



基于移动节点二次部署的 WSN 栅栏新型强化方法

戴国勇^{1,2}, 施伟元¹, 应可珍^{1,3}, 陈庆章¹, 毛科技¹

(1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023;

2. 浙江树人大学信息科技学院, 浙江 杭州 310015;

3. 浙江财经大学东方学院, 浙江 嘉兴 314408)

摘要: 无线传感器网络栅栏覆盖在入侵检测方面发挥着重要作用, 如何构建顽健的栅栏是重点研究问题。针对栅栏初始部署后, 随着节点能量的消耗, 部分节点过早死亡, 从而导致栅栏中存在较多薄弱点的问题, 提出了一种利用移动节点二次部署来强化栅栏的方法。该方法采用基于集合的最大流算法计算能强化薄弱点的数量, 并根据薄弱情况部署和调度可移动节点来强化栅栏, 经过强化后的栅栏具有更好的性能, 解决了栅栏薄弱点强化问题。仿真实验表明, 该算法能有效强化栅栏, 延长栅栏的生存时间, 且算法复杂度也比较低。

关键词: 无线传感器网络; 二次部署; 强化栅栏; 集合最大流算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017184

Novel barrier-reinforcing method based on mobile nodes re-deployment in WSN

DAI Guoyong^{1,2}, SHI Weiyuan¹, YING Kezhen^{1,3}, CHEN Qingzhang¹, MAO Keji¹

1. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

2. College of Information Science and Technology, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China

3. Dongfang College, Zhejiang University of Finance & Economics, Jiaxing 314408, China

Abstract: Barrier coverage in wireless sensor networks plays a key role in intrusion detection system. How to build a robust barrier is a key problem in this research area. In order to fix the weak points caused by nodes' energy consumption, a reinforcing method was proposed to strengthen the barrier by re-deploying some mobile nodes, in which set-based max-flow algorithm was employed to calculate the number of weak points. The vulnerability degree of each weak point was analyzed so that the mobile nodes can move to these spots to reinforce the whole barrier. Experiment results show that the algorithm can effectively strengthen the barrier, extend the survival time of the barrier and the algorithm complexity is relatively lower.

Key words: wireless sensor network, re-deployment, barrier reinforcement, set-based max-flow algorithm

收稿日期: 2016-12-11; 修回日期: 2017-06-06

通讯作者: 毛科技, maokeji@zjut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61379023); 浙江省公益性技术应用研究计划基金资助项目 (No.2015C31066)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61379023), Zhejiang Provincial Public Welfare Technology Project(No.2015C31066)



1 引言

无线传感器网络的研究主要包括能耗与能量捕获问题、路由问题及覆盖问题等。栅栏覆盖 (barrier coverage) 主要研究当监测目标试图穿越部署区域时的被检测问题^[1], 在军事、环保等诸多领域有着广泛的用途^[2-4]。目前, 国内外在无线传感器网络栅栏覆盖领域的研究主要集中在栅栏的构建与调度两个方面, 并已经取得了丰厚的成果。Kumar S 等人^[5]提出了 k -栅栏覆盖的概念, 并研究区域形成 k -栅栏的条件等问题。Saipulla A 等人^[6]提出了基于直线 (line-based) 栅栏部署方法, 该方法形成栅栏的概率比均匀部署等方式更高, 并且提出了基于权重有向图的最大流算法派遣移动节点修补栅栏间隙 (gap), 从而维持栅栏的有效性。Mostafaei H^[7]以栅栏覆盖的能效为目标, 用随机覆盖图进行建模, 提出了一种基于分布式自动学习机的栅栏构建方法, 以最少数量的传感器节点构建栅栏。Xu B 等人^[8]以入侵者的历史数据为先验条件, 采用单变量灰度模型来预测下一时间段栅栏中最易受入侵者攻击的节点, 并将移动节点移动到最易受攻击节点处的方法, 该方法使栅栏不会被快速破坏。卢云宏等人^[9]在概率感知模型下结合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。应可珍等人^[10]针对 1-栅栏覆盖问题, 考虑到信息传输量, 设计了一种分布式栅栏覆盖算法, 减少了部署节点的数量和网络的信息传输量。Kong L H 等人^[11]研究了在软件定义传感器网络中通过可移动传感器节点动态构建栅栏以适应监测区域动态变化的场景。Liu T 等人^[12]提出了一个以节点链为调度单位的分布式栅栏维持算法, 识别监测区域中的薄弱区域并通过增加节点进行修复。范兴刚等人^[13]研究了有向传感器网络中的 k -栅栏覆盖问题, 提出了一种包含最少传感器节点的有向强栅栏覆盖模型, 并在此基础上设计了基于

