

The Optimization Algorithm and Simulation for Variable k Coverage in Two-Dimensional Area Intrusion Detection Area Based on WSN

Shuxia Dong^{1,2*}, Zengzhen Shao^{2,3}, Lijuan Li³, Tongtong Che¹

¹School of Information Technology, Shandong Women's College, Jinan Shandong

²School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

³School of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, Jinan Shandong

Email: *dongshuxia@126.com

Received: May 7th, 2017; accepted: May 24th, 2017; published: May 27th, 2017

Abstract

The realization of the variable coverage demand in different regions and different time has great value in two-dimensional area intrusion detection. In this paper, we propose a variable k coverage issue in two-dimensional intrusion detection zone based on WSN, and introduce CP-var(k) algorithm based on partition clustering rule to deploy the Location of sensor nodes. Firstly mesh the region and clusters according to its coverage, and then draw redundant nodes or inadequate coverage based on the comparison of current coverage and need coverage. Finally the variable coverage requirement is achieved through redeployment of nodes. Simulation results show that the algorithm can realize the variable k coverage in the region quickly with less energy consumption under the premise of a limited number of nodes, and it also can achieve the goal of the invasion effective with a certain satisfaction and verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords

Wireless Sensor Networks, Variable k Coverage, Node Deployment, Intrusion Detection

基于WSN的二维入侵监测区域可变k覆盖优化算法及仿真

董树霞^{1,2*}, 邵增珍^{2,3}, 李丽娟³, 车统统¹

*通讯作者。

¹山东女子学院信息技术学院, 山东 济南

²西南交通大学经济管理学院, 四川 成都

³山东师范大学信息科学与工程学院, 山东 济南

Email: dongshuxia@126.com

收稿日期: 2017年5月7日; 录用日期: 2017年5月24日; 发布日期: 2017年5月27日

摘要

实现不同区域、不同时间的可变覆盖需求, 在区域入侵监测问题中具有重要价值。提出基于无线传感器网络WSN的二维入侵监测区域的可变 k 覆盖问题, 提出基于划分聚类规则对传感器节点进行重新部署的CP-var(k)算法。该算法首先对区域进行网格划分, 根据其覆盖度进行聚类, 而后根据当前覆盖度和需求覆盖度的比较得出每个区域是有冗余节点或是覆盖度不足, 最后通过对节点的重新部署实现区域内的可变覆盖。仿真实验表明, 在节点数目有限的前提下, 该算法可以较少的能量消耗实现区域内快速可变 k 覆盖效果, 且以一定的满意度实现对入侵对象的监测, 验证了算法的有效性。

关键词

无线传感器网络, 可变 k 覆盖, 节点部署, 入侵监测

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

对入侵对象运行轨迹进行实时、可靠监控是入侵监测领域的重点研究内容之一, 而解决这一问题的有效方法是在监测区域内设置无线传感器网络(WSN, Wireless sensor Networks), 在可预见的入侵对象运行轨迹附近区域快速部署一定数量的传感器节点, 并完成对重点区域的多重监测[1] [2] [3]。无线传感器网络由部署在监测区域内的大量廉价微型传感器组成, 它们通过无线通信方式形成多跳自组织网络系统。对原有区域内的传感器节点根据需要进行位置的调整及优化, 以实现不同区域的不同覆盖要求[4] [5] [6]。同时要求重点区域实现多重覆盖, 而一般区域实现一重覆盖。

针对以上问题, 国内外学者做了很多研究。吴春琼等[7] [8]提出一种基于能量预测的节点调度算法, 虽可节省网络能耗但降低了网络覆盖率。吴苏豫等[9]构建了节点连通图以发现可休眠节点, 但仅适用于需大致覆盖的场景。黄守志等[10]提出了基于网格划分的冗余节点判定方法, 但该算法仅考虑了网络完全覆盖情况, 尚未考虑覆盖目标热点区域需要多重覆盖的需求。王成等[11] [12]提出一个基于Voronoi图的 k 覆盖算法, 该算法可判断网络的覆盖率, 且可实现多重覆盖, 但该算法计算复杂度较高。实际应用中, 监测区域的覆盖要求是比较复杂的, 单一的覆盖要求可能导致传感器数量的过多利用及能量的无效损耗。因此, 针对不同实际需求快速实现不同的覆盖重数, 以降低传感器使用数量及能量损耗, 具有重要的现实意义。当前研究中相关成果尚不多见。

