

高效无线传感器网络强 k -栅栏覆盖节能算法

郭新明^{1,2*}

(1. 咸阳师范学院 信息工程学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 东南大学 计算机科学与工程学院, 南京 210096)

(* 通信作者电子邮箱 guoxinming118@126.com)

摘要: 为了进一步降低监测穿越行为的无线传感器网络强 k -栅栏覆盖的能耗, 首先证明了强 k -栅栏覆盖最小能耗问题是 NP 难的, 进而提出了一个节点感知功率可调的启发式节能算法 HARP。该算法根据栅栏中相邻节点的间距和前向节点的状态制定了 4 种节点感知半径的计算规则, 再根据节点感知半径的大小确定节点的感知功率等级, 在保证传感栅栏贯通的前提下, 尽可能降低栅栏整体的能耗。理论分析和仿真实验表明, 在相同的栅栏波动条件下, HARP 算法的适应性和稳定性更强, 网络平均能耗约为 Heuristic-2 算法的 62%, 网络的生存期进一步延长。

关键词: 无线传感器网络; 强 k -栅栏覆盖; NP 难; 启发式算法; 节能

中图分类号: TP393.01 **文献标志码:** A

Energy-efficient algorithm of strong k -barrier coverage in wireless sensor network

GUO Xinming^{1,2*}

(1. School of Information Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang Shaanxi 712000, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: To further reduce the energy consumption of Wireless Sensor Network (WSN) strong k -barrier coverage for crossing behavior detection, the minimum energy consumption of strong k -barrier coverage was proved to be NP-hard firstly, and then a heuristic algorithm named HARP which could adjust the sensing power of nodes was proposed. In HARP, four rules of computing node's sensing radius were put forward according to the distance between wireless nodes in barriers and the state of the preorder nodes, and then sensing power of nodes was determined based on the size of node's sensing radius. On the premise that sensing barriers must be connected, the energy consumption of overall barriers should be reduced as much as possible. The theoretical analysis and simulations show that the adaptability and stability of HARP are stronger than the others, and its average energy consumption is about 62% of Heuristic-2's under the same network conditions of barrier fluctuation, which means the network lifetime is prolonged.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); strong k -barrier coverage; NP-hard; heuristic algorithm; energy-efficiency

0 引言

随着无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 技术的不断进步, WSN 的应用迅速渗透到许多领域, 如在边境线上部署无线传感节点来监测非法越境者; 在森林或易燃物品堆积场所周边部署无线传感节点以监测火灾发生和火情蔓延情况; 以及在敌营周边布设无线传感节点来监视敌方的兵力部署和武器配备情况等^[1]。这种通过在带状区域部署无线传感节点来监测穿越该区域移动目标的技术被称为栅栏覆盖^[2], 是无线传感器网络领域的一个研究热点。

栅栏覆盖的概念是由 Gage^[3] 首次在机器人领域中提出的, Kumar 等^[1] 首次给出了强栅栏和弱栅栏的定义, 提出了一个判定监控区域是否被 k -栅栏覆盖的集中式算法, 并推导出无线传感节点随机部署的区域中存在弱 k -栅栏覆盖的临界条件。文献[4]推导出无线传感节点随机部署的区域中存在强 k -栅栏覆盖的临界条件, 并设计了一个在大规模无线传感器网络中搜索传感器栅栏的算法。文献[5]在证明基于概率感知模型的栅栏最小权重问题是 NP-hard 问题的基础上, 提出了一个有效构建最小权重 k -栅栏的近似算法 (Minimum Weight Barrier Algorithm, MWBA), 来选择活动节点监测穿越

行为。文献[6]在分析栅栏能耗和容错性的基础上, 提出了一个容错 k -栅栏覆盖协议 (Accumulation Point for Barrier Coverage, APBC), 该协议能够很好地平衡节点能耗, 延长网络的生命周期。文献[7]证明了在传感器节点移动能力有限的前提下, 利用网格划分模型构建的 1-网格栅栏最小移动距离和问题是 NP-hard 的, 于是提出了构建 1-栅栏覆盖的近似算法——基准网格栅栏构建 (Constructing Baseline Grid Barrier, CBGB) 算法, 进而设计了一个基于分治策略的 k -栅栏覆盖构建算法。文献[8]将移动模型引入到栅栏覆盖中, 能够使用较少的节点以较高的概率发现入侵者。上述的这些研究工作, 都要求无线传感节点采用固定的传感半径进行工作, 因此导致栅栏中节点的平均能耗过高。针对这一缺陷, 文献[9]在证明感知功率分级的无线传感栅栏最小能耗是一个 NP-hard 问题的基础上, 提出了基于节点间距离的 k -栅栏最小能耗启发式算法 Heuristic-2, 有效地降低了网络能耗, 但该算法忽略了栅栏中节点分布疏密不均的客观事实, 致使栅栏中相邻节点间距波动较大区段的节能效果明显低于其他区段。

