

一种概率感知模型的栅栏覆盖优化部署策略^{*}

卢云宏^{1,2}, 郭忠文¹

¹(中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

²(烟台大学 计算机与控制工程学院, 山东 烟台 264005)

通讯作者: 卢云宏, E-mail: lyh.163@163.com

摘要: 为了解决无线传感器网络的栅栏覆盖问题,对概率感知模型下的栅栏覆盖进行研究.通过对传感器节点费用和能耗的分析,利用相邻节点的数据融合技术,提出了一种可以监测移动目标小于临界速度的优化部署策略,并给出了该策略适用的临界条件.分析和仿真表明,该策略能够有效提高网络的生命周期.

关键词: 无线传感器网络;概率感知模型;数据融合;栅栏覆盖;临界速度

中文引用格式: 卢云宏,郭忠文.一种概率感知模型的栅栏覆盖优化部署策略.软件学报,2014,25(Suppl.(1)):85-92. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14010.htm>

英文引用格式: Lu YH, Guo ZW. Optimized deployment strategy of barrier coverage based on probability sensing model. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014, 25(Suppl. (1)): 85-92 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14010.htm>

Optimized Deployment Strategy of Barrier Coverage Based on Probability Sensing Model

LU Yun-Hong^{1,2}, GUO Zhong-Wen¹

¹(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

²(College of Computer and Control Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China)

Corresponding author: LU Yun-Hong, E-mail: lyh.163@163.com

Abstract: Based on probabilistic sensing model, this paper investigates the issue of barrier coverage in order to solve the problem of barrier coverage in wireless sensor network. By analyzing the cost and the power consumption of sensor nodes and adopting the data fusion technique within adjacent nodes, the paper brings forth an optimized deployment strategy for barrier coverage when the speed of mobile target is lower than the critical speed. It also presents the critical condition for the strategy to apply. The analysis and simulation results show that the proposed strategy can effectively improve the lifetime of the network.

Key words: wireless sensor network; probabilistic sensing model; data fusion; barrier coverage; critical speed

Gage^[1]在多机器人领域内将覆盖行为分为3类:地毯覆盖(blanket coverage)、栅栏覆盖(barrier coverage)以及扫视覆盖(sweep coverage).栅栏覆盖的目标是通过对节点的确定性部署使得入侵者在试图穿越栅栏时不被检测到的概率最小化.

栅栏覆盖^[1]成为近年来无线传感器网络研究的重要选题之一,在国防、军事、工业、环保及林业等方面均有广泛应用,比如:非法入侵者探测、森林火情探测及海洋环境污染监测.该类应用的主要目的是能够在目标穿越保护区时被有效监测,因此需要在监控区域周围部署栅栏对目标进行监测,常用的栅栏部署有带状区域和环状区域两种^[2].

由于传感器节点的体积较小,其存储容量和能量有限,尽可能地减少部署节点个数和通过调度策略减少节点能耗受到了研究者的关注.目前用来研究栅栏覆盖的常用模型包括圆盘感知模型和概率感知模型.

Kumar^[2]基于圆盘感知模型提出了强栅栏覆盖和弱栅栏覆盖,对确定性部署给出了 k -栅栏覆盖的最优部署

* 基金项目: 国家自然科学基金(61170258)

收稿时间: 2014-05-10; 定稿时间: 2014-08-26

策略.若部署区域节点服从泊松分布,Kumar^[2]给出了构造弱 k -栅栏覆盖的临界条件和集中式构造算法,而 Liu^[3]进一步推出了构造强 k -栅栏覆盖的临界条件,并采用分治思想设计了构建强 k -栅栏覆盖的分布式算法.Chen^[4]在限定物体穿越轨迹的前提下,提出分布式算法用于监测部署区域是否存在局部栅栏覆盖.Liu^[5]基于概率感知模型给出了当部署节点密度大于临界值时可以检测到目标.Kumar^[6]对同构网络提出了集中式的最优调度算法 Stint,对异构网络提出了最优调度算法 Prahari.Chen^[7]基于概率感知模型,在限定入侵者速度的条件下将入侵者的检测问题转换为网络最大流问题,根据节点的剩余能量和距离,提出一种有界的构造栅栏算法,并给出局部化调度协议.He^[8]对具有特殊形状的栅栏部署区域,给出了曲线部署优于直线部署的充分条件,在部署曲线满足距离连续的性质时给出了最优部署策略.