基于此, 本文提出无线传感器网络[13] [14] [15]下的可变 k 覆盖问题, 并基于区域网格划分聚类[16]算法, 设计一种移动节点的部署算法: CP-var(k)算法(var(k) algorithm based on Clustering and Prediction)。

该算法可通过对节点的重新部署实现不同区域不同时间的灵活可变覆盖，在传感器节点有限的情况下，充分发挥节点作用，既可保证重点区域的多重覆盖，又可满足一般区域的覆盖要求，以消耗较少的能量为代价实现对入侵对象的有效监测。

2. 可变 k 覆盖问题

2.1. 问题描述

某二维平面的不同区域有不同的实时监测要求，需在不同区域部署不同数量的传感器。做如下假设：1) 按照均匀抛洒原则，区域内最多有 n 个可匀速移动的传感器节点；2) 传感器均为同构节点，感知半径为 R_s ，传感半径为 R_c ，且 $R_c = 2R_s$ ，可实现网络的良好连通[17] [18]；3) 传感器节点的初始位置已知，传感器间可实现摩尔感知[19] [20]；4) 传感器节点带自备电源，可休眠及唤醒。

本入侵监测问题[21] [22]的系统优化目标为：发现入侵对象前，区域内所有节点保持静默状态；假设 t_l 时刻发现入侵对象，系统将根据入侵对象的位置及运动方向快速预测其运行轨迹，确定区域覆盖策略，或者唤醒休眠传感器节点，或者命令传感器节点移动位置以快速实现不同覆盖要求。为描述方便，首先定义几个符号：1) 二维平面区域 C ，该区域由 $\max X \times \max Y$ 确定， $\max X$ 、 $\max Y$ 分别为区域水平长度和区域垂直长度。根据不同区域的覆盖要求，定义 $C = \bigcup_{p=0}^{M-1} c_p$ ， M 为 C 内不同覆盖的子区域数目， k_p 为子区域 c_p 的需求覆盖度， $p = 0, 1, \dots, M-1$ ，即该子区域所辖范围均要求满足 k_p 重覆盖， c_p 同时也代表为子区域的面积， C 也代表整个区域的面积；2) 监测节点 v_l ，其中 $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ ， n 为最大监测节点数；3) $cell_{ij}$ ：区域内坐标为 (i, j) 的单元；4) 覆盖度：定义 kc_{ij} 为网格 $cell_{ij}$ 的当前覆盖度，定义 kn_{ij} 为网格 $cell_{ij}$ 的需求覆盖度；5) 区域 c_p 的覆盖满意度定义为 $Sat(c_p)$ ， $SatT(c_p)$ 为阈值，当 $Sat(c_p) \geq SatT(c_p)$ 时，认为本区域达到覆盖要求。

2.2. WSN 中传感器节点数量的确定

假设入侵对象在一定时间范围内为规律性运行，系统可以通过监测其地理位置的实时变化情况并快速预测其运行轨迹，并通过无线传感器网络在全网内广播。将入侵对象抽象为一个点，假定其运行轨迹为一条曲线。将入侵轨迹向左、向右分别移动固定距离形成 4 条曲线 $L_1 \sim L_4$ ， L_1 与 L_2 之间区域定义为重点监测区域，需实现三重覆盖； L_1 与 L_3 之间以及 L_2 与 L_4 之间定义为次重点区域，需实现二重覆盖，其他区域为一般区域，需实现一重完全覆盖(图 1)。

