

基于 Voronoi 图模型的多目标跟踪覆盖

季云峰¹, 邓小龙¹, 徐毅²

(1. 江苏信息职业技术学院 物联网工程学院, 江苏 无锡 214153;

2. 江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 为实现 WSN 中的多目标跟踪覆盖, 提出一种基于 Voronoi 图的移动模型。通过对高阶 Voronoi 图进行建模, 采用高阶 Voronoi 图实现 2 种移动模型, 前者实现对单个目标位置的准确估计, 后者实现目标的 k -覆盖; 通过对高级移动模型的扩展, 完成对多目标的跟踪覆盖。实验结果表明, 提出的移动模型可以明显提高目标的形成概率和节点覆盖度, 相比其它几种常用移动模型, 在相同的传感器节点数量情况下, 可以大大减小移动距离。

关键词: 无线传感器网络; Voronoi 图; 多目标; 覆盖度; 移动模型

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7024 (2018) 04-0955-05

doi: 10.16208/j.issn1000-7024.2018.04.011

Voronoi graph based model for multiple targets tracking coverage

Ji Yun-feng¹, Deng Xiao-long¹, Xu Yi²

(1. IoT Engineering Department, Jiangsu College of Information Technology, Wuxi 214153, China;

2. IoT Engineering Department, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: To achieve the multiple targets tracking coverage in WSN, a mobile model based on Voronoi graph was proposed. Through the mathematical modeling of the higher order Voronoi graph, two kinds of mobile models were achieved using the higher order Voronoi graph. The former one achieved an accurate estimation of the location for a single target, the latter one guaranteed k -coverage of the target. The extension of advanced mobile model enabled the tracking coverage of multiple targets. Experimental results show that the proposed mobile model can significantly improve the forming probability of the target and the node coverage, and compared with several other mobile models used commonly, the moving distance can be greatly reduced using the model in the case of the same number of sensor nodes.

Key words: wireless sensor network; Voronoi graph; multiple targets; coverage degree; moving model

0 引言

评价基于无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN)^[1,2] 的目标跟踪有效性的一个主要方面就是覆盖面积。事实上, 布置的传感器应当对监测区域有一个最大面积的覆盖。虽然被监测环境的自然状况往往制约着无线传感器网络的建模问题, 但对传感器节点定位进行人为控制是可能的。为了保证传感器节点的最佳分布, 可以采取移动和灵活调度的策略来实现。

文献 [3] 针对 WSN 中的移动性和覆盖问题进行了研

究, 但没有对监测区域内多目标移动的跟踪进行探讨; 文献 [4] 针对混合无线传感器网络的故障恢复提出了一种最佳的移动传感器覆盖调度算法, 以精确地确定所需移动传感器距离的最小值; 文献 [5] 基于多移动节点和路径规划的传感器网络提出了一种覆盖修复机制; 文献 [6] 针对感知覆盖问题, 设计了一种分布式自适应控制策略来同时完成感知覆盖和对密度函数的估计; 也有学者提出采用节点概率感知模型和融合多个节点数据进行联合感知的无线传感器网络的覆盖优化^[7]; 文献 [8] 针对目前移动无线传感器网络定位问题存在的不足, 提出了一种基于改进的洪泛

收稿日期: 2017-02-13; 修订日期: 2017-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60974016); 江苏省自然科学基金项目 (BK20131097); 江苏高校品牌专业建设工程基金项目 (PPZY2015C239); 2016 年度江苏省高校“青蓝工程”基金项目 (苏教师 [2016] 15 号)

作者简介: 季云峰 (1978-), 男, 江苏无锡人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为物联网技术、人工智能等; 邓小龙 (1972-), 男, 江西上饶人, 博士, 教授, 研究方向为物联网技术、智能控制; 徐毅 (1972-), 男, 四川南充人, 硕士, 讲师, 研究方向为数据挖掘。

