

基于 Voronoi 图的无线传感器网络覆盖空洞检测算法

戴国勇^{1,2*}, 陈麓屹¹, 周斌彬¹, 徐 萍¹

(1. 浙江树人大学 信息科技学院, 杭州 310014; 2. 浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310023)

(* 通信作者电子邮箱 daiguoyong@gmail.com)

摘 要:针对无线传感器网络(WSN)中节点随机部署或部分节点能量耗尽带来的覆盖空洞(CH)问题,提出了一种基于 Voronoi 图的覆盖空洞检测算法。该算法利用节点的位置信息在覆盖区域范围内构建 Voronoi 图,通过计算每个 Voronoi 区域内的节点到该区域的顶点和边的距离来判断是否存在覆盖空洞,标识覆盖空洞的边界节点。仿真实验评估了不同节点分布密度、不同感知半径对空洞平均检测时间、平均能耗的影响,并与路径密度(PD)算法进行比较。实验结果表明所提算法在空洞平均检测时间和节点平均能耗两个方面均有 10% 左右的提升,对进一步延长网络生存期具有重要价值。

关键词:无线传感器网络;覆盖空洞;Voronoi 图;能耗;半分布式算法

中图分类号: TP393.03 **文献标志码:** A

Coverage hole detection algorithm based on Voronoi diagram in wireless sensor network

DAI Guoyong^{1,2*}, CHEN Luyi¹, ZHOU Binbin¹, XU Ping¹

(1. College of Information Science and Technology, Zhejiang Shuren University, Hangzhou Zhejiang 310014, China;

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

Abstract: To address the Coverage Hole (CH) problem in Wireless Sensor Network (WSN) caused by nodes' random deployment or running out of energy, a novel coverage hole detecting algorithm was proposed for wireless sensor networks in this paper. The location information of sensor nodes was used to build the Voronoi diagram for the monitored area. Then the distances between a sensor node and the vertex or edges of the corresponding Voronoi cell were calculated to decide the existence of coverage holes and identify the border nodes. Simulations were conducted to evaluate the performance of the proposed algorithm within different sensing ranges and nodes density. The performance comparison with the Path Density (PD) algorithm shows that the proposed algorithm has about 10% promotion both in average detection time and average energy consumption, which is important for prolonging the network lifetime.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); Coverage Hole (CH); Voronoi diagram; energy consumption; semi-distributed algorithm

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是当前的研究热点,它可以被广泛应用于环境监控、入侵检测、智能交通、智慧农业、智慧城市等各个领域^[1-3]。许多实际应用对无线传感器网络的服务质量具有很高的要求,而覆盖是传感器网络服务质量重要的度量指标。为了保证无线传感器网络完成目标监测和信息获取的任务,传感器节点必须有效地覆盖目标监测的区域。由于无线传感器网络中的传感器节点都是依靠电池供电,且节点经常通过随机布撒等形式部署和工作在野外等人员无法到达的恶劣环境中。因此,传感器网络中处于节能考虑常常选择一部分节点保持活跃工作状态,而另一部分节点则保持低能耗的休眠状态。传感器网络部署时可能会产生的未覆盖的区域,或者当网络中某一部分节点由于能量耗尽或者其他自然破坏导致原有网络中部分区域不能

被覆盖的现象,称为覆盖空洞(Coverage Hole, CH)。Wafar 等^[4]指出了导致覆盖空洞的四种情况:节点的随机布撒、节点的失效、节点的位置变化、覆盖区域内出现障碍物。覆盖空洞的产生会导致空洞区域数据无法感知,对网络的连通性造成影响,甚至导致网络整体失效,严重影响无线传感器网络的性能和服务质量。因此,为保证目标监测区域的完全覆盖(complete coverage),及时发现并修复覆盖空洞是一项非常重要的工作。