本文针对感知功率分级的无线传感器强 k -栅栏覆盖网络中, 节点间距波动较大区段能耗偏高的问题, 提出了一个

前向节点相关的启发式算法 HARP (Heuristic Algorithm Relating to the Preorder Nodes)。该算法充分考虑了栅栏中节点间距波动的因素, 根据栅栏中节点前向节点的感知半径确定节点的感知功率, 算法的适应性和稳定性明显优于 Heuristic-2, 网络的整体能耗进一步降低, 生存时间更长。

1 网络模型与问题描述

1.1 网络模型

假设狭长的带状监控区域 M 为一矩形区域, 长为 L , 宽为 W 。无线传感器节点被随机部署在区域 M 内, 以监控区域左下角作为坐标原点, Y 轴的正方向沿着区域 M 的左边界垂直向上, X 轴的正方向沿着区域 M 的下边界水平向右。监控区域 M 内的无线传感器节点集合为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, 节点个数为 N , 节点 $s_i \in S$ 的坐标为 (x_i, y_i) ($0 \leq x_i \leq L, 0 \leq y_i \leq W$)。集合 S 中的所有节点都能够通过定位装置获知自己在区域 M 中的坐标, 但无法改变自身的位置。每个节点的感知功率可以在 $l+1$ 个等级 $(0, p_1, p_2, p_3, \dots, p_l)$ 之间任意选择, 且 $0 \leq p_1 \leq p_2 \leq p_3 \leq \dots \leq p_l$, p_l 是节点的最大感知功率。节点的感知半径也可以在 $l+1$ 个等级 $(0, r_1, r_2, r_3, \dots, r_l)$ 之间调整, 其中 $0 \leq r_1 \leq r_2 \leq r_3 \leq \dots \leq r_l$, r_l 是节点的最大感知半径。当节点的感知半径为 r_i 时节点的感知功率为 p_i , 节点的通信半径 $R_c \geq 2r_i$ 。

定义1 感知圆盘。以传感器节点 $s_i \in S$ 在监控区域 M 内的坐标 (x_i, y_i) 为圆心, 以传感器的感知半径为半径的圆形区域称为该传感器的感知圆盘。若感知半径为 0, 节点感知模块休眠; 否则, 节点以 l 个感知功率等级中的某一个感知功率工作。

定义2 穿越路径。起点和终点分别在监控区域 M 的两边, 并将 M 分割成两个部分的任意曲线段称为穿越路径。

定义3 入侵者。沿任意穿越路径穿过带状监控区域 M 的移动目标称为入侵者。

定义4 强栅栏。由感知圆盘相叠或相切的传感器节点构成的一条连接监控区域两端的路径称为强栅栏, 它使得穿越监控区域的入侵者至少被一个无线传感器感知。

定义5 强 k -栅栏覆盖。如果入侵者沿着任意穿越路径通过监控区域 M 时, 至少被 k 个无线传感器节点感知, 则称该带状监控区域 M 是强 k -栅栏覆盖的。

如果说带状监控区域 M 是强 k -栅栏覆盖的, 那么区域 M 内至少存在 k 条由传感器节点的感知圆盘彼此相接形成的不相交的传感栅栏。图1是一个强2-栅栏覆盖的示意图, 其中灰色节点的感知圆盘形成了两条强栅栏, 入侵者沿任意穿越路径通过带状区域 M 时, 至少会被2个传感器节点感知。图中①和②是两条不同方向的穿越路径, 而③和④不是穿越路径。

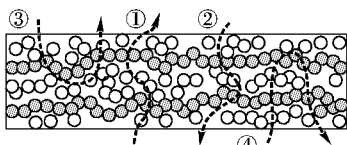


图1 强2-栅栏覆盖示意图

1.2 强栅栏覆盖的节能问题

在无线传感器节点随机部署的条件下, 为了保证带状监控区域中能够形成强栅栏覆盖, 必须进行高密度部署。但是随机部署方式无法保证无线节点的分布是绝对均匀的, 因此监控区域中构建的栅栏内也会出现节点疏密程度不一的情况, 如果栅栏中的节点都工作在最大感知半径状态(感知功

