

无线传感器网络栅栏覆盖改进

司鹏举, 吴成东, 纪鹏[†], 楚好, 于晓升

(东北大学 机器人科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要: 栅栏覆盖是无线传感器网络中的研究热点, 鉴于移动节点的高昂造价以及在移动过程中的巨大能耗, 针对高效节能的修复栅栏漏洞问题进行研究. 建立静止节点的权重图, 并利用迪杰斯特拉算法(Dijkstra)寻找所需最少数目的移动节点和构建栅栏覆盖的最短路径. 根据构建栅栏覆盖的最短路径和基于路径上的每个栅栏漏洞所需的最少移动节点, 将栅栏漏洞划分为简单情况和一般情况, 借助于最大权匹配算法(Kuhn-Munkres)求解移动节点的最短移动距离. 仿真实验表明, 所提出算法明显减少了移动节点的移动距离, 实现了栅栏覆盖.

关键词: 无线传感器网络; 栅栏覆盖; 栅栏漏洞; 移动节点; 最短路径; 最大权匹配

中图分类号: TP393

文献标志码: A

Improving barrier coverage in wireless sensor networks

SI Peng-ju, WU Cheng-dong, JI Peng[†], CHU Hao, YU Xiao-sheng

(Faculty of Robot Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Barrier coverage is a research hot topic in wireless sensor networks (WSNs). Due to the high cost of mobile sensors and the high energy consumption during the moving process, it is critical to address the problem with an energy-efficient method to mend barrier gaps. Therefore, we design a weighted graph of stationary sensors, use the Dijkstra algorithm to search the minimum number of mobile sensors required, and construct the shortest path of stationary sensors. According to the required number of mobile sensors, barrier gaps are divided into simple case and general case. Finally, the Kuhn-Munkres (KM) algorithm is used to solve the minimum movement of the mobile sensors problem. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively improve barrier coverage and minimize the moving distance of mobile sensors.

Keywords: wireless sensor networks; barrier coverage; barrier gaps; mobile sensor; shortest path; maximum weighted matching

0 引言

无线传感器网络(Wireless sensor networks, WSNs)是由大量具有计算、存储和无线通信能力的节点构成的分布式感知网络系统, 一般应用于煤矿监控、桥梁监测、地震区域探测、核泄漏监测以及灾难搜救等复杂环境^[1]. 覆盖的完整性是构建一个稳定可靠的无线传感器网络的前提. 按照应用场景的不同, 无线传感器网络覆盖可以分为区域覆盖^[2-3]、目标覆盖^[4]和栅栏覆盖^[5-6].

栅栏覆盖为探测入侵者, 在感兴趣区域(Region of interest, RoI)中部署一定数量的传感器节点^[7]. 静

止传感器节点的随机部署策略或者电量耗尽等原因会产生栅栏漏洞, 将严重降低无线传感器网络感知服务质量(Quality of service, QoS), 借助移动节点修复栅栏漏洞是一种有效的机制. 由于移动节点的机动性, 通常造价要远高于静止节点. 在使用移动节点时, 应尽量减少移动节点的数量. 移动节点的能量消耗与自身移动的距离成线性比例关系, 但是由于移动节点的电池能量有限, 特别是在移动过程中的巨大能量消耗^[8-9], 一旦电池能量耗尽, 移动节点便会成为新的故障节点, 无法执行正常的感知任务. 所以需要减少移动节点的移动距离, 减少移动节点的能量消耗, 增加

收稿日期: 2017-11-10; 修回日期: 2018-01-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1713216, 61471110, 61701101, 61503274, 61733003); 国家机器人重点专项项目(2017YFB1300900); 中央高校基本科研业务费专项项目(N160413002, N160404003); 辽宁省自然科学基金项目(2017010975-301); 辽宁省教育厅科技项目(L20150185); 沈阳市科研基金项目(17-87-0-00).

责任编委: 虞文武.

作者简介: 司鹏举(1987-), 男, 博士生, 从事无线传感器网络覆盖的研究; 吴成东(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 从事传感器网络、机器人等研究.

[†]通讯作者. E-mail: jipeng@mail.neu.edu.cn.