为提高传感器利用率并降低监测成本，需对监测区域内可用传感器数量进行限制。定义 n 为监测区域内所需抛洒的传感器节点数量，根据文献[23]可知，当 3 个感知半径为 R_s 的同质节点的感知圆盘均匀相交于一点时，各圆心连线将组成边长为 $\sqrt{3}R_s$ 的等边三角形，此时感知圆盘的覆盖效率最高且所需节点数量最少(图 2(a))。图 2 中，有 $OP = R_s/2$ ， $PO_2 = \sqrt{3}R_s/2$ ， $AM = \sqrt{3}R_s$ ， $MN = 3R_s$ 。传感器节点如图 2(b)实心点所示，则横向节点所需数量为 $\max X / \sqrt{3}R_s$ ，纵向节点所需数量为 $2(\max Y / 3R_s) + E$ ，当 $\text{rem}(\max Y / 3R_s) \leq R_s$ 时， E 取值为 1，否则取值为 2， $\text{rem}()$ 的作用是取 $\max Y / 3R_s$ 的余数。可计算整个区域实现一重覆盖所需节点数量为 $N_t = \left\lceil \max X / \sqrt{3}R_s \right\rceil \times \left\lceil 2 \max Y / 3R_s + E \right\rceil$ 。

设定 d_h 为区域纵向划分监测区域的高度， $d_h = \varepsilon R_s$ ， $\varepsilon > 0$ 为权重参数。对入侵对象来说，其在监测区域的运行轨迹越长，获取有效信息的可能性就越大。对图 3(a)、图 3(c)所示，入侵对象的入侵点处于左下角时入侵轨迹最长，入侵点处于左侧边界中心时入侵轨迹较长。我们忽略其他可能的低效入侵情况，拟用上述两种情况的线性组合来表示所有入侵可能。入侵对象的入侵点处于左下角时(图 3(c))，重点监测区域的面积为

