

## 容错节能无线传感器网络中可靠覆盖问题的解决方案\*

徐强<sup>1,2</sup>, 汪芸<sup>1,2+</sup>

<sup>1</sup>(东南大学 计算机科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

<sup>2</sup>(国家教育部计算机网络与信息集成重点实验室, 江苏 南京 210096)

### Solving Reliable Coverage in Fault Tolerant Energy Efficient Wireless Sensor Network

XU Qiang<sup>1,2</sup>, WANG Yun<sup>1,2+</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

<sup>2</sup>(Laboratory of Computer Network and Information Integration, Ministry of Education, Nanjing 210096, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-25-83790819, E-mail: yunwang@seu.edu.cn, http://www.seu.edu.cn

Xu Q, Wang Y. Solving reliable coverage in fault tolerant energy efficient wireless sensor network. *Journal of Software*, 2006,17(Suppl.):184–191. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/s184.htm>

**Abstract:** Based on the heuristic method used to solve set  $k$  cover problem, a scheme namely reliable coverage scheme is proposed to solve reliable coverage problem within the cluster in a hierarchical structured network. A minimum cover is a smallest set of sensor nodes capable of complete monitoring over the entire cluster area. 1-resistant minimum cover topology, applied in reliable coverage scheme, is the combination of two minimum covers. Round robin working of 1-resistant minimum covers prolongs network lifetime significantly. The redundant minimum cover shields nodes' failures from a single minimum cover. In reliable coverage scheme, interaction protocol between cluster head and cluster members is introduced and instant cover replacement algorithm is applied to handle possible members' failures. Simulations show that this scheme is able to efficiently utilize energy to prolong network lifetime while at the same time keeping missed monitoring at a low level.

**Key words:** wireless sensor network; fault tolerant; energy efficient; set  $k$  cover; reliable coverage; 1-resistant minimum cover

**摘要:** 基于生成最小覆盖的  $k$  集合覆盖启发式算法,提出了分簇结构下解决簇内观测区域可靠覆盖问题的高效节能方案,即可靠覆盖方案.最小覆盖是一个可以完全覆盖观测区域的传感器节点最小集合,可靠覆盖方案使用的 1-损毁最小覆盖拓扑结构是两个最小覆盖的迭加.通过 1-损毁最小覆盖间的轮流工作延长网络可用时间,体现节能效果;通过增加一个冗余最小覆盖,屏蔽来自单个最小覆盖的节点失效,体现容错效果.在该方案中,介绍簇头节点和簇内成员的交互协议,并使用快速覆盖替换算法处理可能的节点失效.仿真实验显示,该方案能够高效地利用有限的能量,显著延长网络工作时间,同时将由节点失效而产生的漏测次数保持在较低值.

**关键词:** 无线传感器网络;容错;节能; $k$  集合覆盖;可靠覆盖;1-损毁最小覆盖

\* Supported by the Program for New Century Excellent Talents in University, the Ministry of Education of China under Grant No.NCET-04-0478 (国家教育部新世纪优秀人才培养计划); the "Qing-Lan" Program for Young Excellent Talents of Jiangsu Province of China (江苏省“青蓝”工程中青年学术带头人培养计划)

Received 2006-03-30; Accepted 2006-10-08

微电子技术、计算技术、无线通信等技术的进步,推动了无线传感器网络的快速发展.无线传感器网络由大量廉价小功率传感器节点组成,这些节点随机部署在监测区域内,采集感兴趣的物理信息,简单处理后将局部处理结果路由至汇聚节点,用户通过管理节点获取全局信息<sup>[1,2]</sup>.

无线传感器网络具有广阔的应用前景<sup>[3]</sup>,环境监测和目标发现是其中最重要的两大功能.传感器节点由电池供电,存在能量约束,加之环境影响,可靠性差,整个网络服务质量不可避免地受此影响.并且,多数情况下,为节点二次充电或者二次部署新节点取代损毁节点往往并不现实.因此,无线传感器网络的节能和容错特性的研究成为当前热点.