E-mail: jiyunfeng_2013@163.com

广播机制和粒子滤波的节点定位算法；为了确保每个用户的服务质量，如降低设备资源、计算量和能耗，也有学者提出了面向用户和面向服务的自发 Ad-hoc 传感器网络定位覆盖^[9]；文献 [10] 提出的联合概率数据关联滤波器 (joint probabilistic data association filter, JPDAF) 是基于每个单独跟踪状态的更新，是全部测量值的加权组合。

当构建一个无线传感器网络时，通常需要考虑 3 个主要问题。首先是覆盖控制，其次是移动性，第三就是灵活调度。这 3 个问题都与目标跟踪密切相关。

为了最大限度地对一个给定区域的目标进行跟踪控制，传感器的布置应保证整个区域被覆盖。一般说来，传感器应均匀布置，以确保任何目标出现时都能被检测到。然而，传感器又容易受到多种干扰，从而对其正常工作和检测信息的准确性造成影响。为了最大限度地提高准确检测的概率，通常的解决办法是增加传感器数量和相关检测信号，但这又会导致增加投入和资源消耗，特别是在没有目标的区域。此外，还可能增加无用检测信号过程中带来的额外费用。因此，最好的解决办法就是使目标出现区域的传感器布置最大化。

因此，主要问题就是找到一个最佳的移动模型来保证传感器的安全和控制，保证全部目标被覆盖，而且与每个目标相关的检测信号也应当能够进行区分。

为此，本文根据监测区域中的目标点与传感器节点间的距离，对这些目标点进行分类，提出了基于 Voronoi 图的 2 个移动模型：一个是高级移动模型，对单个目标位置给出准确的估计；一个是组移动模型，把地面传感器以组为单位移动，以保证目标的 k -覆盖，然后通过对高级移动模型进行扩展，实现对多目标的跟踪覆盖。实验结果表明，本文提出的移动模型不仅可以明显提高目标的形成概率和节点覆盖度，而且相比于其它几种常用移动模型，在相同的传感器节点数量情况下，还可以大大减小移动距离。

1 高阶覆盖原理

把同时被 k 个传感器覆盖的区域称之为 k -覆盖区域，图 1 给出了 k -覆盖的含义。对于这种 k -覆盖问题，就是设置最佳参数 k ，以确保检测信号的准确性。这种非均匀覆盖可能会影响传感器的移动和调度，特别是当多个目标出现时。

多目标跟踪覆盖并不是单目标跟踪覆盖的简单扩展。多目标跟踪覆盖的主要问题就是数据关联。事实上，检测信号应当准确地与对应的传感器关联。对于多目标跟踪覆盖，目前有 2 种主要的算法：集中式跟踪覆盖和分布式跟踪覆盖。集中式跟踪覆盖的特点是具有较高的计算复杂度，这是由于要计算全部可能目标的轨迹，而且需要增加感测空间；分布式跟踪覆盖建立在同时使用所布置的传感器的可用计算资源。这样，与资源限制相关的附加条件是已知的。

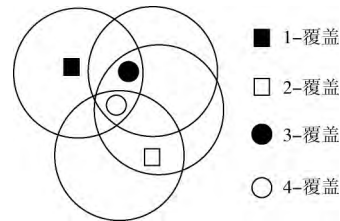


图 1 高阶覆盖原理

2 可计算的高阶 Voronoi 图结构

2.1 基本假设

本文提出的算法模型基于以下假设：

- (1) 全部移动节点安装有感知半径为 R_{s_i} 的二进制传感器， R_{s_i} 为传感器 s_i 的感知半径；
- (2) 传感器 s 的感知范围是一个标准的圆盘形，用 $\Gamma(s, R_s)$ 来表示；
- (3) 通信范围要大于感知范围。

此外，还考虑传感器网络构成如下：

- 1) 地面传感器 (ground sensors, GSs)：负责检测在其感知范围内移动的目标，并完成由上层分配的功能；
- 2) 空间传感器 (space sensors, SSs)：也属于感知层，但被分配更多的管理和通信功能。一方面负责地面传感器的协调、工作分配和对接收到的信息进行处理并传输给控制中心；另一方面完成感知和控制中心之间的互动和协调。因此，空间传感器接收控制中心的指令和请求，并根据来自地面传感器的可用资源来完成处理；
- 3) 控制中心 (control center, CC)：完成请求服务、管理输入参数 (如位置、检测类别、图像类别/数量)、接收结果并做进一步分析。此外，控制中心还完成各类响应，做出判决，并把指令发送给应用。