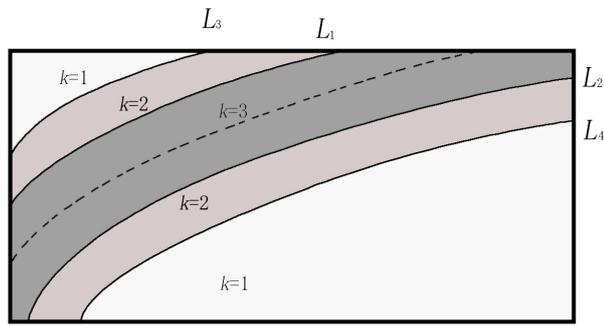


Figure 1. Division of monitoring area
图 1. 监测区域划分

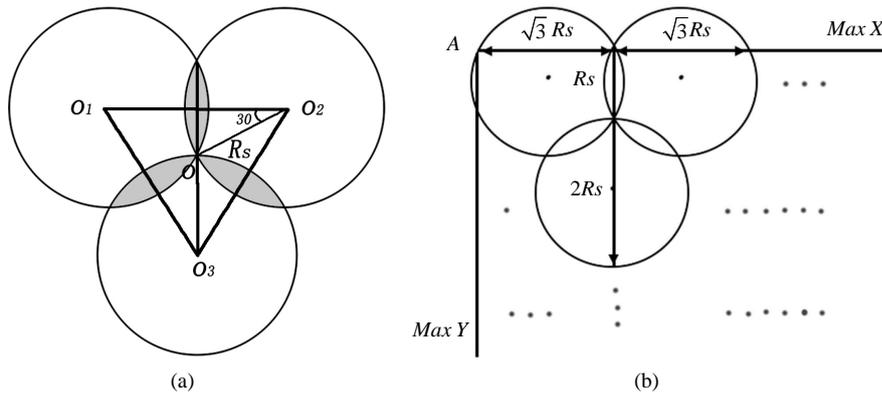


Figure 2. Node coverage
图 2. 节点覆盖示意

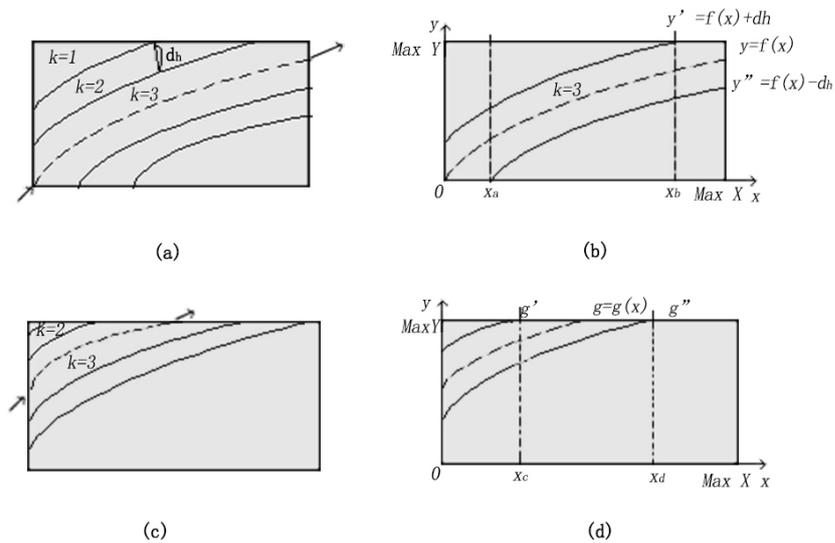


Figure 3. Intrusion trace
图 3. 入侵轨迹示例

$$c'_3 = \int_0^{x_a} y' dx + \int_{x_a}^{x_b} (y' - y'') dx + \int_{x_b}^{\max X} (\max Y - y'') dx$$

入侵对象的入侵点处于检测区域的左侧边界中心点时(图 3(d))，其重点监测区域的面积为：

$$c_3'' = \int_0^{x_c} (g' - g'') dx + \int_{x_c}^{x_d} (\max Y - g'') dx$$

定义重点区域的抛洒面积 $c_3 = \partial_1 c_3' + \partial_2 c_3''$ ，其中 ∂_1 、 ∂_2 为调节参数， $0 \leq \partial_1, \partial_2 \leq 1$ 。

同理可得次重点监测区域和一般区域的面积 c_2 和 c_1 ，则整个监测区域所需抛洒节点总数估计为 $n = (3c_3 + 2c_2 + c_1) N_i / C$ 。

3. 传感器节点动态部署算法：CP-var(k)算法

3.1. 网格划分及聚类预处理

首先将监测区域划分为多个单位长度的小正方形网格，每个网格称为一个 *cell*，如图 4 所示。将每个传感器节点的感知范围等效为它所覆盖的多个 *cell*，当 *cell* 的形心被节点覆盖时，即认为该 *cell* 被整体覆盖[17]。

将监测区域 C 定义在二维平面坐标系中，假设传感器节点位置近似为其最相邻的 *cell* 的形心。为提高搜索效率，可提前将覆盖情况相同的 *cell* 聚集到一起。

3.2. CP-var(k)算法步骤

基于网格聚类算法及入侵对象的运行轨迹的预测，可通过对监测区域中节点的重新移动部署操作实现区域中不同目标区域的可变多重覆盖，这就是 CP-var(k)算法的基本思想。该算法首先需对研究区域进行网格划分，根据每个网格的 kc_{ij} 取值进行分类，比较 kc_{ij} 与 kn_{ij} 的大小得到覆盖度不足的区域及冗余节点区域，然后采取适当节点移动策略，最终以一定的满意度实现整个区域的可变 k 覆盖要求。具体步骤如下：

第一步：初始化。 1) 在区域 C 中随机抛洒 n 个传感器节点并对其进行网格划分，计算每个网格的覆盖度 kc_{ij} ，得到区域初始覆盖矩阵。2) 根据入侵对象位置及方向划分不同覆盖区域及覆盖要求，快速预测出入侵轨迹曲线 $y = f(x)$ 并据此确定重点监测区域、次重点监测区域与一般区域，同时向全网络广播。

