

文章编号: 2095-4980(2020)04-0625-08

## 基于拨备满足模型的无线传感网节点覆盖算法

马庆功<sup>a</sup>, 丁宪成<sup>b</sup>

(常州大学 a.怀德学院, 江苏 靖江 214500; b.信息化建设与管理中心, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 针对无线传感网预覆盖过程中存在覆盖盲区以及数据频繁重传而导致的节点覆盖抑制现象, 提出了一种基于拨备满足模型的无线传感网网络覆盖算法。设计一种新的无线传感网节点覆盖模型, 并构建覆盖指数、覆盖强度、覆盖均衡评估系数等评估维度, 快速评估节点覆盖质量。再计算覆盖均衡评估系数, 并采用拨备模型优化覆盖质量, 确定覆盖性能优越的备用工作节点。随后, 基于覆盖相似性原则评估工作节点覆盖性能, 设计了节点首次覆盖评估方法, 按节点移动路径依次评估覆盖指数统计均值, 并根据目标节点进入覆盖区域的先后, 逐次激活性能最佳的工作节点进行监测。仿真实验表明: 与当前无线传感网常数节点覆盖方案相比, 所提方案具有更高的网络覆盖率、更短的覆盖启动时间和更少的工作节点数目。

**关键词:** 无线传感网; 节点覆盖; 拨备满足模型; 均衡评估; 覆盖相似性; 分区移位

**中图分类号:** TN014; TP393.04      **文献标志码:** A      **doi:** 10.11805/TKYDA2019327

## Node coverage scheme for wireless sensor networks based on reserve satisfaction model

MA Qinggong<sup>a</sup>, DING Xiancheng<sup>b</sup>

(a.Huaide College, Changzhou University, Jingjiang Jiangsu 214500, China;

b.Information Construction and Management Center, Changzhou University, Changzhou Jiangsu 213164, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of node coverage suppression caused by blind area coverage and frequent data retransmissions in the pre-coverage process of wireless sensor networks, a coverage algorithm for wireless sensor networks based on reserve satisfaction model is proposed. Firstly, a new wireless sensor network node coverage model is designed, and the coverage index, coverage intensity, coverage balance evaluation coefficient and other evaluation dimensions are constructed to quickly evaluate the coverage quality of nodes. Secondly, the coverage equilibrium evaluation coefficient is calculated, and the backup model is adopted to optimize coverage quality and determine the backup working nodes with superior coverage performance. Then, based on the principle of coverage similarity, the coverage performance of working nodes is evaluated, and the first coverage evaluation method is designed. The statistical mean of coverage index is evaluated according to the moving path of the nodes. According to the sequence of the target nodes entering the coverage area, the working nodes with the best performance are activated. The simulation results show that the proposed scheme has higher network coverage, shorter coverage start-up time and less work compared with the current constant node coverage schemes of wireless sensor networks.

**Keywords:** Wireless Sensor Network(WSN); node coverage; reserve satisfaction model; equilibrium evaluation; coverage similarity; partition shift

无线传感网部署过程中一般采取随机布撒模式采集数据, 其节点可自行进行数据计算、汇聚、存储、控制, 能够将物理世界的参量转化为控制系统所能识别的数据报文, 并实现参量与数据报文的——对应<sup>[1-2]</sup>。考虑

收稿日期: 2019-09-06; 修回日期: 2019-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61272367); 江苏省高校自然科学基金面上项目资助(6KJB520001)

作者简介: 马庆功(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为无线传感器网络、计算机应用、智能决策等。email:Maqgong1981chd@yeah.net

到物理世界的参量需要处于节点覆盖状态下才能够被节点所采集,因此,实现节点对布撒区域的完全覆盖,成为无线传感网研究领域内重要着力点<sup>[3]</sup>。节点覆盖过程涵盖拓扑定位、信号识别、路由优化、数据同步、能耗控制等诸多方面,但这些研究方面均需要依托传感网节点对物理区域的充分覆盖,否则将直接出现数据采集及汇聚中断现象<sup>[3]</sup>。当前无线传感网节点覆盖问题主要集中于如下方面:1) 如何在不增加网络开销及节点部署的情况下,强化对物理区域的全面覆盖力度;2) 监测过程中如何改善节点能量受限的问题,以便降低因节点受限而导致监测中断;3) 监测过程中,在满足网络对数据采集质量的控制要求下,如何有效利用当前网络节点尽量实现对各监测区域的多重覆盖。为了解决上述问题,Muthuraman<sup>[4]</sup>等提出了一种基于热点分区-生命优化机制的覆盖优化方案,该方案首先采取热点方式获取数据采集过程中使用频率较高的子区域,通过将区域内簇头节点进行主备更换,以降低因能量受限而导致的节点覆盖失效现象。但是,该方案采用排序方式实现热点获取,容易忽视处于冷覆盖区域的簇头节点也存在能量受限现象的问题,无法适应较为复杂的物理部署环境。Radoslaw<sup>[5]</sup>等人通过神经感知模型建立节点-覆盖区域一一对应机制,立足于该机制构建了一种节点覆盖模型,给出了节点-覆盖区域处于交叉状态下如何避免竞争的解决方案,可有效避免因区域重叠而导致频繁进行数据传输。然而,该方案需要通过迭代方式构建神经网络,节点能耗水平要高于文献[4],在网络规模较大时极易出现节点能量受限现象,导致出现网络覆盖不全面的问题。Hao<sup>[6]</sup>等提出了一种基于联合工作策略的节点覆盖优化方案,该方案利用工作节点与其单跳内节点具有的相似特性,按排序方式构建工作节点覆盖区域能量调度模型,当工作节点处于失效状态时,将优先激活工作区域内节点作为备用工作节点,从而实现节点失效状态下的稳定修复。但是,该方案需要工作节点对单跳区域进行周期扫描,未对不同工作节点之间的交叉区域进行覆盖确定性评估,容易导致部分节点难以被工作节点所覆盖,降低了网络覆盖性能。