选择框的有向 k -栅栏构建算法, 通过构建多个强 1-栅栏的方法构建 k -栅栏。Chen A 等人^[14]提出了一种单向栅栏覆盖模型, 从理论上说明了在入侵者没有任何限制的情况下, 各种综合传感器都无法提供有效的单向栅栏, 在此基础上提出了传感器网络利用距离传感器提供单向栅栏覆盖的充分条件, 并设计了一个非法入侵者检测协议。Dewitt J 等人^[15]研究了能量收集无线传感器网络中的栅栏生命期问题, 提出了一种在 k -栅栏中调度最多活跃栅栏而保持网络永久运行的算法。Silvestri S 等人^[16]研究了移动传感器网络中可移动节点自部署形成 k -栅栏的问题, 提出 MobiBar 自部署算法并证明了该算法能够在有限时间内调度节点移动到相应位置, 从而利用给定数量的传感器节点最大程度地形成 k -栅栏。

此外, 一些学者开始关注节点定位误差对栅栏覆盖的影响^[17,18]。

综上所述, 栅栏覆盖领域研究的发展呈现出多元方向, 从最初的栅栏的可构建问题到栅栏中节点的调度问题、有向传感器节点的栅栏覆盖问题、可移动节点在栅栏中的利用问题、栅栏中的间隙修复或薄弱点强化问题等。本文的研究就是关注到栅栏形成后, 随着节点能量的消耗, 感知半径逐渐减小, 栅栏中节点感知范围重叠少的部分极易出现间隙, 从而影响栅栏的有效性。而可移动传感器节点已经被广泛应用在无线传感器网络领域, 本文关注如何更加充分有效地利用可移动节点来强化栅栏中可能存在的薄弱点, 从而提升栅栏的生存时间。因此, 本文通过分析栅栏中传感器节点感知范围的变化作为强化栅栏的基本依据, 设计了一种基于二次部署的栅栏强化方法, 该方法通过再次部署较少的移动节点将栅栏中薄弱点进行强化, 使得栅栏不容易出现间隙, 维持栅栏的有效性, 提升栅栏的生存时间。

2 初始栅栏分析

在监测区域中部署一些传感器节点后, 这些节点构建成了初始的栅栏, 然而栅栏中相邻节点的感知范围重叠部分大小不一。随着节点能量的消耗, 其感知范围逐渐缩小, 因此感知范围重叠部分少的地方极易出现栅栏间隙, 监测目标就可以通过间隙穿越栅栏而不被监测到。部署 WSN 栅栏需要耗费大量的资源, 如果因为栅栏中某些薄弱点的存在而造成栅栏过早失效是一种极大的浪费。因此, 找出栅栏中的薄弱点然后利用可移动传感器节点进行强化, 具有重要的现实意义。

2.1 能耗感知模型

传感器节点的感知半径与节点自身存储的能量有关系: 当节点能量充足时, 感知半径最大; 随着能量消耗, 感知半径逐渐减小。本文采用被广泛采用的感知能耗模型^[19], 如式 (1) 所示。

$$r_k = \sqrt{e_k / c_1} \quad (1)$$

其中, e_k 为节点消耗的能量, c_1 表示感知常数, r_k 表示感知半径变化量。

假设传感器节点的初始总能量为 E , 如式 (2) 所示, 当节点感知半径减小到 0 时, 节点的能量刚好消耗完。当节点消耗能量为 e 时, 节点的感知半径 r 如式 (3) 所示。

$$E = c_1 \times R^2 \quad (2)$$

$$r = R - \sqrt{e / c_1} \quad (3)$$

式 (2)、式 (3) 中 R 为节点最大感知半径。

假设节点的能量主要由节点感知而消耗, 通过节点能耗感知模型可以对初始栅栏和强化后的栅栏进行顽健性分析。

2.2 薄弱点查找

本文假设传感器节点已经通过定位技术获得位置坐标。初始构建的栅栏节点能量充足, 感知半径为 R 。随着能量的消耗, 感知半径减小, 栅

栏中相邻节点间距离接近 $2R$ 的部分极易出现间隙。以节点间距离 d 作为薄弱点查找的依据, d 越大, 该处的栅栏越容易出现间隙, 栅栏薄弱点如图 1 所示, 薄弱点的坐标为节点 n_1 和 n_2 的坐标中点。