第二步：网格聚类。 按照 8-connection 近邻网格对各子区域进行网格聚类。

第三步：传感器节点与网格归类。 比较网格 $cell_{ij}$ 的实际覆盖度 kc_{ij} 与需求覆盖度 kn_{ij} ，构造需要减少节点的集合 A 及需要增加节点的集合 B 。对于区域内所有网格，若 $kc_{ij} \geq kn_{ij}$ ，则说明 $cell_{ij}$ 处有冗余节点，将离此网格最远的节点加入集合 A ；若 $kc_{ij} < kn_{ij}$ ，说明此网格处覆盖节点数不足，将该网格添加到集合 B 。

第四步：传感器节点位置调整。 根据附着在集合 A 的网格中的传感器节点距离集合 B 中网格的距离关系进行位置调整，具体为：1) 对集合 B 中的网格根据 kn_{ij} 的取值进行降序排列，得到新序列 B_s ；2) 从序列 B_s 首部中选择第一个网格元素，从集合 A 中找到与该网格元素距离最近的传感器节点，并将之移动到集合 B 的网格元素上；3) 根据集合 A 、 B 中各网格的当前覆盖度特征对其中元素进行增减，更新传感器节点位置及覆盖矩阵；4) 反复执行 1)~3)，直到各区域的覆盖度满足阈值要求或运行时间超过最大时间要求。

4. 实验仿真与分析

4.1. 参数设置

本次仿真采用 NetLogo5.2.0 系统，该系统可用于模拟自然和社会现象的编程语言和建模，特别适合用于模拟随时间发展的复杂系统。为方便实验，我们对模型的参数做如下取值：监测区域的大小设置为 400×400 ；传感器节点感知半径为 $R_s = 30.0$ ； $\varepsilon = 1$ ， $\partial_1 = \partial_2 = 0.5$ ， $k = 3$ 。根据测算，监测区域内实现完全一重覆盖所需节点数为 80 个，实现入侵监测可变覆盖所需抛洒节点数为 115 个。

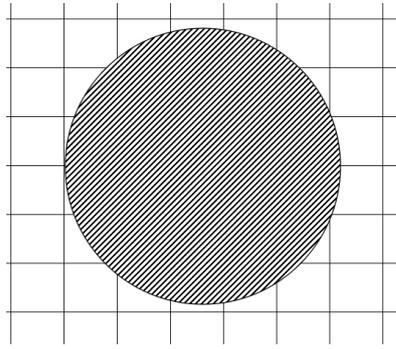


Figure 4. Mesh partition
图 4. 网格划分

4.2. 仿真过程及分析

将传感器节点随机抛洒在区域 C 内, 如图 5(a)所示, 其中白灰色区域表示一重覆盖区域; 浅灰色区域表示二重覆盖区域, 深灰色区域表示三重覆盖区域。考虑到当有入侵对象进入时, 传感器节点还要进行一定规模的位置移动, 随机抛洒操作完成后, 既可立即进行可变 k 覆盖部署操作, 也可先进行一定程度的覆盖盲区消减操作(如图 5(b)), 再进行可变 k 覆盖部署操作。

称具有均匀部署操作的可变 k 覆盖实验为方案 I。传感器节点均匀部署后, 入侵对象进入监测区域, 假设入侵轨迹及可变 k 目标区域划分如图 6 所示。其中深灰色弧状区域为重点监测区域, 宽度 $d_h = 2R_s$, 需实现三重覆盖, 深灰色区域中心的曲线为入侵对象的预测运行轨迹; 浅灰色区域为次重点监测区域, 需实现二重覆盖, 其他区域需实现一重覆盖。

一旦发现入侵对象, 系统将立即启动节点重新部署操作, 其运行过程如图 7(a)~(d)所示。可以发现图 7 中的传感器节点从(a)~(d)逐渐聚集, 图 7(d)较为清晰的展现了可变三重覆盖的特征。

称无均匀部署操作的可变 k 覆盖实验为方案 II。该实验中, 节点随机抛洒后保持静止, 不进行均匀部署操作以减少能量消耗。当发现入侵对象后, 系统直接进行可变 k 覆盖操作, 如图 8 所示。