Barr^[9]基于圆盘感知模型对于水下三维传感器网络,提出了一种 3 阶段的利用移动节点构造三维强栅栏覆盖的集中式算法.Yang^[10]基于概率感知模型,利用邻居节点的相互合作和信息融合构建虚拟节点,将栅栏覆盖映射为线段覆盖问题,给出虚拟节点投影长度的下界估计,并据此设计了一种构造栅栏信息覆盖节点集的集中式算法.Xing^[11]指出在节点服从泊松分布时,概率感知模型比圆盘感知模型能更有效地改善网络覆盖性能,给出了二者在完全覆盖时最小网络部署密度之间的关系,指出圆盘感知模型仅适用于信噪比较高的情形,而概率感知模型借助于数据融合能够适用信噪比较低的情形.Wang^[12]利用相邻节点的信息融合技术针对区域覆盖提出了一种集中式的虚拟节点合作检测算法.文献[13]基于概率感知模型和数据融合技术提出了一种分布式栅栏控制算法.

上述文献使用圆盘感知模型和概率感知模型描述节点的能量模型,当物理节点或虚拟节点之间所形成的栅栏与移动物体的移动轨迹相交时,则认为监测到目标,构成栅栏的节点始终处于工作状态,该类监测方法没有考虑物体的实际移动速度.本文提出一种目标移动速度受限的栅栏部署策略,当移动物体的速度小于临界速度时,可以进行有效监测.采用数据融合的邻居节点,节点随距离的不同形成的栅栏形态有所不同,通过分析栅栏曲线的特性,在平衡节点费用和能量耗费的前提下,给出节点半径、节点感知时间和移动目标的速度三者之间需要满足的临界条件,并推出邻居节点的最优部署距离和移动目标的最短穿越距离,在满足临界条件的前提下监测节点可以进行周期性的工作,从而延长网络的生命周期.

1 系统模型

假设部署在监控区域中的传感器节点集为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, 每个传感器节点具有各相同性,能够获得自己的位置信息.

1.1 概率感知模型

目标发出的物理信号(如声波、电磁波等),其能量随距离的增加按指数率衰减^[12],表示为

$$w_i = \begin{cases} W_i, & d_i < d_0 \\ \frac{W_i}{(d_i/d_0)^\alpha}, & d_i \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

W_i 为常数,表示目标的初始信号能量, d_i 为传感器节点与目标的距离, d_0 为一个小的常量, α 为能量衰减指数,取值范围为 $2 \leq \alpha \leq 5$.每个感知节点通过感知到的目标能量强度来决策目标是否存在.

1.2 监测模型

假设每个监测节点 $s_i \in S$ 的环境噪声 n_i 独立同分布,服从均值为 0、方差为 σ^2 的高斯分布,其累计分布函数表示为 $F_M(n)$.对于目标在指定时刻出现(H_1)或未出现(H_0),节点的感知数据表示为

$$\begin{aligned} H_0: & x_i = n_i \quad i = 1 \dots N \\ H_1: & x_i = w_i + n_i \quad i = 1 \dots N \end{aligned} \quad (2)$$

对于给定的决策阈值 T_1 ,感知节点 s_i 判断目标是否出现,可以表示为

$$\begin{matrix} H_1 \\ x_i > T_1 \\ H_0 \end{matrix} \quad (3)$$

定义 1. 节点的探测率 P_d . 当目标出现时, 感知节点 s_i 监测到目标的概率, 表示为 $P_d = P(x_i > T_1 | H_1) = Q((T_1 - w_i)/\sigma)$, 其中, $Q(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$.

定义 2. 节点的误警率 P_f . 当目标未出现时, 感知节点 s_i 监测到目标的概率, 表示为 $P_f = P(n_i > T_1 | H_0) = Q(T_1/\sigma)$.

定义 3. 节点的 (α, β) 覆盖. 对于给定的常量 α (误警率阈值) 和 β (探测率阈值), 当满足 $P_f \leq \alpha$ 且 $P_d \geq \beta$ 时, 该节点称为 (α, β) 覆盖.

