

文章编号:1000-582X(2007)08-0030-04

基于概率模型的 WSN 最坏与最佳情况覆盖

袁久银^{1,2},石为人¹

(1. 重庆大学 自动化学院,重庆 400030;2. 嘉应学院,广东 梅州 514015)

摘要:针对无线传感器网络最坏与最佳情况覆盖问题,使用概率的方法,给出了基于概率模型的无线传感器网络最坏与最佳情况覆盖算法。其思路是尽可能选择被节点检测概率最小的格点组成最坏情况覆盖(即最大突破路径),选择被节点检测概率最大的格点组成最佳情况覆盖(即最大支撑路径)。仿真结果验证了算法的有效性。

关键词:无线传感器网络;最坏覆盖;最佳覆盖

中图分类号:TP393

文献标志码:A

无线传感器网络是随着无线通信和嵌入式计算技术、传感器技术、微机电技术的发展而发展起来的一种新兴的信息获取技术。网络中的每个节点都含有一个体积小、价格便宜、能耗低、支持短距离通信的多功能传感器。每个传感器节点具备信号采集、数据处理、相互通信的功能,直接嵌入到相应的设备或环境当中,具有很大的灵活性和移动性^[1]。传感器一般通过无线链路或直接或间接地将收集到的数据发送到一个指令中心。基于这些优点,无线传感器网络在军事、环境监测、医疗卫生、智能家庭等方面有很大的潜在应用价值,尤其在无人监测或环境恶劣情况下的事件监测和事件跟踪中显示了很大的优势。同时,在商业方面也呈现出很好的应用前景(办公建筑的环境控制、汽车防盗、库存管理、控制产品质量等)^[2-3]。

近年来,无线传感器网络已经成为研究的热点,目前研究的重点是网络的能量问题。人们通过拓扑控制(Topology control),能量感知路由(Power-aware routing protocols)的设计以及节点睡眠管理(Sleep management)等手段,在合理高效利用节点能源,降低网络能量消耗,延长网络寿命,提高网络服务质量各方面取得了丰富的成果^[4-8]。由于传感器节点自身的特点,降低网络能量消耗,延长网络寿命将是现在乃至今后相当一段时间研究的关键问题。

在构建无线传感器网络时,网络覆盖是无线传感

器网络除了定位、跟踪、调度以外的另一个基本问题,即如何部署传感器网络节点,在保证一定的服务质量(QoS)条件下,达到网络覆盖范围最大化。无线传感器网络覆盖问题与延长 WSN 的生存时间、优化网络资源配置、改善网络服务质量等紧密相关。对网络覆盖的测量能够了解是否存在监测和通信盲区,了解被监测区域的无线传感器网络的覆盖程度,从而重新调整传感器节点分布或者指导在将来添加传感器节点时可采取的改进措施。更为广泛的,还可以通过调整网络覆盖的密度,对被监测区域中重要区域设置热点,部署更多的传感器节点,保证测量数据的可靠性。因此,网络覆盖已不单纯是为了通信覆盖和监测区域覆盖,而是为了满足一定的应用需求。一般来说,服务质量是衡量无线传感器网络覆盖的度量^[9]。

最坏与最佳情况覆盖算法考虑如何对穿越网络的目标或其所在路径上各点的感应与追踪,体现了一种网络的覆盖性质。Meguerdichian 等人先后在文献[9-10]中基于节点的二元感知模型定义了“最大突破路径(maximal breach path)”和“最大支撑路径(maximal support path)”。最大突破路径使得路径上的点到周围最近传感器的最小距离最大化,最大支撑路径使得路径上的点到周围最近传感器的最大距离最小化。显然,这两种路径分别代表了 WSN 最坏(被检测概率最小)和最佳(被发现的概率最大)的覆盖情况。文献

收稿日期:2007-03-27

基金项目:国家教育部博士点基金(2006611010),重庆市自然科学基金(CSTC,2006BB2191)

作者简介:袁久银(1964-),男,讲师,重庆大学博士研究生,研究方向为无线传感器网络与普适计算。

石为人(联系人),男,教授,博士生导师,(Tel) 023-65106238;(E-mail) wrs@cqu.edu.cn。

[9-10]分别采用计算几何中的 Voronoi 图与 Delaunay 三角形来完成最大突破路径和最大支撑路径的构造和查找。其中, Voronoi 图是由所有 Delaunay 三角形边上的垂直平分线形成;而 Delaunay 三角形的各顶点为网络的传感器节点,并满足子三角形外接圆中不含其他节点。