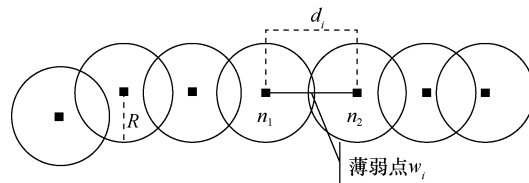


图1 栅栏中的薄弱点

确定薄弱点的过程首先是遍历一条栅栏中所有的传感器节点, 计算相邻节点的距离 d 。假设栅栏由 s 个传感器节点构成, 栅栏中相邻节点间距离的集合为 $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_{s-1}\}$ 。

随机部署静态传感器节点, 假设集合 D 中的元素满足高斯分布, 如式 (4) 所示。

$$f(d_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(d_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式 (4) 中, μ 为期望, σ 为标准差, 如下:

$$\mu = \frac{1}{s-1} \sum_{i=1}^{s-1} d_i \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{s-2} \sum_{i=1}^{s-1} (d_i - \mu)^2} \quad (6)$$

本文将集合 D 中元素 $d_i \in [\mu + \sigma, 2R]$ 对应的相邻节点 n_1 和 n_2 的坐标中点 w_i 作为薄弱点, 建立薄弱点集合 $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\}$ 。

3 二次部署

目前已经有一些研究利用移动节点来修复栅栏^[6,8,11], 这些移动节点通常是和静态节点混杂在一起, 一次性部署在监测区域中, 这种部署方式使得移动节点被利用的概率低, 造成大量移动节点不能得到有效的利用。同时移动节点的价格昂贵, 这种部署方式无疑大大增加了部署栅栏的成本。为提高移动节点的利用率, 增加栅栏的顽健



性, 本文提出了二次部署的方法: 第一次部署静态节点, 利用静态节点构建栅栏; 第二次沿着已经构建的栅栏再次部署移动节点, 利用移动节点修补或强化栅栏, 如图 2 所示。

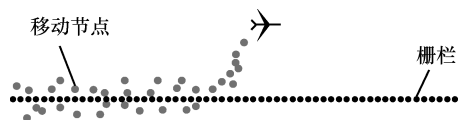


图 2 二次部署

步骤 1 根据部署区域的环境和要求, 可采用泊松部署、随机均匀部署、基于直线部署等方式部署静态传感器节点^[20-22], 然后可采用参考文献[23]等栅栏构建算法构建栅栏。此时, 初始构建的栅栏可能会存在一些薄弱点, 栅栏运行一段时间后, 随着节点能量的消耗, 容易出现间隙, 从而导致栅栏的监测功能失效, 因此进行步骤 2, 部署移动节点用于强化栅栏。

步骤 2 部署移动节点的方式和参考文献[6]采用的基于直线部署方法类似, 这次是沿着步骤 1 中已构建的栅栏部署可移动传感器节点。二次部署方法使得移动节点有目标性地部署在栅栏旁边, 因此能更充分地用于栅栏的修补和强化工作。

此外, 二次部署的可移动节点在用于强化之前不参与栅栏的路由。当可移动节点移动到薄弱点时, 加入栅栏中, 并与相邻的两个节点通过 hello 消息建立邻居关系, 局部更新路由信息。由于不涉及栅栏全局路由更新, 这一过程的通信能耗很少, 可以忽略。

4 强化栅栏分析

本节主要是通过基于集合的最大流算法 (set-based maximum flow algorithm) 计算可强化的薄弱点数量, 然后将可移动节点移动到栅栏中的薄弱点强化栅栏。强化后的栅栏和初始栅栏相比更加顽健, 随着节点能量消耗, 强化后的栅栏不容易出现间隙。