通常,该方面研究结合拓扑控制技术进行,即充分利用传感器节点高密度部署的特性,在保证网络一定覆盖度和连通度的前提下,使用功率控制技术和骨干节点选择技术,形成优化拓扑结构.当前,已有层次型拓扑结构生成算法,如 TopDisk<sup>[4]</sup>,GAF<sup>[5]</sup>,LEACH<sup>[6]</sup>等,由于缺乏考虑可靠覆盖问题,鲁棒性不够.本文提出的可靠覆盖方案使用 1-损毁最小覆盖拓扑结构,该结构基于高效节能的最小覆盖拓扑结构.1-损毁最小覆盖拓扑结构能够有效地容忍传感器节点失败/终止(fail-stop)失效行为,解决分簇结构下簇内观测区域的可靠覆盖问题.

本文第 1 节介绍  $k$  集合覆盖相关背景知识.第 2 节详述可靠覆盖方案.仿真实验和数据分析在第 3 节展开.第 4 节是全文总结.

## 1 $k$ 集合覆盖问题

$k$  集合覆盖问题由 Slijepcevic<sup>[7]</sup>提出.该问题生成的最小覆盖拓扑结构充分利用了高密度部署时传感器节点的观测范围相互重叠的特点.最小覆盖拓扑结构将节点划分为  $k$  个子集(每个子集称为一个最小覆盖,是一个可以完全覆盖簇内区域的最小集合),子集节点间轮流顺序工作,关闭不工作子集中的节点,达到节能效果.较之所有节点同时工作的普通方式,最小覆盖拓扑结构可以延长网络工作时间大致  $k$  倍.图 1 显示了  $4 \times 4$  网格状簇内区域,节点观测半径为 3 个网格单位,随机部署了 10 个传感器节点,可以生成 4 个最小覆盖,剩余 1 个空闲节点.其中图 1(a)显示了网格状簇内区域.图 1(b)显示了随机部署情况和覆盖生成情况.传感器节点分别标记为 1~10,最小覆盖分别标记为 1~4.属于最小覆盖  $j$  的传感器节点  $i$  表示为  $ij$ ;表示为  $i/U$  的空闲节点  $i$ ,不参与已有最小覆盖的工作.例如,3 号最小覆盖由节点 {4,6} 组成,节点 4 覆盖区域为 {3,4,6,7,8,9,10,11,12,14,15,16},节点 6 覆盖区域为 {1,2,3,4,5,6,7,9,10,13}.最小覆盖拓扑结构只能保证簇内区域的完全覆盖,不能保证可靠覆盖.最小覆盖中任意节点的损毁必然会引起漏测区域的产生.例如,3 号最小覆盖中节点 6 的损毁会引起漏测区域 {1,2,5,13} 的产生.

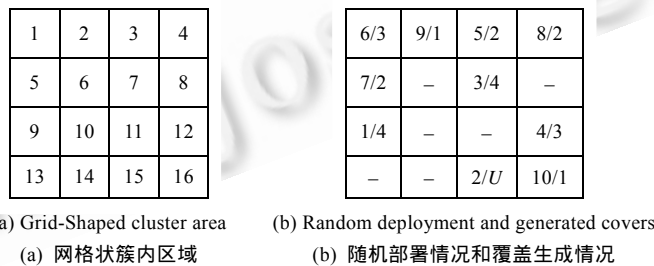


Fig.1 Minimum cover topology

图 1 最小覆盖拓扑结构

$k$  集合覆盖算法的形式化描述如下.传感器节点集合  $C$  是网格状簇内区域  $A$  的子集,传感器节点观测半径为  $r$  个网格单位.算法产生尽可能多的最小覆盖共  $k$  个  $C_1, C_2, \dots, C_k. C_i \subseteq C. \forall i, j, i \neq j, C_i \cap C_j = \emptyset, A$  中每个网格至少被  $C_i (i=1, \dots, k)$  中的一个传感器节点所观测到.算法可能会剩下不加入任何最小覆盖的空闲节点.

在上例中,  $A = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16\}, C = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}, k=4$ , 生成的最小覆盖分别是  $C_1 = \{9, 10\}, C_2 = \{5, 7, 8\}, C_3 = \{4, 6\}, C_4 = \{1, 3\}$ , 空闲节点 = {2}.

目前已证明<sup>[8]</sup> $k$  集合覆盖问题是 NP-hard 问题,通常的解决方法有启发式算法、模拟退火算法等,其中启发式算法效率较高.本文将 Slijepcevic 的启发式算法应用于可靠覆盖方案.算法的复杂度是  $O(n^2)$ ,  $n$  是传感器节点数量.