整体网络寿命,有必要研究如何高效节能地利用移动节点修复栅栏漏洞。

目前,针对借助移动节点改善栅栏覆盖的研究已经取得了一系列的研究^[10]。Saipulla等^[11]研究了不同的随机部署策略对栅栏覆盖的影响,并且首次探究了使用移动节点修复栅栏漏洞的策略。Kim等^[12]研究了如何组合使用静止节点和移动节点,达到了最大化栅栏覆盖时间。Tian等^[13]研究了在恶劣天气下如何组合使用静止节点和移动节点,完成最少移动节点的能量消耗的栅栏覆盖。但是,现有的研究成果在使用移动节点改善栅栏覆盖时,没有充分利用无线传感器节点的感知模型的特点。Chen等^[14]在研究目标覆盖时,提出一种多项式近似算法,使用圆盘感知模型边缘也能够感知目标的特性,最小化移动节点达到最大化目标覆盖的目的。Liao等^[8]在研究目标覆盖时,同样也利用了圆盘感知模型特点。如图1所示,使用移动节点 m_1 修复静止节点 s_1 与 s_2 之间的栅栏漏洞。现有文献都是采用图1(b)的移动策略,即将移动节点 m_1 移动到静止节点的中线上。而采用图1(c)的移动策略后,同样可以完成修复栅栏漏洞的任务,并且明显降低了移动节点的移动距离。

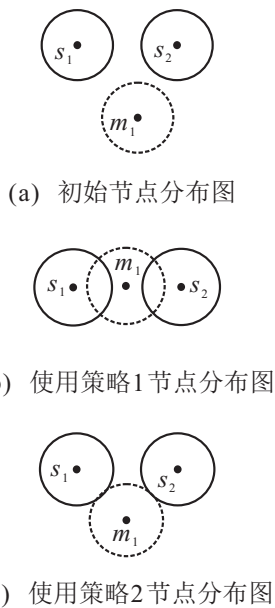


图1 不同的栅栏漏洞修复策略

基于以上观察,本文提出一种高效节能的修复栅栏覆盖的策略,贡献主要有以下几点:

1) 在修复栅栏漏洞的现有文献中,移动节点只是简单地重新部署到静止节点的连线上。根据传感器节点感知模型特点,提出一种改进栅栏修复策略,在使用最少数量的移动节点完成栅栏漏洞修复基础上,减少了移动节点的移动距离。

2) 利用静止节点的分布,建立静止节点的权重

图,使用迪杰斯特拉(Dijkstra)算法^[15]寻找到潜在的一条栅栏覆盖路径,并计算修复栅栏覆盖所需的最少数量的移动节点。

3) 栅栏漏洞划分为特殊情况和一般情况。特殊情况中,只需要一个移动节点修复栅栏漏洞;一般情况需要多个移动节点修复栅栏漏洞。使用最大权匹配(Kuhn-Munkres, KM)算法完成栅栏漏洞的修复。

1 系统模型

感兴趣区域中随机部署两种类型的传感器节点:静止节点和移动节点。每个节点都可以通过GPS或者定位技术知道自身的地理位置^[16]。除了移动性能外,移动节点和静止节点的属性完全相同。本文采用传感器节点的圆盘感知模型,感知半径为 r ,当入侵者通过节点的感知区域时,能够被节点探测到。

移动节点的能耗与移动距离成正比例关系,换言之,节点移动越远,消耗的能量越多。由于无线节点通常是电池供电,一旦电池耗尽,节点便无法正常工作,成为故障节点。

根据栅栏覆盖的应用特点,通常感兴趣区域是一个狭长的条形区域,例如国境边界或者其他重要区域的边界线,需要部署大量的传感器节点。Saipulla等^[17]证明了线性随机部署方式会有效减少构造栅栏覆盖所需的传感器数目。如图2所示,栅栏覆盖的感兴趣区域是一个长方形区域,尺寸为 $L \times W, L \gg W$,静止节点 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 和移动节点 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_m\}$ 均线性随机部署在感兴趣区域上。静止节点 s_i 和移动节点 m_j 的感知范围都是以其节点坐标 (sx_i, sy_i) 和 (mx_j, my_j) 为中心、半径为 r 的圆形范围。规定节点从左至右依次增序,即 $sx_i < sx_{i+1}, i = 1, 2, \dots, n, mx_j < mx_{j+1}, j = 1, 2, \dots, m$ 。感兴趣区域的左右边界的横坐标分别用 x_l 和 x_r 表示。栅栏覆盖要求传感器节点从左至右依次连接。图2中静止节点 s_4 和 s_5 没有连接,之间出现栅栏漏洞,从而入侵者可以从栅栏漏洞中找到穿越路径,进入传感器网络要保护的区域,因此需要调配移动节点去修复栅栏漏洞。