## 1 本文覆盖模型及覆盖质量评估

由于无线传感节点往往处于移动状态,在针对目标进行覆盖中,一般均需要对物理区域进行全覆盖<sup>[7]</sup>。当工作节点通过无线方式对移动节点进行区域覆盖时,应当能够将移动节点拓扑运动轨迹全部纳入覆盖范围之内。然而由于无线传感网节点具有能量受限特性,实践中节点覆盖往往存在如下不足:1) 无线传感网节点不能同时充当工作节点,这是因为当节点全部处于工作状态时,会导致能耗急剧增加,致使网络节点受限的概率显著提升;2) 若采用分区机制,由于不同区域内簇头节点覆盖能力具有差异,可能导致不同区域间存在节点无法覆盖的部分,使得整个网络覆盖难以实现全面化;3) 由于节点移动路径存在复杂特性,若移动过程中经过的分区所属的簇头节点处于休眠状态,则此时节点将难以被覆盖,导致出现盲区现象,见图 1。

### 1.1 覆盖模型

不失一般性,考虑图 1 所示节点覆盖情况,规定:1) 节点分布区域为矩形,均以随机散布的方式进行节点部署<sup>[8]</sup>;2) 节点坐标可以通过 sink 节点实时获取:sink 节点均采用角度定位和时延定位两种模式实时获取<sup>[9]</sup>;3) 节点初始能量相同,具有相同的理论覆盖半径<sup>[10]</sup>;4) 由于存在信道噪声的干扰,节点实际覆盖半径满足高斯分布<sup>[11]</sup>。

**定义 1 覆盖指数:**在工作节点分布区域内,待监测区域面积与工作节点覆盖区域面积的比值:

$$Cover(index) = \frac{S(net)}{\sum_{i=1,2,\dots,n} S(i)} \quad (1)$$

式中:  $Cover(index)$  为覆盖指数;  $S(net)$  为待监测区域面积,见图 2;  $S(i)$  为第  $i$  个工作节点覆盖区域面积。依据式(1),覆盖指数越高,说明对工作节点的覆盖能力要求也就越高。

**定义 2 覆盖强度:**在定义 1 待监测区域中,工作节点覆盖区域面积与工作节点覆盖面积并集之间的比值:

$$Cover(Strength) = \frac{\sum_{i=1,2,\dots,n} S(i)}{\bigcup_{i=1,2,\dots,n} S(i)} \quad (2)$$

式中:  $Cover(Strength)$  为覆盖强度;  $S(i)$  为第  $i$  个工作节点覆盖区域面积。根据式(2),覆盖强度越高,说明工作

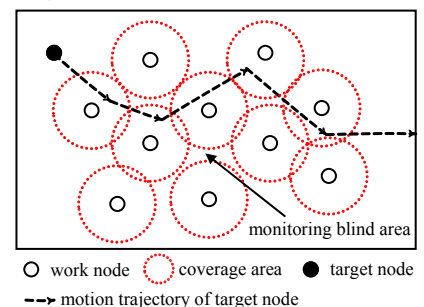


Fig.1 Diagram of node coverage

图 1 节点覆盖示意图

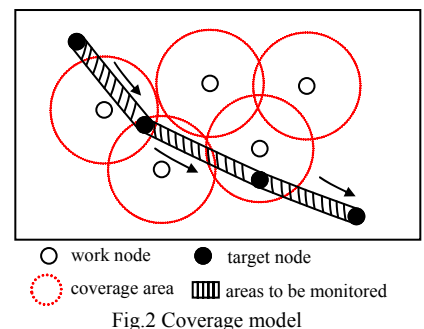


Fig.2 Coverage model

图 2 覆盖模型

节点的覆盖能力也就越高。

**定义 3 覆盖均衡评估系数：**定义 1 所示的待监测区域中，工作节点与其覆盖范围内全部节点之间的方差：

$$D(\text{node}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{n_1} \sum_{m=1}^{n_1} (R_i - L(\text{node}, m)) \right]^2 \quad (3)$$