2.2 高阶 Voronoi 图的数学建模

先定义与传感器节点分布相关的数学模型。本文采用高阶 Voronoi 图模型来确定出 k 个相距最近的邻居组。

设 M 为度量空间， $\delta: M \times M \rightarrow \mathbb{R}$ 表示 M 上的欧氏距离，用 $R = \{p_i, 1 \leq i \leq N\} \subseteq M$ 表示在 M 中 N 个传感器节点集合的坐标。

与 R 关联的 Voronoi 图是定义在 M 中的唯一子集，所以对于 R 中的 $p_i (1 \leq i \leq N)$ ，子集的每个部分都包含了定义在 M 中的最近邻居，把与 $p_i (1 \leq i \leq N)$ 关联的每个子集的一部分称之为 Voronoi 单元，对每个 $p_i, p_j \in R$ ，用 $H(p_i, p_j)$ 来表示包含 p_i 的半平面

$$H(p_i, p_j) = \{x \in M / \delta(p_i, x) < \delta(p_j, x)\} \quad (1)$$

$H(p_i, p_j)$ 是由线段 $[p_i, p_j]$ 的平分线决定的半平面，而且包含 p_i 。

与 p_i 关联的 Voronoi 单元是由上面定义的全部半平面之间的公共区域且包含 p_i 来生成。因此，一个与 p_i 相关联

的 Voronoi 单元可以表示为

$$V_R(p_i) = \bigcap_{p_j \in R \setminus \{p_i\}} H(p_i, p_j) \quad (2)$$

对于一个给定的 p_i , $p_j \in R$ 的分布来说, 主要是根据 k 个最近邻居把 M 划分为等同的单元。对于一个给定的传感器分布, 就是寻找包含最近传感器邻居的集合 $P_i^{(k)} = \{p_{i1}, \dots, p_{ik}\}$ 。这个集合可以采用更高阶的 k 阶 Voronoi 图来得到。对于一阶 Voronoi 单元(即一个 k 阶单元), 可以用它的生成器和度量空间剩余部分之间的等分来构建, 即

$$V(P_i^{(k)}) = \bigcap_{p_j \in R \setminus P_i^{(k)}} [H(p_{i1}, p_j) \cap \dots \cap H(p_{ik}, p_j)] \quad (3)$$

则得到的 Voronoi 图可以表示为

$$V_k(S) = \bigcup_{R_k^*} V(P_i^{(k)}) \quad (4)$$

式中: X_k^* (即集合 X) 是包含基数 k 的子集的集合。也用 $N(p_i, V(P))$ 来表示一个 Voronoi 图 $V(P)$ 中点 p_i 的邻居的集合。

算法 1 即为构建 k 阶 Voronoi 图的算法。算法运行采用递归方式, 即用 $k-1$ 阶 Voronoi 图来计算 k 阶 Voronoi 图。

算法 1:

Input: 地面传感器集合 R , $k-1$ 阶 voronoi 图

Output: k 阶 voronoi 图

- (1) 根据 $V_1(RP_i^{(k-1)})$, 把由 $P_i^{(k-1)} \subset R$ 得到的每个区域 $r_i^{(k-1)}$ 细分为子区域;
- (2) 把相关的相邻 $r_i^{(k-1)}$ 合并成等效的新的子区域;
- (3) 删除旧的边界, 并保存每个 $r_i^{(k)}$ 的新的顶点和边界。

