

基于区域分割和 Voronoi 图的区域覆盖算法*

张景昱, 刘京菊[†], 叶春明

(国防科技大学 电子对抗学院, 合肥 230037)

摘要: 针对无线传感器网络区域已知的区域覆盖问题, 提出了一种基于区域分割和 Voronoi 图的覆盖算法 (RSV)。算法首先分析已知区域的地理信息和兴趣点, 根据传感器感知能力, 构造合适大小的网格将已知区域细化分割。然后基于分割后的各个区域, 根据兴趣点的数量划分其为不同权重部分, 并初步设计传感器位置。根据初步部署位置和权重, 对不同权重位置构造 Voronoi 图填补覆盖空洞, 直至所有空洞被填补完毕, 并为了延长运行寿命设计了合适的节点休眠策略。仿真实验显示, 基于区域分割和加权 Voronoi 图的目标区域覆盖算法相较于现有算法, 在节点数量增加较少的情况下, 延长了网络的运行寿命, 同时使节点能量消耗更加平均, 在节点数量受限情况下, 算法对有效区域的覆盖效果也更佳。

关键词: 区域覆盖; 区域分割; Voronoi 图; 无线传感器网络

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2020)10-048-3116-05

doi:10.19734/j.issn.1001-3695.2019.06.0229

Area coverage algorithm based on region segmentation and Voronoi diagram

Zhang Jingyu, Liu Jingju[†], Ye Chunming

(College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: This paper proposed a novel algorithm based on region segmentation and Voronoi diagram (RSV) for area coverage problem with certain area in WSN. The algorithm analyzed points of interest (POI) and geographic information in certain area and designed the grid to divide the area. With the number of POI in divided area, the algorithm designed the initial deployment. According to the initial deployment location and weight, the algorithm constructed Voronoi diagram to fill the coverage holes for different weight positions until all the holes were filled and designed a suitable node dormancy strategy to prolong WSN lifetime. The results of simulation experiment show that the RSV algorithm prolongs WSN lifetime and balances the energy consumption among all sensors with less increased number of sensors. The RSV algorithm also has better coverage of the effective area with limited number of sensors.

Key words: area coverage; region segmentation; Voronoi diagram; wireless sensor network (WSN)

0 引言

无线传感器网络是由许多传感器节点通过无线网络连接构成的, 而覆盖问题是 WSN 相关研究中最重要的问题之一。随着科技水平的发展, 传感器节点成本变得越来越低, 而且功能也越来越完善, 但是其自身的能量限制仍然是限制 WSN 发展的主要因素。因此覆盖问题的目标就是兼顾能量以及覆盖效果, 保证对感兴趣区域和目标实现最优的覆盖, 同时延长 WSN 的工作时间。区域覆盖问题 (area coverage) 是针对目标区域进行覆盖管理的问题。区域覆盖问题可以根据覆盖率分为完全覆盖 (full coverage) 和部分覆盖 (partial coverage), 本文研究目标为完全覆盖。完全覆盖根据对区域的覆盖率可以分为简单覆盖 (simple coverage) 和多重覆盖 (k -coverage)。简单覆盖是指使用最少数量传感器节点实现对整个区域的完全覆盖, 可以简单地理解为目标区域内兴趣点只要满足至少被一个节点覆盖。而多重覆盖是指兴趣点满足至少被 k 个节点覆盖, 同时整个区域内所有位置都被覆盖到^[1]。传统区域覆盖问题, 只针对一片区域是否能够被完全覆盖, 以满足区域内出现兴趣点时可以被及时感知, 而对于整个区域的细节把握不足。在实际情况中, 很多区域单个节点并不能满足时刻对区域的监视, 这样的情况在许多高安全区域内是不允许存在的。因此多

重覆盖是这类条件下的优质选择。

在实际场景中, 针对一些大范围区域, 为了实现对大范围区域的长期监视, 需要部署节点进行覆盖, 考虑到传感器节点自身价值和部署代价, 不可能使用较大数量的传感器对区域进行覆盖。使用简单覆盖策略, 虽然能以较少数量传感器实现对整片区域的监视, 但是可能由于某些原因导致节点出现问题, 无法实时监视到目标, 使得监视效果下降。而使用多重覆盖策略, 虽然可以保证监视效果, 但大范围区域内很多区域兴趣点出现概率极低, 而一些区域出现兴趣点的概率又很高, 此种方式部署可能会有许多节点一直处于空闲状态, 而一些节点又会时刻处于工作状态, 造成很大程度上的资源浪费, 严重影响网络的运行时间以及工作状态。在此类区域中, 能够出现兴趣点的位置往往同地形以及环境有着很大的联系, 会存在某些位置出现兴趣点的概率很高, 而某些位置出现兴趣点的概率很低。上述两种覆盖策略均不能有效地针对此类场景设计出既满足覆盖效果又代价很低的算法。因此本文希望结合两种覆盖策略的优点, 通过对覆盖区域进行细致的规划, 以优化对区域感知节点的部署, 延长整个网络的寿命。