式中： $D(\text{node})$  为覆盖均衡评估系数； $n_1$  为第  $i$  个工作节点覆盖区域内的节点数量； $R_i$  为第  $i$  个工作节点当前覆盖半径； $L(\text{node}, m)$  为第  $i$  个工作节点与覆盖区域内节点之间的平均距离。根据式(3)，覆盖均衡评估系数越小，说明工作节点覆盖将更为均衡。

**定义 4 覆盖启动时长：**网络中全部工作节点从接受 sink 指令并开始启动后，到最后一个工作节点完成覆盖为止所耗费的时间。显然覆盖启动时长越短，说明网络覆盖能力越强。

**定义 5 覆盖鲁棒度：**目标节点进入网络后，到该目标节点被工作节点覆盖期间所耗费的时间。显然覆盖鲁棒度越低，说明网络对目标节点的捕获能力也就越强，工作节点覆盖能力亦越高。

## 1.2 拨备满足模型

由节 1.1 所示的覆盖模型可知，监测区域为矩形，无线传感器节点个数为  $n$ ，理论覆盖半径均为  $R$ ，实际覆盖半径  $R'$  满足高斯分布  $N(R, \delta^2)$ 。在节点均不因能量耗尽而处于受限状态时，网络需要拨备一定数量的工作节点，以便满足监测区域覆盖强度最大化的监测需求。

**定理 1** 设待监测的面积为  $S(\text{net})$ ，监测区域内工作节点个数为  $n$ ，实际覆盖半径满足高斯分布  $N(R, \delta^2)$ ，则覆盖指数的统计均值  $E[\text{Cover}(\text{index})]$  满足：

$$E[\text{Cover}(\text{index})] = 1 - \left[ 1 - \frac{S(\text{net})}{\pi(R^2 - \delta^2)} \right]^n \quad (4)$$

**证明：**考虑到节点部署过程均满足随机散布模型<sup>[12]</sup>，且实际覆盖半径  $R'$  满足高斯分布  $N(R, \delta^2)$ 。根据定义 1，可知任意节点  $i$  的覆盖指数  $v_i$  满足：

$$v_i = \frac{S(i)}{\sum_{m=1,2,\dots,i-1} S(m)} \quad (5)$$

式中： $S(i)$  为工作节点  $i$  覆盖区域面积； $S(m)$  为第  $i$  个工作节点覆盖区域内任意节点  $m$  的覆盖面积。

任意节点  $m$  被第  $i$  个工作节点所决定的覆盖指数  $v_m$  满足：

$$v_m = \frac{S(i)}{\sum_{m=1,2,\dots,i-1} S(m)} \pi R'^2 \quad (6)$$

式中节点  $m$  的实际覆盖半径  $R'$  满足高斯分布  $N(R, \delta^2)$ 。由于任意节点的实际覆盖半径  $R'$  均满足高斯分布，且各个节点间均处于互相独立状态，因此由高斯概率密度函数<sup>[13]</sup>可得任意节点的覆盖指数  $v$  满足：

$$v = \int_{-\infty}^{2R} v_m \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{R'-R}{\delta\sqrt{2}}\right)^2\right) dR \quad (7)$$

为便于计算式(7)所示的覆盖指数  $v$ ，作如下的等式变换：

$$l = \frac{R'-R}{\delta\sqrt{2}} \quad (8)$$

将式(8)带入式(7)中，可得：

$$v = \int_{-\infty}^{2R} v_m \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{R'-R}{\delta\sqrt{2}}\right)^2\right) dR = \frac{\sqrt{\pi}}{\sum_{m=1,2,\dots,i-1} S(m)} [T_1 + T_2 + T_3] \quad (9)$$

其中， $T_1, T_2, T_3$  三者满足：

$$T_1 = \int_{\frac{R}{\delta}}^{\frac{R}{\delta}} (l\delta)^2 e^{-l^2} dl \quad (10)$$

$$T_2 = \int_{\frac{R}{\delta}}^{\frac{R}{\delta}} 2R\delta e^{-l^2} dl \quad (11)$$

$$T_3 = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{m=1,2,\dots,i-1} S(m) \int_{\frac{R}{\delta}}^{\frac{R}{\delta}} R^2 e^{-l^2} dl \quad (12)$$

联立式(9)~(12)计算可得：

$$v = \frac{\sum_{i=1,2,\dots,i-1} S(m)}{\pi(R^2 - \delta^2)} \quad (13)$$

考虑到网络中工作节点之间均处于互相独立状态, 若  $n$  个工作节点同时监测任意目标  $H$  时, 由抽样统计理论可知<sup>[14]</sup>, 覆盖指数的统计均值  $E[\text{Cover}(index)]$  满足:

$$E[\text{Cover}(index)] = 1 - \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1,2,\dots,i-1} S(m)}{\pi(R^2 - \delta^2)} \right]^n \quad (14)$$

$$S(net) = \sum_{i=1,2,\dots,i-1} S(m) \quad (15)$$

$$E[\text{Cover}(index)] = 1 - \left[ 1 - \frac{S(net)}{\pi(R^2 - \delta^2)} \right]^n \quad (16)$$