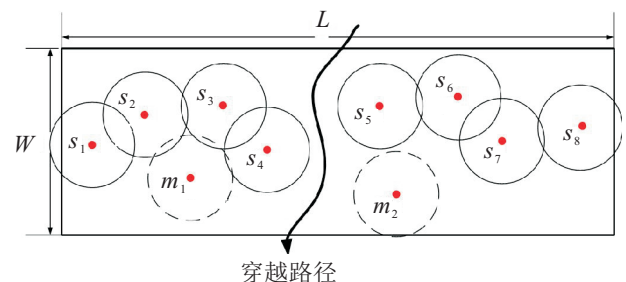


图2 栅栏覆盖模型示例

移动节点的造价要高于静止节点,因此希望执行栅栏覆盖任务主要由静止节点完成. 当出现栅栏漏洞时,移动节点作为补充去改善栅栏覆盖. 本文的任务是使用最少数量的移动节点,同时减少移动节点的移动距离,完成栅栏漏洞的修复工作.

2 寻找栅栏漏洞

给定静止节点集合 S , 增加两个虚拟节点 s_0 和 s_{n+1} 分别代表感兴趣区域的左右边界. 为保持一致性,用 $x_0 = x_l$ 和 $x_{n+1} = x_r$ 表示 s_0 和 s_{n+1} 的横坐标. 由静止节点集合 $V = \{s_0, s_1, \dots, s_n, s_{n+1}\}$ 可以建立一个无权图 $G = (V, E)$, 其中 V 为顶集, E 为边集.

由于静止节点的坐标已知,节点之间的距离为

$$d_{ij} = \begin{cases} |x_j - x_i|, & i = 0, 0 < j \leq n + 1; \\ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, & 0 < i < j < n + 1; \\ |x_j - x_i|, & 0 < i < n + 1, j = n + 1. \end{cases} \quad (1)$$

静止节点和移动节点具有相同的感知半径 r , 可以给无权图的每条边加上权重, 有

$$w_{ij} = \begin{cases} \left\lceil \frac{d_{ij} - r}{2r} \right\rceil, & i = 0, 0 < j \leq n + 1; \\ \left\lceil \frac{d_{ij} - 2r}{2r} \right\rceil, & 0 < i < j < n + 1; \\ \left\lceil \frac{d_{ij} - r}{2r} \right\rceil, & 0 < i < n + 1, j = n + 1. \end{cases} \quad (2)$$

无权图可以转化为有权图 $G = (V, E, W)$, 其中 $W = \{w_{01}, w_{02}, \dots, w_{ij}, \dots, w_{n(n+1)}\}, 0 \leq i < j \leq n$. 每条边上的权重代表需要补充的移动节点数目. $w_{ij} = 0$ 代表两个静止节点 s_i 与 s_j 相互连接, 不存在栅栏漏洞, 不需要增加移动节点. 如果节点 s_0 到 s_{n+1} 之间的边权重之和等于 0, 则说明存在一条完整的栅栏, 不需要增加任何移动节点. 如果 s_0 到 s_{n+1} 之间任何边的权重之和均大于 0, 则说明存在栅栏漏洞, 需要增加移动节点. 并且为了减少移动节点数量, 需要找到从 s_0 到 s_{n+1} 最小权重的一条路径.

算法 1 迪杰斯特拉算法寻找栅栏漏洞.

输入: 静止节点集合 S , 感兴趣区域长边 L ;

输出: 需要的最少移动节点数目 N_m , 构造栅栏覆盖的最短路径 P .

Step 1: 计算每条边的权重, 得到权重集合 W ;

Step 2: 构造权重图 $G = (V, E, W)$, 其中 V 、 E 、 W 分别代表节点集、边集和权重集;

Step 3: 生成权重图 G 的邻接矩阵 A ;

Step 4: $(N_m, P) = \text{Dijkstra}'s(A, s, t)$;

Step 5: 返回 (N_m, P) .

算法 1 使用迪杰斯特拉算法寻找最短路径和最少需要移动节点, 其复杂度为 $O(n^2)$.

3 修复栅栏漏洞

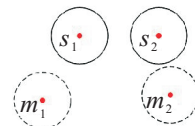
当发现栅栏漏洞存在时, 需要使用移动节点进行修复. 由于移动节点在移动过程中会消耗大量能量, 需要减少移动节点的移动距离, 延长网络寿命.