1.3 覆盖区域

按照式(3)的监测模型, 由文献[12]给出感知节点 s_i 的探测区域为以 s 为圆心, 半径为 d_s 的圆的内部, 表示为

$$R_s = \{t \mid d(t, s) \leq d_s\} \quad (4)$$

其中, $d(t, s)$ 表示点 t 到感知节点 s_i 的欧氏距离, 半径 d_s 表示为

$$d_s = d_0 \left(\frac{W_i}{\sigma(Q^{-1}(\alpha) - Q^{-1}(\beta))} \right)^{1/\alpha} \quad (5)$$

定义 4. k -虚拟节点. 由 k 个物理感知节点组成, 综合每个节点的感知数据 x_i , 做出联合决策, k 为虚拟节点的度. k -虚拟节点判断目标是否出现可以表示为

$$\sum_{i=1}^k x_i \begin{matrix} H_1 \\ > \sqrt{k} T_1 \\ H_0 \end{matrix} \quad (6)$$

对于按照式(3)监测的物理节点和按照式(6)监测的虚拟节点, 文献[12]证明了虚拟节点的误警率与物理节点相同, 而虚拟节点的探测率大于等于物理节点的探测率, 并给出了虚拟节点 v_i 的覆盖区域 R_v .

$$R_v = \left\{ t \mid \sum_{j=1}^k \frac{1}{d^\alpha(t, s_j)} \geq \frac{\sqrt{k}}{d_s^\alpha} \right\} \quad (7)$$

其中, $d(t, s_j)$ 表示点 t 到感知节点 s_j 的欧氏距离.

1.4 2-虚拟节点

本文只讨论虚拟节点所关联的物理节点数为 2 的情形. 设两个物理节点 S_1, S_2 的坐标为 $S_1(-x_0, 0)$ 和 $S_2(x_0, 0)$, 两个节点在不采用数据融合时, 由式(4)可知, 其所覆盖区域的边界曲线 Γ_1 和 Γ_2 分别表示为

$$\Gamma_1: (x + x_0)^2 + y^2 = d_s^2 \quad (8)$$

$$\Gamma_2: (x - x_0)^2 + y^2 = d_s^2 \quad (9)$$

当两个节点采用数据融合时, 由式(7)可知, 2-虚拟节点所覆盖区域的边界曲线 Γ_3 表示为

$$\Gamma_3: \frac{1}{[(x + x_0)^2 + y^2]^{\alpha/2}} + \frac{1}{[(x - x_0)^2 + y^2]^{\alpha/2}} = \frac{\sqrt{2}}{d_s^\alpha} \quad (10)$$

对式(8)~式(10)分析可得曲线的关系, 如图 1 所示. 图 1(a)表示, 当 $x_0 < ((\sqrt{2} + 1)^{1/\alpha} - 1)/2 \cdot d_s$ 时, 曲线 Γ_1 和 Γ_2 包含于曲线 Γ_3 内部; 图 1(b)表示, 当 $x_0 = d_s$ 时, 曲线 Γ_1 和 Γ_2 相切于原点, 该距离表示相邻物理节点能够构成栅栏的临界值, 当两节点之间的距离大于 $2d_s$ 时, 物理节点在不使用数据融合的情况下则无法构成栅栏; 图 1(c)表示, 当 $x_0 = 2^{1/(2\alpha)} d_s$ 时, 曲线 Γ_3 过原点, 称此时的 x_0 为 2-虚拟节点的临界值, 记为 d_{th} , 当两节点之间的距离大于 $2d_{th}$ 时, 即使两节点采用数据融合也无法构成栅栏; 图 1(d)表示, 当 $x_0 > ((\sqrt{2} + 1)^{1/\alpha} + 1)/2 \cdot d_s$ 时, 曲线 Γ_3 分成两部分, 分