## 2 可靠覆盖方案

在最小覆盖拓扑结构中,每个网格至少被一个传感器节点所观测到,节点失效伴随着最小覆盖中漏测区域的产生.如果适当增加冗余,安排两个最小覆盖同时工作,使每个网格至少被两个传感器节点所观测到,则来自同一个最小覆盖任意数量的节点失效均不会影响可靠观测.如果能够及时替换失效的最小覆盖,就可始终保持连续的可靠观测.

### 2.1 方案假设

假设 1. 簇内区域已随机部署一定数量传感器节点,能够产生方案所需的若干最小覆盖.

假设 2. 簇内节点间通信无须借助节点路由,可相互直达.

假设 3. 存在可靠的簇头节点.不考虑簇头节点的具体位置,簇头节点具备可靠能量来源,没有能量约束,且损毁概率为 0.

假设 4. 簇内成员和簇头节点以同步方式通信.他们之间存在可靠的时钟同步.

假设 5. 簇内成员地理位置已知.

假设 6. 目标是否发现简化为 0/1 报告.

假设 7. 簇内成员的损毁模式为失败/终止.称损毁的和能量耗尽的节点为失效节点.不研究拜占庭问题.簇内成员损毁概率已知.

### 2.2 定义

定义 1. 最小覆盖:可以完全覆盖簇内观测区域的最小节点集合.最小覆盖拓扑结构下,节点的失效必然引起漏测区域的产生.

定义 2.  $K$ -损毁最小覆盖: $k+1$  个最小覆盖的迭加. $k$ -损毁最小覆盖拓扑结构下,出现节点失效时,只要失效节点来源于  $k$  个最小覆盖,则观测区域至少还被一个最小覆盖所观测到.本文以 1-损毁最小覆盖为例,讨论可靠覆盖方案.使用变量 `min_cover` 记录当前拓扑状态.1 表示最小覆盖拓扑结构,0 表示 1-损毁最小覆盖拓扑结构.

定义 3. 忙碌区:管理最小覆盖和 1-损毁最小覆盖轮流工作的区域.

定义 4. 空闲区:管理空闲传感器节点的区域.

定义 5. 可能漏测数:如果失效节点来源于 1-损毁最小覆盖中的两个最小覆盖,则漏测仍有可能发生.使用变量 `possible_miss` 记录该情况的发生次数.

定义 6. 工作轮数:系统失效前的工作时间.当剩余正常节点无法组织出最小覆盖时,簇内产生了永久性的漏测区域,系统失效.

### 2.3 可靠覆盖方案

本节具体描述可靠覆盖方案的工作原理.首先,介绍簇头节点和簇内成员间的交互协议.然后,描述簇头的第 3 阶段工作,即快速覆盖替换算法.最后,通过实例阐明该方案.

#### 2.3.1 交互协议

忙碌区和空闲区中的簇内成员以不同方式和簇头节点交互.簇头节点担当协调者,簇内成员听从来自簇头节点的协调.簇头节点工作分 3 个阶段,称为一轮.

第 1 阶段(发送阶段):发送时钟同步消息给簇内成员,如果上一轮工作中出现节点失效,则捎带发送更新覆盖的决定消息.

第 2 阶段(接收阶段):以 TDMA 同步方式接收当前工作的 1-损毁最小覆盖节点的若干次观测报告.