为验证以上两种方案的优缺点, 本文分别从重点区域覆盖率和节点剩余平均能量两方面进行比较分析, 如下图 9 和图 10 所示。图 9 中, 两种方案中分别迭代 50 次后, 方案 II 中重点区域覆盖率为 69.11%, 而方案 I 中为 47.76%。图 10 中, 迭代 100 次后, 方案 II 中节点的剩余平均能量为 72.8, 方案 I 为 46.3。出现该结果的原因是方案 I 中节点由于首先需要进行分散均匀分布, 所以将耗费更多的时间和能量, 但由于其节点分散为均匀覆盖, 后期移动部署运行将会更为稳定。

为研究传感器节点数目不同情况下的性能, 我们对实际节点抛洒数量进行实验考察, 对比策略性能。

1) 节点数目 $n = 85$, 节点分布如图 11(a)所示。由于节点数量少, 监测区域中存在盲区将难以避免的, 但发生入侵时, 节点会根据优先级别牺牲外围一般区域的覆盖需求, 首先满足重点监测区域的覆盖需求。

2) 节点数目 $n = 150$, 如图 11(b)所示。在满足整个监测区域可变 k 覆盖的基础上产生部分冗余, 即在外围一般区域也会产生部分 2 重甚至 3 重覆盖, 这样会造成一定程度上节点的浪费。但如果考虑节点能量消耗或节点损坏, 节点数目可适当增加。

5. 结论

本文针对二维区域入侵监测问题提出可变 k 覆盖问题, 并基于区域网格划分聚类算法提出 $CP-var(k)$ 算法对传感器节点进行重新部署优化, 以实现监测区域内的可变覆盖要求。利用 NetLogo 进行仿真后表

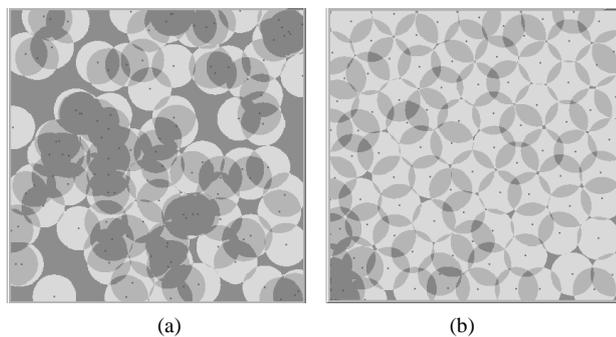


Figure 5. Sensor nodes randomly throwing and blind cut. (a) Randomly throwing; (b) Blind cut
图 5. 传感器节点随机抛洒及覆盖盲区消减。(a) 初始随机抛洒; (b) 覆盖盲区消减

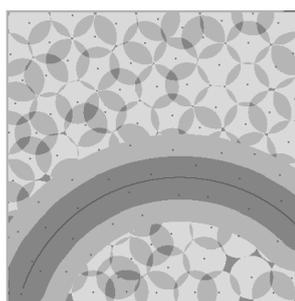


Figure 6. Intrusion trajectory and variable k coverage region partition
图 6. 入侵轨迹及可变 k 覆盖区域划分

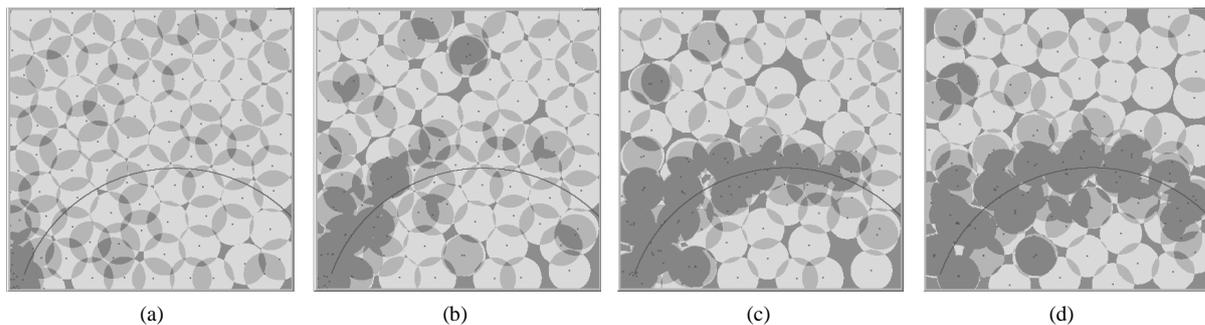


Figure 7. Sensor node deployment process (uniform deployment operation)
图 7. 传感器节点移动部署过程(有均匀部署操作)