上一部分建立了栅栏覆盖的权重图, 最短路径上每条边的权重代表需要补充的移动节点数目. 按照需要的移动节点的数量, 分为特殊情况和一般情况.

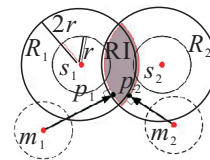
3.1 特殊情况

特殊情况是只需要一个移动节点便可修复栅栏漏洞的情况, 此时权重图中边的权重为 1.

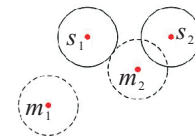
如图 3(a) 所示, 感兴趣区域存在静止节点 $\{s_1, s_2\}$ 和移动节点 $\{m_1, m_2\}$. 由于 $w_{12} = 1$, s_1 与 s_2 之间存在栅栏漏洞, 并且只需要 1 个移动节点修复漏洞.



(a) 初始节点分布图



(b) 移动节点的潜在移动位置



(c) 最终节点分布图

图 3 特殊情况示例

为了修复栅栏漏洞, 需要选择移动节点移动之后的待选位置. 如果 m_1 经过移动与 s_1 连接, 则

$$\sqrt{(sx_1 - mx_1)^2 + (sy_1 - my_1)^2} \leq 2r,$$

其中 (sx_1, sy_1) 和 (mx_1, my_1) 分别是静止节点 s_1 和移动节点 m_1 的坐标. 即移动节点 m_1 的待选位置应该位于以静止节点 s_1 坐标为中心、半径为 $2r$ 的圆形区域 (用 R_1 表示) 内. 同理, 如果移动节点 m_1 经过移动与 s_2 连接, 则移动节点 m_1 的待选位置应该位于以静止节点 s_2 坐标为中心、半径为 $2r$ 的圆形区域 (用 R_2 表示) 内. 因此为了修复 s_1 与 s_2 之间的栅栏漏洞,

移动节点需要移动到 R_1 与 R_2 相交的区域(用 RI 表示),如图3(b)所示.

本文的目的是要修复栅栏漏洞,还要减少移动节点的移动距离. 由于 R_1 和 R_2 都是凸区域,相交区域 RI 也是凸区域^[18],在凸区域 RI 边缘上必然存在唯一点,距离凸区域外的移动节点的距离最短. 特别地,当 $d(s_1, s_2) = 4r$ 时, RI 会变成 s_1, s_2 连线的中点. 在图3(b)中,点 p_1 和 p_2 分别是 RI 边缘上距离 m_1 与 m_2 最短的点. 如图3(c)所示,由于 $d(m_2, p_2) < d(m_1, p_1)$,应该将移动节点 m_2 移动到点 p_2 修复栅栏漏洞.

3.2 一般情况

权重图中边的权重大于1是修复栅栏漏洞的一般情况,此时需要补充多个移动节点到最短路径上.

假设静止节点 $\{s_1, s_2\}$ 边权重 w_{12} 是一个正整数,且 $w_{12} = 2, 3, \dots$. 为了使用最少的移动节点,只需要移动等于 w_{12} 的移动节点修复栅栏漏洞. 设定移动节点从 s_1 到 s_2 方向依次配置,并且以 $2r$ 为长度划分线段 $\{s_1, s_2\}$,得到 w_{12} 个移动节点的待选位置. 首先移动 $w_{12} - 1$ 个移动节点到待选位置,每一个待选位置被一个移动节点占据,剩下的一个待选位置就变成了特殊情况.

如果网络中有 $m(m \geq w_{12})$ 个移动节点可以利用,则对于最开始移动的 $w_{12} - 1$ 个移动节点而言,需要最小化移动距离,建立如下具有多种约束条件的最优化问题:

$$\min \sum_{i=1}^{w-1} \sum_{j=1}^m \delta_{ij} d_{ij}. \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{w-1} \delta_{ij} \leq 1, \forall j = 1, 2, \dots, m; \quad (4)$$

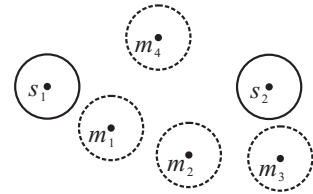
$$\sum_{j=1}^m \delta_{ij} = 1, \forall i = 1, 2, \dots, w - 1; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \delta_{ij} &= 0 \text{ or } 1, i = 1, 2, \dots, w - 1, \\ &j = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (6)$$

