

移动传感器网络非均匀事件区域节点部署优化

刘 军^{1,2},程良伦²,王建华²,王 涛²

(1. 广东技术师范学院自动化学院, 广东广州 510665; 2. 广东工业大学自动化学院, 广东广州 510006)

摘 要: 针对移动传感器网络中热点事件监测场景, 研究传感器节点的快速优化部署策略. 首先假定事件随机产生, 针对事件优先模型及节点感知误差函数推导基于 Voronoi 剖分时感知误差最小, 然后定义节点有效覆盖权值, 证明了当所有节点有效覆盖权值一致时, 整个网络覆盖效能将达到最大. 结合虚拟力及节点有效覆盖权提出一种分布式优化部署算法 SDOA(Sparse Deployment Optimization Algorithm), 其在保证覆盖能效最大化时保证网络连通性. 最后仿真比较了本文提出部署策略能够快速有效实现对热点区域部署, 并保证较高的覆盖效能.

关键词: 移动传感器网络; 事件区域; 稀疏部署; 覆盖权值

中图分类号: TP393.04

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2015)12-2402-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.12.009

Deployment Optimization in Non-Uniform Event Area of Mobile Sensor Networks

LIU Jun^{1,2}, CHENG Liang-lun², WANG Jian-hua², WANG Tao²

(1. School of Automation, Guangdong polytechnic Normal University, Guangzhou, Guangdong 510665, China;

2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract: This paper focuses on sensor nodes rapid deployment strategy for event monitoring scenario in mobile sensor networks. Firstly, we deduced conclusion that sense error of Voronoi subdivision is minimum based on nodes error model. Then the node effective cover weight is defined by priority function of event area. We proved that coverage effectiveness is maximization when all of nodes coverage weight are identical. A node deployed algorithm SDOA(Sparse Deployment Optimization Algorithm) is presented. It combined coverage weight and virtual force. It guaranteed network connectivity during algorithm running. Finally, we use simulations to show that our deployment algorithm is accurate and effective and with more coverage effectiveness.

Key words: mobile sensor network; event area; sparse deployment; coverage weight

1 引言

传感器网络作为物理世界与信息世界之间的桥梁扩展了人类信息获取能力, 为物联网以及信息物理融合系统提供了实施基础^[1,2]. 移动传感器网络(Mobile Sensor Networks, MSNs)凭借节点的感知、计算、通信和移动能力, 能够针对部署区域的动态事件进行迅速的跟踪部署受到广泛关注^[3,4]. 在物理监测区域内, 常常存在有若干随机产生的热点事件区域比如湖面污染扩散, 火场火源监测等, 如何通过移动感知节点对目标区域进行有效快速部署是其研究的一个重要方向^[5].

感知节点优化部署一直是传感器网络研究中的热

点问题, 针对不同场景及假设众多学者取得了丰富的成果. 刘惠等^[6]借鉴库仑力、胡克定律以及边界斥力等组合虚拟力研究传感器节点在监测区域的三维空间重部署方法, 能使所有随机布撒的传感器节点在低能耗的情况下, 进入目标覆盖区域并在该区域内自组织成一个具有高覆盖性和重连通性的网络拓扑. Wang 等^[7]针对异构环境中的部署问题, 结合虚拟力以及粒子群算法构建联合优化函数, 实现对区域的覆盖以及优化能量效率. 刘全等^[8]设计了一种基于三角形网格的无需地理信息的空洞探测算法 ATN(Advanced Triangle Net)和空洞修复算法 TNR(Triangle Net Recovery), 其在部署密集传感网络中能够快速完成空洞修复. 李劲等^[9]假定节点采用

