

面向水环境的传感网虚拟距离覆盖算法

赵太飞, 马欣媛, 包 鹤

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 针对水面传感器随机部署时网络覆盖率较低的问题,采用了一种面向水环境的无线传感网虚拟距离覆盖算法,在保证连通性的前提下提高网络的覆盖率。在虚拟距离算法中,每个传感器节点的运动受到3个虚拟距离的影响:节点之间的虚拟距离、未被覆盖区域格点与节点的虚拟距离以及边界与节点间的虚拟距离。仿真结果表明:该算法可以有效地提高网络覆盖率。可以得出以下结论:虚拟距离算法通过对节点位置的控制更新有效提高了网络覆盖率,使节点得到优化部署。

关键词: 水环境; 无线传感网络; 虚拟距离算法; 网络覆盖

中图分类号: TP212.9; X832

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)05-0065-05

Virtual distance coverage algorithm for sensor network in water environment

ZHAO Taifei, MA Xinyuan, BAO He

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the problem of low network coverage when the surface sensor is randomly deployed, a virtual distance coverage algorithm of wireless sensor networks for the water environment is adopted to improve the coverage of the network under the premise of ensuring connectivity. In the virtual distance algorithm, each sensor node is influenced by three virtual distances, which are the virtual distance between nodes, the virtual distance between the unregistered region grid and the node, and the virtual distance between the boundary and the node. The simulation results show that the algorithm can effectively improve the network coverage. It can be concluded that the virtual distance algorithm improves the network coverage effectively by optimizing the control of the node position, so that the deployment of nodes can be optimized.

Key words: water environment; wireless sensor networks; virtual distance algorithm; network coverage

1 研究背景

为了解决传统的水质监测存在监测频次低、采样误差大、监测数据分散、监测不及时等缺点,基于无线传感网络的水环境监测逐渐成为近年来的研究热点^[1]。根据应用环境的不同,节点覆盖的方式可以分为静态覆盖和动态覆盖^[2-3]。静态覆盖通过精确地计算可以获得较高的覆盖率,但是需要人工干预,因此部署效率较低而且会对水环境造成一定的污染。其次,在一些周边环境复杂的地区,很难实现人工部署节点。而动态覆盖的自主移动性可以解决以上静态部署的不足之处^[4-6]。

近年来,对无线传感网动态覆盖算法的研究已有大量成果,虚拟力算法因其具有灵活性高、稳定性强的特点,成为目前动态覆盖算法的研究热点。Yi Zou 等^[7-8]最先提出了一种集群分布式的虚拟力覆盖算法和一种新的概率目标定位算法,用于提高传感器节点初始部署后的覆盖率。陈义军等^[9]对基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法进行了改进,针对在边界区域模型引入虚拟节点,提高了边界区域的覆盖率,还提出了自调整角度的机制,提高了算法的执行效率。杜晓玉^[10]提出了一种基于虚拟势场的定向移动的覆盖优化算法,该算法对网络中节点位置进行微调,多次迭代后节点位置达到稳

收稿日期:2017-05-12; 修回日期:2017-06-05

基金项目:陕西省水利科技项目(2016slkj-30); 陕西省教育厅科研计划项目(17-JF024)

作者简介:赵太飞(1978-),男,河南浚县人,博士后,教授,主要从事网络优化、网络抗毁、紫外光通信和无线光通信等方面的研究。

定,实现网络的优化覆盖。王婷婷等^[11]结合泰森多边形计算几何理论,提出基于泰森多边形形心理论的虚拟力覆盖优化算法,通过调整固定节点对移动节点的约束,有效提高了网络覆盖率。本文针对水面传感器随机部署时网络覆盖率较低的问题,在虚拟力算法的基础上,采用了一种面向水环境的无线传感网虚拟距离覆盖算法,在保证连通性的前提下提高网络的覆盖率。