第 3 阶段(本地计算阶段):根据观测报告判断有无兴趣事件出现.如果探测到工作节点出现能量耗尽或损

毁,则做出更新覆盖的决定,并在下一轮工作时发送,维护忙碌区和空闲区。

当前工作的 1-损毁最小覆盖的节点工作分两个阶段。

第 1 阶段(接收阶段):接收时钟同步消息,校对本地时钟,若有捎带的决定消息,则更改本轮工作状态。

第 2 阶段(发送阶段):以 TDMA 同步方式周期发送观测结果。

当前不工作的忙碌区节点不参与本次观测工作,只接收第 1 阶段消息。空闲区中节点也不参与观测工作,直到簇头节点将其协调换入忙碌区。

图 2 描述了簇头节点和当前工作中的 1-损毁最小覆盖节点的交互协议。

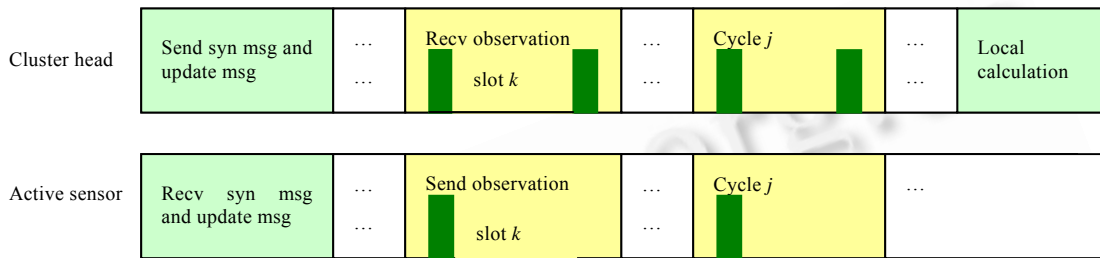


Fig.2 Interaction protocol

图 2 交互协议

### 2.3.2 快速覆盖替换算法

簇头节点的本地计算阶段是一个高效快速的处理过程,称为快速覆盖替换算法。算法处理当前工作节点的失效行为,调整剩余正常节点在各个覆盖中的分布和覆盖间的工作顺序,作出更新覆盖的决定。在该算法中,系统初始工作在 1-损毁最小覆盖拓扑状态,该状态可以保证簇内区域的可靠覆盖。当剩余正常节点降低到一定数量后,系统降级运行在最小覆盖拓扑状态,该状态只能保证区域的完全覆盖。当剩余正常节点无法组织出最小覆盖时,永久性漏测区域产生,系统失效。

算法输入来自本轮中节点的观测报告,失效节点不发送观测报告,失效行为被簇头节点探测到。算法的输出是下一轮工作时簇头节点的更新覆盖决定。忙碌区和空闲区的所有正常节点接收该决定消息,听从簇头调度,改变工作顺序。

算法见下。当前工作的覆盖失效时,首先在空闲区寻找可能的替换覆盖(第 3 行)。如果没有可替换的覆盖,则通过减少轮流工作的覆盖数量来处理失效行为(第 5 行、第 15 行),当残存覆盖数量不足时,通过  $k$  覆盖问题的重新计算,考察系统能否继续保持当前拓扑状态(第 8 行、第 18 行、第 24 行)。失效节点只有被调度到忙碌区,且轮到其工作时,失效行为才能被簇头节点探测到。

算法 1. 快速覆盖替换算法。

1. 若  $\min\_cover=0$ ,系统工作在 1-损毁最小覆盖拓扑状态
2. 如果失效节点来自一个最小覆盖
3. 如果空闲区内节点可以组织出一个最小覆盖
4. 利用此覆盖替换相应的失效覆盖,更新忙碌区和空闲区,工作轮数递增,结束。
5. 如果忙碌区中最小覆盖数量  $\geq 3$
6. 将失效覆盖中的正常节点调度进空闲区,重新安排忙碌区中覆盖的工作顺序,工作轮数
7. 递增,结束。
8. 否则,使用启发式算法对剩余的正常节点重新计算  $k$  覆盖问题
9. 如果生成的最小覆盖数量  $\geq 2$ ,安排覆盖工作顺序,工作轮数递增,结束。
10. 如果生成的最小覆盖数量 = 1,安排覆盖工作顺序,  $\min\_cover=1$ ,系统在下一轮中工作在
11. 最小覆盖拓扑状态,工作轮数递增,结束。

12. 否则,系统失效.
13. 如果失效节点来自两个最小覆盖
14. 可能漏测数 *possible\_miss* 递增
15. 如果忙碌区中最小覆盖数量 $\geq 4$
16. 将失效覆盖中的正常节点调度进空闲区,重新安排忙碌区中覆盖的工作顺序,工作轮数
17. 递增,结束.
18. 否则,使用启发式算法对剩余的正常节点重新计算  $k$  覆盖问题
19. 如果生成的最小覆盖数量 $\geq 2$ ,安排覆盖工作顺序,工作轮数递增,结束.
20. 如果生成的最小覆盖数量=1,安排覆盖工作顺序, $\min\_cover=1$ ,系统在下一轮中工作在
21. 最小覆盖拓扑状态,工作轮数递增,结束.
22. 否则,系统失效.
23. 否则, $\min\_cover=1$ ,系统工作在最小覆盖拓扑结构.
24. 使用启发式算法对剩余的正常节点重新计算  $k$  覆盖问题
25. 如果生成的最小覆盖数量 $\geq 1$ ,安排覆盖工作顺序,工作轮数递增,结束.
26. 否则,系统失效.