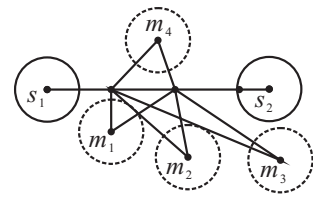
其中: δ_{ij} 为决策变量, $\delta_{ij} = 1$ 表示第 i 个待选位置被1个移动节点占据,否则为0; d_{ij} 为移动节点 m_j 移动到待选位置 i 的移动距离. 约束(4)表示最多1个移动节点可以移动到待选位置,约束(5)表示每个待选位置必须有1个移动节点占据.

如图4(a)所示,感兴趣区域存在静止节点 $\{s_1, s_2\}$ 和移动节点 $\{m_1, m_2, m_3, m_4\}$. 由于 $w_{12} = 3$, s_1 与 s_2 之间存在栅栏漏洞,至少需要3个移动节点修复漏洞. 如图4(b)和图4(c)所示,从 s_1 到 s_2 方向按 $2r$ 为长度依次划分出移动节点的待选位置点. 通过KM算

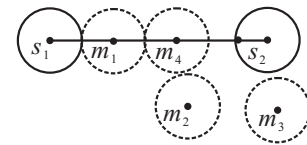
法计算得到, m_1, m_4 分别移动到前2个待选位置时,移动总距离最小,但是移动节点 m_4 和静止节点 s_2 之间仍有栅栏漏洞. 如图4(d)所示,按照特殊情况处理剩下的栅栏漏洞,最终完成了栅栏覆盖.



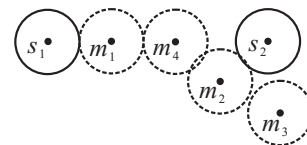
(a) 初始节点分布图



(b) 移动节点的潜在移动位置



(c) 第1次使用KM算法



(d) 第2次使用KM算法

图4 一般情况示例

3.3 修复栅栏漏洞算法

通过以上分析可以得出修复栅栏覆盖可以转化成二分图的最小权匹配问题,借助于最大权匹配算法,可以完美解决此类问题. 修复栅栏漏洞算法可以分两种情况使用最大权匹配算法. 当最短路径上存在边权重 w 大于2时,首先利用最大权匹配算法,完成 $w - 1$ 个移动节点的配置. 最后剩下的栅栏漏洞都是仅需要1个移动节点便可以修复,此时再次利用最大权匹配算法,最终完成栅栏覆盖.

算法2 最大权匹配算法修复栅栏漏洞.

输入: 移动节点集合 M ,最短路径上静止节点集合 P ;

输出: 需要移动的移动节点集合 Q_k ,移动节点的移动总距离 D_m .

Step 1: for $(u, v) \in P$ do //一般情况

Step 2: if $w(u, v) > 1$ then

Step 3: $p_m(u, v)$

Step 4: 以 $2r$ 为长度从 u 到 v 方向划分 (u, v) , 标记 $(w(u, v) - 1)$ 待选位置为 b_u

Step 5: 构造待选位置和移动节点的二分图 G_b

Step 6: 生成 G_b 的伴随矩阵 A_{gm}

Step 7: $(q_\mu, d_\mu) = KM(-a_{gm})$

Step 8: $Q_k \leftarrow q_\mu; D_m \leftarrow d_\mu; M_l \leftarrow m_\mu; B_p \leftarrow (b_\mu, v)$

Step 9: end if

Step 10: end for

Step 11: for $(u, v) \in (B_p \cup (P - P_m))$ do //特殊情况

Step 12: 生成每个栅栏漏洞的移动节点待选位置

Step 13: 构造待选位置和移动节点 $M - M_l$ 的二分图 G_c

Step 14: 生成 G_c 的伴随矩阵 A_{hm}

Step 15: $(q_\lambda, d_\lambda) = KM(-A_{hm})$

Step 16: $Q_k \leftarrow Q_\lambda; D_m \leftarrow d_\lambda$

Step 17: end for

Step 18: 返回 Q_k, D_m

算法2使用最大权匹配算法计算所有移动节点

的最小化移动距离问题. 最大权匹配算法解决最小化匹配问题, 可以使用反值计算解决. 由于最大化匹配算法的算法复杂度为 $O(mn^2)$, 算法2的算法复杂度为 $O(mn^4)$.