率最大), 那么栅栏中节点密集区段的平均能耗就偏高。如图2所示, 节点 A, B, C, D, E, F, G, H 构成一条传感栅栏, 其中 $DEFG$ 区段节点的分布较为密集, 如果将节点 D, E, F, G 的感知圆盘调整到图中虚线圈所示的大小, 则传感栅栏依然贯通, 且栅栏的能耗会明显降低。可见, 栅栏中节点疏密程度的不均性为其能耗提供了较大的压缩空间。

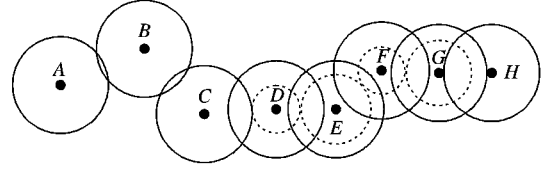


图2 栅栏节能示意图

2 强 k -栅栏覆盖最小能耗问题分析

定义6 强1-栅栏覆盖最小能耗问题。从带状监控区域 M 的无线传感器节点集合 S 中找到一个子集 S_c 以及 S_c 中每个节点的感知功率 p_i^j (无线节点 $j, j \in S_c$ 的感知功率为 p_i 级), 使得由 S_c 形成的强传感栅栏的无线节点功率和 $\sum_{j \in S_c} p_i^j$ 最小。

在许多实际应用中, 为了实现高可靠性的防御效果, 需要在监控区域中构建多条强栅栏, 以提高监测入侵者的概率。与强1-栅栏覆盖最小能耗问题一样, 强 k -栅栏覆盖也同样存在最小能耗问题。

定义7 强 k -栅栏覆盖最小能耗问题。从带状监控区域 M 的无线传感器节点集合 S 中找到 k 个不相交的子集 $S_{c,1}, S_{c,2}, \dots, S_{c,k}$ 以及这些子集中每个节点的感知功率 p_i^j (无线节点 $j \in S_{c,t}$ 的感知功率为 p_i 级), 使得由 $S_{c,1}, S_{c,2}, \dots, S_{c,k}$ 形成的 k 条不相交的强传感栅栏的无线节点功率和 $\sum_{t=1}^k \sum_{j \in S_{c,t}} p_i^j$ 最小。

显然, 强1-栅栏覆盖最小能耗问题是强 k -栅栏覆盖最小能耗问题的一种特殊情况。

带状监控区域中的无线传感器网络可以表示成图3所示的网络覆盖图, 即 $G = (V, E)$, 其中: V 表示网络中所有点的集合 (包含虚拟源节点 h 和虚拟目标节点 t), E 表示所有边的集合 (包含与 h, t 连接的虚线边)^[10]。长方形方框代表带状监控区域 M , 方框中的圆表示无线传感器节点, 节点之间的连线表示两个节点的传感圆盘相交 (即节点间无传感空隙), 若某节点和 h 或 t 之间用虚线连接, 则说明该节点的传感圆盘与带状区域的左边界或右边界相交。若带状区域被强 k -栅栏覆盖, 那么 h 和 t 之间一定是 k 连通的^[11]。

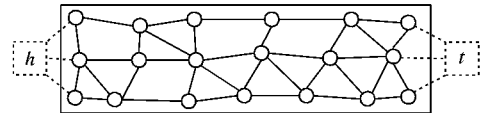


图3 带状区域的无线传感器网络覆盖图

为了解决强 k -栅栏覆盖的最小能耗问题, 对覆盖图 G 进行如下转化: 将 S 中的每个节点 s_i 拆分成两个节点 q_i^l 和 q_i^h , 并在这两个节点之间构造 l 条内边 $\{q_i^l, q_i^h\}, \{q_i^2, q_i^h\}, \dots, \{q_i^l, q_i^h\}$, 即节点 s_i 的内边集为 $e(s_i) = \{\{q_i^l, q_i^h\}, \{q_i^2, q_i^h\}, \dots, \{q_i^l, q_i^h\}\}$, 定义 $e(s_i)$ 中每条边 $\{q_i^x, q_i^h\}$ 的能耗为 p_x ; 用 $\{q_{u,m}^h, q_{v,n}^h\}$ 表示节点拆分后从节点 s_u 到节点 s_v 的边, 其能耗为 0, 节点 s_u 的感知功率为 p_m , 节点 s_v 的感知功率为 p_n , 且节点 s_u 与 s_v 的感知圆盘相交; 所有与虚拟节点 h 或 t 连接的虚线边的能耗为 0; 所有边的数据传输容量定义为 1。转化后的网络覆盖图可以表示成 $G_a = (V_a, E_a, C_a, U_a)$, V_a 表示网络