针对区域覆盖的算法当中, 多边形网格分割是很常用的一种方法, 其实现思路是将整个区域分割成等大小的网格, 在所有网格点上部署传感器以满足对整个区域的覆盖。此方式只

收稿日期: 2019-06-12; 修回日期: 2019-07-22 基金项目: 国防科技大学基金资助项目

作者简介: 张景昱 (1995-), 男, 河南商丘人, 硕士, 主要研究方向为网络安全态势感知; 刘京菊 (1974-), 女 (通信作者), 湖北枣阳人, 教授, 硕士, 主要研究方向为网络安全态势感知 (80822448@qq.com); 叶春明 (1982-), 男, 安徽安庆人, 讲师, 博士, 主要研究方向为通信协议分析、网络仿真。

能够简单地满足区域的覆盖监视,对于整个网络的寿命和兴趣区域的监视贡献很少。基于 Voronoi 图的算法常常用来检测已经部署完成的网络是否存在监视空洞,通过已经部署的位置构建 Voronoi 图,对图的 vertex 位置进行判断是否存在未覆盖的情况。此种方法虽然能有效地检测出空洞并填补,但并不能针对实际区域的需求,对最合适的空洞位置进行填补,很难有好的覆盖效果。为了提高网络的整体寿命,休眠策略成为了很多覆盖算法实际运行的优化选择,但是休眠策略往往与部署算法相辅相成,每种算法都有适合其自身的休眠策略设计^[2]。

本文通过对目标区域的分析,将区域内关键位置分割成权重不同的区块,并对每个区块进行中心点提取,并赋予相应权重,得到新的区域图;根据新构建的区域图设计了一种基于 Voronoi 图的节点部署算法,并设计了一种合适的节点休眠策略。

1 相关研究

完全区域覆盖主要以减少部署节点和延长网络寿命为研究目标。由于完全区域覆盖的基础是对整个区域的覆盖率为 100%,所以最常规的算法是对区域进行网格化分割,网格化划分是一种规则化的划分方式,它将区域划分成一个个均匀的网格单元,通过划分的单元设计部署节点的算法,使得整个网络部署更加简单,节点分布更加均匀,更容易分析各种情况。文献[3,4]分析表明最常用的网格单元是三角形、四边形和六边形,研究证明网络的连通性和覆盖效率与节点的通信半径 R 和感知半径 r 之间存在一定关系。当 $R/r \geq \sqrt{3}$ 时,三角形网格(triangular lattice)覆盖效果比四边形网格(square grid)和六边形网格(hexagonal grid)效果好;但当 $R/r < \sqrt{3}$ 时,三角形网格覆盖效果最差。文献[5]提出六边形网格部署是一种通用的基本分割模式,可以通过改变边缘及夹角使得六边形呈现出不同的最优模式,三角形网格划分即可通过六边形进行转换。在文献[6]中提出了一种算法 HGSDA,它使用六边形单元将区域进行划分,将每个六边形中心设置为感知节点位置,尽管划分单元使用了六边形,但是通过连线,节点之间以 $\sqrt{3}R$ 的距离构成三角形,此种方法实现完全覆盖时使用了最少数量的感知节点。在文献[7]中提出一种 C2 算法,算法分为两个阶段:a)确定一些簇头节点作为原始点,以这些点为中心构建六边形方格,并不断向外扩散;b)不断调整六边形之间的结构位置,使得构成的网络满足完全覆盖和连通性。文献[8]中提出了 AT-RI 算法,该算法只需要考虑相邻节点之间的位置信息,通过将区域分割成节点之间连接的三角形,减少了节点之间通信的代价。文献[9]中提出 RGB 算法将区域分割成一定数量的随机网格,选择密度为 $P\%$ 数量节点作为网格内初始节点,通过分析每个网格内的节点密度,选择删除网格内的冗余节点以达到最少数量,实现区域覆盖。