别包含于曲线 L_1 和 L_2 的内部。

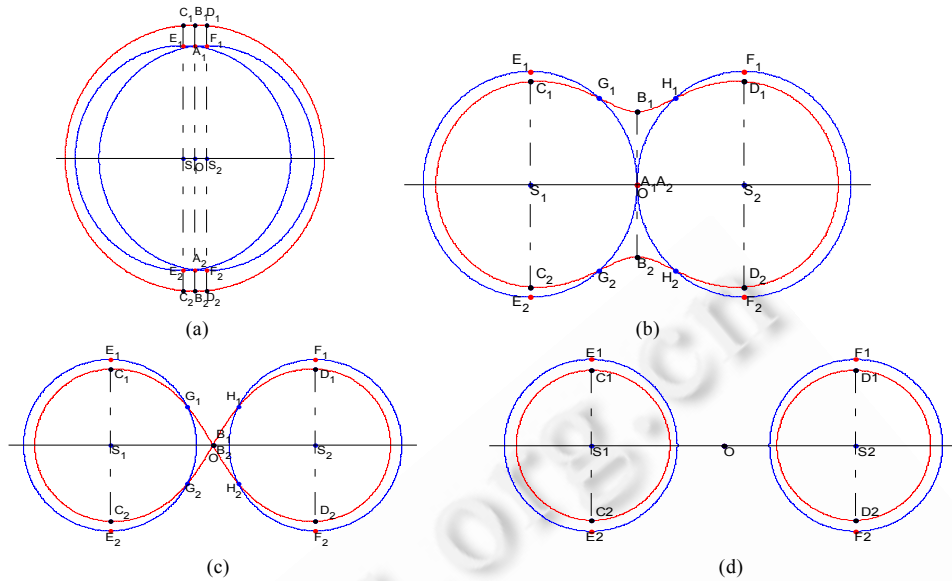


Fig.1 The coverage area of two adjacent nodes

图 1 相邻节点的覆盖区域

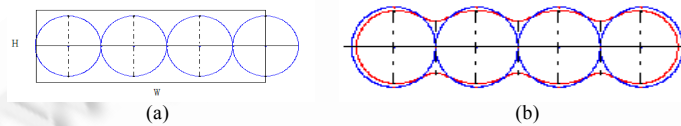


Fig.2 The deployment strategy of nodes

图 2 节点的部署策略

2 栅栏的部署

2.1 部署策略

假设传感器节点部署的区域为带状区域,本文只讨论规则的矩形区域 $W \times H$,如图 2(a)所示.Kumar^[2]给出了构造 k 栅栏覆盖的确定性部署策略,感知节点沿着与 W 平行的边邻接部署 k 行,其需要的节点数为 $k \cdot \lceil W/2r \rceil$,称其为部署策略 1^[2],其中 r 为节点的感知半径.由于 k 行栅栏的构造无相关性,以下只分析 $k=1$ 时的情况.

如图 2(b)所示,相邻节点之间的距离小于 2 倍的 2-虚拟节点的临界值 d_{th} ,构成 2-虚拟节点,该部署方法称为部署策略 2.

当移动目标按照策略 1 部署的场景穿越矩形区域,沿着与 W 垂直且经过相邻圆切点的路径时,目标在经过切点时被监测到,被监测时间为一个时间点,该方式称为穿越策略 TS_1 .当移动目标按照策略 2 部署的场景穿越矩形区域,沿着与 W 垂直的路径穿越时,其被监测的时间为一个时间段,该方式称为穿越策略 TS_2 .在考虑移动目标速度的情况下,按 TS_2 穿越时,感知节点无需在整个被监测时间段内一直处于工作状态,只需在该时间段内监测到移动目标即可,也就是说,节点可以在休眠和感知状态之间切换,从而节省能量.

当移动目标沿着与 W 垂直的路径穿越矩形区域时,该情况属于弱栅栏覆盖.如果满足相邻物理节点在休眠和感知时间同步,则属于强栅栏覆盖.

2.2 生命周期

假设每个传感器节点在感知状态下其单位时间的能耗为 η ,总的持续工作时间为 T ,则其用于监测的能耗可

以表示为 $E_s = \eta \cdot T$. 假设每个传感器节点的费用为 C , 则按照部署策略 1, 栅栏覆盖的部署费用为 $C_1 = C \cdot \lceil W/(2r) \rceil$, 当 $W \gg r$ 时, $C_1 \approx C \cdot W/(2r)$. 每个传感器节点单位费用下的生命周期为 T/C , 则整个栅栏所构成网络的单位费用下的生命周期为

$$T_1 = \frac{T}{C_1} = \frac{2r \cdot T}{C \cdot W} \quad (11)$$

讨论部署策略 2 的情况, 如图 1 所示. 假设相邻节点的距离为 $2d$, 满足 $0 < d \leq d_{th}$. 设物体的运动速度为 v , 满足 $0 < v \leq v_{\max}$. 由曲线 Γ_3 的对称性可知, 要使穿越距离最短, 只需考虑在第 1 象限内的曲线(由曲线 Γ_2 和曲线 Γ_3 组成), 其 y 值最小即可. 定义该距离为 $d_{\min} = \min_{0 \leq x \leq d} \{ \max_{(x, y_1) \in \Gamma_2, (x, y_2) \in \Gamma_3} \{y_1, y_2\} \}$.