概率感知模型且融合多个节点的数据进行联合感知时,结合博弈论提出一种分布式的覆盖优化算法,当算法收敛时,网络能达到高的覆盖率。

上述都是针对一般区域的部署研究,针对移动传感器网络事件区域覆盖问题,涂志亮等^[10]首先建立了基于 Voronoi 剖分的监测性能评价函数,然后提出基于群集控制的传感器节点部署分布式控制算法.算法在提高以目标为中心的一定区域监测性能的同时,使全体传感器速度趋于一致,从而在尽量保持网络拓扑结构的同时减少了整体移动能耗. Milan 等^[11]提出保证网络连通性是覆盖优化前提,结合 RNG(Relative Neighborhood Graph)模型保证网络连通性,提出了热点部署算法能够实现对静态、动态热点的覆盖部署.夏娜等^[12]针对水下事件监测问题,提出了一种鱼群启发的水下传感器节点布置算法,通过模拟鱼群行为,并结合拥挤度控制,使节点自主趋向并覆盖事件,同时实现节点分布密度与事件分布密度相匹配部署.并提出了一种部署性能评价指标“事件集覆盖效能”.算法并未考虑网络连通性问题,在进一步研究中,作者引入刚性理论构造水下传感器网络覆盖度和连通性的联合优化目标提出相应的节点位置评价指标和节点移动策略从而较好地解决水下传感器节点自组织布置问题^[13].

在许多传感器网络应用场景中比如军事应用,野外环境监测等大面积应用场景^[14~16],监测区域面积巨大,从成本方面考虑难以实现完全覆盖.然而大部分的应用中并不需要对整个区域都实时完全覆盖,仅需对某些热点事件区域进行可靠监测,因此如何部署感知节点优化的区域中的热点事件部署即是一个重要问题. Hamid 等^[17]假设监测的事件区域各点的优先级不同,感知节点异构,在随机部署后检测自身区域中的空洞大小,然后提出三种移动传感器节点部署算法覆盖优先级更高的区域,算法实现了对优先级区域的覆盖,但缺少对网络连通性的考虑.另外感知节点模型大多为布尔模型,并不符合实际情况.

本文假设场景为在大面积区域中,随机产生部分突发事件,这些事件区域为带优先级的非均匀区域,事件中心区域优先级更高,需要更精确的监测,外围次之.在监测到事件后,移动传感器节点通过重定位分布式实现对这些区域有效覆盖.提出了一种分布式部署算法完成对非均匀优先级区域的覆盖,并保证网络连通,使得整个网络的部署达到最优.

2 问题模型及性质分析

假设传感器节点同构,节点具有移动能力.在传感器网络监测区域中,随机产生若干个事件区域.其中事件区域依据距离事件中心位置不同存在不同优先

级^[17],定义优先级函数 $\varphi(q) = \exp(-x^2 - y^2)$, (x, y) 为点 q 的坐标. $\varphi(q)$ 其代表分布密度函数,其值可以为该处感知信息重要程度或某事件发生在 q 的概率.本文的目标即在不同的优先级位置上不上不同密度的传感器节点,使得有限的传感器节点通过这种部署,得到较好的监测性能或总体更为可靠的数据.

为了衡量传感器节点对于区域中各点的感知精度,定义一感知误差函数.由于节点感知误差与传感器距离有关,距离目标点距离越远则误差越大,误差函数即可定义为与所述传感器节点的距离的函数.

定义 1(误差函数) 设 p_i 为传感器节点 S_i 在区域 A 中位置,则节点感知误差函数为 $g(\|q - p_i\|)$,表示区域中位置 q 被传感器节点 p_i 感知测量的误差. $\|q - p_i\|$ 为目标点与感知节点的欧氏距离.

定义 2(区域剖分) 设 n 个传感器节点随机部署在区域 A 中,依照各个节点位置将整个感知区域剖分为各个节点的专属区域,所有分区集合表示为 V . V_i 代表为节点 i 的感知区域,其所有剖分的联合构成了整个区域的覆盖.