在区域覆盖部署节点的过程中,填补覆盖空洞是其中很重要的一步。计算几何的一些特性可以应用于分析 WSN 的几何特性,如点、区域、线条等。其中最具代表性的是 Voronoi 图和 Delaunay 三角化,Voronoi 图是 Delaunay 图的对偶图,它们分割出的区域具有很好的性质,常被用来分析解决覆盖空洞问题。文献[10]中通过分析 Voronoi 图的特性,提出了 VCHDA 的覆盖空洞发现算法,它根据节点位置,构建 Voronoi 图,设计了空洞判定标准,用于发现覆盖空洞。文献[11]中提出在部署节点时使用虚拟力思想使节点之间距离尽可能扩大,部署完成后针对部署位置构建 Voronoi 图,计算所有顶点和质心位置,发现空洞后,对部署节点进行位置微调。文献[12]中提出 VEC 算法在初始部署完成后,构建 Voronoi 图,对所有的感知节点使用虚拟力设计,使它们与 Voronoi 图顶点之间产生关系,对存在空洞位置附近的节点进行位置调整。

上述算法虽然可以实现对区域的完全覆盖,但是对于已知区域内,一些已知位置出现目标的概率会很高,而覆盖此位置的节点消耗能量会更多,考虑到此种情况下网络的运行寿命,算法的实际优化效果不佳。本文拟针对此种情况,提出一种基于区域分割和加权 Voronoi 图的目标区域覆盖算法,希望通过部署位置优化,提高网络的整体运行寿命,使算法具有更好的适应性。

2 问题模型

2.1 问题描述

本文问题描述如下,针对已知区域,通过对区域的地理信息细化划分,实现一种对兴趣区域针对性更强的完全区域覆盖算法以提高网络的寿命。设计中包含以下元素:

- a) 目标区域。已知区域中,可能出现目标的区域。
- b) 兴趣区域。为了算法设计简便,将目标区域中提取到的地理信息均视为兴趣点,并将目标区域视为兴趣区域。
- c) 感知节点。已经部署完毕的已知坐标信息的传感器节点,在其通信范围内可以与其他感知节点进行正常通信,在其感知范围内的点根据感知模型可以判定是否被覆盖。
- d) 目标点。在目标区域内出现的兴趣点,是感知节点监视的目标。

本文中为了方便算法设计,作了一些较为简单的假设,假设如下:a)算法设计空间拟在二维平面空间内使用静态传感器节点,且所有节点的属性相同,拥有相同的通信和感知半径,通信半径为感知半径的两倍;b)所有节点的初始能量相同,感知和计算消耗能量速率已知。

2.2 系统模型

2.2.1 Voronoi 图及覆盖空洞

Voronoi 图是计算几何中很重要的组成部分,它在 WSN 应用中常用来进行覆盖空洞的检测。Voronoi 图根据平面中点的相邻程度将平面划分成若干区域。假设 P 是区域内的点集,由 P 构成的 Voronoi 图中,每一块区域内只包含一个点 p_i ,而这个点到自己所在区域的距离比点集中其他任何点到此区域的距离都要小。相邻的两个 cell 的公共边是构成这两个区域点间线段的垂直平分线,每个区域都被称为一个 Voronoi cell,如图 1 所示。覆盖空洞定义如下:

覆盖空洞是区域内所有节点构成的覆盖区域都无法覆盖到的连续区域。覆盖空洞中的任何事件或信息都不能被感知节点感知到。

由覆盖空洞的定义及 Voronoi 图示例可以得到,感知范围和 Voronoi cell 之间存在着如下几种关系:a)感知范围包含 Voronoi cell;b)Voronoi cell 包含感知范围;c)两者范围重叠。

根据上述关系分析,存在空洞的判定满足以下定理:

定理 1 如果节点与 cell 边缘之间的距离大于感知半径,则在边缘的交点和边缘两侧节点之间存在覆盖空洞。

证明 由图 1 中 A, B 两点为例,设 A, B 两点连线与 Voronoi 图边界交于 X 点, A, B 所在的 Voronoi 单元为 $V(A), V(B)$,根据 Voronoi 图性质, $V(A)$ 内任意一点到 A 的距离一定小于到其他节点的距离。而相邻单元连线上任意一点到两个节点的距离相等,则有 $AX = BX = AB/2 > R$,因此 A, B 两点之间一定存在覆盖空洞。

定理 2 如果传感器节点与 cell 顶点之间的距离大于感知半径,则在顶点周围存在覆盖空洞。

证明 设节点为 A ,顶点为 $B, AB > R, AB$ 与感知半径交于 X ,由 Voronoi 图性质可知, $V(A)$ 内所有点到 A 的距离一定小于到其他节点的距离,则 XB 上一定有不能被感知区域覆盖的位置,因此此类顶点周围一定存在覆盖空洞。

根据上述定理判断产生的空洞位置,本文依据这两条空洞判定定理,设计出了通过构建 Voronoi 图补充空洞的算法。算法主要思想为利用初始化部署的节点坐标构建 Voronoi 图,将此图与原区域图进行对比,查看是否有兴趣点的位置满足上述两条定理,若存在,则将此位置标记为覆盖空洞,通过计算空洞兴趣点和 Voronoi 图顶点 vertex 之间的欧几里德距离,将靠近此兴趣点最近的 vertex 标记为新的部署节点。