中所有点的集合, E_a 表示所有边的集合, C_a 表示所有边的能耗, U_a 表示所有边的传输容量。

从网络覆盖图 G_a 可知强 k -栅栏覆盖的最小能耗问题可以转化成网络最小费用流问题进行求解。用一个二值变量 $x_{i,j}$ 表示从节点 i 到节点 j 是否有数据流, 若从节点 i 到节点 j 有数据流, 则 $x_{i,j} = 1$, 否则 $x_{i,j} = 0$; 用 c_{ij} 表示从节点 i 到节点 j 的边的能耗。至此, 可以将强 k -栅栏覆盖的最小能耗问题表示成如下形式:

$$\min \sum_{(i,j) \in E_a} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{(i,v) \in E_a} x_{i,v} - \sum_{(u,i) \in E_a} x_{u,i} = \begin{cases} k, & i = h \\ 0, & i \in V_a - \{h, t\} \\ -k, & i = t \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{(u,v) \in e(s_i)} x_{u,v} = 1, \forall e(s_i) \quad (3)$$

$$x_{i,j} = 0, 1 \quad (4)$$

用 X 表示由所有边的 $x_{i,j}$ 值组成的列向量, 用 C 表示与 X 具有相同顺序的边的能耗 c_{ij} 组成的列向量, 则式(1) ~ (4) 的整数线性规划形式为:

$$\min C^T X \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \quad AX = b \quad (6)$$

$$DX = d \quad (7)$$

$$0 \leq X \leq 1 \quad (8)$$

其中: 约束(6)来源于式(2), A 是 $|V_a| \times |V_a|$ 的系数矩阵, a_{ij} 表示边 (i,j) 在 A 中对应的系数, a_{ij} 的值如式(9)所示; 约束(7)来源于式(3), D 是 $|V_a - 2| \times |V_a - 2|$ 的系数矩阵, d_{ij} 表示边 (i,j) 在 D 中对应的系数, d_{ij} 的值如式(10)所示。由式(5) ~ (8)可知, 强 k -栅栏覆盖的最小能耗问题是 NP-hard 的^[11], 因此在多项式时间内求得该问题的最优解是困难的。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & (i,j) \in E_a \\ 0, & (i,j) \notin E_a \end{cases} \quad (9)$$

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & (i,j) \in e(s_i); s_i \in S \\ 0, & (i,j) \notin e(s_i) \end{cases} \quad (10)$$

3 强 k -栅栏覆盖的节能算法

由于强 k -栅栏覆盖最小能耗问题是 NP-hard 的, 因此, 需要给该问题设计一个多项式时间近似算法, 求得该问题的次优解。本章针对该问题提出了一个前向节点相关的启发式算法 HARP。如果带状监控区域是强 k -栅栏覆盖的, 若每条栅栏的能耗取到最小值, 则 k -栅栏覆盖的能耗一定最小, 所以强 k -栅栏覆盖最小能耗问题可以转化为求每条栅栏的最小能耗问题, 这里说的最小值均指次优解。

3.1 节能理论分析

由于栅栏中节点密集区段具有较大的能耗压缩空间, 因此, 在保证栅栏传感链路连通的情况下, 通过降低栅栏中节点的感知功率能有效降低监控区域中栅栏覆盖网络的能耗。

定义 8 栅栏边。强栅栏中任意两个相邻的无线传感器节点构成一条栅栏边。显然, 一条栅栏是由若干条栅栏边首尾相接构成的。

定义 9 节能增益。若无线节点的感知功率减小后, 其感知圆盘仍能和栅栏中两个相邻节点的感知圆盘相交, 那么将该节点最大感知功率与减小后感知功率的差称为该节点的节能增益。

在本文中, 无线节点的能耗模型为 $E = \mu r^2$, 其中: r 为感知半径; μ 为能量消耗系数, 是常数^[12]。本文的研究工作只

考虑传感器节点传感模块的能耗, 暂不考虑通信、计算等其他能耗。

定理 1 栅栏边中两个无线节点感知半径为栅栏边长度的一半时, 该栅栏边的能耗最小。

证明 假设栅栏边的长为 l , 节点的最大感知半径为 r , 栅栏边的两个无线节点的感知半径分别为 r_1, r_2 。

$$\text{栅栏边的能耗 } E_c = \mu r_1^2 + \mu r_2^2 = \mu(r_1^2 + r_2^2)。$$

由传感栅栏的连通性可知 $l \leq r_1 + r_2 \leq 2r$, 如图 4 所示 r_1 和 r_2 的取值范围在第一象限中直线 $r_2 = -r_1 + l$ 和 $r_2 = -r_1 + 2r$ 之间的阴影区域, 因此可以得证, 当 r_1 和 r_2 均为 $l/2$ 时, 栅栏边的能耗 E_c 最小。