**定理 1** 至此证明完毕。显然, 从**定理 1** 可知覆盖指数的统计均值与理论覆盖半径  $R$  有关, 理论覆盖半径越大, 统计均值越高, 网络覆盖质量也就越高。

**推论 1:** 实现**定理 1** 时, 网络启动过程中最佳工作节点个数  $M$  为:

$$M = \frac{\log(1 - \pi R^2 S(net))}{\log(1 - \pi(R^2 - \delta^2) S(net))} \quad (17)$$

**证明:** 由**定义 1** 可知, 区域内任意节点  $M$  被单一工作节点覆盖指数应小于被多个节点同时覆盖时的覆盖指数, 相应均值也满足如下不等式关系:

$$\frac{S(net)}{\pi R^2} \leq 1 - \left[ 1 - \frac{S(net)}{\pi(R^2 - \delta^2)} \right]^n \quad (18)$$

对式(18)两端取对数可得:

$$M \geq \frac{\log(1 - \pi R^2 S(net))}{\log(1 - \pi(R^2 - \delta^2) S(net))} \quad (19)$$

根据**定义 2** 可知, 工作节点个数越少, 网络覆盖能力越强, 此时工作节点性能最佳。

### 1.3 节点首次覆盖评估方法

**定理 1** 给出了监测区域内工作节点个数为  $n$ , 实际覆盖半径满足高斯分布  $N(R, \delta^2)$  时, 覆盖指数的统计均值。通过**推论 1** 可求得工作节点的最佳个数。由于目标节点进入监测区域后, 其运动路径进入不同的工作节点覆盖区域时, 覆盖指数会发生变化, 因此当目标节点首次进入监测区域后, 按照相似的覆盖指数逐次激活运动路径附近的工作节点, 并根据式(19)动态控制区域内最佳工作节点个数, 从而实现在最佳监测状态条件下对目标节点的全覆盖。因此本文提出**定理 2** 如下:

**定理 2** 目标节点  $k$  进入监测区域后, 其覆盖指数的统计均值  $E(k)$  满足:

$$E(k) = \frac{1 - (1 - 1/E[\text{Cover}(index)])^n}{1/E[\text{Cover}(index)]} \quad (20)$$

式中:  $n$  表示目标节点  $k$  的最大移动次数; 其余参数同式(16)。

**证明:** 不妨设目标节点  $k$  移动  $n$  次前均不能为工作节点所监测, 被监测时期覆盖指数统计均值均须触发模型(14)后, 方可为工作节点所监测。记随机变量  $Y$  为目标节点移动次数, 并记  $y$  为该随机变量的分布密度, 则随机变量  $Y$  满足如下分布:

$$p(Y = y) = \begin{cases} \frac{1}{E[\text{Cover}(index)]} \left[ 1 - \frac{1}{E[\text{Cover}(index)]} \right]^m, & m = 1, 2, \dots, n-1 \\ \left[ 1 - \frac{1}{E[\text{Cover}(index)]} \right]^m, & m = n \end{cases} \quad (21)$$

对式(21)求均值  $E(Y)$ , 可得:

$$E(Y) = \sum_{m=1}^{n-1} n \frac{1}{E[\text{Cover}(index)]} \left[ 1 - \frac{1}{E[\text{Cover}(index)]} \right]^{n-1} + \sum_{m=1}^{n-1} m \left[ 1 - \frac{1}{E[\text{Cover}(index)]} \right]^{m-1} \quad (22)$$

化简式(22)可得：

$$E(Y) = \frac{1 - (1 - 1/E[\text{Cover}(index)])^n}{1/E[\text{Cover}(index)]} \quad (23)$$

**定理 2** 至此得证。由**定理 2**可知，当目标节点进入监测区域后，逐次选取覆盖指数最接近式(20)的工作节点进行监测，即可实现对目标节点拓扑路径所经过区域的全覆盖，从而优化节点的首次监测过程。

## 2 本文无线传感网节点覆盖算法

基于前文提出的覆盖模型和拨备满足模型，结合节点首次覆盖评估方法，本文算法由区域初始化、工作节点备份、工作节点动态更迭三个步骤构成。

### 2.1 区域初始化

目标节点进入监测区域之前，按照式(17)所示确定网络中工作节点的个数  $M$ ，将网络中能量最佳前  $M$  个节点选取为工作节点，并按照理论覆盖半径  $R$  进行分簇过程，从而实现区域初始化，详情如下：

Step 1: 按式(17)确定网络中工作节点个数  $M$ ，并选取能量最佳的前  $M$  个节点作为工作节点，将能量剩余排序位于第  $M+1$  至  $2M$  个节点作为后备节点后，启动分簇过程；

Step 2: 工作节点从接受 sink 指令并开始启动初始化过程后，若出现某个节点无法正常启动，则按 Step 1 中所示的后备节点进行替补，再次启动分簇过程；

Step 3: 工作节点启动后，按式(1)计算覆盖指数并获取各个节点的覆盖指数，当且仅当覆盖指数低于 1 时，转 Step 4，否则继续进行后备节点替补，直到覆盖指数低于 1；

