

无线传感器网络覆盖控制算法研究

石为人¹ 袁久银^{1,2} 雷璐宁¹

摘要 无线传感器网络 (Wireless sensor network, WSN) 覆盖控制通常采用基于二元感知模型的几何计算方法休眠冗余节点, 其算法在实际应用中受到局限, 不够精确. 针对此问题, 本文采用概率感知模型, 提出新的覆盖控制算法, 将提高能量利用效率作为重要指标, 采用节点轮换周期工作机制, 每个周期逐个唤醒部分节点, 组成满足网络覆盖要求的覆盖集, 实现降低能耗、均衡节点能量的目的. 概率感知模型描述网络的覆盖能力更精确, 算法不受感知模型的限制, 原理简单, 易实现, 仿真结果验证了本算法的有效性.

关键词 无线传感器网络, 覆盖概率, 覆盖控制, 能耗, 能量控制
中图分类号 TP393

Research on Wireless Sensor Network Coverage Control Algorithm

SHI Wei-Ren¹ YUAN Jiu-Yin^{1,2} LEI Lu-Ning¹

Abstract Wireless sensor network (WSN) coverage control commonly makes nodes dormancy by geometry algorithm based on duality apperceiving model. The algorithm is limited in practical application and not accurate enough. Aiming at the problem, this paper adopts the probability perception model, puts forward a new coverage control algorithm, and takes the improvement of energy using efficiency as important index. It adopts the nodes alternate periodic work mechanism that in each period, nodes are aroused one by one to form a coverage set required by network coverage. It realizes energy consumption decrease and node energy equilibrium. The probability perception model describes the coverage ability of the network more accurately, and the algorithm is not limited by the perception model. It has plain principle and is easy to realize. The simulation results have validated its effectiveness.

Key words Wireless sensor network (WSN), coverage probability, coverage control, energy consumption, energy control

无线传感器网络 (Wireless sensor network, WSN) 的覆盖控制, 就是在传感器网络节点能量、无线网络通信带宽、网络计算处理能力等资源普遍受限的情况下, 通过网络传感器节点放置以及路由选择等手段, 最终使无线传感器网络的各种资源得到优化分配, 使感知、监视、传感、通信等各种服务质量得到改善. 选择无线传感器网络覆盖控制策略, 有助于网络节点能量的有效控制、感知服务质量的提高和整体生存时间的延长.

在无线传感器网络覆盖控制策略与算法研究中, 文献 [1] 讨论了如何利用节点的覆盖冗余来延长网络生存时间. 其基本思想是: 将所有节点划分为若干互不相交的节点集合, 其中每个节点集都能够完全覆盖目标区域. 通过不同节点集合之间的交替工作, 可以延长网络生存时间. 互不相交的集合越多, 网络的生存时间越长. 寻找最大数量的节点集是一个 NP 完全问题, 作者为此设计了一种集中式的启

发式算法. 文献 [2] 提出了一种基于探测的分布式节点密度控制算法. 文献 [3] 根据邻居节点之间的覆盖交叠关系, 提出了一种旨在延长网络生存时间的分布式轮换活跃/休眠节点的 Node self-scheduling 覆盖协议, 协议采用节点轮换周期工作机制. 文献 [4] 提出了一种基于目标区域网格划分的工作节点选择算法. 文献 [5] 提出了一种分布式算法, 以期在保持网络原始覆盖的前提下提高节点的能量利用效率并延长网络生存周期. 文献 [6] 提出了基于网格的有效探测及目标定位策略. 此外, 文献 [7-11] 也分别从覆盖质量、网络寿命、能量有效等方面提出了多种策略和算法.