目前,无线传感器网络覆盖问题已有广泛研究,也有很多专家和学者关注覆盖空洞的检测和修复问题。Ahmed 等^[5]提出了覆盖空洞更为普适的描述:在特定的无线传感器网络应用中,若目标监测区域内的覆盖度要求为 k ,而网络运行的任意时刻,若区域内同时覆盖任意区域的节点数小于 k ,则说明出现了覆盖空洞。目前的研究主要是针对 1-覆盖要求下覆盖空洞检测和修复策略。总体而言,现有的覆盖空洞检测方

收稿日期:2014-10-20;修回日期:2014-11-24。

基金项目:浙江省教育厅科研项目(Y201432448);国家自然科学基金面上项目(61379023)。

作者简介:戴国勇(1983-),男,浙江杭州人,讲师,博士研究生,主要研究方向:无线传感器网络、信息安全; 陈麓屹(1982-),女,浙江江山人,助教,硕士,主要研究方向:物联网、数据挖掘; 周斌彬(1987-),女,浙江温州人,讲师,硕士,主要研究方向:无线传感器网络; 徐萍(1977-),女,浙江台州人,讲师,博士,主要研究方向:人工智能、物联网。

法可以分为两类:一类是根据网络中节点之间的连通信息检测;另一类则需要预先知道节点的位置信息,然后根据节点位置进行计算。

Corke 等^[6]提出的路径密度(Path Density, PD)算法根据传感器节点周围的路径密度来检测 WSN 中的覆盖空洞。Yan 等^[7]利用最大单纯复形,即 Cech 复形和 Rips 复形,将覆盖空洞分为三角空洞与非三角空洞两类,并提出了基于节点连通信息的非三角覆盖空洞检测算法。在文献[8]中提出基于同调论的空洞检测方法,并在理论上以未发现空洞区域的比例为指标分析了其准确性。Khan 等^[9]根据 WSN 拓扑结构提出了基于节点 α 跳邻居连通性的覆盖空洞边界检测算法,该算法不要求节点具有特定的分布,无需节点的位置信息。Yu 等^[10]针对混合传感器网络提出了基于水平集方法的覆盖空洞检测算法,该算法能够估计网络中存在的覆盖空洞的数量及大小,在此基础上提出了基于遗传算法的空洞修复算法。Ma 等^[11]提出了基于计算几何理论的分布式覆盖空洞检测算法,该算法利用网络中相邻的三个节点构成的三角形的特性来判断是否存在覆盖空洞。

本文针对现有无线传感器网络覆盖空洞检测算法计算复杂度高、能耗大的问题,提出了一种基于 Voronoi 图的分分布式覆盖空洞检测算法。算法利用 Voronoi 区域与节点位置信息通过简单的几何计算来判断某一位置是否被覆盖到,从而标识空洞边缘的传感器节点。算法将计算量较大的 Voronoi 图构建部分放在计算能力强的 Sink 节点集中式计算,空洞检测部分由普通传感器节点分布式计算。

1 问题描述及预备知识

1.1 预备知识

本节给出本文用到的相关概念的定义。

定义 1 感知圆盘。传感器节点 N_i 位于二维平面中坐标为 (x_i, y_i) , 节点的感知半径为 R_i , 则节点 N_i 的感知范围是以 (x_i, y_i) 为圆心, 以 R_i 为半径的一个圆盘, 记作 S_i 。定义如式(1):

$$S_i = \{(x, y) \mid \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} < R_i\} \quad (1)$$

定义 2 覆盖空洞。无线传感器网络中如果存在一片连续的区域 CH 不被任何传感器节点感知范围所覆盖, 则称 CH 为一个覆盖空洞。

定义 3 边界节点。若网络中的一个传感器节点 N 位于一个覆盖空洞边缘, 则称 N 为一个边界节点。

定义 4 覆盖率。已覆盖的区域 Q 的面积 $S(Q)$ 和节点部署区域 H 的面积 $S(H)$ 之比为覆盖率, 定义如式(2):

$$\eta = \frac{S(Q)}{S(H)} \quad (2)$$

1.2 问题描述

传感器节点随机布撒在一个矩形区域内, 节点分为两类: 一类是静态节点, 不具有可移动性; 另一类是具备一定的移动能力的可移动节点, 可用于修复覆盖空洞。这两类节点除了在可移动性上的区别之外, 其他特性均同构, 即有相同的通信能力(通信半径)和覆盖能力(感知半径), 相同的初始能量及