4.1 可强化的薄弱点数量

目前很多研究都采用最大流算法解决可修复栅栏间隙数量这个问题^[6,8]。通过该方法能准确计算出最大可修复栅栏间隙的数量, 然而移动节点的数量多, 该算法效率并不高。本文强化栅栏薄弱点与栅栏间隙修复问题相似, 因此提出一种基于集合的最大流算法, 在保证准确率的前提下提高了算法的效率。

假设栅栏的薄弱点有 $w_i, w_{i+1}, w_{i+2}, \dots, w_k$, 可移动节点的集合为 $M = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_n\}$, 移动节点的可移动距离为 md 。当 w_i 与 m_i 的距离小于 md , 则称 m_i 为薄弱点的邻居节点。算法具体步骤如下。

以薄弱点 w_i, w_{i+1}, w_{i+2} 为例, 计算它们的邻居移动节点, 分别为集合 A, B, C , 这些集合中可能包含薄弱点的公共邻居节点, 然后将这些公共邻居节点区分开, 以集合 A, B 为例, 如式 (7) ~ 式 (9) 所示。

$$a = A - A \cap B \quad (7)$$

$$b = A \cap B \quad (8)$$

$$c = B - A \cap B \quad (9)$$

其中, a 为 w_i 的邻居节点集合、 b 为 w_i, w_{i+1} 的公共邻居节点集合, c 为 w_{i+1} 的邻居节点集合。

为应用最大流算法求解从集合 a, b, c 中分别派遣多少个移动节点去强化薄弱点 w_i, w_{i+1}, w_{i+2} 的问题, 以集合 a, b, c 以及薄弱点 w_i, w_{i+1}, w_{i+2} 为顶点, 并增加两个虚拟节点 u, v 分别作为起始顶点和结束顶点, 构建一个网络流图 G (如图 3 所示)。连接顶点 a 与薄弱点 w_i 之间的边的权重表示集合 a 中有 N_a 个可移动节点可以到达薄弱点 w_i , 连接顶点 b 与薄弱点 w_i 之间的边的权重表示集合 a 中有 N_b 个可移动节点可以到达薄弱点 w_i , 依次类推。与起始顶点 u 相连的边的权重值为相应的集合元素的数量, 与结束顶点 v 相连的边的权重值都为 1, 因为强化薄弱点的过程中只需要将一个可移动节点移动到薄弱点位置就可强化

薄弱点。图3中集合 d 为 w_{i+2} 的邻居节点集合。

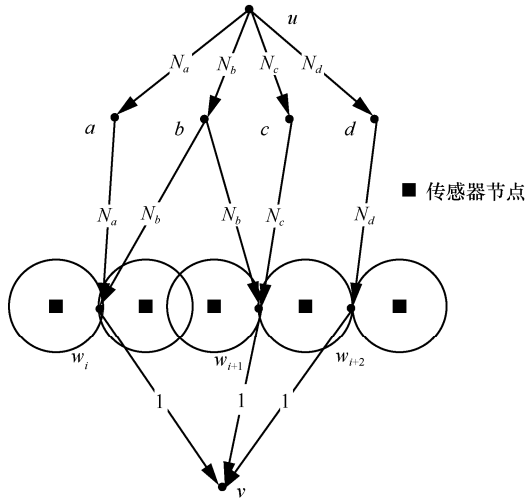


图3 带权有向流图

采用最大流算法计算图 G 的最大流,当最大流等于薄弱点的数量时,薄弱点可全部被强化,否则存在不能被强化的薄弱点,因为它没有可移动邻居节点。

4.2 强化策略

本节主要研究利用移动节点强化栅栏薄弱点的移动距离总和最小。通过第4.1节得到了所有薄弱点的邻居节点集合(a 、 b 、 c 、 d 等),合并邻居节点集合 $N = a \cup b \cup c \cup d \cup \dots$,假设集合 N 中的可移动节点到它的邻居薄弱点的距离集合为 $MD = \{md_1, md_2, md_3, \dots, md_{num} \mid md_i \leq md\}$,集合 MD 中有 num 个元素,对集合 MD 升序排序得到集合 MD' ,集合 MD' 的第一个元素为 md_{min} ,最后一个元素为 md_{max} 。假设存在一个距离 $md_{optimum}$, $md_{min} < md_{optimum} < md_{max}$,使得满足集合 $ED = \{MD' \mid md_i \leq md_{optimum}\}$ 的移动节点恰好能强化所有的薄弱点,则此时移动节点移动的距离总和最小。