以上文献提出休眠冗余节点的计算方法, 是基于二元感知模型, 运用几何计算的方法. 但在实际的应用场景中, 对象被监控到的概率不是个常量, 而是由对象与节点之间的距离、节点的物理特性以及节点周围邻居的多少等诸多因素决定的变量, 因此概率感知模型能够更精确地描述网络的覆盖能力. 同时, 考虑到实际中感知模型的多样化, 以上算法也存在一定的局限. 本文针对以上问题, 提出两种概率感知模型的覆盖控制算法. 算法的设计目标是在保证目标区域 100% 满足覆盖要求的前提下, 让尽可能多的节点处于睡眠状态以节约能量, 同时在选取工作节点时将网络节点能量均衡作为重要的指标. 算

收稿日期 2008-05-06 收修改稿日期 2008-12-09
Received May 6, 2008; in revised form December 9, 2008
国家教育部博士点基金 (20060611010) 资助
Supported by Ministry of National Education Doctor Program
Foundation of China (20060611010)
1. 重庆大学自动化学院 重庆 400044 2. 嘉应学院 梅州 514015
1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing
400044 2. Jiaying University, Meizhou 514015
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.00540

法采用节点轮换周期工作机制, 基本思想是周期性的确定网络覆盖集, 每个周期优先唤醒工作次数较少且感知能力较强的节点 (算法 1) 或者优先唤醒工作次数较少且位于不太容易被其他节点感知的格点处的节点 (算法 2), 组成保证网络覆盖要求的覆盖集. 时间周期的确定可根据运行环境和网络节点部署情况由用户指定.

1 感知模型与地域模型

1.1 感知模型

目前已知的感知模型可分为两种: 二元感知模型和指数感知模型.

1) 二元感知模型

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & d(i, j) < r \\ 0, & d(i, j) \geq r \end{cases} \quad (1)$$

其中 p_{ij} 为节点 i 对感应区域内目标 j 的感知概率, $d(i, j)$ 为节点 i 与目标 j 之间的几何距离, r 称为感知半径. 这个模型也称为 0-1 感知模型. 即当监控对象处在节点的感应区域内时, 它被节点监控到的概率恒为 1; 而当监控对象处在节点的感应区域之外时, 它被监控到的概率恒为 0.

2) 指数感知模型

在节点 i 不存在邻居节点的前提下, 节点 i 对感应区域内目标 j 的感知概率有如下三种定义形式

$$p_{ij} = e^{-\alpha d(i, j)} \quad (2)$$

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & d(i, j) \leq r_1 \\ e^{-\alpha[d(i, j) - r_1]}, & r_1 < d(i, j) \leq r_2 \\ 0, & d(i, j) > r_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{[1 + \alpha d(i, j)]^\beta}, & d(i, j) \leq r \\ 0, & d(i, j) > r \end{cases} \quad (4)$$

其中 $d(i, j)$ 为节点 i 与目标 j 之间的几何距离, α 和 β 为与传感器物理特性有关的类型参数. 通常 β 取值为 [1, 4] 之间的整数, 而 α 是个可调的参数.

如果传感器区域内有障碍物, 将产生信号阻塞, 从而降低节点探测效率. 若障碍物出现在从节点 i 到目标 j 的视线, 即障碍物坐标满足连接 i, j 的线段方程, 则令 p_{ij} 等于零.

从以上三种形式可以看出, 任一点的覆盖概率是一个介于 0 和 1 之间的数, 且当点 i 恰好与 j 重合时 $d(i, j) = 0$, 节点的感知概率等于 1.

如果节点存在邻居节点, 由于邻居节点的感应区域与节点自身的感应区域存在交叠, 所以如果点 j 落在交叠区域内, 则点 j 的感知概率会受到邻居节点的影响. 假设节点 i 存在 N 个邻居节点

n_1, n_2, \dots, n_N , 节点 i 以及邻居节点的感应区域分别记为 $R(i), R(n_1), R(n_2), \dots, R(n_N)$, 则这些感应区域的重叠区域为 $M = R(i) \cap R(n_1) \cap R(n_2) \cap \dots \cap R(n_N)$. 假设每个节点对目标的感知是独立的, 根据概率计算公式, M 中任一点 j 的感知概率有如下两种计算方式, 分别为

$$G_j = \sum_{k=1}^N p_{kj} - \sum_{1 \leq i < k < l \leq N} p_{ij} p_{kj} + \sum_{1 \leq i < k < l \leq N} p_{ij} p_{kj} p_{lj} - \dots + (-1)^{N-1} p_{1j} p_{2j} p_{Nj} \quad (5)$$

或者

$$G_j = 1 - (1 - p_{ij}) \prod_{k=1}^N (1 - p_{n_k j}) \quad (6)$$

1.2 地域模型

本文算法将目标区域用平行于 x 轴和平行于 y 轴的一系列直线划分为网格^[4] (如图 1), 其粒度 (相邻网格点之间的距离) d 由期望的放置精确度决定, 一般来说, 粒度越小精确度越高.