硬件特性等。传感器节点随机部署完成后, 每个节点的位置信息已知(可以通过 GPS 获取, 或者通过位置估计算法计算得知)。

本文的研究目标是在网络部署完成后有效地检测无线传感器网络中存在的覆盖空洞, 即空洞检测算法的输入为所有节点的位置信息、节点的感知半径, 算法的输出为空洞的数量以及每一个空洞对应的边界节点序列。由于节点部署区域外界环境的变化或者人为因素, 节点可能发生位置移动、能量耗尽失效的情形。覆盖空洞检测算法可能会周期性运行, 因此必须使算法能耗尽可能低。本文暂不研究空洞发现后的进一步修复问题。

2 基于 Voronoi 图的覆盖空洞检测算法

2.1 Voronoi 图

定义 5 Voronoi 图。对平面 n 个离散点而言, 把平面分为若干个区域, 每个区域包括一个点, 该点所在的区域是到该点距离最近的点的集合。设 P 是一离散点集合 $P_1, P_2, \dots, P_n \in P$, 定义 P_i 的 Voronoi 区域(Voronoi Cell) $V(P_i)$ 为所有到 P_i 距离最小点的集合: $V(P_i) = \{P \mid d(P, P_i) < d(P, P_j), j \neq i, j = 1, 2, \dots, n\}$ 。则 Voronoi 图 $V(P)$ 为 $V(P) = \{V(P_1), V(P_2), \dots, V(P_n)\}$ 。

Voronoi 图是计算几何中常用的一种数据结构, Voronoi 区域的边界线是两个区域内点连线的垂直平分线。Voronoi 图在无线传感器网络的覆盖问题研究中已经得到了很多应用。把无线传感器网络覆盖区域划分成若干个 Voronoi 区域, 可以较好地呈现覆盖率的优劣^[12]。如图 1 是根据无线传感器网络节点构建的 Voronoi 示例。其中矩形区域为无线传感器网络的覆盖范围, A, B, C, D, E, F 为网络中的传感器节点, 实线圆圈为每个传感器节点的感知圆盘, 可以观察到图 1 中覆盖率是比较低的, 存在覆盖空洞。WSN 中传感器节点的覆盖范围(感知范围)与其所在的 Voronoi 区域可能存在以下几种关系: 1) 覆盖范围完全包含了该 Voronoi 区域; 2) Voronoi 区域完全覆盖了该节点的覆盖范围; 3) 两者部分重叠, 即两者边界存在交点。

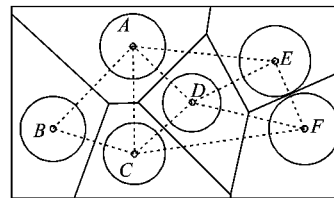


图1 Voronoi 图示例

2.2 空洞检测算法

定理 1 当传感器节点与 Voronoi 区域的边的距离大于感知半径时, 该边与其两侧区域传感器节点连线交点处存在覆盖空洞。

证明 为了不失一般性, 取图中任意相邻两个 Voronoi 区域中的节点 A, B , 如图 2 所示, 它们所在的 Voronoi 区域分别记作 $V(A)$ 和 $V(B)$ 。由 Voronoi 图的性质可知 $V(A)$ 内任意一点到 A 的距离比到其他任意节点的距离都小, 且 $V(A)$ 和 $V(B)$ 边界线上任意一点到节点 A 和节点 B 的距离相等。取线段 AB 与 $V(A)$ 和 $V(B)$ 边界的交叉点 H , 则 $AH = BH = AB/2$