栅栏覆盖的部署节点数为 $\lceil W/(d_s + d) \rceil$, 部署费用为 $C_2 = C \cdot \lceil W/(d_s + d) \rceil$, 当 $W \gg d_s$ 时, $C_2 \approx C \cdot W/(d_s + d)$. 如图 1 所示, 当物体以最大速度 v_{\max} 沿 y 取值最短路径穿越时, 其所需穿越时间最短, 表示为 $T_{\min} = 2d_{\min}/v_{\max}$. 假设每个节点在 T_{\min} 时间内用来感知的时间为 ΔT , 满足 $0 < \Delta T < T_{\min}$, 则每个节点可监测的总时间为 $T \cdot T_{\min}/\Delta T$. 整个栅栏所构成网络的单位费用下的生命周期 T_2 为

$$T_2 = T \cdot \frac{T_{\min}}{\Delta T} \cdot \frac{1}{C_2} = \frac{2T \cdot d_{\min} \cdot (d_s + d)}{\Delta T \cdot v_{\max} \cdot C \cdot W} \quad (12)$$

当 $T_2 > T_1$, 即 $2T \cdot d_{\min} \cdot (d_s + d)/(\Delta T \cdot v_{\max} \cdot C \cdot W) > 2r \cdot T/(C \cdot W)$ 时, 部署策略 2 优于部署策略 1. 令 $r = d_s$, 求得满足的条件为

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{d_{\min} \cdot (d_s + d)}{\Delta T \cdot v_{\max} \cdot d_s} > 1 \quad (13)$$

上述条件表示物体的穿越速度越小, 用于感知移动目标的时间越短, 则部署策略 2 的优势越明显, 与直观相符.

2.3 计算最短穿越距离 d_{\min}

由图(1)的对称性, 只考虑第 1 象限内的曲线. 当两个节点间的距离从 0 开始逐渐增大时, 如图 1(a)所示, 其穿越的边界曲线 $\widehat{B_1 D_1}$ 位于 Γ_3 上; 当节点间的距离继续增大时, D_1, F_1 和 H_1 这三个点重合, 此时穿越边界曲线为 $\widehat{B_1 D_1}$; 当节点距离再增大时, 穿越边界曲线由两部分组成, 如图 1(b)所示, 一部分为 $\widehat{B_1 H_1}$, 位于 Γ_3 上, 另一部分为 $\widehat{H_1 F_1}$, 位于 Γ_2 .

以下对能量衰减指数 $\alpha=2$ 的情况进行分析.

在式(10)中, 令 $x=0$ 可得 B_1 点的 y 坐标, 满足下式:

$$y^2 = \sqrt{2}d_s^2 - d^2 \quad (14)$$

在式(10)中, 令 $x=d$ 可得 D_1 点的 y 坐标, 满足下式:

$$y^2 = \frac{\sqrt{2}}{2}d_s^2 - 2d^2 + \sqrt{\frac{d_s^4}{2} + 4d^4} \quad (15)$$

由式(9)和式(10)可得, 两曲线 Γ_2 和 Γ_3 的交点 H_1 点的 y 坐标, 满足下式:

$$y^2 = d_s^2 - \left(\frac{\sqrt{2}}{4d} d_s^2 - d \right)^2 \quad (16)$$

对式(14)~式(16)进行比较分析, 可得如下结论:

- (1) 当 $d < \sqrt[4]{2}/2 \cdot d_s$ 时, d_{\min} 由式(15)给出.
- (2) 当 $\sqrt[4]{2}/2 \cdot d_s \leq d \leq 1/(2\sqrt{2}-\sqrt{2}) \cdot d_s$ 时, d_{\min} 由式(16)给出.
- (3) 当 $1/(2\sqrt{2}-\sqrt{2}) \cdot d_s < d < \sqrt{2} \cdot d_s$ 时, d_{\min} 由式(14)给出.