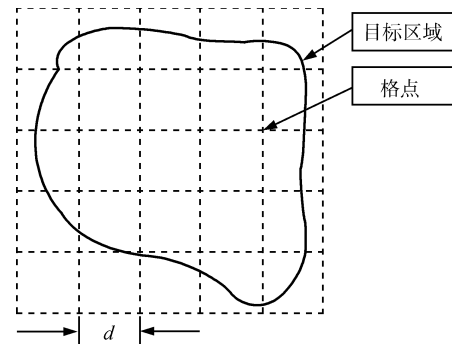


图 1 目标区域网格划分

Fig. 1 Grid partition of target area

1.3 感知矩阵及目标感知概率

假设感知区域划分为 $n \times n$ 的网格, 于是有 n^2 个格点, 传感器感知矩阵 $D = [p_{ij}]$ 为 n^2 行 n^2 列矩阵, 共有 n^4 个元素. 其中 p_{ij} 表示格点 i 处的节点对位于格点 j 处的目标的感知概率. 假设网络中共有 $M (M \leq N)$ 个节点, 且节点对目标的感知是独立的, 则位于格点 i 处的目标被感知的概率为

$$G_i = \sum_{k=1}^M p_{ki} - \sum_{1 \leq j < k < l \leq M} p_{ji} p_{ki} + \sum_{1 \leq j < k < l \leq M} p_{ji} p_{ki} p_{li} - \dots + (-1)^{M-1} p_{1i} p_{2i} \dots p_{Mi}, \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

其中 $N = n^2$.

2 基于概率感知模型的覆盖控制算法

2.1 网络运行环境

- 1) 网络中有足够多的节点,可以保证目标区域 100% 满足覆盖要求;
- 2) 节点随机部署在感知目标区域,算法运行前,所有节点都处于睡眠状态;
- 3) 节点无法自由移动;
- 4) 节点具有相同的初始能量、相同的处理和通信能力,节点在网络中的地位平等;
- 5) 节点之间连接对称.

在如下的算法中,假设所有节点都位于格点上.先讨论格点上的目标覆盖问题,后讨论非格点上的目标覆盖问题.

2.2 覆盖概率极限

用 M_{\min} 表示目标被发现的概率极限,即当目标 i 被感知的概率 G_i 满足: $G_i \geq M_{\min}$ 时,目标 i 被发现,其中 M_{\min} 表示目标被发现的最小概率. M_{\min} 的确定与实际应用环境、软硬件设备条件及服务要求等因素有关,可由用户指定.

2.3 算法一

算法的主要思想是每个周期优先唤醒工作次数较少且感知能力较强的节点组成保证网络覆盖要求的覆盖集.这样做的原因主要有两点: 1) 工作次数较少的节点有较多的能量.让能量较多的节点工作,能量较弱的节点休眠有利于均衡网络能量,不会导致个别节点的过早死亡. 2) 选用感知能力较强的节点可以减少覆盖集的节点个数.算法的终止条件是:按照所设规则唤醒了足够多的节点,它们的覆盖满足网络的覆盖要求,即所有格点处的目标被感知的概率不小于 M_{\min} .为了简单,我们用

$$D_i = p_{i1} + p_{i2} + \cdots + p_{iN} \quad (8)$$

描述节点 i 的感知能力, D_i 越大,节点 i 的感知能力越大,其值在算法执行之前计算,作为每个周期计算的输入.以下是一个周期覆盖集的计算过程,其中 $n(i)$ 表示节点 i ($i = 1, 2, \cdots, M$) 的工作次数.

步骤 1. 输入 $N, M_{\min}, D, D_i, n(i)$ ($i = 1, 2, \cdots, M$)

步骤 2. 计算节点唤醒顺序表.根据前面工作周期提供的每个节点的工作次数,将工作次数相同的节点归于同一个集合,并按工作次数从小到大依次排列.假设共有 l 个集合,表示为 w_i ($i = 1, 2, \cdots, l$),其中每个集合 w_i 中的节点工作次数相同且少于集合 w_{i+1} 中节点工作次数.对 w_i ($i = 1, 2, \cdots, l$) 中节点的感知能力从大到小排序,设为 $D_{i1} \geq D_{i2} \geq \cdots \geq D_{il_i}$ (l_i 为 w_i 中的节点数

$i = 1, 2, \cdots, l$).