2 问题与假设

传感器节点搭载在水下自主航行器上可以在水面自由移动^[12]。初始时,传感器节点被随机抛洒在待监测水域中。然后,传感器节点通过虚拟力算法不断调整自身位置,减少监测区域的覆盖盲区和覆盖冗余。最终,传感器节点有效覆盖监测区域达到稳定状态。为方便研究,对网络做如下假设:

- (1) 传感器节点采用二元布尔感知模型;
- (2) 每个节传感器点集成了 GPS 模块,可以知道自身位置;
- (3) 传感器节点加速度为零,即节点运动时做匀速直线运动,节点到达稳定状态时速度瞬间为零;
- (4) 所有传感器节点同构,并且通信半径 R 是感知半径 r 的 2 倍。

3 基于虚拟距离的自组织覆盖算法

3.1 传感器节点设计

在有若干个监测节点及数据基站组成的网络中,监测节点之间通过 CC2530 模块与数据基站进行通信,监测节点作为一个独立的嵌入式设备,通过集成传感器实现对各种水质参数的监测^[13]。为了对传感器自身位置进行定位,每个传感器带有 GPS 定位装置。传感器节点除了具备感知、通信和定位的功能外还要具备移动的功能,可采用微型水下自主航行器来满足移动功能^[14]。

3.2 基本模型定义

本文采用布尔模型作为节点的感知模型^[15],用来解决传感网的覆盖问题。假设在随机部署阶段在监测区域随机部署 k 个传感器节点。每个传感器节点的感知半径为 r ,感知半径的大小是由传感器本身的物理性能所决定,包括传感器的类型、功率、剩余能量等因素^[16]。传感器节点的感知范围可以理解为半径为 r 的圆形区域,当监测区域中任意一点与节点的距离小于感知半径时,该点被监测的概率为 1,即认为以传感器节点为圆心,半径为 r 的圆形范围

内的所有点都能被传感器节点完全覆盖。假设传感器 s_i 的位置为 (x_i, y_i) ,监测区域中的任意一点 P 的坐标为 (x, y) ,定义传感器 s_i 与点 P 的欧式距离为 $d(s_i, P)$ 。公式(1)为节点的布尔感知模型,描述了点 P 被传感器节点 s_i 覆盖的概率。

$$C_{xy}(s_i) = \begin{cases} 1, & d(s_i, P) < r \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

3.3 虚拟距离矢量分析

监测中的每个传感器的运动受到 3 个虚拟距离的作用:节点之间的虚拟距离、未被覆盖区域格点与节点的虚拟距离以及边界与节点间的虚拟距离。假设传感器节点 s_i 受到的所有虚拟距离矢量加权和为 d_i ;节点 s_j 与节点 s_i 间的虚拟距离为 d_{ij} ;未覆盖区域的网格点与节点 s_i 间的虚拟距离为 d_{ig} ;边界与节点之间的虚拟距离为 d_{ib} 。因此,作用在节点 s_i 的虚拟距离矢量和为:

$$d_i = \sum_{j=1, j \neq i}^k (d_{ij} + d_{ig} + d_{ib}) \quad (2)$$

首先是节点 s_i 与其他节点 s_j 之间的虚拟距离 d_{ij} 。每个传感器节点与其他邻居节点间存在虚拟距离。若两个传感器节点的距离小于预先设置的阈值,则传感器向远离邻居节点的方向移动,类似于虚拟力作用中的斥力作用。这是为了确保传感器不过度聚集在一个区域,导致其他区域覆盖率差或者出现覆盖盲区。如果两个传感器间的距离等于阈值或者大于通信半径,则这个传感器之间的虚拟距离没有影响节点移动。如图 1 是传感器节点部署的两种方式。采用图 1(a)的部署方式,传感器的感知区域有部分重叠但是不存在覆盖盲区;采用图 1(b)的部署方式,传感器感知区域不存在重叠但是中间有一块覆盖盲区,如果要覆盖这块区域还需要增加一个传感器节点。本文采用图 1(a)的方式部署节点,并计算出阈值为 $d_{th} = \sqrt{3}r$ 。