3 基于 Voronoi 图的移动模型

下面来阐明高阶 Voronoi 图如何用于控制覆盖范围、传感器的移动及调度。

通过确定出离区域最近的传感器和已知每个传感器的检测范围, 就可以得到覆盖范围。简单 Voronoi 图就是通过确定出离每个传感器最近的点的集合, 来得到覆盖和未覆盖区域, 高阶 Voronoi 图通过确定出离区域最近的 k 个传感器来增大覆盖范围, 这样就可以定义 k -覆盖, 从而得到覆盖范围。事实上, 覆盖范围应当在目标可能出现的区域增大, 而在剩余区域减小。这就要求应如何采用高阶 Voronoi 图来确定哪些传感器应当移向优先区域。优先权的确定根据当前的覆盖范围和将要估计的目标位置。

下面采用高阶 Voronoi 图来实现传感器移动的建模。采用 2 个移动模型, 一个是高级移动模型。在此模型中, 传感器节点朝设定的目标区域移动; 第二个是组移动模型, 为了增大覆盖, 同时保持更灵活的移动, 采用组移动模型。

3.1 高级移动模型

事实上, 目标检测信号数量越多, 预测精度就越高。通常情况下, 存在目标的交叉 k -覆盖和非交叉 k -覆盖区域 2 种情形。

对于一个目标的交叉 k -覆盖区域来说, 移动模型算法的触发是基于对目标存在的检测。每个 GS 发送其检测信号给相关联的 SS, SSs 收集全部检测信号, 验证其完整性并确定出可能包含目标的区域; 确定出的区域集合又按照目标存在的概率进行分类。当一个区域被 k -覆盖时, 这个概率就达到最大。模型算法如下:

(1) 最近的 k 个传感器 $s_i (1 \leq i \leq k)$ 发送其检测信号给它们的 SSs;

(2) 当检测信号发送给不同的 SS 时, SSs 进行协调并收集 GSs 上的全部信号;

(3) GSs 对接收到的信号的 k 个密钥进行验证, 并构建出目标存在区域 z_t ;

设 d_i 为传感器 s_i 的检测信号, $d_i = (r_{ii}, \alpha_{ii}, \theta_{ii}, s_i)$, $r_{ii} = \sqrt{(x_{s_i} - x_{t_i})^2 + (y_{s_i} - y_{t_i})^2}$, $\alpha_{ii} = \arctan[(y_{s_i} - y_{t_i}) / (x_{s_i} - x_{t_i})]$, θ_{ii} 为检测时刻。对每个 s_i , SSs 计算检测区域 z_i , 即 $z_i = \int_{a_{ii}-\delta_a}^{a_{ii}+\delta_a} \int_{r_{ii}-\delta_r}^{r_{ii}+\delta_r} da dr$, 这里 δ_a , δ_r 为估计检测误差。则总的目标存在区域就可以由全部基本检测区域的交集来得到, 即 $z_t = \bigcap_{1 \leq i \leq k} z_i$ 。

(4) SSs 确定出围绕 z_t 的区域 ΔZ , 这样目标不会超出下一个移动步。SSs 计算出 $Z_T = z_t + \Delta Z$ 和 k 个 Voronoi 图之间的交叉部分

$$\bigcup_{p_i^{(k)} \in S_k^*} (Z_T \cap V(P_i^{(k)})) = \bigcup_i \delta V_i^{(k)} \quad (5)$$

式中: $\delta V_i^{(k)} \subseteq V_i(P_i^{(k)})$, $V_i(P_i^{(k)})$ 为指标为 i 的 k 个传感器的 Voronoi 图单元;

(5) 为了保证 Z_T 的 k 覆盖, 每个 $\delta V_i^{(k)}$ 都应当被 k 覆盖, 这意味着

$$\delta V_i^{(k)} \subset \bigcap_{1 \leq j \leq k} \Gamma(s_j, R_s) \quad (6)$$

(6) 移动指令由 (r_i, α_i) 来确定, 这里 $r_i \geq d(s_i, p)$, 这样, $\exists p, \forall q \in V_i^{(k)}, d(s_i, p) \geq d(s_i, q)$, 且 $\alpha_i = \argmax_{x, y \in v_i} x s_i y$, 这里 $x, y \in v_i$, v_i 为 δV_i 的顶集合。