2.2.2 感知模型

感知节点发现目标的能力与感知节点和目标之间的欧氏距离决定,考虑到实际传感器感知能力,现研究常常采用概率感知模型^[13],其模型公式如下:

$$C_s(p) = \begin{cases} 1 & \text{dist}(s,p) \leq \varepsilon R \\ f(\text{dist}) & \varepsilon R < \text{dist}(s,p) \leq R \\ 0 & \text{dist}(s,p) > R \end{cases}$$

当感知节点与目标之间欧氏距离大于感知半径 R 时,目标被感知到的概率为 0;当感知节点与目标之间欧氏距离小于 εR 时,目标被感知到的概率为 1;参数 ε 为阈值,其含义为在 εR 距离之外,目标被感知到的概率与距离成反比;超出了感知半径 R 后,则目标无法被传感器节点感知。

由于本文研究默认使用的传感器参数完全相同,所以为了简化计算,将上述感知模型进行简化定义。定义感知概率 $f(\text{dist})$ 大于 50% 即为可以被感知,阈值 ε 设定为统一值。上述感知模型可以简化为 0-1 感知模型,模型公式为

$$C_s(p) = \begin{cases} 1 & \text{dist}(s,p) \leq R \\ 0 & \text{dist}(s,p) > R \end{cases}$$

此处 R 默认为感知节点实际感知半径,后续感知半径均以此半径为标准。

2.2.3 距离判定

进行节点部署和目标感知的过程中,都需要对相应距离进行判定,一般情况下使用欧氏距离计算。根据坐标和欧氏距离的定义,感知节点的感知区域定义为

$$S_i = \{(x,y) | \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} < R\}$$

感知节点 N_i 的坐标为 (x_i, y_i) ,平面内所有到此点的欧氏距离小于 R 的区域都是这个节点的感知区域。

针对不同阶段的判定,节点之间距离的判定也不相同。首先对于节点的部署,完全区域覆盖情况下,目前效果最佳的完全区域覆盖算法以正六边形为基础分割整个区域,相邻感知节点之间距离为 $\sqrt{3}R$,节点数量和重复覆盖区域较少。参照此种部署思路,针对本文初始部署算法距离判定可以设计为同样效果,即只考虑初始部署节点之间的距离满足上述距离,因此初始节点之间的欧氏距离通过计算可以设计为 $\sqrt{3}R$ 。

使用 Voronoi 图进行空洞填补时,考虑到为了使空洞都能够被覆盖,对于 Voronoi 图判断覆盖空洞距离,已在 2.2.1 节中详细阐述,空洞的距离判定标准为感知半径 R 。目标与感知节点之间距离的判定标准根据感知模型的设计,同样将此距离设计为感知半径 R 。

2.2.4 区域模型

本文为了实现更好的区域覆盖,需要对目标区域进行细致划分。在现实当中,兴趣点在整片区域不同位置出现的概率是不同的。例如监控人员的流动,人员出现在道路、建筑等位置的概率比出现在田野、河流中的概率要大许多;而在森林火灾监控中,根据森林密度和湖泊的位置不同,发生火灾的概率也和地理位置有很大的联系。因此本文希望通过对目标区域地理信息的分析,分割区域使得节点能够更好地被部署在关键位置。

以监视车辆人员为例,本文通过得到区域的地理信息图,通过轮廓提取出该地图中一些兴趣点出现概率比较大的位置轮廓,例如道路、建筑等轮廓,将传统地理信息图转换成为有一

定兴趣点轮廓的区域图,记录所有的轮廓坐标,并根据此类位置图设计节点部署算法。本文为了简化算法的实现,拟将区域中所有能够提取到的所有信息轮廓均视为目标出现概率较大的区域,并将这些轮廓标记为兴趣点。