则节点 i 的感知区域的误差为:

$$G_i(p_i, V_i) = \int_{q \in V_i} g(\|q - p_i\|) dq \quad (1)$$

整个部署区域中的误差即为:

$$G(P, V) = \sum_{i=1}^n \int_{q \in V_i} g(\|q - p_i\|) dq \quad (2)$$

对于给定的区域 A 和节点位置部署方案 P ,对节点的分区有无限种可能,依据 Voronoi 剖分的定义有:

$$V_i = \{q \in A \mid \|q - p_i\| \leq \|q - p_j\|, \forall j \neq i\} \quad (3)$$

易知基于 Voronoi 剖分的分区是感知误差最小的.但是给定 n 个传感器节点部署于区域 A 中,每一种部署都对应有一种剖分 V ,因此需要寻找一种部署策略,其构成的部署方案 P 能够最小化 $G(P, V)$.

对于带优先级的事件区域,可以理解事件不同位置发生的概率不同,而不同事件区域的感知不可靠度对整个区域的检测效果影响是不同的,对于高优先级的区域我们需要更密集的部署保证感知数据的精确,对于低优先级区域,在节点数量有限的情况下可以考虑稀疏一些的节点部署,即保证整个区域内总体感知覆盖效能达到最大化,先考虑针对事件区域的节点定义一种节点的有效覆盖权值.

定义 3(节点有效覆盖权值) 给定一个剖分 V ,某一个感知节点 s_i 对于事件 E 在本剖分区域中的有效覆盖权值定义为:

$$W_E(s_i) = \int_{q \in V_i} \varphi(q)(1 - g(\|q - p_i\|)) dq \quad (4)$$

使节点在检测区域 A 内尽可能合理覆盖事件,使

各个区域的节点密度与事件区域的优先级相匹配. 我们引入熵来评价节点对事件覆盖的均衡性. 构造完备集条件有:

$$W_E'(S_i) = \frac{W_E(s_i)}{\sum_{s_j \in E} W_E(s_j)} \quad (5)$$

定义 4(事件覆盖加权熵) 定量描述节点部署对于事件有效覆盖权值的均衡性, 定义为:

$$H_A(P) = \sum_{s_i \in E} W_E'(S_i) \log \frac{1}{W_E'(S_i)} \quad (6)$$

定义 5(事件覆盖效能) 节点部署在区域中, 对于事件的覆盖能效定义为:

$$\zeta(P) = \frac{\hat{n}}{n} \cdot \frac{H_A(E)}{\log m} \quad (7)$$

其中, \hat{n} 为覆盖事件的节点数量, n 为整个区域内部署节点的数量, $\frac{\hat{n}}{n}$ 即表示有效覆盖在事件区域中的节点数量百分比.

定理 1 当所有节点对于事件的覆盖权重都相等时, 对于事件的覆盖效能 $\zeta(E)$ 达到最大.

证明 设随机变量 $X = 1/W_A'$, 即 $x_i = 1/W_E'(S_i)$. 有:

$$E[\log X] \leq \log(E[X]) \quad (8)$$

$$\sum_{s_i \in E} W_E'(S_i) \log x_i \leq \log \sum_{s_i \in E} W_E'(S_i) x_i \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{s_i \in E} W_E'(S_i) \log \frac{1}{W_E'(S_i)} \\ & \leq \log \sum_{i=1}^m W_E'(S_i) \frac{1}{W_E'(S_i)} = \log m \end{aligned} \quad (10)$$

当 $W_A'(S_i) = 1/m$, 即所有节点的有效覆盖权值相等时:

$$H_A(P) = \sum_{i=1}^m W_E'(S_i) \log m = \log m \quad (11)$$

若同时, 所有节点都覆盖事件, $\hat{n} = n$, 则

$$\zeta(P) = \frac{\hat{n}}{n} \cdot \frac{H_A(E)}{\log m} = 1 \quad (12)$$

证毕.

3 事件区域部署算法

前面讨论了 V 剖分时传感器网络感知误差最小, 然后证明了当所有节点对于事件的覆盖权重都相等时, 传感器网络对于事件的覆盖效能 $\zeta(P)$ 达到最大. 为了使得节点逐步移动使得实现在事件区域使得各个节点的有效覆盖权值一致, 形成疏密部署, 拟借鉴虚拟力思想. 具体方法就是传感器节点依据自身及邻居节点的有效覆盖权受到周围邻居节点的引力或斥力以及区域中心位置的引力.

