

无线传感器网络的最优地理密度控制算法^①

——阴影衰落环境下的概率覆盖研究

刘 益, 胡楚然

(湖南人文科技学院 计算机科学技术系, 娄底 417000)

摘 要: 信号在传播过程中因障碍物阻挡产生的阴影衰落, 使某一事物同时受到多个节点共同的概率感知, 对网络的覆盖产生较大的影响. 无线传感器网络的最优地理密度控制算法, 采用基于协作的概率覆盖感知模型, 通过最优地理位置原则选取工作节点, 在达到所要求的覆盖质量的同时尽可能减少覆盖面积的重叠, 从而使完全覆盖监测区域所需的工作节点数目最少. 仿真结果表明, 该算法能最大限度地减少完全覆盖监测区域所需的工作节点数目.

关键词: 阴影衰落; 概率覆盖; 协作感知; 最优地理密度控制

Algorithm Optimal Geographical Density Control in Wireless Sensor Networks ——Research on the coverage in a Shadow Fading Environment

LIU Yi, HU Chu-Ran

(Department of Computer Science and Technology, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000, China)

Abstract: A shadow fading caused by obstructions in the surroundings of transmitting has an important effect on wireless sensor networks. It makes an object to be probabilistic sensed by more than one node. An optimal geographical density control algorithm in wireless sensor network based on probabilistic was proposed. By choosing the optimal nodes, this algorithm reduced overlapping area that satisfies covered quality as much as possible to minimize working number. The simulation results show that this algorithm can minimize the total number of nodes.

Key words: shadow fading; probability coverage; cooperative sensing; optimal geographical density control

1 引言

无线传感器网络广阔的应用领域与可观的应用前景, 引起了全世界的广泛关注. 但由于其节点所带的电量非常有限且不能及时补充, 通常在监测区域内大量散布节点, 常采用轮换的工作方式, 在达到网络覆盖质量的前提下, 使每一轮尽可能多的节点进入能耗最小的休眠状态, 从而减少整个网络的能耗.

在无线传感器网络的覆盖控制算法研究中, 大多采用自由空间环境下的布尔感知模型, 即同样规格的传感器具有相同的探测半径, 在探测范围内的

事件都能被完全可靠(感知概率为 1)地感知, 否则完全无法被感知. 然而, 在实际的传感器网络中, 除空间距离外, 信号传播过程中的各种障碍物也会对传输信号强度造成影响, 由此形成阴影衰落^[1], 使得布尔感知模型覆盖区域内一些位置的信号强度可能会低于既定的阈值, 不能被正确感知, 而处于其覆盖区域外的一些位置却能正确感知. 这种情况在无线传感器网络的覆盖问题研究中还没有引起足够的关注和重视.

本文考虑阴影衰落效应, 采用基于概率的协作感知覆盖模型, 以尽可能少的工作节点来保证网络的覆

^① 收稿时间:2013-04-22;收到修改稿时间:2013-07-03

盖质量要求, 提出了一种分布式覆盖控制算法——P-OGDC 算法(Optimal Geographical Density Control based on Probabilistic Coverage Algorithm). 仿真结果表明了 P-OGDC 算法的有效性, 解决了用最少的传感器节点来完成网络的完全监测的问题.

2 概率覆盖模型

基于无线电波的传感信号能量, 除距离外, 还受到周围障碍物、无线电干扰等因素的影响, 使传感器对其周围事物的探测并非确定的, 而是服从一定分布的概率^[2]. 此外, 被监测区域中的一点能否被探测到, 并不是单独地由某一个传感器节点决定, 而是由其周围多个节点共同感知的结果. 因此, 文章[3]提出了基于协作的覆盖感知模型, 即对于被检测区域内一点 P , 通常受到多个传感器节点(假设有 N 个)的共同探测, 这时 P 点被协作感知的概率为:

$$C_p(p, \eta) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - p(n_i, p)] \quad i=1, 2 \cdots N \quad (1)$$

其中 $p(n_i, p)$ 为第 n_i 个节点在 p 处的探测概率, 即:

$$p(n_i, p) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_0^{R_c} \exp\left[-\frac{(t - 10\log_{10}((\frac{r}{r_0})^{-\eta}))^2}{2\sigma^2}\right] dt & r \leq R_c \\ 0 & r > R_c \end{cases} \quad (2)$$

其中, r 为传感器 n_i 与被探测点 p 之间的距离, η 为路径损耗指数; δ 为与环境相关的随机变量; r_0 对应布尔感知模型中的探测半径; R_c 节点有效的感知距离, 即在以传感器节点为圆心, R_c 为半径的圆内, 事物以某一探测概率被感知, 而圆外因探测概率极小而被忽略.