3 算法设计

HGSDA、ATRI 算法均是通过分析分割网格的结构,分别以正六边形和三角形对整个区域进行分割,实现了未知区域节点数和重复覆盖率均较低的完全区域覆盖。算法 RGB 使用网格分割,对目标区域进行部署完毕后,对已经部署的节点位置进行网格分割,并筛选删除每个网格内的冗余节点以减少网络的总节点数量。对于已知区域,区域内一些位置出现目标的概率大大提高,而有些位置则很少出现目标,在同样满足完全覆盖的条件下,上述几种方法在整体覆盖效果上较好,但在网络运行寿命方面效果不佳。考虑到 k -覆盖策略可以很好地满足对一些位置监视的稳定性,而节点数量是 k -覆盖策略中一个很大的问题,它会直接影响到整个网络的部署代价。对于所有覆盖算法而言,出现覆盖空洞是很难避免的,虽然已经有了很多使用 Voronoi 图解决空洞,但以所有部署节点为基础构建 Voronoi 图是针对未知区域而言,同样无法对已知区域进行更高效的填补空洞设计。基于上述覆盖方法的思想启发,本文拟将两种思路结合,提出一种基于区域分割和 Voronoi 图(region segmentation and Voronoi diagram, RSV)的覆盖算法。主要思路如下:首先对于已知区域,尽量实现对区域内目标位置的多点覆盖,而对于一些无关位置,只简单满足单点覆盖。在部署节点的过程中,为了更加切合已知区域的目标出没特性,拟将所有部署节点进行分类,设置不同的权重程度,并针对每一类权重节点构建 Voronoi 图,针对性地对区域进行分割,在部署完毕后,为了进一步延长部署无线网络的运行寿命,拟根据节点部署特点设计节点休眠策略。整个算法具体设计可以分为区域分割、节点部署和休眠策略三个步骤,分别对应于节点部署前对已知区域的处理、根据分割区域部署感知节点、部署完成后节点休眠策略设计。

3.1 区域分割算法

算法考虑到已知区域元素较多,需要对区域进行细化划分处理,以分析各个划分区域的兴趣点,具体划分方式设计如下:

a) 设计合适大小的正方形网格(扫描框)将整个区域分割开,将这片区域分割成由 n 个网格组成的新区域。

网格边的大小 s 与部署的传感器感知半径 R 大小紧密相关。如图 2 所示,根据正方形网格与传感器圆形感知区域之间可能产生的关系,通过计算可以得到以下关系:当 $s > \sqrt{2}/2 \times R$ 时,无论在网格内任意一处部署节点,网格区域一定存在一些区域不能被感知区域覆盖;当 $s \leq \sqrt{2}/2 \times R$ 时,网格内所有点均可以被在此网格内部署的节点覆盖。为了使区域网格内细化出的每一个兴趣点都可以被算法部署在网格内的节点覆盖,网格边大小需要在 $0 < s \leq \sqrt{2}/2 \times R$ 内。

b) 针对每个网格,对网格内存在的兴趣点进行统计,记录其坐标和兴趣点数量 n ,计算网格内所有兴趣点的坐标中心点,计算公式设计为

$$(x,y) = \frac{1}{n} \sum (x_i, y_i)$$

得到网格内所有兴趣点的中心点坐标,作为该网格的标志点 P ,为下一步算法提供参考。

c) 计算完所有的中心点后,根据每个网格内兴趣点的数量设置相对应的权重值,根据所有记录的 n 值,按照 n 值从小到大的比例设置相应的权值区间,权值区间为 $[1,w]$,计算公式为

$$w_i = \left\lceil \frac{n}{n_{\max}} w \right\rceil$$

上述算法对已知目标区域进行细化预处理后,得到了由中心点和权重值组成的新区域图。

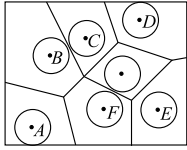


图1 Voronoi图示例
Fig.1 Example of Voronoi diagram

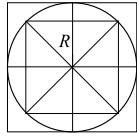


图2 感知半径与网格示例
Fig.2 Example of grids and sensor radius

3.2 基于 Voronoi 图的区域覆盖算法

本节算法实现对已知区域的节点部署,使用了改进的 Voronoi 图算法寻找并填补部署过程中产生的覆盖空洞,算法思路设计如下:

a) 根据上述已得到的新区域图的中心点 $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 和权重值 $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, 按照权重值由高至低的顺序, 依次在中心点部署传感器, 并记录部署位置, 得到初始化部署。

部署过程中, 若中心点已经在某一传感器覆盖范围内, 则不在此处部署节点, 若该中心点不在覆盖范围内, 则计算与该点距离最近的传感器之间的距离是否满足已定界限 $\sqrt{3}R$, 超出该界限则可以在此点部署新的传感器; 否则不能在此位置部署节点, 而由此产生的空洞由后续部分进行填补。构建节点部署表 1。

b) 根据不同的权重值, 按照权重值从大到小的分组顺序, 对初始化部署中的位置点构建不同权重值下的 Voronoi 图, 由于高权重值代表构建的小片区域内存在的兴趣点相对较多, 所以由高权重值构建的 Voronoi 图的顶点 vertex, 其位置出现未覆盖兴趣点的概率也相对较大, 通过对比原区域图与已经构建完成的部署位置, 若构建的 Voronoi 单元附近出现覆盖空洞, 则选择在此位置附近, 找到满足判定距离 R 的顶点位置作为新加入的部署位置。对于已经构建的不同权重下的 Voronoi 图, 按照权重大小, 依次对已知区域进行判定, 同时更新节点部署表 1。

