论理论,建立分析模型,从理论角度分析 FISS 算法的覆盖性能与能耗。

#### 参考文献:

- [1] 王汝言,李宏娟,李红霞. 基于 SMDP 的虚拟化无线传感网络资源分配策略[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(1):66-71. (WANG Ruyan,LI Hongjuan,LI Hongxia. SMDP-based resource allocation strategy in virtualized WSN[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(1):66-71.)
- [2] HUANG C F, TSENG Y C. The coverage problem in a wireless sensor network[J]. Mobile Network Application, 2015,10(4): 519-528.
- [3] ZHU C, ZHENG C, SHU L, et al. A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks[J]. Journal of Network Computing Application, 2012,35(2):619-632.
- [4] AHMED N, KANHERE S S, SANJAY J. The holes problem in wireless sensor networks: a survey[J]. Mobile Computing and Communications Review, 2005,9(2):4-18.
- [5] IZADI D, ABAWAJY J, GHANAVATI S. An alternative node deployment scheme for WSNs[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(2):667-675.
- [6] WANG J, JU C, GAO Y. A PSO based energy efficient coverage control algorithm for wireless sensor networks[J]. Computers Materials Continua, 2018,56(3):433-446.
- [7] KHALIFA B, AGHBARI Z A, KHEDR A M. Coverage hole repair in WSNs using cascaded neighbor intervention[J]. IEEE Sensors Journal, 2017,17(21):7209-7216.
- [8] SENOUCI M R, MELLOUK A, ASSNOUNE K. Localized movement assisted sensor deployment algorithm for hole detection and healing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014,25(5):1267-1277.
- [9] HOSSAIN A, BISWAS P K, CHAKRABARTI S. Sensing models and its impact on network coverage in wireless sensor network[C]// 2008 IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems. Kharagpur, India: IEEE, 2008:1-5.
- [10] HAN G, XU H, DUONG T Q. Localization algorithms of wireless sensor networks: a survey[J]. Telecommunication System, 2013,52(4):2419-2436.
- [11] 孙泽宇,高春玲. 一种增强型事件驱动策略的覆盖空洞补偿算法[J]. 光通信研究, 2016,3(6):35-43. (SUN Zeyu, GAO Chunling. An enhanced event-driven strategy coverage holes compensation algorithms[J]. Study on Optical Communications, 2016,3(6):35-43.)
- [12] KWON S M, KIM J S. Coverage ratio in the wireless sensor networks using Monte Carlo simulation[C]// 2008 Fourth International Conference on Networked Computing and Advanced Information Management. Gyeongju, South Korea: IEEE, 2008:235-238.