就是节点 A 、 B 到 $V(A)$ 和 $V(B)$ 边界的距离。采用反证法,假设 H 点附近不存在覆盖空洞,则 H 点能被节点 A 感知,即 H 点在 A 的感知范围内, $AH \leq R_s$,这与条件 $AH > R_s$ 矛盾,原命题成立。证毕。

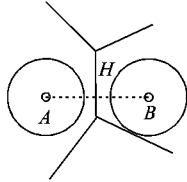


图2 覆盖空洞判定示例1

定理2 当传感器节点与 Voronoi 区域定点的距离大于感知半径时,该顶点处存在覆盖空洞。

证明 如图3所示, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 构成节点 A 的 Voronoi 区域 $V(A)$, 节点 A 到顶点 V_1 的距离大于节点的感知半径 R_s , 即顶点 V_1 在节点 A 的感知圆盘之外。连接 A 和 V_1 , 线段 AV_1 与节点 A 的感知圆的交点记为 H 。取线段 HV_1 上的任意一点 X , 由 Voronoi 图的性质可知, X 到节点 A 的距离小于 X 到其他任意节点的距离, 而 X 在节点 A 的感知圆盘之外, 即 X 不能被 A 覆盖, 所以 X 不能被其他任何节点所覆盖。 X 处在一个覆盖空洞中, 命题成立。证毕。

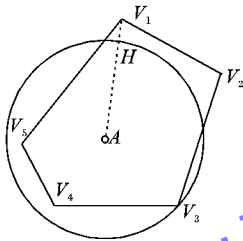


图3 覆盖空洞判定示例2

根据上述两个定理, 本文设计了一个无线传感器网络的覆盖空洞检测算法, 其基本思想是: 获取网络拓扑结构并构造 Voronoi 图, 各个节点分布式计算自身到所在 Voronoi 区域各边以及各顶点的距离, 比较距离与节点感知半径的大小判定是否存在覆盖空洞。实际上, 算法可以分为两个阶段, 第一个阶段是构建 Voronoi 图阶段, 这个阶段中由节点将自己的位置信息发送给具有较强计算能力的 Sink 节点, 由 Sink 节点根据全网所有节点的位置信息构建 Voronoi 图, 并将各个节点所在的 Voronoi 区域信息发送给相应的传感器节点。第二阶段是覆盖空洞检测阶段, 此时每个节点已经知道自己所在的 Voronoi 区域的顶点信息, 由每个节点分布式计算各个节点周围是否存在空洞, 并标识自身是否为空洞边界节点。算法的伪代码如下:

```
the sensor node get the vertex coordinates of the Voronoi cell {  $V_1, V_2,$ 
 $\dots, V_n$  }
for( int  $i = 1; i \leq n; i++$  )
{
    calculate the distance between the sensor node and  $V_i$  as  $d_V$ ;
    calculate the distance between the sensor node and the edge
     $V_i V_{(i+1) \% n}$  as  $d_E$ ;
    if (  $d_E > R_s$  or  $d_V > R_s$  ) tag the current sensor node as hole
    boundary node;
}
```

3 仿真实验分析

3.1 实验环境

采用 Matlab 平台进行仿真实验, 在 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的矩形区域内部署传感器节点(如图4, 图中点为节点所在位置, 虚线圆圈表示节点感知范围, 实线多边形构成 Voronoi 划分), 所有传感器节点同构, 具有相同的感知半径和通信半径。仿真实验中的主要参数如表1所示。

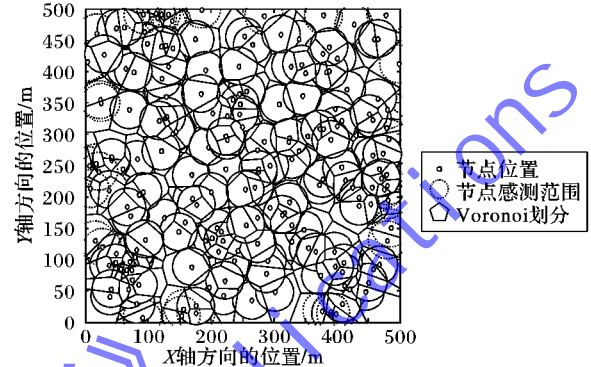


图4 200个节点随机部署 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的矩形区域

表1 仿真实验参数

参数	取值	参数	取值
监测区域形状	矩形	节点感知半径	10 m ~ 30 m
监测区域大小	500 m × 500 m	覆盖空洞数量	5 ~ 30
节点数量	200 ~ 2 000	初始能量	100 J
节点通信半径	10 m	数据传输速率	250 Kb/s