4 实验结果及分析

为了验证本文所提出的算法, 进行仿真实验. 设定感兴趣区域为 $1000\text{ m} \times 150\text{ m}$, 静止节点和移动节点均采用线性随机部署方式布置在感兴趣区域中.

首先对本文算法修复栅栏漏洞的有效性进行仿真. 如图5(a)所示, 感兴趣区域中随机部署30个静止节点(实线圆表示其感知范围)和20个移动节点(虚线圆表示其感知范围), 节点感知半径为20 m. 感兴趣区域中有很多栅栏漏洞, 无法构成栅栏覆盖. 如图5(b)所示, 采用本文算法修复栅栏漏洞后, 构造了一条完整的栅栏覆盖, 并且充分考虑了感知模型特点. 按照栅栏漏洞的特点, 分为特殊情况(如使用移动节点{17}修复静止节点{24, 26}之间的漏洞)和一般情况(如利用移动节点{4, 5}修复静止节点{8, 11}之间的漏洞), 减少了移动节点的移动距离.

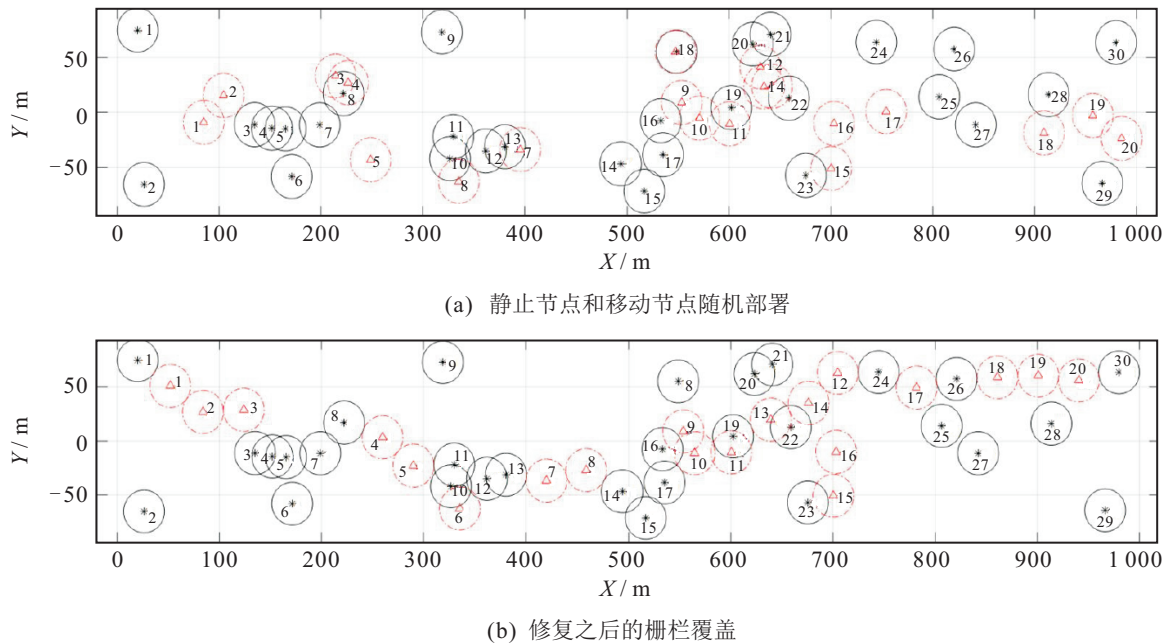


图5 移动节点修复栅栏漏洞

将本文算法与现有文献中关于移动节点修复栅栏漏洞的算法(移动栅栏算法^[11]和生存栅栏算法^[13])进行实验对比, 以表明本文算法的优越性. 图6为静止节点数量与移动节点移动距离之间的关系. 设定感兴趣区域中随机部署50个移动节点, 感知半径为10 m, 以10个静止节点为间隔逐渐计算移动节点移动距离. 由图6可见, 随着静止节点的增加, 移动节点

的移动总距离对于所有的算法呈下降趋势. 由仿真结果可以看出, 本文提出的算法优于移动算法和生存算法, 特别是随着静止节点的增加, 越来越多特殊情况的栅栏漏洞出现, 本文算法更能体现其优越性. 其根本原因是移动算法和生存算法都简单地将移动节点重新移动到两个静止节点的连线上. 当静止节点较多时, 会出现只需要一个移动节点便能修复栅栏