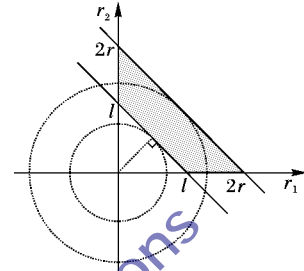


图 4 r_1 和 r_2 的取值范围

定理 2 若不考虑传感栅栏中节点间的相互影响, 那么短栅栏边的节能增益比长栅栏边大。

证明 假设某栅栏中有两条栅栏边 l_1, l_2 , 且 $l_1 > l_2$ 。

由定理 1 可知, 栅栏边的能耗在两个节点的感知半径为栅栏边长的一半时最小, 因此栅栏边 l_1, l_2 的节能增益分别为 $G_1 = 2\mu r^2 - 2\mu(l_1/2)^2$, $G_2 = 2\mu r^2 - 2\mu(l_2/2)^2$, 因为 $l_1 > l_2$, 所以 $G_1 < G_2$ 。

由定理 2 知, 短栅栏边的节能增益大于长的栅栏边。如果在栅栏节能处理的过程中首先考虑较短的栅栏边, 就可能造成传感栅栏的中断, 为了保证节能处理后的传感栅栏依然连通, 栅栏的节能处理应从较长的栅栏边开始。

3.2 节点感知半径的调整规则

定义 10 栅栏边前方向。如果栅栏边一端的无线节点 x 的感知半径已经确定, 而另一端 y 的感知半径尚未确定, 则称从 x 到 y 的方向为该栅栏边的前方向, 记为 $x \rightarrow y$ 。

定义 11 栅栏平均波动差。栅栏中所有相邻栅栏边长度差的平均值, 称为栅栏平均波动差。

为了有效地降低栅栏覆盖的感知能耗, 本节制定了栅栏构建过程中节点感知半径的四条调整规则。

规则 1 如果栅栏边 bc 两端无线传感器节点的感知半径尚未确定, 则将节点 b 和 c 的感知半径均调整为 $l_{bc}/2$, l_{bc} 是栅栏边 bc 的长 (见图 5(a))。

规则 2 如果栅栏中某节点 b 的两个邻居节点的感知半径均已确定, 则节点 b 的感知半径 $r_b = \max(l_{ab} - r_a, l_{bc} - r_c, 0)$ (见图 5(b))。

规则 3 如果栅栏边 ab 一端节点 a 的感知半径已确定, 另一端节点 b 的感知半径未确定, 栅栏边 ab 的前方向是 $a \rightarrow b$, c 为栅栏边 ab 的前向 1 节点, d 为栅栏边 ab 的前向 2 节点。如果节点 c 的感知半径未确定, 而节点 d 的感知半径已确定, 当 $l_{ab} - r_a + l_{cd} - r_d \geq l_{bc}$ 时, 则 $r_b = \max(l_{ab} - r_a, 0)$, $r_c = \max(l_{cd} - r_d, 0)$ (见图 5(c)); 否则, 则 $r_b = \max(l_{ab} - r_a, l_{bc}/2)$, $r_c = \max(l_{cd} - r_d, l_{bc}/2)$ (见图 5(d))。

规则 4 如果栅栏边 ab 一端节点 a 的感知半径已确定, 另一端节点 b 的感知半径未确定, 栅栏边 ab 的前方向是 $a \rightarrow b$, c 为栅栏边 ab 的前向 1 节点, d 为栅栏边 ab 的前向 2 节点。