c) 若原区域中有兴趣点没有被覆盖到, 则针对新的节点部署表 1, 重复步骤 b), 直至区域内所有兴趣点全部被覆盖。

d) 所有兴趣点均被覆盖后, 判断整个区域内是否还存在覆盖空洞, 此处将整个区域所有位置均视为兴趣点, 判断已经完成的节点部署是否已经对区域实现了完全覆盖。若区域内不存在覆盖空洞, 则终止算法; 若存在空洞, 由于这些空洞出现目标的概率较低, 所以对这些位置只需要满足有节点覆盖。为了简化计算, 参考算法 HGSDA, 首先以边长为 R 的正六边形为网格对整个区域进行分割, 以每个网格中心为节点部署位置得到部署表 2, 对比两张节点部署表, 将部署表 2 中节点位置与部署表 1 中所有节点位置欧氏距离大于感知半径的点添加到部署表 1, 终止算法。

e) 部署表 1 即为本算法所有部署节点的最终位置。

在上述部署过程中, 覆盖空洞的判定规则已在 2.2.1 节中详细阐述。

3.3 节点休眠策略

上述算法部署完成后, 为了进一步提高整个网络的寿命, 延长网络的工作时间, 根据部署节点的位置特征, 设计了一种节点休眠策略。节点休眠策略主要思想为: 将运行过程划分为许多相等的时间段 (time slot), 针对每一个 time slot, 每个节点判断在此时内部是否已经存在被覆盖的兴趣点, 如果存在则保持节点的活跃状态 active, 如果不存在, 则将节点状态调整为休眠状态 sleep。在实际使用此策略时, 会存在一种特殊情况, 即某一个兴趣点被多个传感器覆盖, 若同时将传感器都置为 active, 则会造成能量的浪费。因此在此情况下, 需要相邻节点之

间进行信息交互, 选择剩余能量较高的那一个传感器保持 active 状态, 其他的转入 sleep 状态。因此针对上述部署算法, 节点休眠策略设计如下:

a) 整个网络运行之前, 设置一个时间段 t , 并将所有节点状态置为 sleep。

b) 在每个时间段 t 的开始阶段, 所有节点扫描自身范围内的兴趣点, 并将兴趣点坐标和本节点剩余能量统一上传给终端节点。

c) 终端节点判断是否有多个节点传递相同坐标位置, 若存在, 则选择剩余能量较多的节点, 将其状态置为 active, 其他冲突节点置为 sleep; 若不存在多个节点冲突的情况, 则按照节点上传是否存在兴趣点坐标分别设置状态为 active 和 sleep。

d) 重复上述过程直至有节点能量完全消耗完毕。

4 实验验证

4.1 实验参数配置

本文算法在 MATLAB 下进行仿真实验。实验设置区域大小为 $1500 \text{ m} \times 1500 \text{ m}$ 。实验中将节点感知半径分别设置为 $10 \sim 60 \text{ m}$, 节点初始能量 100 J , 数据传输速率 250 Kbps , 网格边大小设为 $1/2 R$, 并在实验区域内随机产生兴趣点, 在上述条件下进行仿真, 记录部署的传感器节点个数以及整体仿真时间。

算法评估参数选择如下: a) 传感器节点个数, 即在满足区域覆盖条件下, 整个网络使用的传感器节点个数; b) 网络寿命, 即在节点部署完毕后, 从开始至某些节点能量耗尽, 区域不能被完全覆盖为止, 网络持续工作的总时长。

4.2 实验结果分析

由于文献[5]已证明三角形, 正方形网格分割可以转换成正六边形网格分割, HGSDA 算法以正六边形分割实现较好的完全覆盖效果。RGB 算法使用随机网格分割区域, 通过对比冗余节点实现节点数量较少的完全覆盖, 因此选择 HGSDA 和 RGB 算法作为对比算法, 感知半径选择在 $10 \sim 60 \text{ m}$, 每隔 10 m 作为一个间隔, 每个半径条件下进行 10 次仿真实验, 每次实验选择的已知区域相同, 所有静态节点的感知能力和连通能力完全相同。实验结果取平均值以减少偶然条件下产生的误差。当传感器节点数目不受限制的情况下, 三种算法最终都会实现对整个区域的完全覆盖。在此条件下进行实验时, 首先比较三种算法之间的节点数量, 算法以已知区域为基础, 进行节点部署, 三种算法节点数量比例图如图 3 所示。图中为 HGSDA 和 RGB 算法部署节点数量与 RSV 算法部署节点数量的比值, 数量上 RSV 算法随着感知半径的增加, 节点数量相较于 HGSDA 和 RGB 算法增加越来越多。这是由于感知半径较小时, 算法第一步根据兴趣点分布部署节点的数量相对较多, 而每个感知节点可以覆盖到的兴趣点数量较少, 相对而言与直接对区域进行网格分割时感知节点的分布差别很小, 因此此时两种算法的部署节点数量相差很小。而当感知半径增大, 每个感知节点对已知兴趣点的覆盖增加, 初始化部署会覆盖更多的兴趣点, 同时部署更少的感知节点, 而此时算法的主要工作是对已部署的感知节点进行空洞填补, 而空洞填补时算法对于空洞的判定会使新部署的节点之间距离更短, 从整体上增加了节点的数量。同时已知区域内兴趣点的分布也会影响算法部署的节点数量。