漏洞的特殊情况,尤其是传感器节点的感知半径较大时,采用本文的特殊情况进行处理时,对比其他算法,将明显减少移动节点的移动总距离。

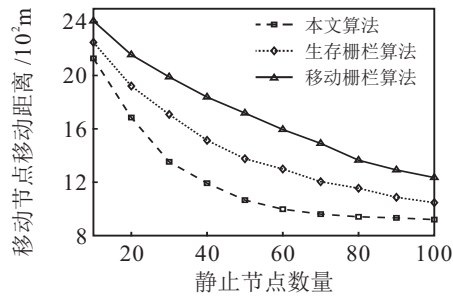


图6 静止节点数量与移动节点移动距离之间的关系

5 结论

本文针对无线传感器网络中的栅栏漏洞探测和修复问题进行了研究. 首先建立静止节点的权重图, 利用迪杰斯特拉算法获得栅栏漏洞区域, 并得到修复栅栏漏洞的最短路径; 然后根据最短路径上的边权重将修复栅栏漏洞分为一般情况和特殊情况, 并提出了使用最大权匹配算法修复栅栏漏洞的算法. 仿真结果表明, 本文算法可以有效完成栅栏漏洞修复, 减少移动节点移动距离, 进而能够延长网络寿命。

参考文献(References)

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A Survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] Si P, Wu C, Zhang Y, et al. Probabilistic coverage in directional sensor networks[J]. Wireless Networks, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1007/S11276-017-1564-4>.
- [3] He S, Shin D H, Zhang J, et al. Full-view area coverage in camera sensor networks: Dimension reduction and near-optimal solutions[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 7448-7461.
- [4] Han G, Liu L, Jiang J, et al. Analysis of energy-efficient connected target coverage algorithms for industrial wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2017, 13(1):135-143.
- [5] Si P J, Wu C D, Zhang Y Z, et al. Barrier coverage for 3D camera sensor networks[J]. Sensors, 2017, 17(8): 1771.
- [6] Silvestri S, Goss K. MobiBar: An autonomous deployment algorithm for barrier coverage with mobile sensors[J]. Ad Hoc Networks, 2017, 54: 111-129.
- [7] Kumar S, Lai T H, Arora A. Barrier coverage with wireless sensors[J]. Wireless Networks, 2007, 13(6): 817-834.
- [8] Liao Z, Wang J, Zhang S, et al. Minimizing movement for target coverage and network connectivity in mobile sensor networks[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2015, 26(7): 1971-1983.
- [9] Lin T Y, Santoso H, Wu K R, et al. Enhanced deployment algorithms for heterogeneous directional mobile sensors in a bounded monitoring area[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2017, 16(3): 744-758.
- [10] 胡楠, 吴成东, 于晓升, 等. 基于C-V模型的网络覆盖空洞探测与修复算法[J]. 控制与决策, 2016, 31(8): 1424-1428.
(Hu N, Wu C D, Yu X S, et al. Network coverage holes detecting and healing algorithm based on C-V model[J]. Control and Decision, 2016, 31(8): 1424-1428.)
- [11] 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.
- [12] Kim D, Wang W, Son J, et al. Maximum lifetime combined barrier-coverage of weak static sensors and strong mobile sensors[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2017, 16(7): 1956-1966.
- [13] Tian J, Liang X, Wang G. Deployment and reallocation in mobile survivability-heterogeneous wireless sensor networks for barrier coverage[J]. Ad Hoc Networks, 2016, 36(1): 321-331.
- [14] Chen Z, Gao X, Wu F, et al. A PTAS to minimize mobile sensor movement for target coverage problem[C]. Proc of Infocom. San Francisco: IEEE, 2016: 1-9.
- [15] Wang Z, Liao J, Cao Q, et al. Barrier coverage in hybrid directional sensor networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2014, 13(7): 1443-1455.
- [16] Cui W, Wu C, Meng W, et al. Dynamic multidimensional scaling algorithm for 3-D mobile localization[J]. IEEE Trans on Instrumentation & Measurement, 2016, 65(12): 2853-2865.
- [17] Saipulla A, Liu B, Xing G, et al. Barrier coverage with sensors of limited mobility[C]. Proc of Mobihoc. Chicago: IEEE, 2010: 201-210.
- [18] Vel van de M L J. Theory of convex structures[M]. North-Holland: Elsevier, 1993: 267-286.

(责任编辑: 郑晓蕾)