节点在检测到事件后进行剖分, 然后可以计算出自己节点的有效覆盖权值. 若本节点的有效覆盖权值

比周围大, 则对周围其他节点有引力, 使得周围节点靠近, 自身的区域减少, 而自身覆盖权重值则降低, 最终目标使得整个网络节点的有效覆盖权值一致. 本文提出感知节点 s_i 对 s_j 的作用力模型 F_{ij} , 主要考虑有效覆盖权值之间的大小区别, 作用力模型如下:

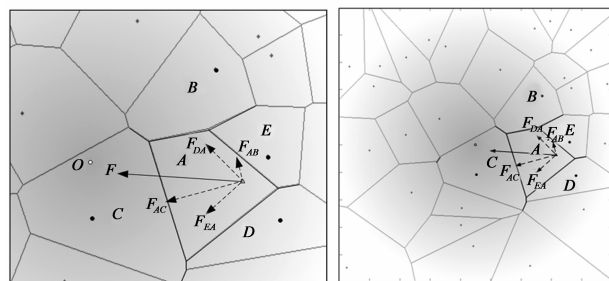
$$F_{ij} = \begin{cases} \delta_i \frac{\|W_E(s_i) - W_E(s_j)\|}{W_E(s_i)} \cdot d_{ij}, & W_E(s_i) < W_E(s_j) \\ 0, & W_E(s_i) = W_E(s_j) \\ \delta_i \frac{\|W_E(s_i) - W_E(s_j)\|}{W_E(s_i)} \cdot d_{ji}, & W_E(s_i) > W_E(s_j) \end{cases} \quad (13)$$

本虚拟力是基于周围节点有效覆盖权值区别而不是距离, 其中 δ_i 为虚拟力系数.

最后, 感知节点 s_i 受周围节点的虚拟力的矢量合力, 数学表达式为:

$$F_i = \sum_{j=1, j \neq i}^k F_{ij} \quad (14)$$

如图 1 所示, O 为事件 E , 20 个节点分布于事件区域, 构建 V 剖分如图 1(b) 所示, 分析节点 A 的受力情况. 节点 A 与 B, C, D, E 相邻, 依据事件优先级函数、节点误差模型以及式(4)计算各节点的有效覆盖权值. 假定经计算有 $W_E(s_A) = 10$, $W_E(s_B) = 12$, $W_E(s_C) = 19$, $W_E(s_D) = 6$, $W_E(s_E) = 4$. 依据式(13)、(14), B, C 覆盖权值大于 A , 则为引力 F_{DA}, F_{AB} , 另外则为排斥力 F_{EA}, F_{DA} , 其四个力合成为合力 F 如图 1 所示, 则节点 A 受到力 F 向事件中心 O 移动.



(a) 某节点受力分析 (b) 事件区域内节点剖分
图1 节点受力分析

当节点的虚拟力计算完毕后, 可以获得移动距离和方向, 从而得到新的位置 P_{new} .

由于当网络拓扑结构破裂时, 即认为网络生命周期结束. 而在移动传感器网络中, 节点移动导致网络拓扑结构动态变化, 因此需要网络连通性要首先保证. 在本文中, 拟借助 RNG 图作为网络连通性的数学分析工具. 初始部署时, 假设整个网络连通, 拓扑抽象为 RNG 图. 令 $R(G)$ 表示为图 $G(V, E)$ 的相对邻域图, 则有 $R(G) = (V, E^R)$. 其中, E^R 为拓扑结构中的邻域边. 假

定节点 u 的相对邻域集合为 $N_R(u)$. $N_R(u)$ 的传感器节点数量表示为 $|N_R(u)|$. 令 $d_{\max}(u)$ 表示感知节点 u 到它的最远 RNG 节点的距离, R 为节点通信距离, d 为节点运行算法后的移动距离.