最坏情况覆盖和最佳情况覆盖的确定对网络覆盖质量提供了最直接的评价指标,为网络覆盖质量的改善提供了最直接的依据。实际应用中,如战争环境,在最大突破路径(或附近)上增加活性(如激活冗余或添加)节点,可加强对活动目标的追踪,并可快速提高整个网络的覆盖质量。最大突破路径指出了感知的最薄弱环节,可较隐蔽的穿越。又如为了探测未知的危险环境,可通过飞机在环境周围布撒传感器,让人沿最大支撑路径探测,使人处于最佳监督之下,减少探测的危险性。

为了给应用提供更接近实际应用环境,更具实际应用价值及更准确的理论依据,笔者针对一般的节点概率感知模型,基于目标区域网格划分^[11],节点随机部署,运用概率的方法,确定最大突破路径和最大支撑路径,分别使得路径上的目标被传感器节点感知的概率最小及被传感器节点感知的概率最大。显然,这两种路径分别代表了所给情形下 WSN 最坏和最佳的覆盖情况。综合二分查找算法与广度优先搜索算法,提出了求解基于网格的无线传感器网络节点概率模型最坏与最佳情况覆盖的算法。算法不受感知模型的限制,从某种意义上来说,是对文献[10]提出的算法的推广。算法更加简单,易于实现。最后对算法进行了仿真实验,验证了算法的有效性。

1 感知模型与地域模型

1.1 感知模型

目前常用的感知模型可分为2种:二元感知模型和指数感知模型^[12-13]。二元感知模型:

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, d(i,j) < r \\ 0, d(i,j) \geq r \end{cases} \quad (1)$$

其中 p_{ij} 为节点 i 对目标 j 的感知概率, $d(i,j)$ 为节点 i 与目标 j 之间的距离, r 称为感知半径。

指数感知模型的基本形式为

$$p_{ij} = e^{-\alpha d(i,j)}, \quad (2)$$

其中 p_{ij} 为节点 i 对目标 j 的感知概率, $d(i,j)$ 为节点 i 与目标 j 之间的距离。

其改进形式为

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, d(i,j) \leq r_1 \\ e^{-\alpha[d(i,j)-r_1]}, r_1 < d(i,j) \leq r_2 \\ 0, d(i,j) > r_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中 p_{ij} 为节点 i 对目标 j 的感知概率, α 为衰减因子, $d(i,j)$ 为节点 i 与目标 j 之间的距离, r_1 和 r_2 分别称为内、外感知半径。

如果传感器区域内有障碍物,将产生信号阻塞,从而降低节点感知效率。若障碍物出现在从节点 i 到目标 j 的视线上,即障碍物坐标满足连接 i,j 的线段方程,则令 p_{ij} 等于零。

需要说明的是感知模型的不同不会影响该算法,只是影响初始输入。

1.2 地域模型

传感器区域划分为网格^[6],其粒度(相邻网格点之间的距离)由期望的放置精确度决定。

1.3 感知矩阵及目标感知概率

假设感知区域划分为 $n \times n$ 的网格,于是有 n^2 个格点,传感器感知矩阵 $D = [p_{ij}]$ 为 n^2 行 n^2 列矩阵,共有 n^4 个元素。其中 p_{ij} 表示节点 i 对位于格点 j 处的目标的感知概率。假设网络中有 K 个节点,且节点对目标的感知是独立的,则位于格点 i 处的目标被感知的概率为:

$$p_i = \sum_{j=1}^K p_{ki} - \sum_{1 \leq j < l \leq K} p_{ji} p_{li} + \sum_{1 \leq j < l < m \leq K} p_{ji} p_{li} p_{mi} - \dots + (-1)^{K-1} p_{1i} p_{2i} \dots p_{ki}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

其中 $N = n^2$ 。

2 基于概率模型的最坏与最佳情况覆盖算法

2.1 问题的描述

基于概率模型的最坏(佳)情况覆盖——最大突破(支撑)路径问题描述如下:

给定始点 I 和终点 J (始点 I 和终点 J 可以位于目标区域任何地方),确定由目标区域网格点组成的连接始点 I 到终点 F 的最大突破(支撑)路径,使最大突破(支撑)路径上的目标被传感器节点感知的概率最小(大)。

2.2 算法

算法的主要思路是先用二分法缩小节点查找范围,再用广度优先搜索查找是否存在从始点 I 到终点 F 的满足要求的路径。最大突破(支撑)路径查找过程如下:

- 1) 根据指定的节点感知模型,分别计算每个节点对位于各个格点处的目标的感知概率 p_{ij} ;
- 2) 利用公式(4)分别计算位于网络各格点处的目标被网络所有节点同时感知时的感知概率 P_i ;
- 3) 在最小和最大权重之间执行二分查找算法:每