Step 4: 完成 Step 1~Step3 所示的工作节点选取后，由该工作节点向理论覆盖半径  $R$  内的节点发送 Hello 数据报文，节点收到 Hello 数据报文后，反馈 Re\_Hello 数据报文给工作节点，从而形成工作节点-剩余节点交互数据的分簇区域，区域初始化流程结束。

### 2.2 工作节点备份

完成区域初始化后，工作节点与其监测区域内的节点均能产生数据交互，但单纯按照能量高低进行工作节点备份，可能存在覆盖不完全的问题。因此，基于覆盖均衡评估系数，设计工作节点备份方法，以实现工作节点快速替换，具体过程如下：

Step 1: 对工作区域内的其余节点，逐个按照**定义 2**计算覆盖强度，并按照计算获取的覆盖强度由高到低进行排序；

Step 2: 针对工作节点区域内其余节点，按照**定义 3**所示计算覆盖均衡评估系数；

Step 3: 当工作节点无法正常工作时，选取覆盖强度最高的节点作为暂定备用节点，并按照**定义 3**所示计算覆盖均衡评估系数；

Step 4: 当且仅当暂定备用节点的覆盖均衡评估系数低于 Step1 所获取的覆盖均衡评估系数时，将该暂定备用节点设定为新的工作节点；若备份暂定备用节点的覆盖均衡评估系数高于 Step1 所获取的覆盖均衡评估系数，则该节点将不再被选取为备用工作节点，备份过程结束。

### 2.3 工作节点动态更迭

当目标节点进入监测区域后，逐次选取覆盖指数最接近式(20)的工作节点进行监测，并将其余工作节点设置为休眠状态，减少因工作节点能量受限而出现无法覆盖监测区域的现象，整个工作节点动态更迭过程如下：

Step 1: 目标节点进入监测区域后，按照式(20)计算其覆盖指数的统计均值，并首先选取覆盖指数最接近的工作节点作为首次监测的工作节点；

Step 2: 按**定义 5**计算目标节点当前的覆盖鲁棒度，当且仅当覆盖鲁棒度发生变化后，再次选取覆盖指数最接近的工作节点作为新的工作节点；

Step 3: 覆盖鲁棒度发生变化后，直到新的工作节点将目标节点覆盖前，剩余的工作节点均将被设定为休眠状态，按工作节点备份流程进行区域内工作节点的备份；

Step 4: 当且仅当目标离开网络监测区域后，流程结束。否则，转 Step 3。

### 3 仿真实验

为测试所提算法的节点覆盖性能,使用 Matlab 平台进行实验。为了体现所提算法的优势,在同等仿真参数条件下对实践中常用的基于分区移位机制的无线传感网常数节点覆盖方案<sup>[15]</sup>(Constant Approximation Algorithm based on Partitioning and Shifting Scheme, CA-PSS)、基于生物地理学的无线传感器网络覆盖和连接节点布局优化方案<sup>[16]</sup>(Biogeography-Based Optimization Scheme for Solving the Coverage And Connected Node Placement Problem for Wireless Sensor Networks, BB)进行对比测试与分析。实验参数见表 1。不失一般性,采用如下四个指标来评估节点覆盖性能:1) 平均覆盖率:平均覆盖率越高,说明节点覆盖性能越好,目标节点也越难脱离工作节点的监测。2) 网络监测周期比值:若网络监测周期比值越高,说明目标节点在网络运动过程中处于被监测状态的时间越长,节点覆盖性能也就越好。3) 网络启动时长:通常,网络启动时长越低,说明网络中工作节点对目标节点的敏感程度越好,可以通过当前的网络覆盖迅速监测到目标节点。4) 工作节点数目:在同等情况下,工作节点数目越少,说明网络可以用更少的工作节点覆盖更多的区域,则节点覆盖性能也就越高。

#### 3.1 平均覆盖率

图 3 为节点运动速度在不同情况下按表 1 所示参数进行测试所得到的平均覆盖率数据。由图可知,随着工作节点个数的不断增加,本文算法与 CA-PSS 算法、BB 算法的平均覆盖率均呈现上升趋势,这是由于工作节点个数增多,覆盖区域面积逐步增大,因此覆盖率也随之增加。但本文算法平均覆盖率均要显著高于对照组算法。原因是本文算法构造了基于拨备机制的覆盖模型,设计覆盖指数、覆盖强度、覆盖均衡评估系数等六个评估维度快速评估工作节点覆盖性能,评估过程中可对筛选的工作节点的覆盖性能及覆盖质量进行控制,特别是本文通过计算覆盖指数设计了工作节点动态更迭,能有效减少因能量受限而导致工作节点失效的现象,因此网络可选取性能较高的工作节点进行区域覆盖,可有效规避因工作节点失效而导致覆盖抑制的现象。CA-PSS 算法主要采用聚类 and 最小生产树方案进行工作节点选取和更新,由于该方案采用深度搜索机制进行工作节点聚类生成及更新,一旦形成工作节点聚类就需要较长的周期进行数据更新,在此期间,容易因能量受限导致工作节点处于失效状态,出现因工作节点失效无法对覆盖范围内的区域进行监测,从而会形成覆盖抑制现象,导致覆盖性能出现下降。BB 算法采用基于突变和迁徙的方式进行工作节点聚类更新,在 CA-PSS 算法基础上优化了聚类生成周期,但该算法依然需要通过预先设置工作节点来进行聚类初始化,且工作节点按照平均分布的方式进行设置,未采用备用方式进行节点更迭,目标节点运动时容易导致部分工作节点长时间处于工作状态而出现能量消耗过大的现象,导致节点出现能量受限,难以适应目标节点高速变动的实际部署情况。因此 CA-PSS 算法、BB 算法的平均覆盖率要显著低于本文方案。