将以上 d_{\min} 带入式(12), 求得当 $d = 1/(2\sqrt{2}-\sqrt{2}) \cdot d_s$ 时, T_2 取得最大值, 此时 $d_{\min} = \sqrt{(7\sqrt{2}-2)/8} \cdot d_s$, 带入式

(13)求得部署策略 2 优于部署策略 1 的临界条件为

$$\sqrt{\frac{7\sqrt{2}-2}{8}} \cdot \left(1 + \frac{1}{2\sqrt{2}-\sqrt{2}}\right) \cdot \frac{d_s}{\Delta T \cdot v_{\max}} > 1 \tag{17}$$

若式(11)中的 r 取 2-虚拟节点的临界值,则相邻两节点采用数据融合的方式进行监测,称其为部署策略 3^[11]. 该策略下整个栅栏所构成网络的单位费用下的生命周期为

$$T_3 = \frac{T}{C_1} = \frac{\sqrt[4]{32} \cdot d_s \cdot T}{C \cdot W} \tag{18}$$

类似地,可求得部署策略 2 优于部署策略 3 的临界条件.

3 性能评估

基于 Matlab 对 3 种节点部署策略,策略 1、策略 2 和策略 3 进行比较,如图 3~图 5 所示.假设节点部署在 20000×200 的区域,每个节点的费用为 1,节点监测时间 ΔT 为 1,在感知状态下单位时间的能耗为 0.01,总的持续工作时间为 10 000.取 $(\alpha, \beta) = (0.05, 0.95)$, $\sigma = 1, d_0 = 1, P_i = 100$.

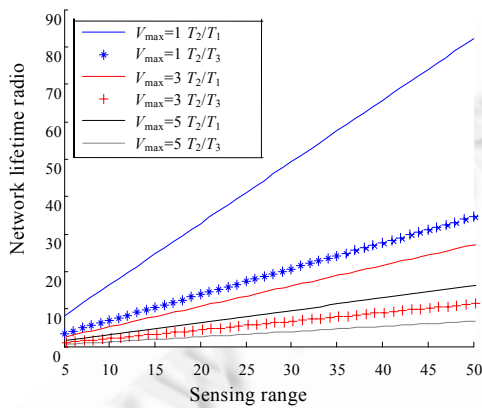


Fig.3 The network lifetime vs. node parameter

图 3 网络生命周期与节点参数的关系

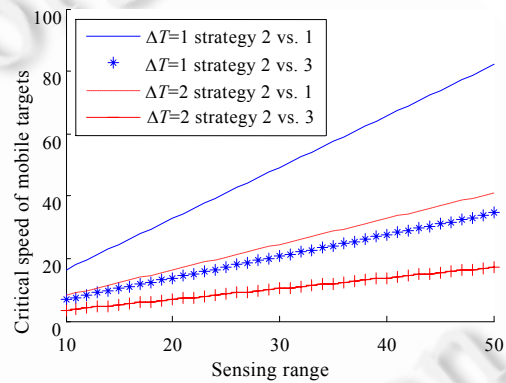


Fig.4 The critical speed of mobile targets under different deployment strategy

图 4 不同部署策略下移动目标的临界速度

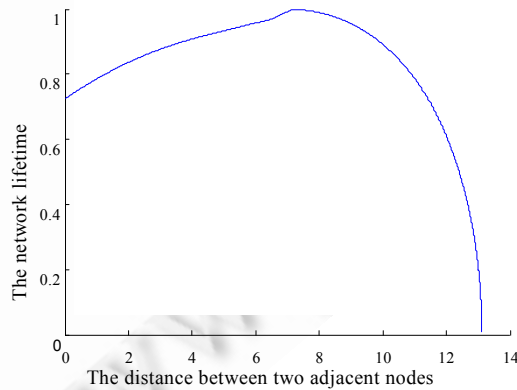


Fig.5 The network lifetime vs. the distance between two adjacent nodes

图 5 网络生命周期与相邻节点部署距离的关系

图 3 给出按照策略 1^[2]、策略 2 和策略 3^[11]部署时,其单位费用下的网络生命周期比值随着感知半径的增

加而增大,随着移动目标的临界速度的增加而减少.因为感知半径越大,移动目标穿越栅栏的时间越长,则节点用于休眠的时间越长,从而网络的生命周期越长;而移动目标的速度越快,其穿越栅栏的时间越短,则节点用于休眠的时间越短,从而网络的生命周期越短.

图4对部署策略2优于部署策略1和部署策略2优于部署策略3的临界速度进行对比,移动目标的临界速度随着感知半径的增加而增大,随着节点监测时间 ΔT 的增加而减少.部署策略3由于采用数据融合,相邻节点之间的部署距离大于策略1下的部署距离.故在相同参数下,部署策略2优于部署策略3的临界速度小于部署策略2优于部署策略1的临界速度.