### 2.3.3 一个实例

下面,我们以如图 1 所示的初始部署为例,说明可靠覆盖方案的详细工作过程,见表 1.

**Table 1** An example of reliable coverage scheme

表 1 可靠覆盖方案的一个实例

| Round | Busy space                     | Spare space | Detected failed sensors | Notes  |
|-------|--------------------------------|-------------|-------------------------|--|
| 48    | {9,10}+{5,7,8}+<br>{4,6}+{1,3} | {2}         | {10}                    | Deploy {9} into spare space, failure of {4} is not detected at this round.   |
| 49    | {5,7,8}+{4,6}+<br>{1,3}        | {2,9}       | {3,4}                   | Failed sensors {3,4} are from two minimum covers, <i>possible_miss</i> increments. After redeployment, minimum cover {2,9} in spare space becomes active, {1,6} are deployed into spare space. |
| 120   | {5,7,8}+{2,9}                  | {1,6}       | {2}                     | After redeployment, {9} is deployed into spare space, failure of {6} in spare space is not detected, system degrades into minimum cover state.   |
| 170   | {5,7,8}                        | {1,6,9}     | {8}                     | Minimum covers cannot be organized after redeployment, permanent blind spots occurs and system fails.  |

在表 1 中,使用斜体表示当前工作的覆盖,使用下划线表示失效的节点.忙碌区中节点 4 在第 48 轮失效,在第 49 轮工作时被簇头节点探测到.49 轮时,失效节点来自两个不同最小覆盖,故可能漏测数递增.在第 120 轮时,剩余的正常节点只能保证完全覆盖,系统降级运行在最小覆盖拓扑结构.在第 170 轮时,节点 8 失效后,出现永久性的漏测区域,系统失效.空闲区中节点 6 在第 120 轮时的失效行为始终没有被簇头探测到.

## 2.4 应用考虑

上述可靠覆盖方案的正常工作基于许多假设条件,实际应用中,需要研究这些条件的可行性.本节讨论在应用时进行节点部署,设置可靠簇头两个问题.

### 2.4.1 节点的初始部署

初始节点部署研究节点数量,观测半径和初始覆盖要求三者关系.依照假设 1,初始节点部署需要保证随机部署足量节点,在后续  $k$  集合覆盖算法中能够产生所需数量的最小覆盖.问题规约如下:已知观测区域是  $N \times N$  尺度的网格,传感器节点观测半径  $r$ ,至少需要多少节点,才能满足初始  $k$  个最小覆盖的要求.

已有研究<sup>[9]</sup>使用圆周覆盖技术,推导出  $k=1$  时所需最少节点数量  $n_{\min}$  和其他参数的关系  $\frac{N \cdot N}{n_{\min} \cdot r^2 \pi} = \frac{2\pi}{\sqrt{27}}$ .

在随机部署下, $k$  个最小覆盖要求所需的最少节点数量是  $n_{\min}$  的  $k$  倍.

### 2.4.2 可靠簇头的设置

依照假设 3,可靠覆盖方案的正常运作依赖于可靠簇头节点的设置.可靠簇头不参与区域的观测工作,没有能量约束,损毁概率为 0.在实际应用中,可以由没有能量约束的汇聚节点担当簇头任务,解决能量约束问题;并使用类似<sup>[10]</sup>的备份簇头策略,解决簇头损毁问题.

## 3 仿真和分析

### 3.1 比较方案和评价指标

为了证实可靠覆盖方案的效率,引入两种比较方案.

- 普通工作方案.该工作方案中,所有节点始终参与区域观测,并按照 TDMA 同步方式依次向簇头节点报告观测结果.当失效节点数量过多,剩余正常节点无法完全覆盖观测区域时,系统失效.
- 最小覆盖工作方案.该工作方案中,单个最小覆盖轮流顺序工作.系统工作在最小覆盖拓扑状态下,当剩余正常节点无法完全覆盖观测区域时,系统失效.

评价工作效率的指标包括工作轮数和可能漏测数.工作轮数体现了网络的可用时间,是方案节能效果的体现;可能漏测数体现了可靠覆盖的程度,是方案容错效果的体现.影响指标的因素包括:簇内观测区域尺寸,传感器节点观测半径,节点数量,节点的损毁率和初始能量多少.直观地,普通工作方案的工作轮数最短,可能漏测数为 0;最小覆盖工作方案工作轮数最长,可能漏测数最多;而可靠覆盖方案的工作轮数和可能漏测数介于两者之间.