本文采用二分查找法搜索 $md_{optimum}$, ε 为一个阈值,用于算法逼近,算法具体步骤如下。

步骤1 初始化 $md_{optimum} = md_{\lceil \frac{1+num}{2} \rceil}$, $L = 0$,

$$optimum = \left\lceil \frac{1+num}{2} \right\rceil。$$

步骤2 更新薄弱点的邻居集合 a 、 b 、 c 、 d 等,将距离薄弱点大于 $md_{optimum}$ 的节点从邻居集合移除,并更新有向图 G 的权重和拓扑。

步骤3 计算更新后有向图 G 的最大流,如果最大流小于薄弱点数量,则 $md_{optimum} = md_{\lceil \frac{optimum+num}{2} \rceil}$,

$$L = optimum, optimum = \left\lceil \frac{optimum+num}{2} \right\rceil, \text{最大流}$$

不可能大于薄弱点的数量。如果最大流等于薄弱点数量,且 $|L - optimum| < \varepsilon$,输出 $md_{optimum}$,算法结束,否则执行步骤4。

步骤4 跳回步骤2。

5 仿真实验

实验中已经构建的栅栏长度为5000 m,部署区域是个长为5000 m、宽为100 m的矩形区域,已构建的栅栏将部署区域均匀分为上下两部分。移动节点沿着已构建的栅栏均匀分布在部署区域中。移动节点和静态节点的最大感知半径为 R ,传感器节点能量 $E=900$,移动节点的可移动距离为 md 。

5.1 二次部署分析

本文采用二次部署的方式能大大提高移动节点的利用率。第二次部署移动节点,使得移动节点带有目的地部署在栅栏周围,因此能大大提高强化的效果。实验对比了一次部署(FDA)和二次部署(SDA)的结果,同时又对比了移动节点的不同移动距离对栅栏强化的影响。实验中的强化率(reinforce rate)是指可用移动节点强化的薄弱点数量除以栅栏薄弱点的总数量,实验结果如图4所示。

实验结果表明,部署相同数量的可移动节点,二次部署方式比一次部署方式能强化更多的栅栏薄弱点。当移动节点数量为600时,二次部署方

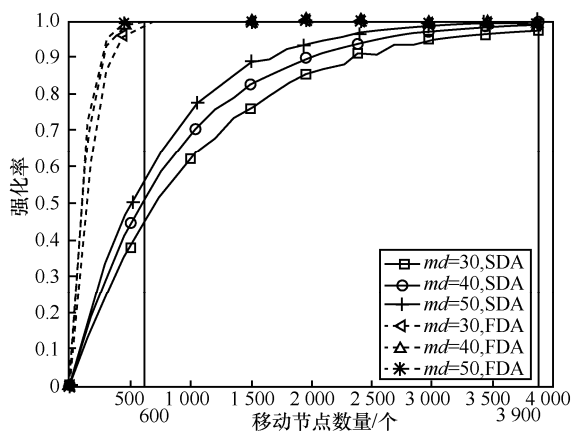


图4 二次部署分析

式能强化所有的栅栏薄弱点, 强化率为 1, 而一次部署方式需要 3 900 个移动节点强化率才能达到 1。同时实验结果还表明, 移动节点的可移动距离越大, 强化率越高。

5.2 可强化薄弱点分析

实验验证本文提出的栅栏强化算法的性能, 实验中移动节点的可移动距离 $md=50$ m, 实验对比了参考文献[6,8]的最大流 (maximum flow) 算法、贪婪 (greedy) 算法和本文提出的基于集合的最大流 (S-maximum flow) 算法, 贪婪算法总是派遣距离薄弱点最近的可移动节点强化栅栏, 不从整体考虑可强化薄弱点的数量, 而本文算法和参考文献[8]提出的最大流算法首先考虑能够强化薄弱点的数量, 其次考虑如何派遣可移动节点使得强化过程中节点的平均移动距离最小, 实验结果如图 5 所示。