一步操作之前给出一个目标被感知的参考权重标准 (breach_weight 或 support_weight), 然后进行广度优先搜索 (breadth-first-search (BFS)) 查找, 检查是否存在从 I 到 F 的路径, 满足路径上格点的权重都比参考权重标准要大。如果路径存在, 则增加参考权重标准来缩小路径上可选择的格点数目, 否则就降低参考权重标准;

4) 循环 3), 最后得到从 I 到 F 的最大突破(支撑)路径, 路径上格点的权尽可能的小(大)。

其中格点权重为位于该格点处的目标被网络所有节点同时感知时的感知概率 P_i 。求最大突破路径时, 选择的格点的权重不大于参考权重标准。反之, 求最大支撑路径时, 选择的格点的权重不小于参考权重标准。最大突破(支撑)路径算法伪代码如图 1。

```

第 1 步: 根据节点感知模型, 分别计算节点  $S_i$  ( $i=1,2,\dots,k$ )
对位于各个格点处的目标的感知根率  $p_{ij}$  ( $j=1,2,\dots,N$ );
第 2 步: 利用公式 (4) 分别计算位于网络各格点处的目标
被网络所有节点同时感知时的感知概率  $P_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ );
weight( $P_i$ ) =  $P_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ )
min_weight = max1≤i≤N{weight( $P_i$ )}
max_weight = max1≤i≤N{weight( $P_i$ )}
range = (max_weight - min_weight) / 2
第 3 步: breach_weight = min_weight + range
(support_weight = min_weight + range)
如果 weight( $P_i$ ) ≤ breach_weight ( $i=1,2,\dots,N$ )
(weight( $P_i$ ) ≥ support_weight ( $i=1,2,\dots,N$ ))
则将格点  $P_i$  加入集合  $G$ ;
range = range / 2
IF 广度优先搜索  $G$  中存在  $I$  到  $F$  的突破路径 (支撑路径),
则 breach_weight = breach_weight - range
(support_weight = support_weight + range)
返回第 3 步
ELSE
breach_weight = breach_weight + range
(support_weight = support_weight - range)
返回第 3 步
END IF
    
```

图 1 最大突破(支撑)路径算法

值得注意的是最大突破路径(最大支撑路径)不是惟一的。

算法虽只考虑了网格点的覆盖, 但因为感知函数的连续性, 除非有障碍物, 当两个格点的距离很近时, 节点对它们的感知概率相差很小。故只要网络的划分足够细, 所求最大突破(支撑)路径可任意接近非网格划分的最大突破(支撑)路径。

3 算法复杂度分析

K 个节点计算其对格点的感知概率的计算复杂度为 KN , 计算 N 个格点被所有节点感知的概率的计算复杂度为 N 。算法的第 1 步, 使用最好的二分查找计算方法, 其复杂度为 $O(\log N)$, 算法的第 2 步即广度优先搜索的计算复杂度为 $O(N^2)$, 因此最差情形下的计算复杂度为 $O(N^2 \log N)$ 。在实际问题中, 网络节点稀疏, 大体上计算复杂度为 $O(N \log N)$ 。

4 仿真实验

笔者用 MATLAB 对提出的算法进行了仿真, 目标区域划分为 8×8 的网格, 感知模型采用简单的指数模型 $p = e^{-\alpha d}$, 参数 $\alpha = 0.5$ 。图 2 为最坏情况覆盖算法确定的最坏情况覆盖 (即最大突破路径), 图 3 为最佳情况覆盖算法确定的最佳情况覆盖 (即最大支撑路径)。图中圆圈表示格点, 圆圈内的数字为该格点被节点感知的概率, 深色圆圈分别表示路径的始点 (I) 和终点 (F)。