对于一个目标的非交叉 k 覆盖区域来说, 这时, 只有标记为 k' 的检测信号被 SSs 重新接收到。SSs 采用前面的算法构建出目标可能存在的区域。同时, 为了精确目标存在的区域, SSs 对需要的剩余 $(k - k')$ 个信号进行恢复。为此, SSs 的处理过程如下:

1) 设 z_i 为一个目标存在的可能区域, p_i 为其存在的概率, $p_i = k_i/k$, k_i 为 SSs 接收到的、经过验证的检测信号的数量, k 为最小需要信号数量;

2) SSs 确定出离区域 z_i 每部分最近的 k 个传感器, 这样, SSs 就可以确定出 z_i 和 k 个 Voronoi 图之间的交叉部分, 从而得到 $\bigcup_i \delta V_i^{(k)}$;

3) 对于每个 $\delta V_i^{(k)}$, SSs 确定出最近的 k 个传感器的集合, 并验证哪些传感器 $k_i'' (0 \leq k_i'' \leq k')$ 已经发送了检测信号。SSs 根据 k_i'' 的值对 $\delta V_i^{(k)}$ 进行分类, k_i'' 值越大的就是

$\delta V_i^{(k)}$ 中目标存在概率最大的; 较小的 k_j'' 值为离开或不在 $\delta V_j^{(k)}$ 中的目标;

4) 对于每个 $\delta V_i^{(k)}$ 来说, SSs 控制 $(k-k'')$ 个最近的传感器移向 $\delta V_i^{(k)}$, 为此, SSs 发送给它们移动指令, 指令中包括目标存在的概率; 一个移动指令定义为 (r_i, α_i, p_i) , 这里 $r_i \geq d(s_i, p)$, 而且对于 $\exists p, \forall q \in \delta V_i^{(k)}, d(s_i, p) \geq d(s_i, q)$ 且 $\alpha_i = \operatorname{argmax}_{x \in \hat{y}} \hat{y}$, 这里 $x, y \in v_i, v_i$ 为 δV_i 的顶集合, $p_i = k''/k$ 为 $\delta V_i^{(k)}$ 中目标存在的概率。

3.2 组移动模型

在组移动模型中, GSs 以组为单位移动, 以保证 k -覆盖。为此, 对每个移动步来说, 传感器随机确定出 k 个成员为一组, 对每个组来说, 都不要求是最近的邻居。每个组有一个“组长”, 由“组长”决定移动步。组的其余成员根据这个选择来确定它们的下一个移动步。通过这种方式, 每个传感器的移动步都基于其整个组。此外, 一个传感器在每个移动步中可以从一个组移动到另一个组。用这个模型可以确定出 k 个 Voronoi 组的交叉部分, 从而保证 k -覆盖。这样, 为了保证所有沿估计目标路径的 k -覆盖, 算法步骤如下:

(1) 从离估计目标路径最近的节点集合中挑选“组长”, 随后接收移动指令。“组长”要遵循由 SSs 发出的移动指令, 否则, 整个组将离开目标路径;

(2) 每个组的“组长”负责集合组成员, 并在它的邻近区域不断搜索;

(3) 一个成员只要没有接收到来自 SSs 的移动指令, 就选择属于一个组。否则, 移动指令将优先处理;

(4) 对于一个移动步, 一个成员可以只属于一个组。在下一个移动步, 它可以移动到另一个组;

(5) 一个节点只要它接收到来自 SSs 的移动指令, 可以成为一个“组长”。

3.3 多目标跟踪覆盖的实现

采用前面提出的 2 种移动模型可以确定出单个目标存在的可能区域, 而且能够驱动传感器移向这些区域。但在多目标情况下, 一个 GS 可以接收不同的移动指令, 并选择执行哪一条移动指令, 这就可能导致 GSs 的不均匀分布, 因而某些目标可能不被完全覆盖, 特别是当传感器数量不足以覆盖全部目标的估计位置时。基于此, 对高级移动模型进行扩展, 从而实现多目标跟踪覆盖。