图 3 为节点运动速度在不同情况下按表 1 所示参数进行测试所得到的平均覆盖率数据。由图可知,随着工作节点个数的不断增加,本文算法与 CA-PSS 算法、BB 算法的平均覆盖率均呈现上升趋势,这是由于工作节点个数增多,覆盖区域面积逐步增大,因此覆盖率也随之增加。但本文算法平均覆盖率均要显著高于对照组算法。原因是本文算法构造了基于拨备机制的覆盖模型,设计覆盖指数、覆盖强度、覆盖均衡评估系数等六个评估维度快速评估工作节点覆盖性能,评估过程中可对筛选的工作节点的覆盖性能及覆盖质量进行控制,特别是本文通过计算覆盖指数设计了工作节点动态更迭,能有效减少因能量受限而导致工作节点失效的现象,因此网络可选取性能较高的工作节点进行区域覆盖,可有效规避因工作节点失效而导致覆盖抑制的现象。CA-PSS 算法主要采用聚类 and 最小生产树方案进行工作节点选取和更新,由于该方案采用深度搜索机制进行工作节点聚类生成及更新,一旦形成工作节点聚类就需要较长的周期进行数据更新,在此期间,容易因能量受限导致工作节点处于失效状态,出现因工作节点失效无法对覆盖范围内的区域进行监测,从而会形成覆盖抑制现象,导致覆盖性能出现下降。BB 算法采用基于突变和迁徙的方式进行工作节点聚类更新,在 CA-PSS 算法基础上优化了聚类生成周期,但该算法依然需要通过预先设置工作节点来进行聚类初始化,且工作节点按照平均分布的方式进行设置,未采用备用方式进行节点更迭,目标节点运动时容易导致部分工作节点长时间处于工作状态而出现能量消耗过大的现象,导致节点出现能量受限,难以适应目标节点高速变动的实际部署情况。因此 CA-PSS 算法、BB 算法的平均覆盖率要显著低于本文方案。

#### 3.2 网络监测周期比值

图 4 为节点运动速度在不同情况下按表 1 所示参数,通过逐次增加工作节点数量所得到的网络监测周期比值测试结果。由图可知,随着工作节点个数的不断增加,本文算法与 CA-PSS 算法、BB 算法的网络监测周期比值均呈现上升趋势,这是由于随着工作节点个数不断增加,网络区域被覆盖的范围也不断增大,目标节点进入节点覆盖区域后被监控的时间也呈现增加态势,因此网络监测周期比值也不断上升。但本文算法的比值始终高于 CA-PSS 算法、BB 算法。这是由于本文采用多维

表 1 仿真参数表

Table 1 Simulation parameters

parameter	value
area of regional distribution	10 000 m×10 000 m
node transmission period (min)	≥20
node layout	random distribution
node density	≥1/m <sup>2</sup>
node coverage radius/m	≥20
initial energy of nodes/J	12