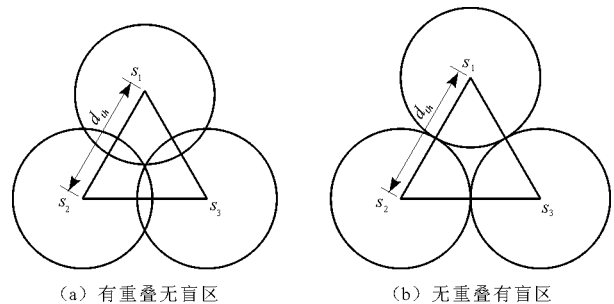


图 1 节点部署方式

将传感器之间的虚拟距离 d_{ij} 分解为 x 轴方向的

距离矢量 d_{ijx} 和 y 轴方向的距离矢量 d_{ijy} , 当节点间距离小于阈值 d_{th} 时, 虚拟距离表达式如公式 3 所示。

$$\begin{cases} d_{ijx} = x_i - x_j \\ d_{ijy} = y_i - y_j \\ d_{ij} = \sqrt{d_{ijx}^2 + d_{ijy}^2} \end{cases} \quad (3)$$

如果传感器节点会在虚拟距离的作用下移动, 更新后的位置为:

$$\begin{cases} x_{new} = x_{old} + \frac{d_{ijx}}{d_{ij}} \times \text{Max_sensor} \times e^{\frac{-1}{d_{ij}}} \\ y_{new} = y_{old} + \frac{d_{ijy}}{d_{ij}} \times \text{Max_sensor} \times e^{\frac{-1}{d_{ij}}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: (x_{old}, y_{old}) 为更新前的节点位置坐标; (x_{new}, y_{new}) 为更新后的节点位置坐标; Max_sensor 是节点在虚拟距离作用下节点移动的最大步长。

除了节点之间的虚拟距离, 影响传感器节点移动的因素还有未被覆盖区域格点与节点的虚拟距离。首先对监测区域进行离散化, 得到网格点的总数目和网格点的横纵坐标 (g_x, g_y) 。当未被覆盖的格点与传感器节点的距离大于感知半径 r 且小于通信半径 R 时, 节点向着未覆盖格点的方向移动, 类似于格点对传感器施加引力。用 d_{ig} 表示未覆盖格点与节点的距离, d_{ig} 可分解为 x 轴方向的距离矢量 d_{igx} 和 y 轴方向的距离矢量 d_{igy} 。未覆盖区域网格点与节点的虚拟距离表达式如公式 5 所示。

$$\begin{cases} d_{igx} = g_x - x_i \\ d_{igy} = g_y - y_i \\ d_{ig} = \sqrt{d_{igx}^2 + d_{igy}^2} \end{cases} \quad (5)$$

虚拟距离作用之后的传感器节点位置更新为:

$$\begin{cases} x_{new} = x_{old} + \frac{d_{igx}}{d_{ig}} \times \text{Max_grid} \times e^{\frac{-1}{d_{ig}}} \\ y_{new} = y_{old} + \frac{d_{igy}}{d_{ig}} \times \text{Max_grid} \times e^{\frac{-1}{d_{ig}}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Max_grid 是在未覆盖格点虚拟距离影响下节点移动的最大步长。

为了避免传感器聚集在监测区域边界产生覆盖冗余, 节点需要在边界的约束下进行位置调整。当传感器节点与边界的距离小于预先设置的阈值 db_{th} 时, 则传感器节点向远离边界的方向移动, 类似于边界对节点产生斥力。采用图 2 的方式设置节点与边界的阈值为 $db_{th} = \frac{\sqrt{2}}{2}r$ 。

4 算法描述与仿真分析

无线传感网虚拟距离覆盖算法具体描述如下:

步骤 1: 设置监测区域范围 $L \times H$ 、传感器节点个数 N 、感知半径 r 、通信半径 R 、最大步长、阈值、迭代次数;

步骤 2: 初始化网络, 传感器节点随机部署;

步骤 3: 计算节点间距离并与预先设置的阈值作比较, 小于阈值时根据公式 (3) 计算节点间作用力, 然后根据公式 (4) 更新节点位置;

步骤 4: 存储未被覆盖的网格点, 计算网格点与节点距离, 若距离大于通信半径 r 且小于通信半径 R 时, 根据公式 (5) 计算格点与节点的虚拟距离, 然后根据公式 (6) 更新节点位置;

步骤 5: 节点与边界距离与阈值比较, 小于阈值则更新节点位置;

步骤 6: 计算网络覆盖率;

步骤 7: 循环迭代, 当达到最大迭代次数时转到步骤 (9), 否则转到步骤 3;

步骤 8: 算法结束。

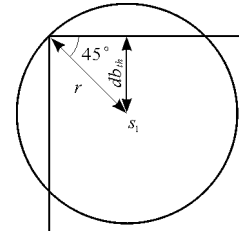


图2 边界节点部署方式

在 MATLAB 环境下对虚拟距离算法进行仿真。在 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 的矩形监测区域随机部署若干个传感器节点, 应用虚拟距离算法最终达到传感器网络的优化部署。

图 3 显示了网络不同阶段传感器节点位置的变化。取传感器节点 45 个, 感知半径为 30 m 。图 3 (a) 是网络初始化时节点的位置状态, 传感器节点随机部署在整个监测区域。由图 3 (a) 中可以看出部分区域聚集了大量传感器节点造成重复覆盖, 而且覆盖盲区较大。

图 3 (b) 显示了运用虚拟距离算法经过 5 次迭代之后传感器节点的位置, 可以看出节点向未覆盖区域扩散。图 3 (c) 为算法结束时节点的最终位置。由图 3 (a) ~ 3 (c) 中可以看出, 网络初始时大量传感器聚集在一起造成重复覆盖, 还有大片区域没有传感器节点覆盖。随着迭代次数增加, 传感器重复覆盖区域越来越少, 覆盖盲区越来越小, 最终状态节点几乎覆盖整个监测区域。