实验中主要采用以下两个指标来评价算法的性能:

平均空洞检测时间 算法平均检测出一个空洞所花的时间, 即检测出所有空洞的时间除以空洞的数量。

平均能耗 算法平均检测出一个空洞所消耗的能量, 即检测出所有空洞的总能耗除以空洞的数量。

3.2 实验结果及分析

首先考察算法的平均空洞检测时间, 考虑网络中不同节点密度、不同感知半径对空洞检测时间的影响。实验在同一区域内随机部署不同数量的传感器节点(200 ~ 2 000)来表示不同的节点密度, 分别设置节点的感知半径等于通信半径、两倍通信半径以及三倍通信半径, 运行空洞检测算法, 实验结果如图5所示。随着节点密度增加, 空洞的平均检测时间也增加。而感知半径的越大, 平均检测时间也略大, 但总体影响并不大。

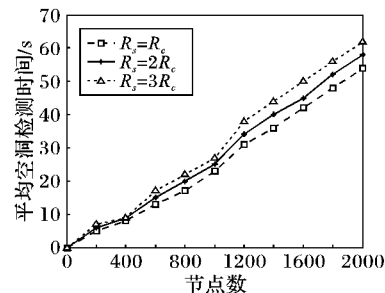


图5 平均空洞检测时间与节点数和感知半径关系

接下来考察算法对节点能耗的影响, 考虑网络中不同节点密度、不同感知半径情况下算法运行时的平均能耗。实验结果如图6所示, 算法的能耗主要与监测区域中传感器节点

的密度相关,能耗随着节点密度增大(节点数量增加)而增加明显。而在不同感知半径下算法的能耗差异较小,感知半径较大时算法能耗也略增加。算法的能耗主要花费在通信和计算上,在感知数据上能耗较少。

此外,实验将本文的空洞检测算法与典型的 PD 算法从平均空洞检测时间和能耗两个方面进行比较。如图 7 所示,本文所提出的空洞检测算法在不同的节点密度条件下检测时间均优于 PD 算法,其中在节点密度较小时优势较为明显,节点密度较大时两者差异逐渐缩小。如图 8 所示,本文所提出的空洞检测算法在不同节点密度条件下节点的平均能耗均小于 PD 算法,且两者之间的能耗差异比较稳定。