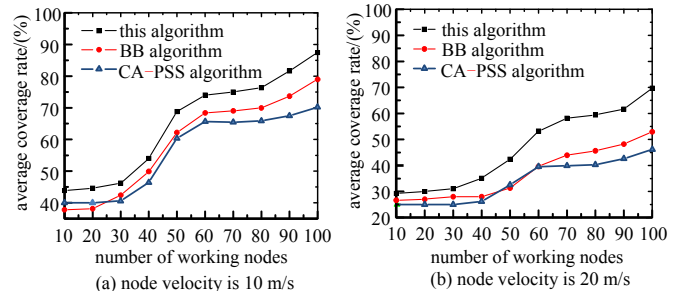


Fig.3 Average coverage

图 3 平均覆盖率

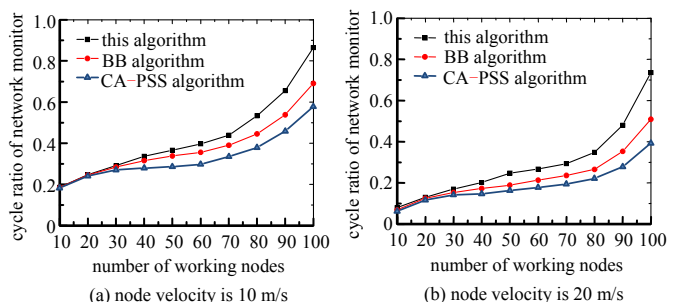


Fig.4 Cycle ratio of network monitoring

图 4 网络监测周期比值

因此网络监测周期比值也不断上升。但本文算法的比值始终高于 CA-PSS 算法、BB 算法。这是由于本文采用多维

度评估方式建立了基于拨备机制的覆盖模型，工作节点处于能量受限时可优先筛选工作能力最强的节点作为工作节点，继续进行网络监测，因而网络区域被覆盖的范围不会因工作节点失效而减小，平均覆盖率较高，网络监测周期比值也较理想。此外，由于 CA-PSS 算法主要采用聚类 and 最小生产树方案进行工作节点选取和更新，节点数据更新过程较长，工作节点更新速度要显著低于本文方案，当工作节点失效时将出现因节点失效而导致部分网络区域无法被监测的现象，从而产生监测失效的问题。BB 算法在 CA-PSS 算法的思想采用突变和迁徙机制优化节点数据更新，虽取得一定的效果，但由于该算法没有通过备用机制对工作节点进行更新，动态更迭工作节点的能力较差，当节点覆盖强度过大而出现能量受限时，将因该节点受限而出现严重的覆盖抑制现象，因与本文算法相比，出现监测失效的概率较高，监测性能亦差于本文算法。

### 3.3 网络启动时长

图 5 为节点运动速度在不同情况下按表 1 所示参数，通过逐次增加工作节点数量所得到的网络启动时间测试结果。由图可知，本文算法在两种节点运动速度条件下，网络启动时长均要低于 CA-PSS 算法和 BB 算法。这是由于本文算法构建的基于拨备机制的覆盖模型可实现多维度覆盖评估，能从覆盖指数、覆盖强度、覆盖均衡评估系数等六个评估维度进行网络覆盖初始化，因此对监测区域的覆盖性能较高。平均覆盖率及网络监测周期比值均要高于 CA-PSS 算法和 BB 算法，因此网络启动时长较短。CA-PSS 算法需要通过聚类和最小生产树方案进行工作节点更换，随着工作节点数量的增加，出现数据丢失的概率要高于本文算法，因此网络启动时长较高。BB 算法采用突变和迁徙机制优化节点数据更新，但在运动目标节点处于监测失效状态时不具有工作节点动态更迭的能力，网络启动时长亦要长于本文方案。

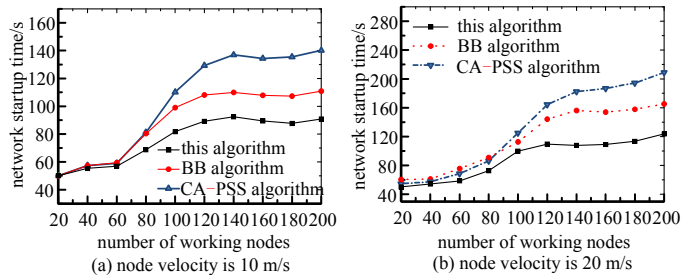


Fig.5 Network startup time

图 5 网络启动时长

CA-PSS 算法需要通过聚类和最小生产树方案进行工作节点更换，随着工作节点数量的增加，出现数据丢失的概率要高于本文算法，因此网络启动时长较高。BB 算法采用突变和迁徙机制优化节点数据更新，但在运动目标节点处于监测失效状态时不具有工作节点动态更迭的能力，网络启动时长亦要长于本文方案。

### 3.4 工作节点数目

图 6 为节点运动速度逐次增加的情况下，按表 1 所示参数进行仿真实验，所得到的工作节点数目的仿真测试结果。由图可知，本文算法在标准高斯信道噪声和标准莱斯信道噪声干扰的环境下，工作节点数目均要少于 CA-PSS 算法和 BB 算法，体现了更强的节点覆盖性能。这是由于本文算法采用拨备覆盖模型，设计了节点首次覆盖评估方法，能够在较少数目的工作节点下实现网络全覆盖，因此工作节点个数要显著低于对照组算法。CA-PSS 算法主要采用最小生产树方案确定初始节点个数，随着目标节点运动速度逐次增加，对节点覆盖性能的要求也就越高，考虑到 CA-PSS 算法的网络启动时长较长，因此需要的工作节点数目也要高于本文方案。BB 算法虽然在 CA-PSS 算法基础上有一定程度的改善，然而由于工作节点聚类收敛时间较长，难以达到本文算法具备的工作节点动态更迭能力，因此在相同覆盖条件下需要的工作节点数目亦要多于本文算法。