图5给出了在部署策略2下,网络生命周期随相邻节点间距离的变化关系.随着节点距离的增加,网络部署所需节点数减少,使得总部署费用减小,但同时对应的最短穿越距离也相应减小,使得节点单位时间的监测能耗增加,从而缩短了总的网络生命周期,因此费用和能耗之间存在折中,即存在单位费用下能够获取的最大网络生命周期的最优节点部署距离.

4 结束语

本文讨论了一种在概率感知模型下的栅栏覆盖,结合相邻节点的数据融合,给出了一种移动目标在限定速度内的栅栏部署策略,通过对感知区域几何特性的分析,计算出节点的最优部署距离和目标的最短穿越距离,目标在穿越感知区域的过程中,感知节点可以在休眠和感知状态下切换,无需一直工作,从而节省了能量.通过仿真表明,该策略能够有效地提高网络的生命周期.但在计算感知节点的能耗时,没有考虑节点在休眠和感知状态之间切换的能耗,这是我们下一步的研究工作.

References:

- [1] Gage DW. Command control for many-robot systems. *Unmanned Systems*, 1992,10(4):28–34.
- [2] Kumar S, Lai TH, Arora A. Barrier coverage with wireless sensors. *Wireless Networks*, 2007,13(6):817–834.
- [3] Liu BY, Dousse O, Wang J, Saipulla A. Strong barrier coverage of wireless sensor networks. In: Jia XH, ed. *Proc. of the 9th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. New York: ACM Press, 2008. 411–420.
- [4] Chen A, Kumar S, Lai TH. Local barrier coverage in wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2010,9(4):491–504. [doi: 10.1109/TMC.2009.147]
- [5] Liu BY, Towsley D. A study of the coverage of large-scale sensor networks. In: Agrawal DP, ed. *Proc. of the 1st IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*. IEEE, 2004. 475–483.
- [6] Kumar S, Lai TH, Posner ME, Sinha P. Optimal sleep-wakeup algorithms for barriers of wireless sensors. In: George R, ed. *Proc. of the 4th Int'l Conf. on Broadband Communications, Networks and Systems*. Raleigh: IEEE, 2007. 327–336.
- [7] Chen JM, Li JK, Lai TH. Energy-Efficient intrusion detection with a barrier of probabilistic sensors: Global and local. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2013,12(9):4742–4755. [doi: 10.1109/TW.2013.072313.122083]
- [8] He SB, Gong XW, Zhang JS, Chen JM, Sun YX. Barrier coverage in wireless sensor networks: From lined-based to curve-based deployment. In: Marco A, ed. *Proc. of the 32nd IEEE Int'l Conf. on Computer Communications*. Turin: IEEE, 2013. 470–474. [doi: 10.1109/INFCOM.2013.6566817]
- [9] Barr SJ, Wang J, Liu BY. An efficient method for constructing underwater sensor barriers. *Journal of Communications*, 2011,6(5):370–383. [doi: 10.4304/jcm.6.5.370-383]
- [10] Yang GQ, Qiao DJ. Barrier information coverage with wireless sensors. In: Roberto J, ed. *Proc. of the 28th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications*. Rio de Janeiro: IEEE, 2009. 918–926. [doi: 10.1109/INFCOM.2009.5062002]
- [11] Tan R, Xing GL, Liu BY, Wang JP, Jia XH. Exploiting data fusion to improve the coverage of wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2012,20(2):450–462. [doi: 10.1109/TNET.2011.2164620]
- [12] Wang W, Srinivasan V, Chua KC, Wang B. Energy-Efficient coverage for target detection in wireless sensor networks. In: Tarek A, ed. *Proc. of the 6th Int'l Conf. on Information Processing in Sensor Networks*. Boston: ACM Press, 2007. 313–322.

- [13] Luo Q, Lin YP, Wang L, Yin B. Barrier coverage control based on data fusion for wireless sensor network. Journal of Electronics and Information Technology, 2012,34(4):825-831 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [13] 罗卿,林亚平,王雷,尹波.传感器网络中基于数据融合的栅栏覆盖控制研究.电子与信息学报,2012,34(4):825-831.



卢云宏(1972-),男,山东威海人,讲师,主要研究领域为传感器网络.
E-mail: lyh.163@163.com



郭忠文(1965-),男,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为传感器网络,并行分布式系统.
E-mail: guozhw2007@163.com

www.jos.org.cn

www.jos.org.cn