由此得到一个综合节点工作次数和感知能力的节点唤醒顺序表: $D_{11}, D_{12}, \cdots, D_{1l_1}, D_{21}, D_{22}, \cdots, D_{2l_2}, \cdots, D_{l1}, D_{l2}, \cdots, D_{ll_l}$ (其中 $\sum_{i=1}^l l_i = M$).

为便于叙述,不妨设为: D_1, D_2, \cdots, D_M .

步骤 3. 在步骤 2 的基础上求覆盖集.伪代码如下:

```

procedure
begin
  Wset = emptyset /* 覆盖节点集,初始为空集 */
  for i = 1 to M do /* 按顺序表逐个添加节点到覆盖集 */
    Wset = Wset ∪ {i} /* 节点 i 加入覆盖集 */
    n(i) = n(i) + 1 /* 节点 i 的工作次数 */
    for k = 1 to N do
      Gk /* 计算 Wset 中节点工作时,格点 k 处的目标被感知的概率 Gk */
    end
  if min1 ≤ k ≤ N {Gk} ≥ Mmin, then the arithmetic is ending,
  output the coverage set.
end

```

2.4 算法二

算法的主要思想是每个周期优先唤醒工作次数较少且位于不太容易被其他节点感知的格点处的节点组成覆盖集.调用位于不太容易被其他节点感知的格点处的节点可以较快提高网络的感知概率.在如下公式中

$$G_i = \sum_{k=1}^M p_{ki} - \sum_{1 \leq j < k < l \leq M} p_{ji} p_{ki} + \sum_{1 \leq j < k < l \leq M} p_{ji} p_{ki} p_{li} - \cdots + (-1)^{M-1} p_{1i} p_{2i} \cdots p_{Mi}$$

令 $p_{ii} = 0$,可计算出格点 i 处的目标在其他节点都开启时被感知的概率.在算法执行之前计算,作为每个周期计算的输入.以下是一个周期覆盖集的计算过程:

步骤 1. 输入 $N, M_{\min}, D, p_i, n(i)$ ($i = 1, 2, \cdots, M$)

步骤 2. 计算节点唤醒顺序表.根据前面工作周期提供的每个节点的工作次数,将工作次数相同的节点归于同一个集合,并按工作次数从小到大依次排列.假设共有 l 个集合,表示为 w_i ($i = 1, 2, \cdots, l$),其中每个集合 w_i 中的节点工作次数相同且少于集合 w_{i+1} 中节点工作次数.对 w_i ($i = 1, 2, \cdots, l$) 中节点所处格点处的目标被感知的概率

从小到大排序, 设为 $p_{i1} \leq p_{i2} \leq \dots \leq p_{il_i}$ (l_i 为 w_i 中的节点数, $i = 1, 2, \dots, l$).

由此得到一个综合节点工作次数和被感知概率的节点唤醒顺序表: $p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1l_1}, p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2l_2}, \dots, p_{l1}, p_{l2}, \dots, p_{ll_l}$ (其中 $\sum_{i=1}^l l_i = M$).

为便于叙述, 不妨设为: P_1, P_2, \dots, P_M .

步骤 3. 在步骤 2 的基础上求覆盖集. 伪代码同算法一的步骤 3.

如果网络中不同的目标有不同的感知极限, 以上两种算法仍然适用, 只要考虑每个目标在有节点加入时各自分别满足其覆盖概率极限即可.

2.5 算法复杂度分析

以上两种算法的复杂性主要来自于排序, 用最好的方法排序, 两种算法的复杂度均为 $O(N^2 \log N)$.

3 非网格点的覆盖

上述的分析过程中只考虑了网格点的覆盖要求, 为提供传感器区域的充分覆盖, 也需要确保非网格点被发现的概率不小于门限 M_{\min} , 由文献 [4] 可知, 下面的引理成立.