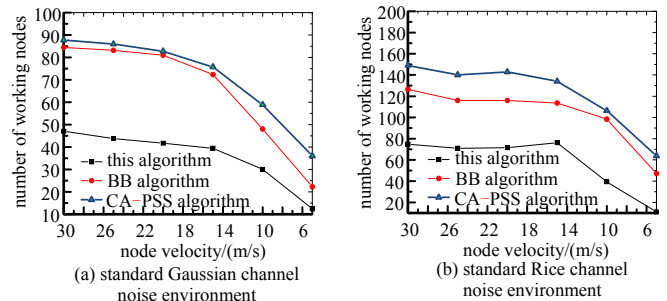


Fig.6 Number of working nodes

图 6 工作节点数目

## 4 结论

为提高无线传感网节点覆盖算法对复杂环境的适应性能，避免节点覆盖过程中存在的盲区及数据重传现象，提出一种基于拨备满足模型的无线传感网网络覆盖算法。其主要通过多个评估维度来构建覆盖模型，使其可以快速获取网络中性能卓越的工作节点，优化节点覆盖质量。随后，通过高斯分布特性优化覆盖均衡评估系数，设计了一种采用拨备方式的备用工作节点选取流程，提高了目标节点在网络运动过程中被覆盖的概率，优化了工作节点切换鲁棒性能。随后，基于区域节点的相似特性设计了工作节点首次覆盖评估方法，进一步改善网络能耗水平，提高工作节点监测性能。仿真实验证明了本文算法的有效性。

下一步，针对本文算法同时对多目标节点监测存在的性能不稳定现象，拟引入多目标监测算法改进工作节点监测性能，强化本文算法对多种实际应用场合的适应性能。

## 参考文献:

- [ 1 ] DINA Deif,YASSER Gadallah. A comprehensive wireless sensor network reliability metric for critical internet of things applications[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2017,1(1):1–18.
- [ 2 ] RUCKEBUSCH Peter,HOEBEKE Jeroen,POORTER Eli De,et al. Smart container monitoring using custom-made WSN technology: from business case to prototype[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018:1–20.
- [ 3 ] GABER Tarek,ABDELWAHAB Sarah,EIHOSENY Mohamed. Trust-based secure clustering in WSN-based intelligent transportation systems[J]. Computer Networks, 2018,146:151–158.
- [ 4 ] MUTHRAMAN Thangaraj,SUBRAMANIAN Anuradha. Energy conscious deterministic self-healing new generation wireless sensor network: smart WSN using the Aatral framework[J]. Wireless Networks, 2017,23:1267–1284.
- [ 5 ] RADOSLAW O S,MARCIN G. The channel for hidden data transmission in WSN[J]. International Journal of Electronics and Telecommunication, 2017,63(2):209–216.
- [ 6 ] WANG Hao,ZHONG Guoxin. Research of the self-healing technologies in the optical communication network of distribution automation[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018,322(5):19–28.
- [ 7 ] 孙泽宇,李传锋,邢萧飞. 联合感知无线传感网的优化覆盖控制算法[J]. 西安交通大学学报, 2016,50(10):86–92. (SUN Zeyu,LI Chuanfeng,XING Xiaofei. Optimal coverage control algorithm for joint sensing wireless sensor networks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016,50(10):86–92.)
- [ 8 ] JOANA Matos,MARGRIDA S. Lagrangian mixing simulation and quantification of scales[J]. Chemical Engineering Science, 2018,2(12):199–210.
- [ 9 ] 段鸿轩,李跃新. 基于博弈理论无线传感网覆盖空洞修复算法[J]. 计算机工程与设计, 2018,39(2):326–330. (DUAN Hongxuan,LI Yuexin. Wireless sensor network coverage void repair algorithm based on game theory[J]. Computer Engineering and Design, 2018,39(2):326–330.)
- [ 10 ] GONG Bei,WANG Yubo,LIU Xiangang. A trusted attestation mechanism for the sensing nodes of internet of things based on dynamic trusted measurement[J]. Chinese Geographical Science, 2018,15(2):100–121.
- [ 11 ] 吴熙曦,贺赞贻,刘佳. 一种新的异构无线传感网覆盖优化算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(6):958–964. (WU Xixi,HE Zanyi,LIU Jia. A new coverage optimization algorithm for heterogeneous wireless sensor networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(6):958–964.
- [ 12 ] 陶勇,沈济南. 基于相交覆盖集的最大化无线传感网寿命算法[J]. 仪表技术与传感器, 2017,12(12):93–97. (TAO Yong,SHEN Jinan. Maximizing the lifetime of wireless sensor networks based on intersecting coverage sets[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017,12(12):93–97.)
- [ 13 ] CHEN Tong,LUMLEY Thomas. Numerical evaluation of methods approximating the distribution of a large quadratic form in normal variables[J]. Computational Statistics and Data Analysis, 2019,1(39):75–81.
- [ 14 ] SU Zizhou,HU Dan,YU Xianchuan. General interval approach for encoding words into interval type-2 fuzzy sets based on normal distribution and free parameter[J]. Soft Computing, 2019,23:8187–8206.
- [ 15 ] PHI Lenguyen,NGUYEN Thihanh. Node placement for connected target coverage in wireless sensor networks with dynamic sinks[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2019,59:27–46.
- [ 16 ] GUPTA G P,JHA S. Biogeography-based optimization scheme for solving the coverage and connected node placement problem for wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2019,25:3167–3177.