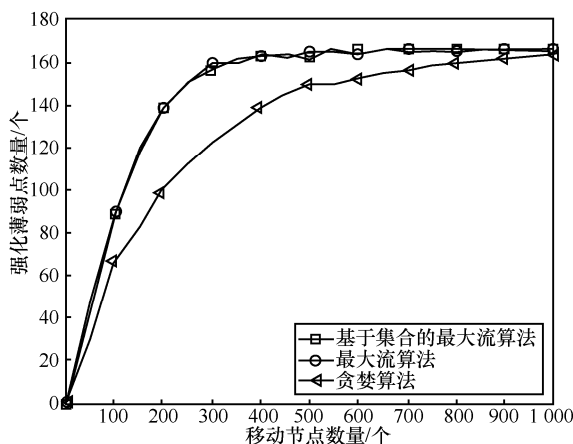


图5 可强化薄弱点分析

实验结果表明, 部署相同数量的可移动节点情况下, 基于集合的最大流算法和最大流算法计算得到的可强化薄弱点的数量是相同的, 同时它们都比贪婪算法效果好。因为最大流算法根据薄弱点建立有向图, 然后计算有向图中的最大流, 该最大流的值即表示最多可强化薄弱点的数量。集合最大流算法以邻居集合为单位, 屏蔽了单个传感器节点, 建立具有更少节点的有向图, 因此大大提高了效率, 且不会影响算法的运算结果。而贪婪算法每次都选取距离薄弱点最近的移动来强化栅栏薄弱点, 没有从整体考虑, 因此可强化的薄弱点数量大大减少。

5.3 平均移动距离分析

本文利用二分搜索算法最大化强化薄弱点的数量, 同时使得移动节点的移动距离总和最小。实验对比了可移动节点在 $md=30$ m 和 40 m 时的平均移动距离, 实验结果如图 6 所示。

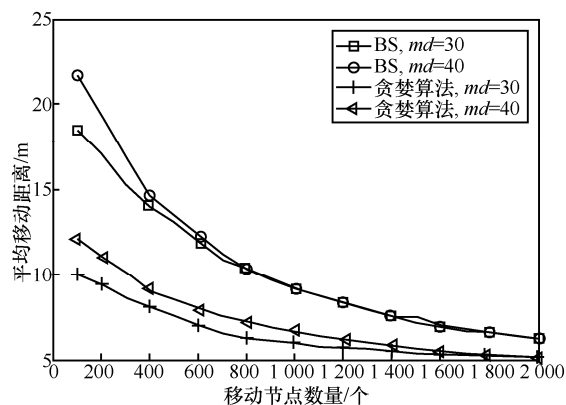


图6 平均移动距离分析

实验结果表明, 本文的二分搜索 (BS) 算法的移动节点平均移动距离大于贪婪算法。结合第 5.2 节实验结果发现贪婪算法能强化的薄弱点数量比本文方法少, 它都是选择距离薄弱点最近的移动节点, 所以贪婪算法的平均移动距离比较小, 而本文的方法需要从全局出发, 考虑最多能强化薄弱点的数量, 使薄弱点被全面的强化所以移动节点的平均移动稍大。同时移动节点的可移动距离越大, 移动节点平均的移动距离也越大, 因为移动距离越大, 会导致可强化的薄弱点数量增加,

因此同样导致平均移动距离的增加。

5.4 顽健性分析

本实验主要验证强化后的栅栏是否比初始栅栏具有更高的顽健性。实验中按照初始栅栏的薄弱情况,由最薄弱的点依次强化,分别强化了 1/7、1/5、1/3、1 的薄弱点和没有进行强化的栅栏进行对比。实验中传感器节点的能量消耗采用第 2.1 节的能耗模型,栅栏的覆盖率 (coverage rate) 是指栅栏间隙和栅栏初始长度的比值,实验结果如图 7 所示。