在前面提出的移动模型中, GSs 可以自由决定它的下一次移动, 主要有 2 种情形。一是 GSs 根据移动指令移向目标, 即移向目标存在的可能区域; 二是 GSs 选择另一个不同的方向, 从而远离这些区域。对于第二种情况, 为了实现多目标跟踪覆盖, 我们让传感器仍然在附近位置不动, 以便在下次移动增加返回到目标方向的概率。为此, 可以通过对选定方向上的速度设定来实现, 即当 GSs 移向目标位置时, 移动速度就增大, 反之就减小。这样, 就需要

确定 2 个速度范围。用 V_{hi} 表示高速度值, 用 V_{li} 表示低速度值。

这样, 扩展后的高级移动模型把 GSs 的速度和选择方向联系了起来。因此, 移动概率就可以确定如下。

(1) 一个节点选择一个给定速度的概率等于选择目标方向的概率;

(2) 当接收到移动指令时, 最近的目标方向有更高的概率, 因而就分配更高概率的速度值;

(3) 速度值的 3 个子集可以定义为: ①速度值 V_i 确保 GSs 能在下一个移动步到达目标位置; ②选择目标方向但不足以达到目标的速度值 V_{hi} ; ③选择另一个方向的速度值 V_{li} 。

3 个速度值的概率分布定义如下

$$P_{\mathcal{N}}(v) = \begin{cases} P((r, \alpha) = (r_i, \alpha_i)) & v = V_i \\ \frac{1}{V_{hi}} P((r, \alpha) = (r_i, \alpha_i)) & v \in \{V_{hi}\} \\ \frac{1}{V_{li}} (1 - P((r, \alpha) = (r_i, \alpha_i))) & v \in \{V_{li}\} \end{cases} \quad (7)$$

4 模型算法实验及结果分析

仿真实验在 Malab 环境下进行。实验参数设置: 感知范围设定为 20 m、速度范围为 $[1, 10 \text{ m/s}]$, 传感器节点在 500 s 内、在一个 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的圆盘形区域内移动, 最大移动距离不超过 8 m, 开始时传感器节点随机布置在圆盘形监测区域内。首先测试本文提出的移动模型的目标形成概率随节点密度的变化关系, 其次测试传感器节点覆盖度随节点密度的变化关系, 最后对本文提出的移动模型与随机方向^[11]、随机游走^[12]和随机路点移动模型^[13]的平均移动距离随节点数量的变化关系进行比较。

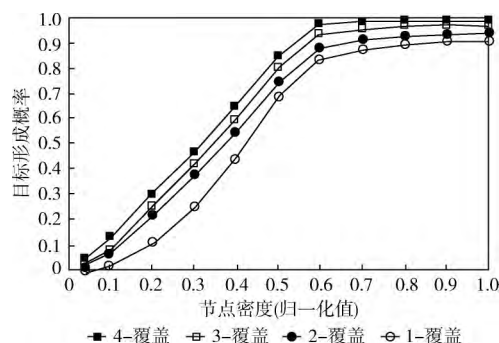
覆盖度 C_d 定义为实际被覆盖的面积与需要覆盖的总面积之比, 计算式如下

$$C_d = \frac{(\sum_{i=1}^k A_i)}{A} \quad (8)$$

式中: A_i ——第 i 个传感器覆盖的面积, A ——需要覆盖的总面积。

图 2 所示为在不同 k -覆盖情况下, 目标形成概率随节点密度的变化关系曲线。从图 2 可见, k 取不同值时, 当节点密度增大时, 目标形成概率也随之增大; 但高阶覆盖(如 $k=4$)时随着节点密度的增大, 目标形成概率增加更明显, 而且当节点密度达到大约 0.75 时, 目标形成概率就接近于 1, 而 $k=1$ 时的目标形成概率只有当节点密度达到 0.5 时才有明显的增加。可见, 本文提出的移动模型对于提高目标形成概率是十分有效的。

图 3 所示为不同 k 值时的节点覆盖度随节点密度的变化关系曲线。从图 3 可见, 在相同的节点密度情况下, 随

图2 不同 k -覆盖时目标形成概率与节点密度的关系

随着 k 值的增大, 节点覆盖度明显增大, 当节点密度为 1 时, k 为 4 的节点覆盖度可以达到 95% 以上。这表明本文提出的高阶 k -覆盖有利于对多目标的跟踪检测, 而且可以保证检测信息的准确性。