定理 2 当 $d \leq (R - d_{\max}(u))/2$ 时, 网络拓扑能够保证联通.

若 $t = T_1$ 时, 网络连通, 则 $\forall t = T_2$, 当 $T_2 > T_1$ 时, 网络是连通的.

证明 设 u, v 为两节点, 且 u, v 相互连通. 在 T_1 时, 有: $u \in R(v), v \in R(u), d(u, v) = d_{\max}(u)$

假设两节点运行算法后, 判断得出同时向相反方向移动.

v 移动最大距离取决于 $d(u, v)$, 因为 $d(u, v) \leq d_{\max}(v)$

节点 v 移动的最大距离 $d_{\max}(v)$, 节点 v 移动的最大距离:

$$d_v = (R - d_{\max}(v))/2 \leq (R - d_{\max}(u))/2 \quad (15)$$

二者之间移动后的最大距离:

$$(R - d_{\max}(v))/2 + (R - d_{\max}(u))/2 \leq R \quad (16)$$

因此 传感器网络能保证连通性.

证毕

当传感器网络检测到事件发生, 向区域中的感知节点广播事件信息. 各个节点接收到事件信息后各运行算法, 建立剖分然后计算移动距离和方向, 每轮完成后依据终止条件判断是否终止, 反复迭代直到所有节点有效覆盖权值基本一致则终止. 算法流程如下所示.

算法 1 稀疏部署优化算法 (SDOA)

输入: 事件区域优先级函数 $\varphi(q)$, 节点通信半径 R .

输出: 部署方案 P .

1. 检测到事件 q , 向网络广播;
2. 任意节点 $\forall u \in N$ 向周围广播握手信息, 获取周围节点信息, 构建网络拓扑 $G(V, E)$, 并得出 $R(u)$;
3. 节点 u 基于 $R(u)$ 建立 Voronoi 剖分 V ;
4. $\forall u \in N$ 依据式(4)计算有效覆盖权值 $W_q(u)$;
5. u 与 $R(u)$ 交换覆盖权值 W_q ;
6. 依据式(13)、(14)计算虚拟力 F_u ;
7. F_u 转换为距离 d_u 和 Δ ;
8. IF $d_u > (R - d_{\max}(u))/2$ THEN
9. $d_u = (R - d_{\max}(u))/2$;
10. END IF
11. IF $u_END = \text{false}$ THEN
12. Go to 步骤 2;
13. ELSE
14. 收集各个节点位置信息 $P \leftarrow u$, return;
15. END

前面的分析已经证明了算法在运行时能够保证网络拓扑结构的连通性, 而且在理想情况下算法能够使节点覆盖能效最大化. 下面进行仿真实验和性能分析.

4 仿真实验与性能分析

前面讨论了有关算法步骤和性质, 本小结通过在 MATLAB2010 平台上测试部署算法性能. 算法性能评价指标采用前面提出的节点部署事件覆盖效能 $\zeta(P)$, 算法收敛速度.

4.1 仿真场景及参数设置

假设事件区域在监测区域中心, 有若干个节点随机部署在监测区域, 区域面积为 $100 \times 120\text{m}^2$, 通过运行算法后实现疏密部署效果. 优先级函数为 $\varphi(q) = \sum_{q=1}^n \exp(-\epsilon \cdot [(x - x_q)^2 + (y - y_q)^2])$, 传感器节点通信距离为 20m. x_q 和 y_q 分别是事件中心区域的纵横坐标, ϵ 表示为事件优先因子, 其值大时则表示事件区域中心地区的优先级更高, 而外部较低, 优先级由事件中心向外围迅速下降; 其值小时, 则整个优先级比较均衡, 当其值为零时退化为均匀事件区域.

分别设计了三组实验, 随机部署 50 移动节点于检测区域, 区域内分别为单一事件, 区域内多事件, 以及优先因子不同时情况, 具体参数下表所示.