### 3.2 仿真设计

使用期望为  $1/\lambda$  的指数分布模拟簇内成员节点的损毁,其中  $\lambda$  为节点的可靠系数.使用平均工作轮数表示该期望值.3 种方案中所有节点均需要在每轮工作的第一阶段接收时钟同步消息和更新覆盖的决定消息,所以,只考虑节点发送观测结果的能量耗费,每轮的耗费计量为一个单位能量.

设计 3 组仿真实验,分别考察能量和损毁率,观测半径,节点数量对工作效率的影响.

第 1 组:考察能量和平均工作轮数的影响.簇内观测区域为  $10 \times 10$  网格状分布,90 个传感器节点随机部署,观测半径是 3 个网格单位,平均工作轮数为 100,改变初始能量,使初始能量和平均工作轮数的比值  $\rho$  在 0.1~2 之间变动.

第 2 组:考察观测半径的影响.簇内观测区域为  $10 \times 10$  网格状分布,90 个传感器节点随机部署,平均工作轮数为 100 轮,能量为 100 个单位.观测半径在 1~7 之间变动.

第 3 组:考察节点数量的影响.簇内观测区域为  $10 \times 10$  网格状分布,观测半径为 3 个网格单位,平均工作轮数为 100 轮,能量为 100 个单位.节点数量在 50~100 之间变动.

### 3.3 数据分析

第 1 组实验的仿真数据如图 3 所示.当  $\rho < 1.3$  时,3 种方案的平均工作轮数都呈现出增长.当  $\rho > 1.3$  时,平均工作轮数处于上下浮动中.当  $\rho > 1$  时,即初始能量多于平均工作轮数时,多数节点已概率损毁,平均工作轮数之所以仍有增长空间的原因是,部分剩余正常节点在观测半径 3 时,还可以组织出最小覆盖.比较 3 种方案,多数节点正常工作时 ( $\rho < 1$ ),最小覆盖方案的平均工作轮数远多于普通工作方案,同时可能漏测次数巨大.相对而言,可靠覆盖方案的平均工作轮数介于两者之间,由于适度冗余的加入,可能漏测次数维持在 8 以下,稍逊于普通工作方案,但远优于最小覆盖方案.

第 2 组实验的仿真数据如图 4 所示.当观测半径为 2 时,由于能量限制,普通工作方案的平均工作轮数达到了极值.另两种方案则能够充分利用增大的观测半径,有效延长平均工作轮数.最小覆盖工作方案的平均可能漏测次数随着平均工作轮数的延长而增多,而可靠覆盖方案的平均可能漏测次数始终保持较少.

第 3 组实验的仿真数据如图 5 所示.传感器节点数量的增多对平均工作轮数的影响小于观测半径增大的影响.类似地,随着平均工作轮数的延长,最小覆盖工作方案的平均可能漏测次数缓慢增加,而可靠覆盖工作方案的平

均可能漏测次数始终较少.