图 4 为传感器节点的运动轨迹。可以看出传感器节点的运动趋势是从节点密集区域向疏松区域运动。

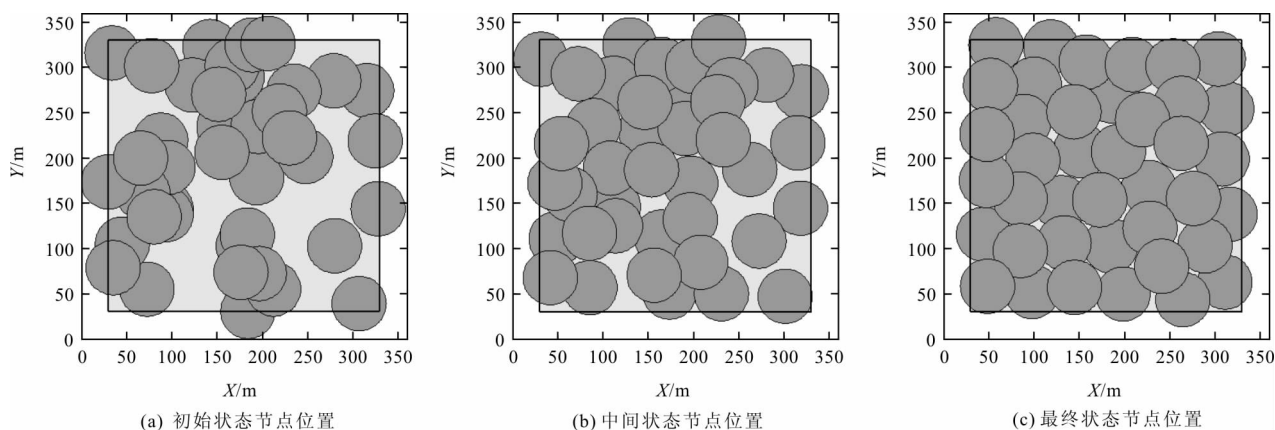


图3 传感器节点位置变化

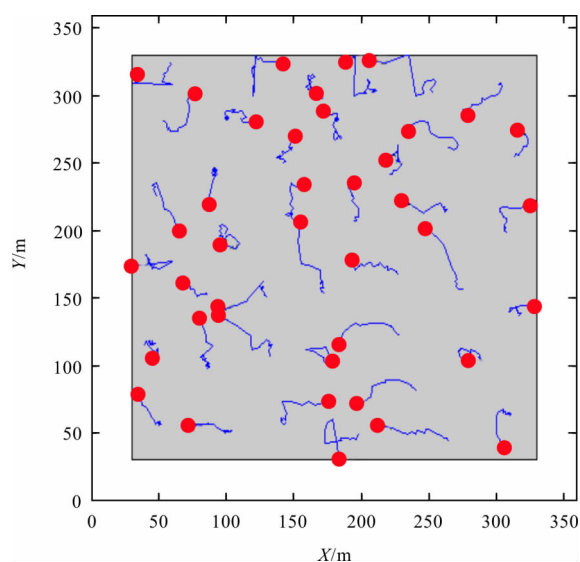


图4 传感器节点的运动轨迹

为了找到区域覆盖的最佳节点数,对节点数不同时覆盖率随迭代次数的变化进行了比较,如图5所示。从图5中可以看出,当节点个数一定时,覆盖率随着迭代次数的增大而增大,最终趋于平稳。在迭代次数相同时,节点数越多覆盖率越高。当节点数达到40以上时,节点数增加对网络覆盖率的提升效果越来越不明显。增加网络节点数在提高网络覆盖率的同时会增加系统的成本,因此需要找到合理的节点数,既满足覆盖率的要求,又使系统成本尽可能低。

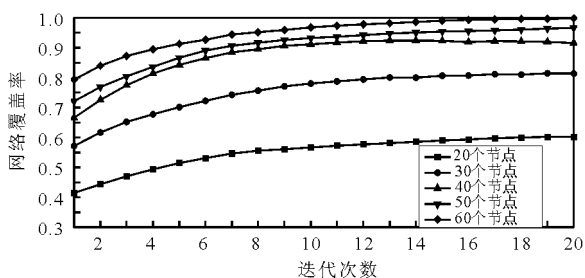


图5 节点数不同时覆盖率随迭代次数的变化

图6反映的是节点半径不同时随迭代次数增加网络覆盖率变化的曲线。由图6中可看出,节点半径一定时,随着迭代次数的增加网络覆盖率先增加后趋于平稳。当迭代次数一定时,节点半径越大网络覆盖率越高。当节点半径增加到40m时,随迭代次数增加网络覆盖率可达到100%。由于覆盖率最高为100%,因此当节点半径继续增加时,覆盖率不会继续增加。节点的半径大小由节点的功率决定,功率越大节点半径越大。功率增大会增加系统能耗,降低网络寿命,因此需要综合考虑覆盖率和系统能耗来选择合适的节点半径。

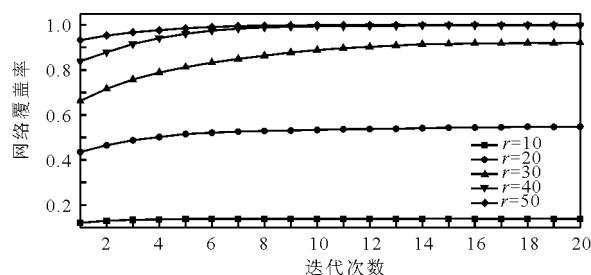


图6 节点半径不同时覆盖率随迭代次数的变化

由图5、图6可看出在虚拟距离覆盖算法的作用下覆盖率有了显著的提高,基本达到节点优化部署的目的。以尽量少的传感器节点覆盖较大的区域面积,克服了随机部署时节点聚集的问题。