表 1 参数设置

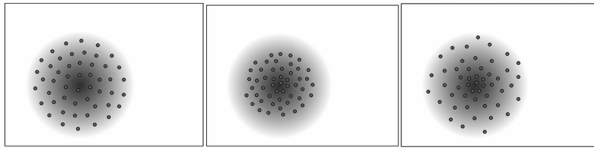
	(x_p, y_p)	ϵ	节点数量
实验 1	$P_1(42, 46)$	0.1	50
实验 2	$P_1(37, 32) P_2(79, 88) P_3(17, 103)$	0.1	50
实验 3	$P_1(37, 32) P_2(79, 88) P_3(17, 103)$	0.01	50

对于针对优先级区域的节点部署, 较为类似的是文献[17]提出的算法 MDW, 其主要思想是结合加权 Voronoi 剖分寻找最大覆盖洞, 然后移动节点去填补. 文献[18]提出的 SOM 算法也是对于事件的覆盖部署算法. 用本文提出的 SDOA 与 SOM 算法和 MDW 算法比较. 算法运行结果如图 2~图 4 所示.

4.2 实验分析

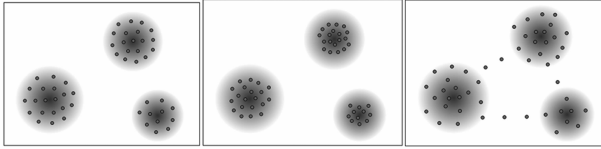
图 2~图 4 为实验仿真图, 其中灰色渐变区域代表事件区域, 灰色小圆点为随机部署于区域中的感知节点, 节点通过运行部署算法, 慢慢向事件中心聚集覆盖, 最终达到疏密部署的效果.

由图 2~图 4 可以看出, 在单一事件和多事件情况下, SDOA 经过多轮的算法运行, 最后传感器节点部署完毕, 形成了依据优先级区别的疏密部署效果. 可以看出, 在事件区域外围, 优先级低, 节点较稀疏, 各个节点对应的监测剖分区域面积较大; 事件中心区域优先级



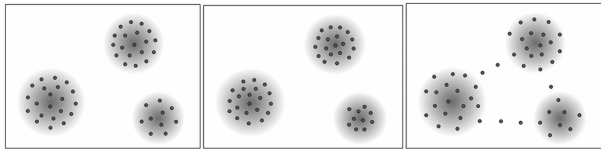
(a) SOM算法部署效果 (b) MDW算法部署效果 (c) SDOA算法部署效果

图2 单事件区域移动节点部署运行效果图



(a) SOM算法部署效果 (b) MDW算法部署效果 (c) SDOA算法部署效果

图3 多事件区域移动节点部署运行效果图



(a) SOM算法部署效果 (b) MDW算法部署效果 (c) SDOA算法部署效果

图4 多事件区域移动节点部署运行效果图

较高,而节点部署较稠密,对应的监测剖分区域面积较小,并保证了节点的连通性. SOM(Self Organizing Maps)算法依据虚拟力原则对于优先级事件进行均匀覆盖,其节点感知模型为布尔模型. MDW(Maximum Distance Weight)依据减小覆盖洞原则,向事件中心移动,并使得节点覆盖减少重合,该算法主要针对布尔感知模型的部署方法,所有的节点都向事件中心移动,对于高优先级的区域覆盖较好,然而由于未考虑针对事件优先级的稀疏部署,对于外围的低优先级区域缺少有效覆盖,总体覆盖能效略低于 SDOA. 另外该算法未考虑部署时的网络连通性,对于多事件区域部署中,不同事件区域之间节点缺少网络连通.

下面比较了两种算法的收敛速度以及在不同优先级因子下的部署覆盖能效,如图 5 和图 6 所示.