引理 1. 假设传感器感知范围无限制, 网格点 i 和一个可能的传感器位置 j 之间的距离为 d^* , 粒度为 d . 如果用 $d^* + d/\sqrt{2}$ 的值来计算由于位于点 j 的传感器对网格点 i 的覆盖, 并且可用的传感器的数目足够, 那么当以上两种算法终止时, 所有非网格点被发现的概率不小于门限 M_{\min} .

事实上, 设节点 j 与网格点 i 之间的距离为 d , 粒度为 d^* , 我们用 $d^* + d/\sqrt{2}$ 替代 d 计算节点 j 对网格点 i 的覆盖概率. 如果网格点 i 的覆盖概率不小于门限 M_{\min} , 则以网格点 i 为圆心, $d/\sqrt{2}$ 为半径的区域的覆盖概率也不小于门限 M_{\min} (图 2). 只要每个网格点的覆盖概率都这样计算, 就可保证所有非网格点的覆盖概率不小于门限 M_{\min} .

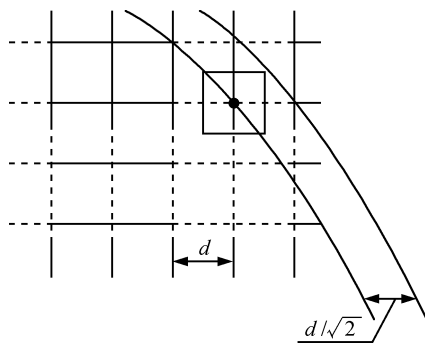


图 2 非网格点的覆盖

Fig. 2 Coverage of non-mesh-points

4 算法仿真与性能分析

为了测试算法性能, 本文使用 Omnet++^[12] 仿真工具对算法进行仿真实验, 测试在不同的感知概率极限下, 感知模型对网络性能的影响. 感知模型选取具有代表性的指数感知模型 (3) ($r_1 = 10$ m, $r_2 = 12$ m, $\alpha = 0.6$), 与二元感知模型 (1) ($r = 10$ m, 与 $r_1 = 10$ m 对应), 节点通讯半径均为 25 m. 又由于本文的算法与文献 [3] 的算法比较接近, 因此将它们与文献 [3] 进行对比. 文献 [3] 的感知模型为二元模型, $r = 10$ m.

假设节点的工作寿命为 1 000 min, 每个周期的持续时间为 10 min.

4.1 仿真环境

节点均匀分布在 160 m \times 160 m 的方形区域内, 为了排除有边界点始终工作的情形, 目标区域设为居中的 140 m \times 140 m 的正方形. 为了消除边界影响, 只统计居中的 100 m \times 100 m 方形区域, 并设有 400 个节点分布于这个区域内, 网格划分粒度 $d = 1$ m. 所有实验重复十次, 取均值.

4.2 单位时间网络总体能量消耗

不同种类的工作节点每单位时间消耗的能量差别很大. 不失一般性, 用 U_e 表示工作节点每单位时间消耗的能量. 我们先讨论目标区域 100% 达到覆盖概率极限时, 单位时间内网络总体能量消耗的上界和下界. 显然当网络中所有节点同时工作时, 单位时间内网络总体能量消耗最大, 共有 400 个节点, 单位时间内网络总体能量消耗上界为 $400U_e$; 下界随节点的部署不同而有差异, 不能给出一个统一的结果. 根据文献 [12] 可以给出一个理想下界. 当一个目标只有一个节点覆盖时, 若感知模型为 (3), 要保证目标达到覆盖概率极限, 则 r_2 必须满足

$$e^{-\alpha(r_2-r_1)} \geq M_{\min}$$

即

$$r_2 \leq \frac{\ln M_{\min}}{-\alpha} + r_1$$

为了求出单位时间内网络总体能量消耗的理想下界, 取 $r_2 = \frac{\ln M_{\min}}{-\alpha} + r_1$. 由文献 [12] 可知, 要使面积为 A 的区域达到覆盖概率极限, 所需最少节点数为 $\frac{2A}{\sqrt{27}r_2^2}$, 从而要使面积为 $10\,000$ m² 的区域达到覆盖概率极限, 单位时间内网络总体能量消耗理想下界为 $\frac{20\,000}{\sqrt{27}r_2^2} U_e$.

实验考察在目标区域 100% 达到覆盖概率极限, 且运行十个周期以后, 各算法单位时间内网络总体

能量消耗情况, 并与理想下界作比较, 仿真结果如图 3.