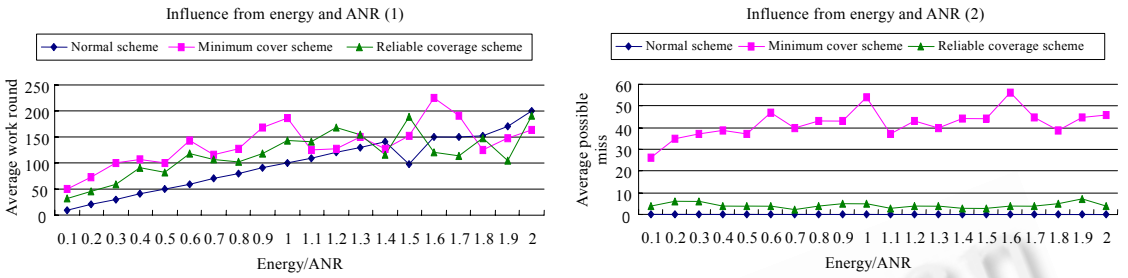


Fig.3 Influence from initial energy and average normal round

图 3 初始能量和平均工作轮数的影响

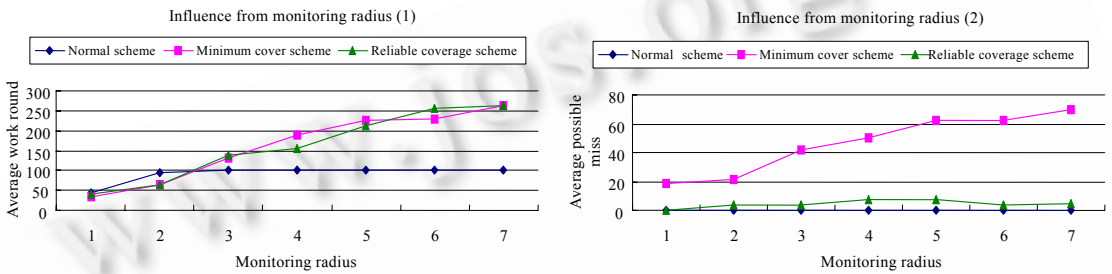


Fig.4 Influence from monitoring radius

图 4 观测半径的影响

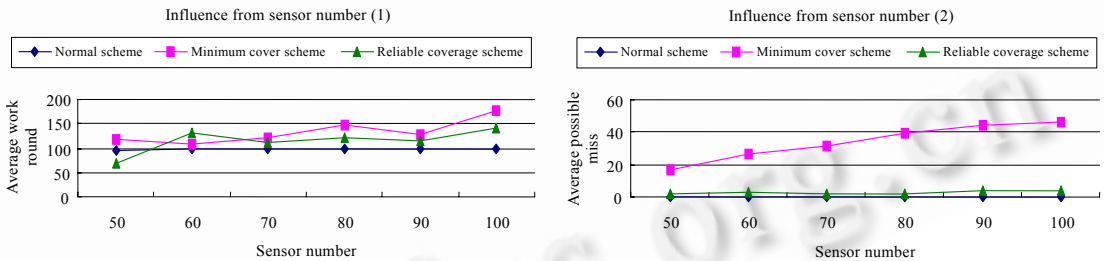


Fig.5 Influence from sensor number

图 5 传感器节点数量的影响

由数据分析可知,可靠覆盖工作方案能够高效利用节点的有限能量,在保证较低平均漏测次数的基础上,显著延长网络的工作轮数.该方案综合了普通工作方案零漏测次数和最小覆盖工作方案长工作轮数的优点,是解决高密度部署的无线传感器网络簇内区域可靠覆盖的有效方案.

### 4 结论

本文以生成最小覆盖的 k 集合覆盖启发式算法为基础,提出了具有适度冗余特征的可靠覆盖工作方案,解决了分簇结构下,簇内观测区域的可靠覆盖问题.数据分析显示,该方案能够高效利用节点的有限能量,显著延长无线传感器网络的平均工作轮数,同时保持较小的可能漏测次数.

致谢 这里向曾经对本文提出宝贵意见的审稿专家及参与本文讨论的老师 and 同学表示衷心的感谢.

**References:**

- [1] Sun LM, Li JZ, Chen Y, Zhu HS. Wireless Sensor Networks. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese).
- [2] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. IEEE Communications Magazine, 2002,40(8): 102–114.
- [3] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. Journal of Software, 2003,14(7):1282–1291 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [4] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management. Technical Report, DCS-TR-441, Rutgers University, 2001.
- [5] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-Informed energy conservation for ad hoc routing. In: Proc. of the 7th Annual Int'l Conf on Mobile Computing and Networking (MobiCOM). Rome, 2001. 70–84.
- [6] Heinzelman W, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002,1(4):660–670.
- [7] Slijepcevic S, Potkonjak M. Power efficient organization of wireless sensor networks. In: IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). Helsinki, 2001. 472–476.
- [8] Garey MR, Johnson DS. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. New York: Freeman, 1979.
- [9] Williams R. The Geometrical Foundation of Natural Structure: A Source Book of Design. New York: Dover Publications, 1979. 51–52.
- [10] Gupta G, Younis M. Fault-Tolerant clustering of wireless sensor networks. Wireless Communications and Networking, 2003,3: 1579–1584.

**附中文参考文献:**

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,朱红松. 无线传感器网络. 北京:清华大学出版社,2005.
- [3] 任丰原,黄海宁,林闯. 无线传感器网络. 软件学报,2003,14(7):1282–1291. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>



徐强(1981 - ),男,江苏无锡人,硕士生,主要研究领域为分布对象计算,无线传感器网络的容错拓扑控制.



汪芸(1967 - ),女,教授,博士生导师,主要研究领域为分布计算系统,容错理论,传感器网络,QoS.