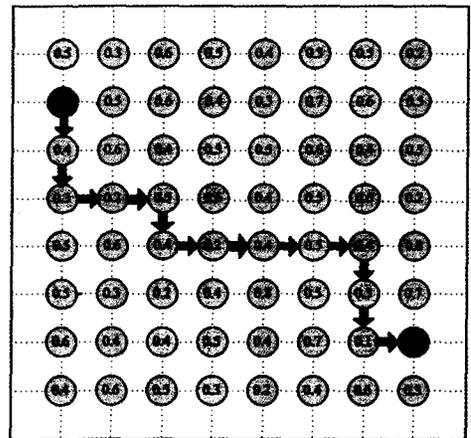


图 2 最大突破路径

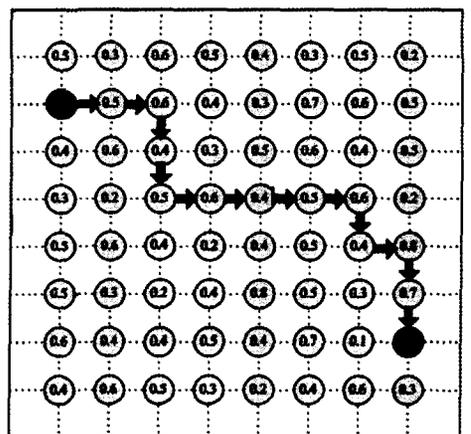


图 3 最大支撑路径

从仿真结果图可以看出, 算法所确定的最坏情况

覆盖(即最大突破路径)和最佳情况覆盖(即最大支撑路径)符合要求。

5 结 语

无线传感器网络覆盖问题与延长 WSN 的生存时间、优化网络资源配置、改善网络服务质量等紧密相关,它已经成为无线传感器网络研究中的一个热点。针对最坏与最佳情况覆盖问题进行了研究,运用概率方法,给出了一种低时间复杂性的基于网格的无线传感器网络概率模型最坏和最佳情况覆盖算法,可以指导网络节点的配置来改进整体网络的覆盖。作为一种特殊的 WSN 覆盖控制算法,适用于网络路径规划、目标观测等许多应用场所。仿真结果证明了算法确定最大突破路径和最大支撑路径的有效性。

参考文献:

- [1] HULL B, JAMIESON K, BALAKRISHNAN H. Mitigating congestion in wireless sensor networks; proceeding of ACM SenSys'04 [C]. Baltimore: ACM Press, 2004:134-147.
- [2] KARLOF C, WAGNER D. Secure routing in wireless sensor networks; attacks and countermeasures; SNPA'03; The 1st IEEE Int' Workshop on Sensor Networks Protocols and Applications [C]. Alaska: IEEE Press, 2003.
- [3] AKYILDIZ I, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks; a survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4):393-422.
- [4] CARDEI M, THAI M T, LI Y, et al. Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks; proceedings of the 24th conference of the IEEE communications society (INFOCOM) [C]. Miami: IEEE Press, 2005.
- [5] CARDEI M, DU D Z. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization[J]. ACM Wireless Networks, 2005, 11(3): 333-340.
- [6] HUANG CF, TSENG YC. A survey of solutions to the coverage problems in wireless sensor networks[J]. Journal of Internet Technology, 2005, 6(1):1-8.
- [7] WU K, GAO Y, LI F, et al. Lightweight deployment - aware scheduling for wireless sensor networks [J]. ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications (MONET) Special Issue on "Energy Constraints and Lifetime Performance in Wireless Sensor Networks", 2005, 10(6):837-852.
- [8] WANG L, XIAO Y. A Survey of energy-efficient scheduling mechanisms in sensor networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(5):723-740.
- [9] MEGUERDICHIAN S, KOUSHANFAR F, POTKONJAK M, et al. Coverage problem in wireless ad-hoc sensor networks: IEEE INFOCOM, 2001[C]. Anchorage: IEEE Press, 2001: 1380-1387.
- [10] MEGERIAN S, KOUSHANFAR F, POTKONJAK M, et al. Worst and best-case coverage in sensor networks[J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2005, 4(1):84-92.
- [11] CHEN H, WU H, TZENG N. Grid-based approach for working node selection in wireless sensor networks; proc. Of the Int'l Conf. on Communications [C]. Paris: IEEE Press, 2004: 3673-3678.
- [12] JUN LU, SUDA T. Coverage-aware self-scheduling in sensor networks; proceedings of IEEE CCW 2003[C]. California: IEEE Press, 2003:117-123.
- [13] ADLAKHA S, SRIVASTAVA M. Critical density thresholds for coverage in wireless sensor networks: WCNC; proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking [C]. New Orleans: IEEE Press, 2003: 1615-1620.

Worst and Best Coverage Based on Probability Model of Wireless Sensor Network

YUAN Jiu-yin^{1,2} SHI Wei-ren¹

(1. Department of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Jiaying University, Guangdong 514015, China)

Abstract: The worst and best-case coverage algorithm is presented based on probability mode of wireless sensor network. The main idea is that choose these lattice points possibly with lowest detection probability by nodes to form the most breach path and choose those lattice points possibly with maximal detection probability by nodes to form the most support path. Simulation experiment validates the algorithm.

Key words: WSN ; worst; coverage; best coverage

(编辑 吕建斌)