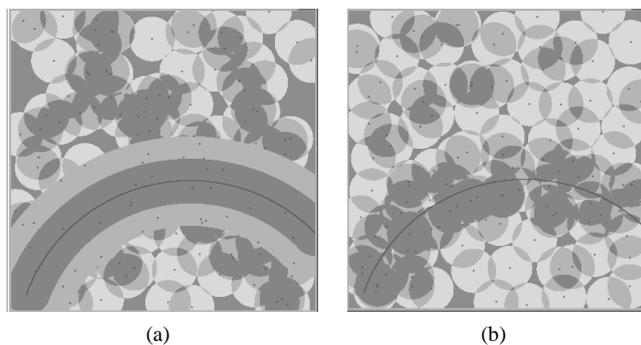


Figure 8. Sensor node deployment process (no uniform deployment operation)
图 8. 传感器节点移动部署过程(无均匀部署操作)

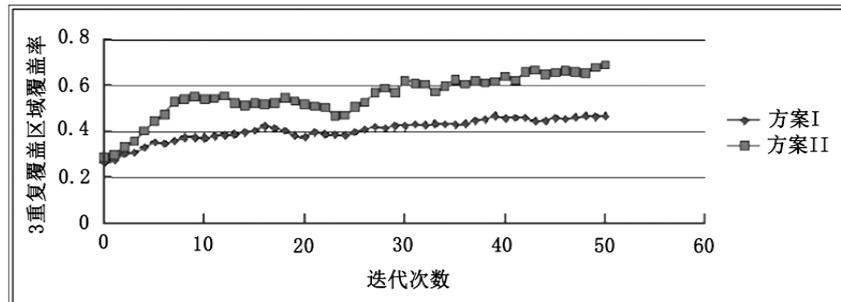


Figure 9. Change curve of coverage in key monitoring area

图 9. 重点监测区域中覆盖率变化曲线

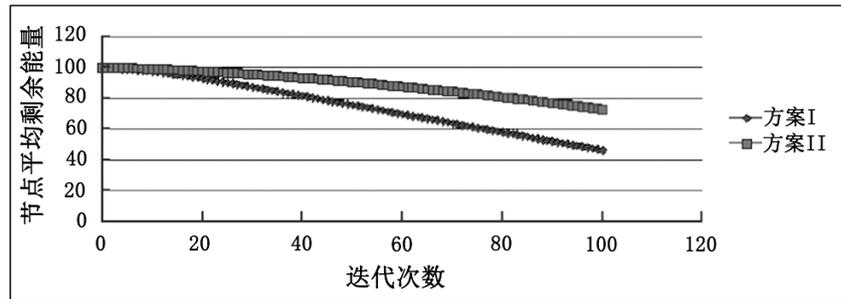


Figure 10. Average energy curve of node residual energy (initial energy is 100)

图 10. 节点剩余平均能量曲线(节点初始能量为 100)

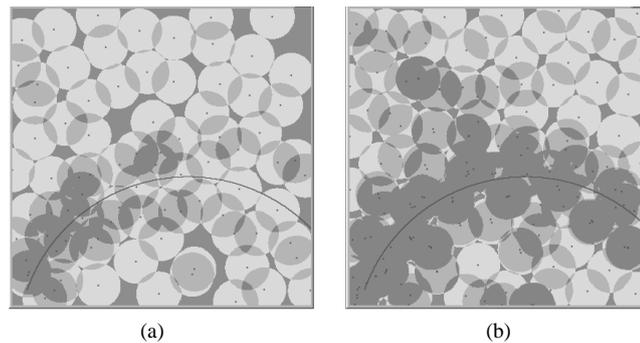


Figure 11. Variation of sensor nodes. (a) A large number of nodes; (b) Less number of nodes