记 $\hat{r} = \frac{r}{r_0}$, $\xi = \frac{\delta}{\eta}$, 并用误差函数化简(2)式为:

$$p(\hat{r}, \xi) = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{10}{\sqrt{2\xi}} \log(\hat{r})\right) \right]$$

根据文献[4], 若采用如图 1 所示的正三角形结构的部署方法, 完全覆盖监测区域所需的节点数目最少. 也就是说, 如图中所示的所有节点处于最优位置, 本文称之为最优位置节点.

由 Voronoi 图^[5]的相关知识可知, 网络中探测概率最小值为 3 条 Voronoi 线的交点处, 如图 1 中的点 P . 现考虑与 P 处最邻近的三个传感器节点 1、2、3.

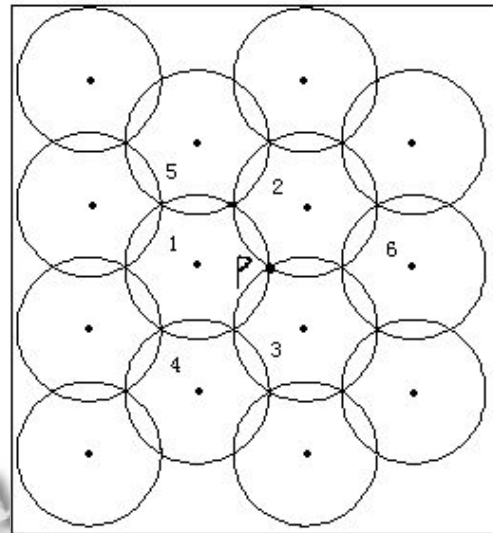


图 1 正三角形结构的网络配置

从图 1 可以直接看出, 此三个传感器节点到 P 处有相同的距离 r . 由协作感知概率公式(1)可知, P 处的被感知概率为:

$$C_p = 1 - \left(0.5 - 0.5 \operatorname{erf}\left(\frac{10}{\sqrt{2\xi}} \log(\hat{r})\right) \right)^3 \quad (3)$$

由上式计算出:

$$\hat{r} = 10^{\frac{\sqrt{2\xi}}{10}} \operatorname{erf}^{-1}\left(2\sqrt[3]{1 - C_p} - 1\right)$$

由于传感器网络的覆盖质量由被监测区域中的最小感知概率决定, 所以传感器网络的覆盖质量 $CN=C_p$, 则上式可写为:

$$\hat{r} = 10^{\frac{\sqrt{2\xi}}{10}} \operatorname{erf}^{-1}\left(2\sqrt[3]{1 - C_N} - 1\right) \quad (4)$$

\hat{r} 称为协作感知半径, 在图 1 中体现为圆的半径.

3 最优地理密度控制算法

考虑到阴影衰落对无线传感器网络覆盖的影响, 本文采用基于概率的协作感知覆盖模型, 以尽可能少的工作节点来保证网络的覆盖质量要求, 提出最优地理密度控制算法 P-OGDC.

P-OGDC 算法是一种完全分布式的拓扑控制算法, 它根据最优位置节点原则来选取工作节点, 即选择最接近正三角形结构位置的节点. 如图 2, 若已知 A 、 B 两节点为工作节点, 按照最优位置节点原则, 覆盖 O

点的最佳节点为 C , 若 C 存在节点, 则选择 C 处的节点作为工作节点; 若 C 处没有节点, 则选取离 C 最近的 P 节点为工作节点. 这样, 网络中工作节点的感知范围发生重叠的区域面积最小, 从而达到监测整个网络所需的工作节点最少的目的.

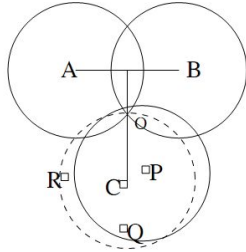


图 2 最优位置节点的选取

首先给出算法的假设条件.

- a. 每个节点都知道自己的位置信息;
- b. 通信半径足够大, 能保证网络的连通;
- c. 所有传感器节点同构, 且时间同步.