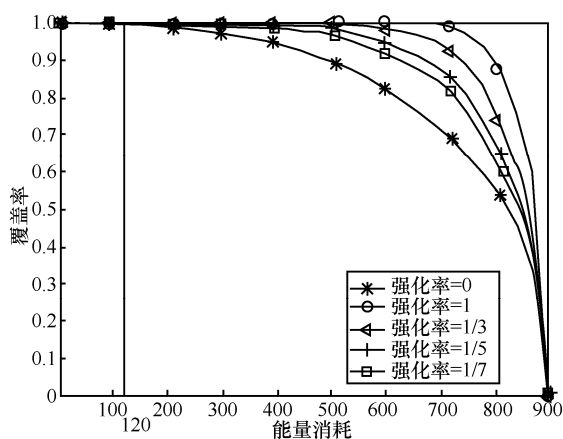


图7 顽健性分析

实验结果表明,栅栏的覆盖率随着传感器节点能量的消耗逐渐减小,因为随着节点能量的消耗,感知半径会逐渐减小,栅栏的间隙会越来越大。其中没有强化过的栅栏在传感器节点能量消耗了 120 时就出现了间隙,覆盖率低于 1,强化薄弱点的数量越多,栅栏越不容易出现间隙,而且强化过的栅栏比没强化过的栅栏具有更高的覆盖率。实验证明了强化栅栏可以提高栅栏的顽健性。

5.5 算法复杂度分析

本文提出的基于集合的最大流算法比传统的最大流算法具有更好的性能。实验在移动节点的可移动距离为 $D=40\text{ m}$ 、 50 m 两种情况下对比了这两种方法的运算效率,实验结果如图 8 所示。

实验结果表明,基于集合的最大流算法具有更高的效率,并且随着移动节点的可移动距离增加,

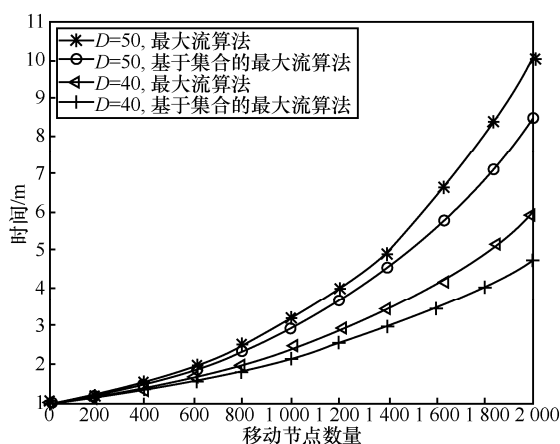


图8 复杂度分析

算法运算的时间也相应增加,这是因为移动节点的可移动距离越大,有向图 G 中的点和线都在增加,图 G 的拓扑结构更大,所以运算时间更长。

6 结束语

本文在目前研究成果的基础上提出了二次部署的部署方式,能大大提高移动节点的利用率,同时利用基于集合的最大流算法计算可强化节点的数量,然后利用二分搜索方法在保证最大化强化薄弱点数量的前提下使得移动节点的移动距离总和最小。但是这些工作还存在不足之处,如栅栏薄弱点的查找没有考虑入侵情况,在实际环境中,节点感知到入侵者数量越多,节点能量消耗得越快。因此在后续工作中,栅栏薄弱点的查找将结合入侵的实际情况,设计更加完善的栅栏薄弱点查找算法。

参考文献:

- [1] SAIPULLA A, CUI J H, FU X, et al. Barrier coverage: foundations and design[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2014: 59-115.
- [2] WU F, GUI Y, WANG Z, et al. A survey on barrier coverage with sensors[J]. Frontiers of Computer Science, 2016, 10(6): 968-984.
- [3] 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.
BAN D S, WEN J, JIANG J, et al. Constructing k -barrier coverage in mobile wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2011, 22(9): 2089-2103.
- [4] SILVESTRI S, GOSS K. MobiBar: an autonomous deployment