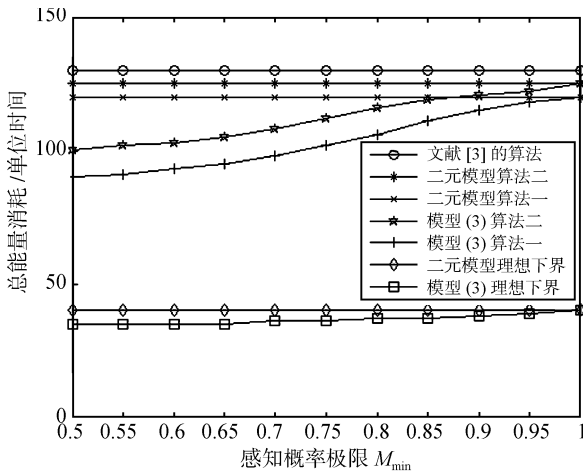


图 3 单位时间总的能量消耗

Fig. 3 Total energy consumption per unit of time

从图 3 可以看出, 概率感知模型 (3) 比二元感知模型大约平均要节约 15% 的能量, 原因在于二元感知模型对感知能力的描述不够精确, 造成了感知能力的部分浪费, 从而导致能量消耗的升高. 同时, 对于相同的二元感知模型, 在节能方面, 本文的算法要稍好于文献 [3] 的算法, 原因在于几何方法休眠节点, 仍有部分节点有较大的覆盖交叠, 本文算法由于采取的是逐个唤醒, 描述更加细腻, 唤醒节点数更少.

4.3 单位时间节点能量均衡

用标准偏差描述节点能量均衡, 实验考察十个周期以后各算法的能量均衡情况, 仿真结果如图 4.

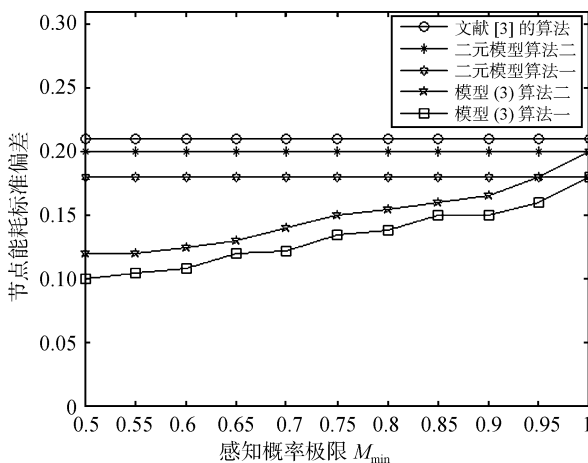


图 4 节点能量消耗标准偏差

Fig. 4 Standard deviation of energy consumed by single nodes

从图 4 可以看出, 本文算法的节点能量标准偏差较小, 更有利于节点的能量均衡, 原因在于在选择节点时优先唤醒能量高的节点, 并且逐个唤醒的机制使选择更细腻.

4.4 网络的一半寿命

为了考察网络的寿命长度, 我们规定从节点开始部署到还剩一半节点存活的时间为网络的一半寿命.

从图 5 可以看出, 概率感知模型 (3) 比二元感知模型的一半寿命大约平均要延长 15%. 同时, 对于相同的二元感知模型, 本文算法的网络一半寿命要长于文献 [3] 的算法.