为了算法描述的方便, 给出以下定义:

定义 1 以传感器节点为圆心, 以协作感知半径为半径的圆盘, 称为协作感知圆盘.

定义 2 协作感知圆盘的外边界, 称为节点的覆盖圆周.

定义 3 两个覆盖圆周的相交的点或覆盖圆周与网络监测区域边界的相交的点称为交叉点.

定义 4 启动了计时器但状态未定的节点, 称为准工作节点.

定义 5 监测区域内任意点被协作感知的最小概率, 称为覆盖质量.

下面给出 P-ODGC 算法的详细描述:

(1) 节点状态描述

网络监测区域中的所有节点处于这三种状态之一: 未定、工作或休眠. 网络运行时间分为多轮, 每一轮有两个阶段: 工作节点选取阶段和稳定运行状态阶段. 在工作节点选取阶段之初, 所有节点被唤醒, 处于未定状态. 这一阶段结束后, 所有节点要么处于工作状态, 要么处于休眠状态. 在第二阶段, 所有节点保持原有状态直到这一轮结束. 每一轮的时间长度, 应大大长于工作节点选取时间, 但远小于网络生存时间.

(2) 工作节点的选取原则

在工作节点选取阶段之初, 所有节点处于未定状

态. 若节点的剩余能量大于一定的阈值 P_t , 则此节点以一定的概率 p 成为准工作节点.

若某节点成为准工作节点, 则启动计时器, 随机设定值为 t_1 , 其中 $t_1 \in [0, T_d]$. 若计时器超时, 则节点状态由准工作状态转变为工作状态, 并广播开机消息; 若在节点在超时之前收到其它节点发来的开机消息, 则取消计时器, 根据开机消息决定自身状态. 开机消息包括发送节点的位置信息和期望的邻居节点的最佳方向角度信息 α (从 $[0, 2\pi]$ 中随机选取).

若节点是非准工作节点, 同样发送开机消息, 其内容包括自身的位置信息和 $\alpha = -1$ 的最佳方向角度信息. 并启动计时器, 时间设置为 T_s . 当计时器超时, 则该节点以概率 $2p$ 成为准工作节点, 如此反复直到概率大于等于 1 时, 取消计时器.

(3) 收到开机消息后的节点应答行为

若此节点已经为工作状态或距离发送节点大于 R_c , 则忽略开机消息. 否则, 将发送节点加入到自己的邻居列表中. 然后检查自己的协作感知圆盘是否被所有的点完全覆盖, 若是, 则该节点进入休眠状态, 否则, 出现下列三种情形之一:

(i) 在节点协作感知圆盘内, 存在由工作状态邻居节点产生的交叉点, 且没有被其它节点所覆盖, 如图 3 的情形(i)所示: 在节点 R 的协作感知圆盘内, 存在由工作状态的 A, B 两邻居节点产生的交叉点 O , 且 O 点没有被其它节点所覆盖;

(ii) 不满足(i), 但至少有一个邻居是准工作节点, 如图 4 的情形(ii)所示;

(iii) 既不满足(i)又不满足(ii).

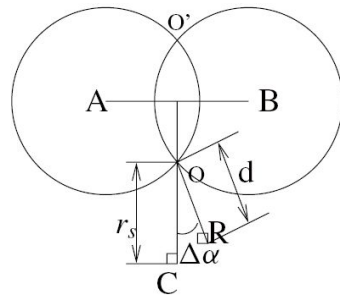


图 3 情形(i)

对于情形(i), 接收开机消息的节点首先找出协作感知圆盘内离自己最近的为未覆盖交叉点, 如果最近的未覆盖交叉点由新邻居(即最后发送开机消息的节

点)产生, 则取消原来的计时器, 重新设定计时器时间为 T_{c1} , 否则维持原来的计时器.

$$T_{c1} = t_0(c(\hat{r}-d)^2 + (d\Delta\alpha)^2 + \mu) \quad (5)$$

其中, t_0 发送开机消息所需的时间; c 是与回退尺度有关的常数; μ 是 0 到 1 之间的随机值; d 为接收节点与发送节点间的距离; \hat{r} 为协作感知半径; $\Delta\alpha$ 为接收节点位置相对于最优位置与交叉点的角度偏差值, 如图 3 情形(i)中, $\Delta\alpha$ 为 \overline{OR} 与 \overline{OC} 的夹角.