图 11. 传感器节点变化情况。(a) 节点数量较多；(b) 节点数量较少

明，在节点数目有限的前提下，该算法能以较快的时间和较少的能量消耗对节点进行良好部署，从而验证了算法的有效性。但本文只是以单点入侵监测为例进行了分析，后期可以此为基础研究多点入侵以及三维区域的可变覆盖问题。

基金项目

本文受国家大学生创新创业项目资助(No. 201512331020)。

参考文献 (References)

- [1] 王伟, 林锋, 周激流. 无线传感器网络覆盖问题的研究进展[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(1): 32-35.

- [2] 邢萧飞, 谢冬青, 郑瑾. 无线传感器网络 k 度覆盖控制算法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014(11): 3832-3839.
- [3] 班庆奇. 无线传感器网络中连通性覆盖问题的研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [4] Tong, X.J. (2012) The Novel Block Encryption Scheme Based on Hybrid Chaotic Maps for the Wireless Sensor Networks. *Acta Physica Sinica*, **61**, Article ID: 030502.
- [5] Gao, G. and Jiang, G. (2012) Prediction of Multivariable Chaotic Time Series Using Optimized Extreme Learning Machine. *Acta Physica Sinica*, **61**, Article ID: 040506.
- [6] Liu, X.L. (2013) A Coordinate Compression Algorithm Based on Centroid for Wireless Sensor Networks. *Acta Physica Sinica*, **62**, Article ID: 070201.
- [7] 吴春琼. 改进的无线传感器网络覆盖区域节点调度算法[J]. 计算机仿真, 2010(12): 156-158.
- [8] 蒋杰, 方力, 张鹤颖, 等. 无线传感器网络最小连通覆盖集问题求解算法[J]. 软件学报, 2006, 17(2): 175-184.
- [9] 吴苏豫, 易卫东. 一种新的无线传感器网络部分冗余覆盖算法及其仿真研究[C]. cwsn'2009 中国传感器网络学术会议. 2009.
- [10] 黄守志, 赵学增, 张中华. 基于网格划分的无线传感器网络节点冗余分析[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(3): 112-116.
- [11] 王成, 樊建席, 王仁喜, 等. 基于 Voronoi 图的无线传感器网络 K 覆盖算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(04): 84-87.
- [12] 王成. 无线传感器网络多重覆盖研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2012.
- [13] An, X. (2013) A Novel Approach to Research on Feature Extraction of Seismic Wave Signal Based on Wireless Sensor Networks. *Acta Physica Sinica*, **62**, 956-959.
- [14] 蒋文贤, 缪海星, 王田, 等. 无线传感器网络中移动式覆盖控制研究综述[J]. 小型微型计算机系统, 2017, 38(3): 417-424.
- [15] 任彦, 张思东, 张宏科. 无线传感器网络中覆盖控制理论与算法[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 422-433.
- [16] 刘雷, 王洪国, 邵增珍, 等. 一种基于蜂群原理的划分聚类算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(5): 1699-1702.
- [17] 刘志坤, 刘忠, 夏清涛, 等. 基于网格划分的无线传感器网络多重覆盖算法[J]. 火力与指挥控制, 2014, 11: 021.
- [18] 付海涛, 柴乔林, 李涛. 完全覆盖热点区域的多重覆盖算法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(35): 69-71.
- [19] 邓亚平, 吴川平. 基于移动节点的无线传感器网络覆盖优化研究[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(8): 3137-3139.
- [20] 方伟, 宋鑫宏. 基于 Voronoi 图盲区的无线传感器网络覆盖控制部署策略[J]. 物理学报, 2014, 63(22): 128-137.
- [21] 傅蓉蓉. 无线传感器网络入侵检测关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [22] 吴亚琴. 基于无线传感器网络的入侵检测研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- [23] 赵国炳, 陈国定, 张奇伟. 一种无线传感器网络覆盖优化方法[J]. 机电工程, 2009, 26(6): 80-82.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: mos@hanspub.org