如果节点 c 和 d 的感知半径均为未确定, 则 $r_b = \max(l_{ab} - r_a, l_{bc}/2)$ (见图 5(e))。

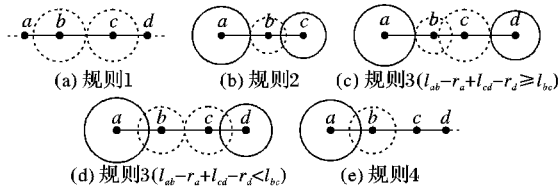


图5 节点感知半径调整规则示意图

3.3 HARP 算法描述

为了实现带状监控区域内无线节点能耗的均衡性, HARP 算法按照轮次进行, 每个轮次分三个阶段: 强 k -栅栏形成阶段、感知功率调整阶段和工作阶段。在每轮次的强 k -栅栏形成阶段, 要综合考虑节点的剩余能量、工作的轮次数以及栅栏中节点个数等因素, 既要保证网络能耗的均衡性, 又要使形成强 k -栅栏覆盖的节点尽可能少。HARP 算法中轮次的详细步骤如下:

步骤 1 本轮次开始, 在监控区域 M 中形成一个强 k -栅栏的网络覆盖, 并将生成的每条栅栏存入栅栏队列 barrierList 中。

步骤 2 若 barrierList 中元素个数 > 0 , 执行步骤 3; 否则执行步骤 9。

步骤 3 从 barrierList 中取出一个栅栏 b , 执行步骤 4。

步骤 4 从 b 中所有非确定栅栏边 (至少一端节点的感知半径未确定) 中找到最长的栅栏边 e , 若 e 两端节点的感知半径均未确定, 用规则 1 计算 e 两端节点的感知半径, 再执行步骤 8; 否则执行步骤 5。

步骤 5 若栅栏边 e 的前向 1 节点感知半径已确定, 用规则 2 计算 e 前方向节点的感知半径, 再执行步骤 8; 否则执行步骤 6。

步骤 6 若栅栏边 e 的前向 1 节点感知半径未确定, 但前向 2 节点感知半径已确定, 用规则 3 计算 e 前方向节点和前向 1 节点的感知半径, 再执行步骤 8; 否则执行步骤 7。

步骤 7 若栅栏边 e 的前向 1 节点和前向 2 节点感知半径均未确定, 则用规则 4 计算 e 前方向节点的感知半径, 再执行步骤 8; 否则执行步骤 4。

步骤 8 若 b 中所有节点的感知半径均已确定, 则将栅栏 b 首尾节点的感知半径调整至能够覆盖监控区域的边界, 再根据 b 中每个节点的感知半径确定其感知功率, 执行步骤 2; 否则执行步骤 4。

步骤 9 实施强 k -栅栏覆盖, 本轮次结束, 进入新一轮次。

4 仿真与分析

本文使用 Matlab 7.0 对 HARP 算法进行仿真实验和性能分析。仿真环境参数设置为: 带状监控区域为 $1000 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 的矩形框, 无线传感器节点使用二元感知模型, 最大感知半径为 20 m , 初始能量为 1000 个能量单位, 节点的感知功率可在 10 个等级内进行调整, 无线节点被随机部署在带状监控区域中。仿真实验通过改变监控区域中节点的部署数量 ($400 \sim 1000$) 和栅栏平均波动差 ($0 \sim 30$), 对比算法 HARP 和 Heuristic-2 对 k -栅栏覆盖的节能效果。

为了研究的方便, 令节点能耗模型中的能量消耗系数 $\mu = 1$ 。图 6 是运用 HARP 算法对监控区域的强 2-栅栏覆盖进行节能处理后的覆盖效果。

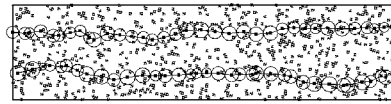


图6 强 2-栅栏覆盖 HARP 算法节能效果图

通过分析仿真数据, 发现采用了 HARP 或 Heuristic-2 的节能策略后, 强 k -栅栏覆盖的能耗明显下降, HARP 的节能效果略优于 Heuristic-2 (见图 7), 但是 Heuristic-2 算法造成的栅栏能耗方差大约是 HARP 算法的 2 倍 (见图 8), 这说明 Heuristic-2 算法的稳定性较差, 不利于均衡栅栏内节点的能耗。随着栅栏平均波动差的增长, HARP 算法的节点平均能耗明显小于 Heuristic-2 算法 (见图 9), 网络平均能耗约为 Heuristic-2 算法的 62%, 当栅栏平均波动差大于节点最大感知半径后, 两者之间的能耗差异才逐渐缩小。由此可见, 在波动较大的栅栏覆盖网络中, HARP 算法比 Heuristic-2 算法具有更好的适应性。