5 结论

本文通过对虚拟距离覆盖算法进行仿真,对传感器个数和感知半径进行分析,得出以下结论:

(1)在一个给定的矩形监测区域,并且传感器节点个数和感知半径一定的情况下,随着算法迭代次数增加,网络覆盖率逐渐增加最终达到相对平稳状态。可以看出采用虚拟距离算法能明显提高网络的覆盖率,达到优化部署的目的。

(2)根据节点的运动轨迹可以发现,虚拟距离算法引导传感器节点从节点覆盖密集的区域向节点覆盖疏松的区域运动,以减小覆盖冗余和覆盖盲区,提高了节点的利用率。

(3)在传感器节点感知半径一定而节点个数不同的情况下,从仿真结果中可以看出,节点数越多覆盖率越高。而当节点数超过40个时,节点数增加对网络覆盖率的提升效果越来越不明显。

(4)在传感器节点个数一定而节点感知半径不同的情况下,从仿真结果中可以看出,随着感知半径的增加网络覆盖率先增加后趋于平稳。当感知半径增加到40 m时,网络稳定时的覆盖率可达到100%。

针对水面传感网覆盖问题,采用了虚拟距离覆盖算法进行研究,下一步将考虑水面传感网络中网络的能耗和生命周期问题。

参考文献:

- [1]李玲燕. 无线传感网络水质监测节点设计与节点部署研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
- [2]罗强, 潘仲明. 一种小规模水下无线传感器网络的部署算法[J]. 传感技术学报, 2011, 24(7):1043-1047.
- [3]田一鸣, 陆阳, 魏臻, 等. 无线传感器网络虚拟力覆盖控制及节能优化研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(11):65-71.
- [4]Luo Junhai, Cai Jiyang. A dynamic virtual force based data aggregation algorithm for wireless sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015:1-7.
- [5]Xu Qin, Wang Qianping. Coverage optimization deployment based on virtual force-directed in wireless sensor networks[J]. International Proceedings of Computer Science & Information Tech, 2012, 47(54):287-293.
- [6]李湘宜. 无线传感器网络动态覆盖优化问题的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2015.
- [7]Yi Zou, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces[C]// Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies. IEEE, 2003:1293-1303 vol. 2.
- [8]Yi Zou, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks[J]. Acm Transactions on Embedded Computing Systems, 2004, 3(1):61-91.
- [9]陈义军, 白光伟, 张进明. 基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法的改进[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(2):243-246.
- [10]杜晓玉. 面向水环境监测的传感网覆盖算法研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2015.
- [11]王婷婷, 孙彦景, 徐钊, 等. 基于虚拟力的异构无线传感器网络覆盖优化策略[J]. 传感技术学报, 2016, 29(8):1253-1259.
- [12]Bartolini N, Bongiovanni G, Porta T L, et al. On the vulnerabilities of the virtual force approach to mobile sensor deployment[J]. IEEE Transactions on mobile computing, 2014, 13(11):2592-2605.
- [13]邹磊, 蔡自兴, 任孝平. 基于虚拟力的自组织覆盖算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(14):93-95.
- [14]Le D V, Oh H, Yoon S. VirFID: A virtual force (VF) - based interest - driven moving phenomenon monitoring scheme using multiple mobile sensor nodes[J]. Ad Hoc Networks, 2015, 27:112-132.
- [15]杨凯. 无线传感器网络中覆盖空洞修复算法研究[D]. 苏州:苏州大学, 2012.
- [16]王丁章. 面向低能耗的无线传感器网络节点部署[D]. 镇江:江苏科技大学, 2014.