随后进行仿真实验, 研究算法对网络运行时间的影响, 如图 4~6 所示。图 4 为三种算法传感器网络寿命的对比图, 可以看到, RSV 算法构成的网络比 HGSDA 和 RGB 算法构建的网络寿命更长, 而随着感知半径的增加, 节点数量的逐渐减少, 网络的整体寿命也会减少, 这是由于每个节点覆盖范围内承担的目标更多, 对能量的消耗更多。图 5 为仿真实验结束时, 平均每个节点上的剩余能量, RSV 算法部署节点平均剩余能量比 HGSDA 与 RGB 算法要少, 意味着对于所有节点而言, RSV 算

法部署节点能量的消耗更平均,与本文设计算法的目的相吻合。图6为整个仿真过程中,网络运行过程中节点保持活跃状态的平均节点数量。RSV算法运行过程中平均活跃节点数量少于HGSDA算法,与RGB算法平均活跃节点数目基本相同,意味着相同状况下RSV算法节点消耗能量更少,同样验证了其可以提高网络的整体寿命。

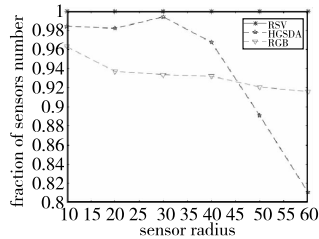


图3 节点数量比例

Fig.3 Fraction of sensors number

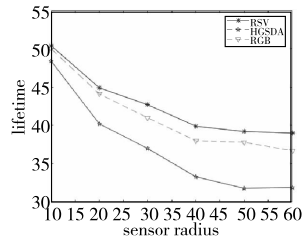


图4 网络寿命

Fig.4 Lifetime of network

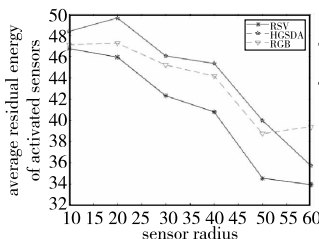


图5 活跃节点平均剩余能量

Fig.5 Average residual energy of activated sensors

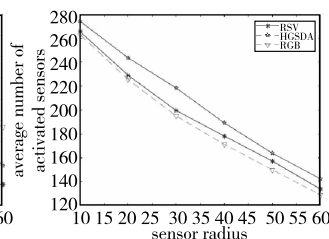
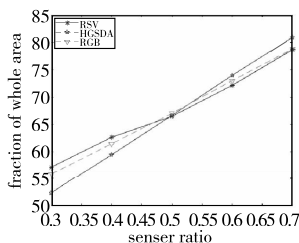
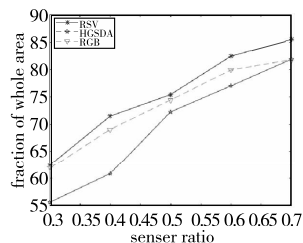


图6 平均活跃节点数量

Fig.6 Average number of activated sensors

当传感器节点数量受限的情况下,使三种算法以HGSDA算法完全覆盖节点数量的30%~70%为界限停止计算。覆盖区域与总区域的比值如图7所示,三种算法随着节点比例的增加,覆盖区域与总体区域的比值也不断上升。RSV算法在节点数量较少时相较于HGSDA和RGB算法覆盖比例更高,这是由于算法初始部署阶段,部署节点之间的距离较大,节点之间重复覆盖区域更少。随着节点数量增加,RSV算法主要工作在于对覆盖空洞的填补,因此区域的覆盖比例增加速度相较于HGSDA和RGB算法而言有一定减少。图8为覆盖区域与有效区域的比值,有效区域即为整体区域中出现目标概率较大的位置。由图中可以看出,RSV算法相较于HGSDA和RGB算法而言,在相同节点受限条件下覆盖到的有效区域更多。这是由于RSV算法在节点较少阶段主要针对有效覆盖区域进行节点部署,相比较而言对有效区域的覆盖率更高,并且随着节点数目增加,填补空洞时算法对于有效区域的针对性相较于另外两个算法而言更强。