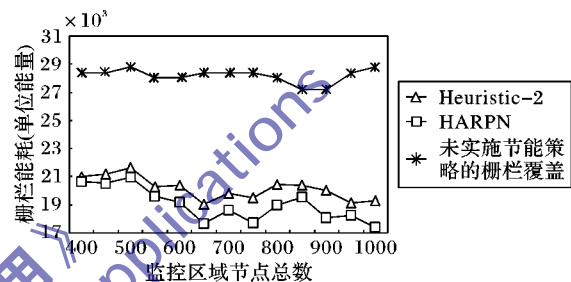


图7 未实施节能策略与两种实施节能策略算法的栅栏能耗对比

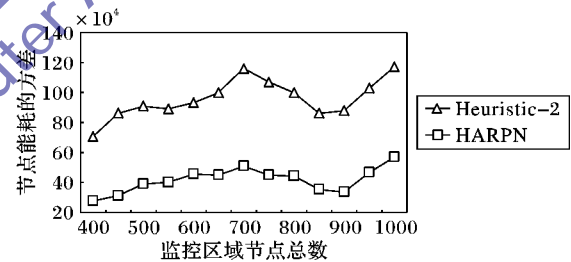


图8 两种节能算法的节点能耗方差对比

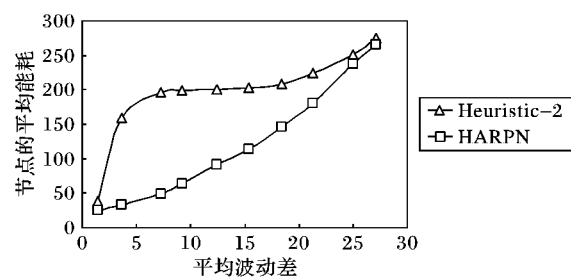


图9 两种节能算法的节点平均能耗对比

5 结语

本文通过对强 k -栅栏覆盖最小能耗问题的分析, 发现强 k -栅栏覆盖最小能耗是一个 NP-hard 问题, 于是在栅栏覆盖节能的理论分析基础上提出了一个前向节点相关的启发式节能算法 HARP。该算法根据栅栏中节点的间距和前向节点的状态确定节点的感知半径, 进而确定节点的感知功率等级。仿真实验表明, 在同等条件下该算法具有较强的适应性和稳定性, 并使栅栏中所有节点的功率和最小, 有效地降低了网络能耗, 延长了网络的生存时间。然而本文主要研究无线传感器网络强 k -栅栏覆盖的感知模块节能问题, 并未涉及数据通信部分的能耗, 感知服务如何与栅栏通信兼容, 实现两者的协调节能, 将是我们的下一步工作。

(下转第 2111 页)

Game,但其生命周期较短,说明其同时工作的节点数多于 Gur Game,但覆盖率却没有明显提高;而 Gur Game 由于其只有等到某一节点死亡后才破坏网络平衡的恒醒问题导致其能耗均衡度最差,变化幅度最大;Shuffle 的状态互换机制有效地减小了 Gur Game 的能量方差,且略优于 LDAS;而 N3SR 在调度过程中充分利用了网络的剩余能量,比 Shuffle 更进一步地减小了 Gur Game 的能量方差,有效缓解了 Gur Game 的能耗均衡度问题。

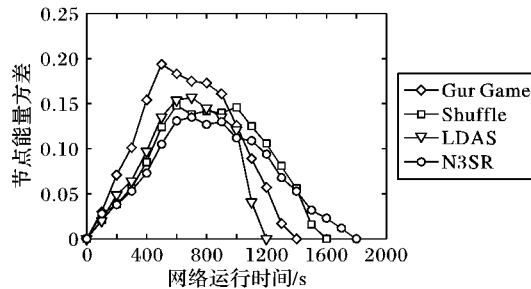


图6 节点能量方差与运行时间的关系

4 结语

针对随机节点调度策略中存在的能量消耗不均衡且不合理使用等问题,本文结合 Gur Game 模型的特点,给出了节点空间分辨率的概念及其与覆盖区域大小的关系,并提出了基于空间分辨率的节点调度策略。实验结果表明,本文方法相比 Gur Game 等节点调度算法进一步有效地保障了网络的覆盖率,延长了网络的生存时间,并均衡了网络各节点间的能量消耗。下一步将在层次化网络拓扑结构下展开基于空间分辨率的节点调度策略的研究,分析网络覆盖率、节点连通性以及网络生命周期之间的关系。

参考文献:

- [1] ATZORI L, IERA A, MORABITO G. The Internet of Things: a survey [J]. *Computer Networks*, 2010, 54(15): 2787 - 2805.
- [2] 文浩,林闯,任丰原,等. 无线传感器网络的 QoS 体系结构[J]. *计算机学报*, 2009, 32(3): 432 - 440.
- [3] WINSTON J J, PARAMASIVAN B. A survey on connectivity maintenance and preserving coverage for wireless sensor networks [J]. *International Journal of Research and Reviews in Wireless Sensor Networks*, 2011, 1(2): 11 - 18.
- [4] ZHANG H, HOU J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks [J]. *International Journal of Ad-Hoc and Sensor Wireless Networks*, 2005, 1(1/2): 89 - 124.
- [5] 温俊,蒋杰,方力,等. 异构无线传感器网络的转发连通覆盖方法[J]. *软件学报*, 2010, 21(9): 2304 - 2319.
- [6] WU K, GAO Y, LI F, *et al.* Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2005, 10(6): 837 - 852.
- [7] YOUNIS O, KRUNZ M, RAMASUBRAMANIAN S. Location-unaware coverage in wireless sensor networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2008, 6(7): 1078 - 1097.
- [8] YEN L, CHENG Y. Range-Based Sleep Scheduling (RBSS) for wireless sensor networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2009, 48(3): 411 - 423.
- [9] JIANG S, YANG M, SONG H, *et al.* An enhanced perimeter coverage based density control algorithm for wireless sensor network [C]// *Proceedings of the 3rd International Conference on Wireless and Mobile Communications*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 79.
- [10] CHOI W, DAS S K. Trade-off between coverage and data reporting latency for energy-conserving data gathering in wireless sensor networks [C]// *Proceedings of the 1st International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*. Piscataway: IEEE, 2004: 503 - 512.
- [11] IYER R, KLEINROCK L. QoS control for sensor networks [C]// *ICC 2003: Proceedings of IEEE International Communication Conference 2003*. New York: IEEE, 2003, 1: 517 - 521.
- [12] TSAI R, WANG H. Shuffle: an enhanced QoS control by balancing energy consumption in wireless sensor network [C]// *Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Grid and Pervasive Computing*, LNCS 6104. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 603 - 611.
- [13] FROLIK J. QoS control for random access wireless sensor networks [C]// *Proceedings of the 5th IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. New York: IEEE, 2004, 3: 1522 - 1527.
- [14] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H, *et al.* An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660 - 670.
- [15] MAJID M N, MOHAMMAD K, MOHAMMAD M. A novel protocol for barrier k -coverage in wireless sensor networks [J]. *Global Journal of Computer Science and Technology*, 2012, 12(11): 57 - 62.
- [16] 班冬松,温俊,蒋杰,等. 移动无线传感器网络 k -栅栏覆盖构建算法[J]. *软件学报*, 2011, 22(9): 2089 - 2103.
- [17] 舒坚,余坤,刘琳岚,等. 无线传感器网络中基于移动模型的栅栏覆盖研究[J]. *计算机研究与发展*, 2011, 48(z2): 141 - 144.
- [18] YANG H Q, LI D Y, ZHU Q H, *et al.* Minimum energy cost k -barrier coverage in wireless sensor networks [C]// *WASA 2010: Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 80 - 89.
- [19] MA H, LI D Y, CHEN W P, *et al.* Energy efficient k -barrier coverage in limited mobile wireless sensor networks [J]. *Computer Communications*, 2012, 35(14): 1749 - 1758.
- [20] 邢文训,谢金星. 现代优化计算方法[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2006: 15 - 16.
- [21] 韩志杰,吴志斌,王汝传,等. 新的无线传感器网络覆盖控制算法[J]. *通信学报*, 2011, 32(10): 174 - 184.

(上接第 2107 页)

参考文献:

- [1] KUMAR S, LAI T H, ARORA A. Barrier coverage with wireless sensors [C]// *MobiCom 2005: Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York: ACM, 2005: 284 - 298.
- [2] BAN D S, JIANG J, YANG W, *et al.* Strong k -barrier coverage with mobile sensors [C]// *IWCMC'10: Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*. New York: ACM, 2010: 68 - 72.
- [3] GAGE D W. Command control for many-robot systems [J]. *Unmanned Systems*, 1992, 10(4): 28 - 34.
- [4] LIU B Y, DOUSSE O, WANG J, *et al.* Strong barrier coverage of wireless sensor networks [C]// *MobiHoc'08: Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. New York: ACM, 2008: 411 - 420.
- [5] LI J K, CHEN J M, LAI T H. Energy-efficient intrusion detection with a barrier of probabilistic sensors [C]// *INFOCOM'12: Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Computer Com-*