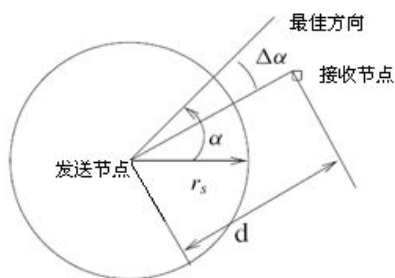


图 4 情形(ii)

对于情形(2), 寻找最近的准工作节点. 若最近准工作节点是新邻居, 则取消原来的计时器, 重新设定计时器时间为 T_{c2} , 否则维持原来的计时器.

$$T_{c2} = t_0(c(\sqrt{3}\hat{r}-d)^2 + (d\Delta\alpha)^2 + \mu) \quad (6)$$

其中个参数的物理意义与情形(i)相同.

对于情形(iii), 寻找最近的邻居, 若最近的邻居是新邻居, 则取消原有计时器, 重新设定计时器时间为 T_{c3} , 否则维持原来计时器时间. T_{c3} 取值远远大于 T_{c1} 和 T_{c2} , 但远远小于 T_s . 算法中各参数的取值如表 1 所示.

表 1 算法 P-OGDC 的参数说明

参数	取值标准与大小
\hat{r}	由协作感知半径计算公式(4)得出
P_t	取工作 900s 所需的能量
P	取 $p=2/N$, N 为区域内的节点总数
T_d	取值为传输开机消息所需时间的 1.5 倍, 为
T_s	保证网络中至少有一个能量达到 P_t 的节点成为准工作节点, 取 1s
T_{c3}	介于 T_{c1} 、 T_{c2} 与 T_s 之间, 取 6.8ms
t_0	6.8ms
c	回退尺度有关, 取值为 $10/\hat{r}^2$
μ	在 0 到 1 之间随即选取
每轮时长	远大于工作节点选取时间, 但远小于网络生存时间, 取 100s

4 实验仿真与分析

本文用 Matlab7.1 进行模拟仿真, 参数设置如下: 网络覆盖质量为 50%, 节点的物理感知半径为 10 米, 监测区域为 $100*100m^2$ 的正方形(为减少边界效应, 其外有 $110*110 m^2$ 的同心正方形), 随机部署节点, 边长分为 10000 分, 形成 100, 000, 000 个等小网格(边长为 0.01m). 由于小网格的面积与监测区域面积相比非常小, 所以当网格的中心点的协作感知概率大于覆盖质量值时, 即认为该小网格被覆盖^[6]. 为更好地反映统计规律, 本文所有实验结果都是 50 次的平均值.

仿真 1 随机部署不同的节点总数, 比较不同阴影衰落因子环境下完全覆盖监测区域所需的工作节点数目, 仿真结果如图 5 所示.

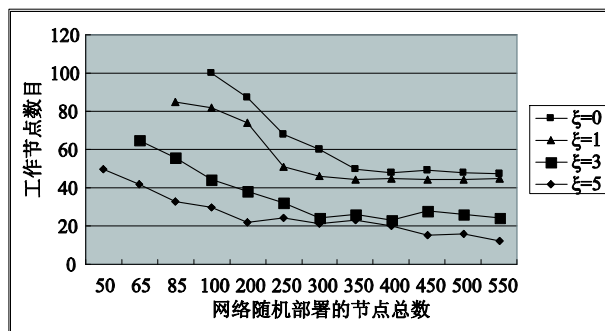


图 5 不同节点部署数目下所需的工作节点数目

从上图可以看出: (i)不同阴影衰落因子环境下, 在一定的监测区域内, 随机部署的节点数目越多, 所需的工作节点数目越少. 因为在一定的监测区域内, 随机部署的节点数目越多, 也就是节点密度越大, 节点处于最优位置的概率就越大, 从而越接近理想状态, 工作节点数目越少. (ii)覆盖质量为 50% 的前提下, 阴影衰落环境下完全覆盖监测所需要的最少工作节点数比自由空间环境下要少, 并且衰落因子 ξ 值越大, 所需的工作节点数目越少. 因为阴影衰落因子越大, 节点感知周围事物的波动区域越大(当然能量损耗得也越多), 但由于本文采用的是协作感知, 聚集了多个节点未达覆盖质量但有效的能量, 使协作感知圆盘增大, 从而增大了单个节点的覆盖面积, 减少了监测区域的工作节点数目.