图7 覆盖区域与总区域比值
Fig.7 Fraction of coverage area and whole area图8 覆盖区域与有效区域比值
Fig.8 Fraction of coverage area and valid area

5 结束语

本文为了解决已知区域范围内实现更有效的完全覆盖的问题,根据已知区域的地理信息,提出了基于区域分割和Voronoi图的区域覆盖算法RSV。算法提取已知区域内的兴趣点作为区域分割的依据,通过设置合适大小的网格将区域细化分割,计算每个区域兴趣点的数目并确定每个网格的中心位

置。对所有网格内的兴趣点进行统计,为各个区域设置不同的权重值,并以此进行感知节点的部署。首先根据权重值进行初始化部署;接着对初始化部署产生的空洞、不同权重的部署节点构建不同的Voronoi图,通过Voronoi图寻找覆盖空洞并填补,直至填补完所有的兴趣点;最后对整个区域内没有兴趣点的未覆盖区域进行填补,并设计了相应的节点休眠策略以增加网络的整体寿命。仿真实验结果显示,本文算法可以通过增加少量节点,提高网络的整体寿命,并降低节点平均剩余能量,使节点消耗能量更加平均。在节点受限情况下,本文算法对有效区域的覆盖相对于其他算法效果更好。但本文算法依然有很多方面需要改进,首先是对区域划分的网格大小是否存在最优化分割;其次对分割区域权重的设置是否可以更加细化;最后是否可以增加移动节点以实现更优化的覆盖设计。这些问题将是下一步研究的内容。

参考文献:

- [1] Mohamed S M, Hamza H S, Saroit I A. Coverage in mobile wireless sensor networks (M-WSN): a survey [J]. *Computer Communications*, 2017, 110: 133-150.
- [2] Khoufi I, Minet P, Laouiti A, *et al.* Survey of deployment algorithms in wireless sensor networks: coverage and connectivity issues and challenges [J/OL]. *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems*. (2017-12-12). <https://dx.doi.org/10.1504/IJAACS.2017.10009671>.
- [3] Wang Bang. Coverage problem in sensor networks: a survey [J]. *ACM Computing Surveys*, 2011, 43(4): article No. 32.
- [4] Wang Y C, Hu C C, Tseng Y C. Efficient deployment algorithms for ensuring coverage and connectivity of wireless sensor networks [C]// *Proc of the 1st International Conference on Wireless Internet*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005: 114-121.
- [5] Yun Ziqiu, Bai Xiaole, Dong Xuan, *et al.* Optimal deployment patterns for full coverage and k -connectivity ($k \leq 6$) wireless sensor networks [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2010, 18(3): 934-947.
- [6] Xiao Jun, Han Song, Zhang Yan, *et al.* Hexagonal grid-based sensor deployment algorithm [C]// *Proc of Chinese Control and Decision Conference*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 4342-4346.
- [7] Mateska A, Gavrilovska L. WSN coverage & connectivity improvement utilizing sensors mobility [C]// *Proc of the 17th European Wireless-Sustainable Wireless Technologies*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 1-8.
- [8] Ma Ming, Yang Yuanyuan. Adaptive triangular deployment algorithm for unattended mobile sensor networks [J]. *IEEE Trans on Computers*, 2007, 56(7): 946-958.
- [9] Dash S, Nayak B P, Prasad Mishra B S, *et al.* Randomized grid-based approach for complete area coverage in WSN [C]// *Proc of the 7th International Advance Computing Conference*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 307-312.
- [10] Dai Guoyong, Lyu Hexin, Chen Luyi, *et al.* A novel coverage holes discovery algorithm based on Voronoi diagram in wireless sensor networks [J]. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2016, 9: 273-282.
- [11] 祁春阳, 戴欢, 赵晓燕, 等. 基于虚拟力和泰森多边形的分布式覆盖算法 [J]. *计算机工程与设计*, 2018, 39(3): 606-611. (Qi Chunyang, Dai Huan, Zhao Xiaoyan, *et al.* Distributed coverage algorithm based on virtual force and Voronoi [J]. *Computer Engineering and Design*, 2018, 39(3): 606-611.)
- [12] Wang Guiling, Cao Guohong, La Porta T F. Movement-assisted sensor deployment [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2006, 5(6): 640-652.
- [13] Yang Qianqian, He Shibo, Li Junkun, *et al.* Energy-efficient probabilistic area coverage in wireless sensor networks [J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2015, 64(1): 367-377.