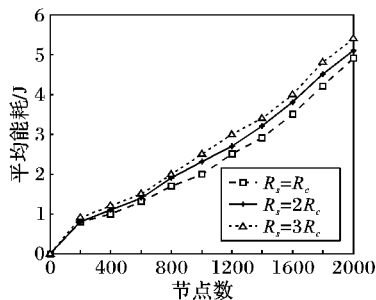


图6 平均能耗与节点数和感知半径关系

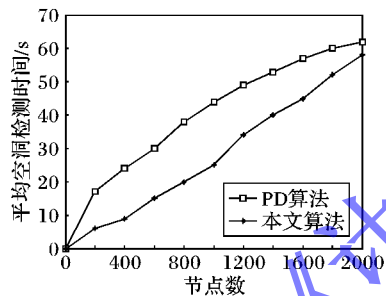


图7 本文算法与 PD 算法平均空洞检测时间比较

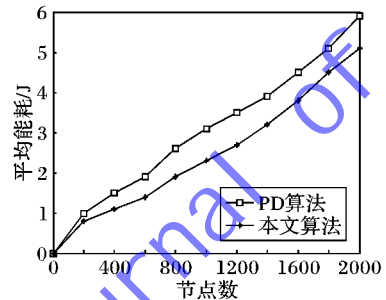


图8 本文算法与 PD 算法平均能耗比较

4 结语

本文针对无线传感器网络中存在的覆盖空洞问题提出了一种基于 Voronoi 图的空洞检测算法。算法思想简单,基于 Voronoi 划分计算节点与所在 Voronoi 区域顶点和边的几何距离,从而判断是否存在覆盖空洞,非常易于实现。算法以半分布式方式执行,结合了集中式算法与分布式算法的优点。仿真实验考察了算法在不同节点密度和不同感知半径下的平均空洞检测时间和平均能耗,并与 PD 算法进行比较。实验结果表明本文的覆盖空洞检测算法与 PD 算法相比在空洞平均检测时间提升约 10%,在节点平均能耗上降低约 10%。节点位置由于外界环境因素会发生变动,空洞算法需要周期性执

行。因此,算法在空洞检测时间和节点平均能耗上的优化提升能进一步延长网络生存时间,对无线传感器网络的推广应用具有重要价值。在此研究基础上,下一步将研究如何通过改变可移动节点位置修复或部分修复 WSN 中检测到的覆盖空洞,在低能耗的基础上最大限度提高网络的覆盖率。

参考文献:

- [1] MA Z, SUN Y, MEI T. Survey on wireless sensors network [J]. Journal on Communications, 2004, 25(4): 114 - 124. (马祖长, 孙怡宁, 梅涛. 无线传感器网络综述[J]. 通信学报, 2004, 25(4): 114 - 124.)
- [2] HONG F, CHU H, JIN Z, *et al.* Review of recent progress on wireless sensor network applications [J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(S2): 81 - 87. (洪峰, 褚红伟, 金宗科, 等. 无线传感器网络应用系统最新进展综述[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(S2): 81 - 87.)
- [3] LI J, GAO H. Survey on sensor network research [J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(1): 1 - 15. (李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 1 - 15.)
- [4] WATFA M K, COMMURI S. Energy-efficient approaches to coverage holes detection in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control. Piscataway: IEEE, 2006: 131 - 136.
- [5] AHMED N, KANHERE S S, JHA S. The holes problem in wireless sensor networks: a survey [J]. Mobile Computing and Communications Review, 2005, 9(2): 4 - 18.
- [6] CORKE P, PETERSON R, RUS D. Finding holes in sensor networks [EB/OL]. [2014-10-20]. <http://cmc.cs.dartmouth.edu/cmc/papers/corke:holes.pdf>.
- [7] YAN F, MARTINS P, DECREUSEFOND L. Connectivity-based distributed coverage hole detection in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 2011 IEEE Global Telecommunications Conference, Piscataway: IEEE, 2011: 1 - 6.
- [8] YAN F, MARTINS P, DECREUSEFOND L. Accuracy of homology based coverage hole detection for wireless sensor networks on sphere [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(7): 3583 - 3595.
- [9] KHAN I M, JABEUR N, ZEDADLY S. Hop-based approach for holes and boundary detection in wireless sensor networks [J]. IET Wireless Sensor Systems, 2012, 2(4): 328 - 337.
- [10] YU X, WU C, CHEN D, *et al.* Level set based coverage holes detection and holes healing scheme in hybrid sensor network [EB/OL]. [2014-10-22]. <http://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2013/297383/>.
- [11] MA H-C, SAHOO P K, CHEN Y-W. Computational geometry based distributed coverage hole detection protocol for the wireless sensor networks [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011, 34(5): 1743 - 1756.
- [12] ZHAO C, WU H, LIU Q, *et al.* Optimization strategy on coverage control in wireless sensor network based on Voronoi [J]. Journal on Communications, 2013, 34(9): 115 - 122. (赵春江, 吴华瑞, 刘强, 等. 基于 Voronoi 的无线传感器网络覆盖控制优化策略[J]. 通信学报, 2013, 34(9): 115 - 122.)