仿真 2 在监测区域内随机部署 550 个节点, 采用 P-ODGC 算法所需的工作节点数目与最少工作节点数目的比较. 仿真结果如图 6 所示. 从图中可以看出, 在

节点密度较大的情况下, P-ODGC 算法产生的工作节点数目接近于最少工作节点数目, 说明了算法的有效。

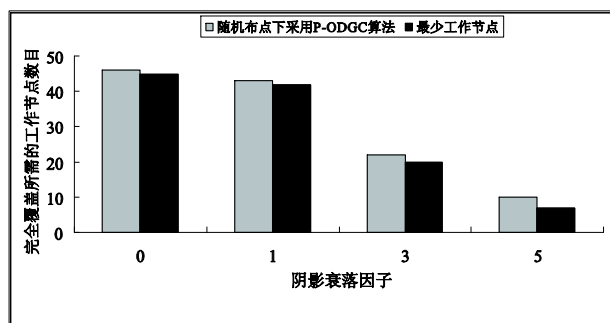


图6 P-ODGC算法与理想情况下工作节点数目的比较

5 结束语

密度控制算法是一种常用的能有效解决能量消耗过大问题的方法, 本文主要研究了在阴影衰落环境下, 采用基于概率的协作感知覆盖模型, 对 OGDC 算法^[4]进行扩展和改进, 提出了一种分布式覆盖控制算法——P-OGDC 算法。该算法能以尽可能少的工作节点来保证网络的覆盖质量要求, 从而达到了节约能量的目

的。实验结果表明, 当节点密度越大, 所需的工作节点数目接近最少工作节点数目, 说明了算法的有效性。

参考文献

- 1 刘乃安. 无线局域网—原理、技术与应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 32–39.
- 2 Sheu JP, Lin HF. Probabilistic coverage preserving protocol with energy efficiency in wireless sensor networks. Wireless Communications and Networking Conference, Kowloon, 11–15 March 2007. 2007. 2633–2638.
- 3 刘益. 阴影衰落环境下无线传感网络的概率覆盖研究. 电子技术应用, 2011, 37(8): 98–104.
- 4 Zhang H, Hou JC. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. Ad Hoc & Sensor Networks. 2005, Old City, 2005, 1: 89–124.
- 5 宗大伟. Voronoi 图及其应用研究[博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- 6 Wang B, Wang W, Srinivasan V. Information coverage for wireless sensor networks. Communications Letters, 2005, 9(11): 967–969.
- 8 项亮, 陈义, 王益. 推荐系统实践. 人民邮电出版社, 2012: 45–53, 131–133.
- 9 汪静, 印鉴, 郑利荣等. 基于共同评分和相似性权重的协同过滤推荐算法. 计算机科学, 2010, 37(2): 99–104.
- 10 曹毅, 贺卫红. 基于用户兴趣的混合推荐模型. 系统工程, 2009, 27(6): 68–72.
- 11 Choi K, Suh Y. A new similarity function for selecting neighbors for each target item in collaborative filtering. Knowledge-Based Systems, 2013, 37(1): 146–153.
- 12 彭德巍, 胡斌. 一种基于用户特征和时间的协同过滤算法. 武汉理工大学学报, 2009, 31(3): 24–28.
- 13 刘建国, 周涛, 郭强等. 个性化推荐系统评价方法综述. 复杂系统与复杂性科学, 2009, 6(3): 1–10.

(上接第 134 页)

算法. 计算机研究与发展, 2007, 44(2): 296–301.

- 4 Chen G, Wang F, Zhang C. Collaborative filtering using orthogonal nonnegative matrix trifactorization. Information Processing & Management, 2009, 45(3): 368–379.
- 5 王岚, 翟正军. 基于时间加权的协同过滤算法. 计算机应用, 2007, 27(9): 2302–2303.
- 6 Bobadilla J, Ortega F, Hernando A. Improving collaborative filtering recommender system results and performance using genetic algorithms. Knowledge-Based Systems, 2011, 24(8): 1310–1316.
- 7 Bobadilla J, Serradilla F, Bernal J. A new collaborative filtering metric that improves the behavior of recommender systems. Knowledge-Based Systems, 2010, 23(6): 520–528.