可以看出,SDOA 算法能够较 SOM 和 MDW 算法获得更好的覆盖能效,而收敛速度 MDW 最快,主要因为本文提出 SDOA 方法较 MDW 算法更复杂,其需要计算周围节点的覆盖权重并比较计算虚拟合力然后移动,

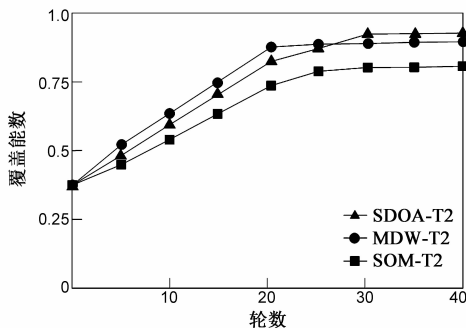


图5 实验2下部署算法收敛速度

移动策略较复杂. SOM 算法同样是基于虚拟力算法,实现过程较复杂. 针对多事件区域,另外我们比较了不同优先级因子 ϵ 下的不同的部署覆盖能效 $\zeta(P)$,如图 6 所示.

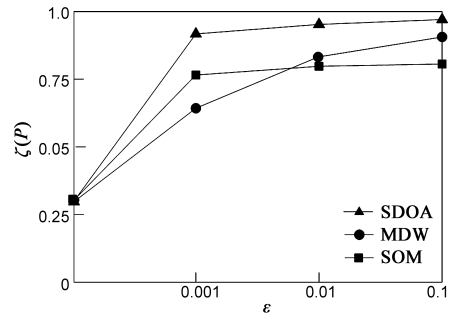


图6 不同优先级因子下的算法最终覆盖能效

图 6 可以看出本文的算法对于不同的事件优先级因子都能获得较好的覆盖能效, SOM 算法对于事件区域均匀分布,覆盖能效居中. 而 MDW 算法对于优先级因子较大的事件情形其覆盖能效更好. 这是因为 MDW 算法是迫使移动节点向事件中心高优先级区域覆盖,外围区域部署节点较少. 对于高优先级事件区域其外围区域的覆盖能效较小,因此其总体能够获得较大的覆盖能效.

5 结束语

传感器节点优化部署作为传感器网络的重要研究方向,对传感器网络监测性能有着重要影响. 本文针对大范围监测区域中的随机事件,研究如何优化部署感知节点. 针对优先级事件区域,构建有效覆盖权值模型,证明当各个节点覆盖权值一致时覆盖性能最大化. 实验结论反应算法可以实现网络连通节点的数量最小和完成网络区域覆盖的节点数量最大化,算法是分布式,仅需局部信息,移动部署策略只需要邻居信息交换即可实现,因此具有扩展性. 随着物联网、信息物理融合系统的兴起,传感器网络作为其实现的重要途径,其相关的研究将不断深入. 本文假定传感器网络节点为全移动节点,这在实际部署中存在一定局限性,在下一步研究中可以考虑结合混合部署场景下的节点优化部署.

参考文献

- [1] 温景容, 武穆清, 宿景芳. 信息物理融合系统[J]. 自动化学报, 2012, 38(4): 507 - 515.
WEN Jing-rong, WU Mu-qing, SU Jing-fang. Cyber-physical system[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(4): 507 - 515. (in Chinese)
- [2] Stankovic J A. Research directions for the internet of things