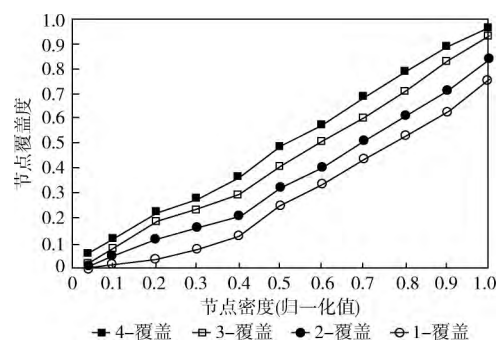
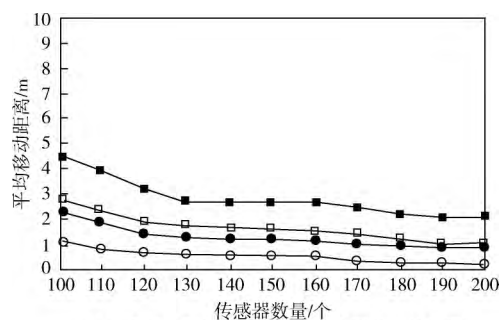
图3 不同 k -覆盖时节点覆盖度与节点密度的关系

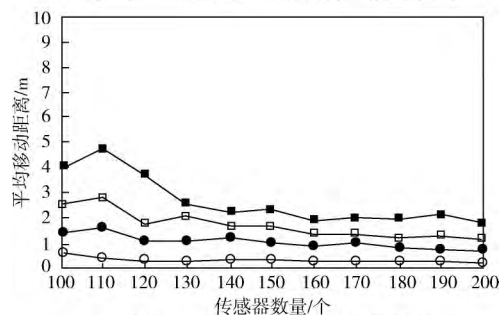
图 4 (a) 和图 4 (b) 分别为本文提出的移动模型在 1-覆盖和 3-覆盖情况下与随机方向^[11]、随机游走^[12]和随机路点移动模型^[13]的平均移动距离随传感器节点数量的变化关系曲线。从图 4 可见, 随着传感器节点数量的增多, 4 种移动模型的平均移动距离都是递减的, 这是因为增大传感器节点密度, 意味着覆盖度增大; 但是在 4 种移动模型中, 本文提出的移动模型的平均移动距离明显小于其余 3 种模型, 性能是最优的; 特别是在 3-覆盖时, 当传感器数量达到 120 个以上时, 本文提出的移动模型的平均移动距离几乎不再随传感器数量变化, 这说明模型算法有着极好的稳定性; 而其余 3 种移动模型虽然平均移动距离也有减小的趋势, 但出现了明显的急剧变化, 特别是文献 [11] 的随机方向移动模型。

5 结束语

本文针对 WSN 中的多目标跟踪, 提出了 2 种基于 Voronoi 图的移动模型。目的是在监测区域内建立一种非均匀覆盖, 从而达到通过多个传感器节点来实现如何用于监测区域内多个目标移动的情形, 从而能达到目标检测的目的; 2 种模型的主要优势在于能够把潜在的目标位置考虑



(a) 1-覆盖时平均移动距离与传感器数量的关系



(b) 3-覆盖时平均移动距离与传感器数量的关系

■ 随机方向移动模型 ◆ 随机游走移动模型
● 随机路点移动模型 ◻ 本文提出的移动模型

图4 不同移动模型的平均移动距离与传感器数量的关系

到移动指令的设计中, 仿真结果表明, 本文提出的移动模型不仅可以明显提高目标的形成概率和节点覆盖度, 而且在相同的传感器节点数量情况下, 还可以大大减小移动距离, 从而保证目标最大可能被更多的覆盖, 提高 WSN 的成本效益。

参考文献:

- [1] DU Xiaoyu, LI Hui, ZHOU Lin. Coverage algorithm based on fixed-directional movement for underwater sensor network [J]. Computer Engineering, 2015, 41 (2): 76-80 (in Chinese). [杜晓玉, 李辉, 周林. 基于定向移动的水下传感器网络覆盖算法 [J]. 计算机工程, 2015, 41 (2): 76-80.]
- [2] QIAN Zhihong, WANG Yijun. Internet of things-oriented wireless sensor networks review [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35 (1): 215-227 (in Chinese). [钱志鸿, 王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35 (1): 215-227.]
- [3] Chen W, Chen S, Li D. Minimum-delay POIs coverage in mobile wireless sensor networks [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2013, 2013 (1): 1-12.
- [4] Fu Z, You K. Optimal mobile sensor scheduling for a guaranteed coverage ratio in hybrid wireless sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 2013 (1): 559-562.

(下转第 1016 页)

- Computer Systems, 2015, 36 (3): 544-549 (in Chinese). [陈昊, 李兵, 刘常昱. 一种无确定度的逆向云算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36 (3): 544-549.]
- [11] SUN Nini, CHEN Zehua, NIU Yuguang, et al. Similarity measurement between cloud models based on overlap degree [J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35 (7): 1955-1958 (in Chinese). [孙妮妮, 陈泽华, 牛昱光, 等. 基于云模型重叠度的相似性度量 [J]. 计算机应用, 2015, 35 (7): 1955-1958.]
- [12] Mellit A, Pavan AM, Benghanem M. Least squares support vector machine for short-term prediction of meteorological time series [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 111 (1): 297-307.
- [13] Morenotorres JG, Saez JA, Herrera F. Study on the impact of partition-induced dataset shift on k-fold cross-validation [J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems, 2012, 23 (8): 1304-1312.
- [14] Grigorievskiy A, Miche Y, Ventelà AM, et al. Long-term time series prediction using OP-ELM [J]. Neural Networks, 2014, 51 (51C): 50-56.
-
- (上接第 959 页)
- [5] YE Miao, WANG Yuping, WEI Jingxuan. Coverage repair strategies for wireless sensor networks based on mutimobile nodes and genetic algorithm [J]. Journal on Communications, 2014, 35 (12): 45-52 (in Chinese). [叶苗, 王宇平, 魏静萱. 基于多移动节点和遗传算法的传感器网络覆盖修复策略 [J]. 通信学报, 2014, 35 (12): 45-52.]
- [6] SONG Cheng. Dynamic coverage and rendezvous for mobile sensor networks [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012 (in Chinese). [宋程. 移动传感器网络的动态覆盖与聚集 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.]
- [7] LI Jin, YUE Kun, LIU Weiyi. Distributed setk-cover algorithms for fusion-based coverage in wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41 (4): 659-665 (in Chinese). [李劲, 岳昆, 刘唯一. 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.]
- [8] ZHAO Haijun, CUI Mengtian, LI Mingdong, et al. The node localization based on improved flooding broadcast and particle filter in wireless sensor network [J]. Journal of Computer Application, 2016, 36 (10): 2659-2663 (in Chinese). [赵海军, 崔梦天, 李明东, 等. 基于改进的洪泛广播机制和粒子滤波的无线传感器网络节点定位 [J]. 计算机应用, 2016, 36 (10): 2659-2663.]
- [9] Lloret J, Shu L, Lacuesta R, et al. User-oriented and service-oriented spontaneous ad hoc and sensor wireless networks [J]. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2012, 14 (1): 1-8.
- [10] Jiang J, Song Z, Zhang H, et al. Voronoi-based approach for constructing connected cover set in wireless sensor networks [C] //Proceedings of New Trends in Computer Networks-International Symposium on Computer & Information Sciences. Istanbul, 2015: 124-133.
- [11] Singh JP, Dutta P. The temporal effect of mobility on path length in MANET [J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2012, 19 (1): 38-48.
- [12] Kalpakis K, Dasgupta K, Namjoshi P. Efficient algorithms for maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2014, 42 (6): 697-716.
- [13] Sabah N, Hocanin A. Gamma random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks [J]. International Journal of Communication Systems, 2013, 26 (11): 1433-1445.