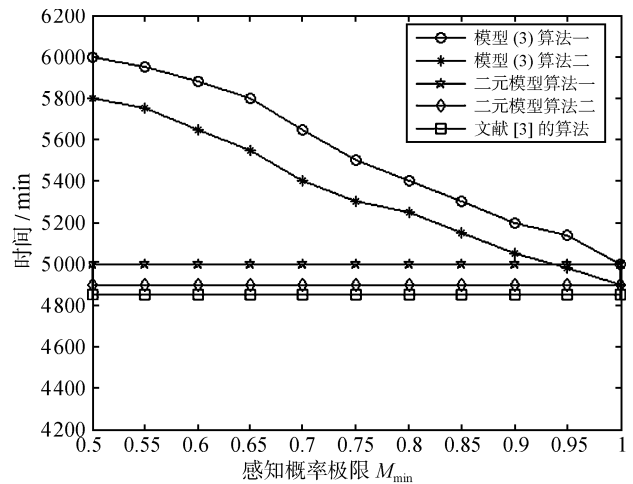


图 5 网络的一半寿命

Fig. 5 Half-life of the network

5 结论

本文针对基于二元感知模型覆盖控制算法不够精确、实际应用受限的问题, 提出基于概率感知模型的覆盖控制算法, 算法不针对具体感知模型, 不受感知模型的限制. 在节点高密度部署的网络环境中, 算法将提高能量利用效率作为重要指标, 周期性地确定满足网络覆盖要求的覆盖集. 仿真结果表明算法可有效地降低网络能耗、均衡节点能量, 延长网络寿命. 算法适用于需要长时间全面收集监测区域完整精确信息的各种网络.

进一步的研究将面向基于概率感知模型的连通覆盖控制及路由问题, 重点研究算法开销、执行时间与能量均衡等的折衷策略.

References

- Slijepcevic S, Potkonjak M. Power efficient organization of wireless sensor networks. In: Proceedings of the International Conference on Communications. Helsinki, Finland: IEEE, 2001. 472-476

- 2 Ye F, Zhong G, Lu S W, Zhang L X. PEAs: a robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks. In: Proceedings of the 10th International Conference on Network Protocols. Providence, USA: IEEE, 2002. 200–201
- 3 Tian D, Georganas N D. A node scheduling scheme for energy conservation in large wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2003, **3**(2): 271–290
- 4 Carbuarn B, Grama A, Vitek J, Carbuarn O. Coverage preserving redundancy elimination in sensor networks. In: Proceedings of the 1st IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. Santa Clara, Mexico: IEEE, 2004. 377–386
- 5 Chakrabarty K, Iyengar S S, Qi H R, Cho E. Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks. *IEEE Transactions on Computers*, 2002, **51**(12): 1448–1453
- 6 Vashistha S, Azad A P, Chockalingam A. Efficient scheduling of sensor activity for information coverage in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Communication Systems Software and Middleware. Bangalore, India: IEEE, 2007. 1–8
- 7 Vashistha S, Azad A P, Chockalingam A. Energy efficient area monitoring using information coverage in wireless sensor networks. In: Proceedings of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Washington D. C., USA: IEEE, 2007. 1–10
- 8 Wang B, Wang W, Srinivasan V, Chua K C. Information coverage for wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 2005, **9**(11): 967–969
- 9 Zhao Q, Gurusamy M. Maximizing network lifetime for connected target coverage in wireless sensor networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. Washington D. C., USA: IEEE, 2006. 94–101
- 10 Fang C, Low C P. Redundant coverage in wireless sensor networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE, 2007. 3535–3540
- 11 Yen Y S, Hong S, Chang R S, Chao H C. An energy efficient and coverage guaranteed wireless sensor network. In:

Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Washington D. C., USA: IEEE, 2007. 2923–2928

- 12 Willams R. *The Geometrical Foundation of Natural Structure: A Source Book of Design*. New York: Dover Publications, 1979. 51–52



石为人 重庆大学自动化学院教授. 主要研究方向为信息控制与智能系统、无线传感器网络及其应用、嵌入式系统.

E-mail: wrs@cqu.edu.cn

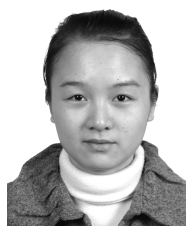
(SHI Wei-Ren Professor at the College of Automation, Chongqing University. His research interest covers information control and intelligence system, wireless sensor network and its application, and embedded system.)



袁久银 重庆大学博士研究生, 广东省嘉应学院数学系讲师. 主要研究方向为普适计算、无线传感器网络及其应用. 本文通信作者. E-mail: yjy@jyu.edu.cn

(YUAN Jiu-Yin Ph.D. candidate at Chongqing University and lecturer at Jiaying University. His research interest covers pervasive computing, wireless

sensor network and its application. Corresponding author of this paper.)



雷璐宁 重庆大学硕士研究生. 主要研究方向为无线传感器网络及其应用.

E-mail: starttofly@sina.com.cn

(LEI Lu-Ning Master student at Chongqing University. Her research interest covers wireless sensor network and its application.)