- [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2014, 1(1): 3 – 9.
- [3] Chen A, Li Z, Lai T, et al. One-way barrier coverage with wireless sensors[A]. Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM) [C]. Shanghai, China: IEEE Computer Society Press, 2011. 626 – 630.
- [4] He S, Chen J, Li X, et al. Cost-effective barrier coverage by mobile sensor networks[A]. Proceedings of the 31th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM) [C]. Orlando, USA: IEEE Computer Society Press, 2012. 819 – 827.
- [5] Jorge Cortés, Sonia Martínez, Timur Karatas, Francesco Bullo. Coverage control for mobile sensing networks[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(2): 243 – 255.
- [6] 刘惠, 柴志杰, 杜军朝, 武波. 基于组合虚拟力的传感器网络三维空间重部署算法研究[J]. 自动化学报, 2011, 37(6): 713 – 723.
Liu Hui, Chai Zhi-Jie, Du Jun-Zhao, Wu Bo. Sensor re-deployment algorithm based on combined virtual forces in three dimensional space[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(6): 713 – 723. (in Chinese)
- [7] Xue Wang, Sheng Wang. Hierarchical deployment optimization for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(7): 1028 – 1041.
- [8] 刘全, 杨凯, 伏玉琛, 张书奎. 一种三角形网格空洞修复算法[J]. 电子学报, 2013, 41(2): 209 – 213.
LIU Quan, YANG Kai, FU Yu-chen, ZHANG Shu-kui. An algorithm for hole recovery in wireless sensor networks based on triangle net [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(2): 209 – 213. (in Chinese)
- [9] 李劲, 岳昆, 刘惟一. 基于融合的无线传感器网络 k-集覆盖的分布式算法[J]. 电子学报, 2013, 41(4): 659-665.
LI Jin, YUE Kun, LIU Wei-yi. Distributed set k-cover algorithms for fusion-based coverage in wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(4): 659 – 665. (in Chinese)
- [10] 涂志亮, 王强, 沈毅. 移动传感器网络中目标跟踪与监测的同步优化[J]. 自动化学报, 2012, 38(3): 452 – 461.
TU Zhi-liang, WANG Qiang, SHEN Yi. A distributed simultaneous optimization algorithm for tracking and monitoring of moving target in mobile sensor network [J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(3): 452 – 461. (in Chinese)
- [11] Milan Erdelj, Tahiry Razafindralambo, David Simplot-Ryl. Coveringpoints of interest with mobile sensors [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(1): 32 – 43.
- [12] 夏娜, 王长生, 郑榕, 等. 鱼群启发的水下传感器节点布置[J]. 自动化学报, 2012 38(2): 295 – 302.
XIA NA, WANG Chang-sheng, ZHENG Rong, et al. Fish swarm inspired underwater sensor deployment [J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(2): 295 – 302. (in Chinese)
- [13] 夏娜, 郑语晨, 等. 刚性驱动水下传感器节点自组织布置 [J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 494 – 505.
XIA Na, ZHENG Yu-Chen, et al. Rigidity driven underwater sensor self-organized deployment [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(3): 494 – 505. (in Chinese)
- [14] Pompili D, Melodia T, Akyildiz I F. Distributed routing algorithms for underwater acoustic sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(9): 2934 – 2944.
- [15] Xufei Mao, Xin Miao, Yuan He et al. CitySee: Urban CO2 monitoring with sensors [A]. Proceedings of the 31th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM) [C]. Orlando, USA: IEEE Computer Society Press, 2012. 1611 – 1619.
- [16] Liu Y, He Y, Li M, et al. Does wireless sensor network scale? A measurement study on greenorbs [A]. Shanghai, China: IEEE Computer Society Press, 2011. 8733 – 881.
- [17] Hamid Mahboubi, et al. Distributed deployment strategies for improved coverage in a network of mobile sensors with prioritized sensing field [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 451 – 461.
- [18] Koutsougeras C, Liu Y, Zheng R. Event-driven sensor deployment using self-organizing maps [J]. International Journal of Sensor Networks, 2008, 3(3): 142 – 151.

作者简介



刘 军 男, 1986 年 11 月生, 湖北荆州人. 博士研究生, 主要研究方向为传感器网络、物联网、信息物理融合系统.

E-mail: liujun7700@163.com



程良伦 男, 1964 年 8 月生, 湖北黄石人. 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向包括物联网、复杂网络优化、信息物理融合系统.

E-mail: lilcheng@gdut.edu.cn

王建华 男, 1982 年 2 月生. 广东河源人. 博士研究生. 主要研究方向包括物联网, 复杂事件检测, 信息物理融合系统.

E-mail: 123chihua@163.com.

王 涛 男, 1983 年 10 月生. 湖北省荆州人. 博士, 讲师. 主要研究方向为传感器网络、上下文感知计算, 服务合成, 信息物理融合系统.

E-mail: wangtaosea@gmail.com