- algorithm for barrier coverage with mobile sensors[J]. *Ad Hoc Networks*, 2017(54): 111-129.
- [5] KUMAR S, LAI T H, ARORA A. Barrier coverage with wireless sensors[J]. *Wireless Networks*, 2007, 13(6): 284-298.
- [6] SAIPULLA A, WESTPHAL C, LIU B, et al. Barrier coverage with line-based deployed mobile sensors[J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(4): 1381-1391.
- [7] MOSTAFAEI H. Stochastic barrier coverage in wireless sensor networks based on distributed learning automata[J]. *Computer Communications*, 2015, 55(C): 51-61.
- [8] XU B, ZHU Y, KIM D, et al. Strengthening barrier-coverage of static sensor network with mobile sensor nodes[J]. *Wireless Networks*, 2016, 22(1): 1-10.
- [9] 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[J]. *软件学报*, 2014, 25(1): 85-92.
- LU Y H, GUO Z W. Optimized deployment strategy of barrier coverage based on probability sensing model[J]. *Journal of Software*, 2014, 25(1): 85-92.
- [10] 应可珍, 邬锦彬, 夏明, 等. 一种分布式的 1-栅栏覆盖构建算法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(3): 720-727.
- YING K Z, WU J B, XIA M, et al. A distributed algorithm for constructing 1-barrier coverage[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(3): 720-727.
- [11] KONG L H, LIN S, XIE W, et al. Adaptive barrier coverage using software defined sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(20): 7364-7372.
- [12] LIU T, LIN H, WANG C, et al. Chain-based barrier coverage in WSNs: toward identifying and repairing weak zones[J]. *Wireless Networks*, 2016, 22(2): 523-536.
- [13] 范兴刚, 王超, 杨静静, 等. 一种基于选择框的有向 k -栅栏构建算法[J]. *计算机学报*, 2016, 39(5): 946-960.
- FAN X G, WANG C, YANG J J, et al. A strong k -barrier construction scheme based on selecting box for directional sensor networks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(5): 946-960.
- [14] CHEN A, ZHU Y, LI Z, et al. Is one-way barrier coverage achievable using comprehensive sensors? [J]. *Computer Communications*, 2015(57): 100-114.
- [15] DEWITT J, SHI H. Barrier coverage in energy harvesting sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2017(56): 72-83.
- [16] SILVESTRI S, GOSS K. MobiBar: an autonomous deployment algorithm for barrier coverage with mobile sensors[J]. *Ad Hoc Networks*, 2017(54): 111-129.
- [17] SHEN J, WENG Z, WANG Z. Fault tolerant line-based barrier coverage formation in mobile wireless sensor networks[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015: 930585.
- [18] WANG Z, CHEN H, CAO Q, et al. Achieving location error tolerant barrier coverage for wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2017(112): 314-328.
- [19] LU M, WU J, CARDEI M, et al. Energy-efficient connected coverage of discrete targets in wireless sensor networks[J]. *International Journal of Ad Hoc & Ubiquitous Computing*, 2009, 4(3/4): 137-147.
- [20] 宋朝, 郑迎凤, 赵文彬. 一种有效的稀疏无线传感器网络路由方案[J]. *电信科学*, 2016, 32(4): 59-64.
- SONG C, ZHENG Y F, ZHAO W B. An effective routing scheme of sparse wireless sensor networks[J]. *Telecommunications Science*, 2016, 32(4): 59-64.
- [21] 赵晗, 黄少卿. 基于改进蚁群算法的无线传感器网络最小跳数路由选择方法[J]. *电信科学*, 2016, 32(3): 113-117.
- ZHAO H, HUANG S Q. Routing optimization method of WSN based on improved ant colony algorithm[J]. *Telecommunications Science*, 2016, 32(3): 113-117.
- [22] 马晨明, 王万良, 洪榛, 等. 带有能量补给的异构无线传感器网络拓扑控制算法[J]. *电信科学*, 2015, 31(8): 30-38.
- MA C M, WANG W L, HONG Z, et al. Topology control algorithm in heterogeneous wireless sensor network with energy supply[J]. *Telecommunications Science*, 2015, 31(8): 30-38.
- [23] 毛科技, 方凯, 戴国勇, 等. 基于改进蚁群算法的无线传感器网络栅栏覆盖优化研究[J]. *传感技术学报*, 2015(7): 1058-1065.
- MAO K J, FANG K, DAI G Y, et al. Research on optimization of barrier coverage for wireless sensor network using improved ant colony algorithm[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015(7): 1058-1065.

[作者简介]



戴国勇 (1983-), 男, 浙江工业大学计算机科学与技术博士生, 浙江树人大学信息科技学院讲师, 主要研究方向为无线传感器网络、网络安全等。



施伟元 (1994-), 男, 浙江工业大学计算机科学与技术学院硕士生, 主要研究方向为物联网技术、大数据分析。

应可珍 (1978-), 女, 浙江工业大学计算机科学与技术学院博士生, 浙江财经大学东方学院副教授, 主要研究方向为物联网数据融合。

陈庆章 (1956-), 男, 博士, 浙江工业大学计算机学院教授、博士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、分布式处理与协同工作等。

毛科技 (1979-), 男, 博士, 浙江工业大学计算机科学与技术学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、大数据分析。