

# 无线传感器网络概率覆盖控制研究<sup>\*</sup>

郑四海, 李腊元, 李 勇

(武汉理工大学 计算机科学与技术学院, 武汉 430063)

**摘要:** 在无线传感器网络中进行覆盖控制能有效缓解无线传感器网络中节点能量受限的问题,通常采用的是基于二元感知模型的几何方法计算休眠冗余节点,其算法在实际应用中受到局限,不够精确。针对此问题,将提高能量利用率作为重要指标,采用概率感知模型,提出一种新的覆盖控制算法(PSMC)。仿真结果表明,PSMC 算法在较好地保持网络覆盖度的同时,可关闭大量冗余节点,有效地延长了网络寿命。

**关键词:** 无级传感器网络;覆盖控制;能耗;路由协议;PSMC

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2012)01-0253-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.01.070

## Research on probabilistic coverage control algorithm for wireless sensor network

ZHENG Si-hai, LI La-yuan, LI Yong

(School of Computer Science & Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** Coverage control is an effective method to alleviate the energy-limitation problem of sensor nodes in wireless sensor networks. Most of current researches are based on geometry calculation of binary sense model which is limited and inaccurate in practical application. Aiming at the problem, this paper adopted the probability sense model, put forward a new coverage control algorithm (PSMC), which took energy efficiency as important index. The probability sense model described the coverage control more accurately. Simulation shows PSMC algorithm can shut down a large number of redundant nodes and extend effectively network lifetime while coverage ability does not reduce.

**Key words:** wireless sensor network (WSN); coverage control; energy; routing protocol; PSMC

### 0 引言

网络覆盖作为无线传感器网络的基本问题,它直接体现在网络所提供的服务质量上。无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)的覆盖控制就是在传感器网络节点能量、无线网络通信带宽、网络计算处理能力等资源普遍受限的情况下,通过网络传感器节点放置以及路由选择等手段,最终使无线传感器网络的各种资源得到优化分配,使感知、监视、传感、通信等各种服务质量得到改善。选择无线传感器网络覆盖控制策略,有助于网络节点能量的有效控制、感知服务质量的提高和网络整体生存时间的延长。

概率覆盖算法采用了非确定性传感器探测模型,即传感器的探测精度随着感应信号衰减的规律而变化,根据目标到传感器距离的变化和环境因素的影响,通过多个传感器的协同工作,以一定的检测概率发现目标。目前,很多文献采用了这种概率探测模型讨论无线传感器网络覆盖问题。

Co-Grid 覆盖算法<sup>[1]</sup>将目标区域分成边界重叠的单元,采用基于概率的分布式探测模型,依据设定的虚报警率,在各单元内选择数目最小的工作节点,以达到节能的目的。Co-Grid

算法虽然提出了网络配置方法,但算法要求的时间复杂度较高,对无线传感器网络的动态特性适应能力较差。文献[2]提出了基于概率覆盖模型的概率覆盖算法(PCA),但它只是用于评价随机布置的传感器网络检测概率的置信度。文献[3]提出了一种基于概率探测模型的覆盖配置算法(CCAP),但它只适用于评价点目标的覆盖概率。文献[4]提出了基于概率探测模型的覆盖保持协议(CPP),在保持网络覆盖的前提下,使传感器网络中的工作节点数目尽可能小。但该协议采用中心控制算法配置网络,限制了网络的规模。

针对这些问题,本文提出了一种基于概率感知模型的覆盖控制算法(probabilistic sense model coverage preserving, PSMC)。PSMC 算法采用 Neyman-Pearson 概率感知模型和 Voronoi 划分网络进行覆盖控制,调度冗余节点的工作状态。在保证网络覆盖的要求下,尽量启用最少的节点进行工作,从而大大节省了能量的消耗,延长网络的整体寿命。

另外,本文把 PSMC 算法与 PEGASIS 路由协议<sup>[5]</sup>进行了结合,形成了 PEGPSMC 协议。最后,把 PEGPSMC 协议和 PEGASIS 协议进行了对比,结果表明 PEGPSMC 协议具有良好的节能效果。

收稿日期: 2011-04-20; 修回日期: 2011-06-13 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60672137, 60773211); 武汉市科技攻关项目(201010621207)

作者简介: 郑四海(1975-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要研究方向为无线 Ad hoc 网络、无线传感器网络、协议工程(sihazheng@qq.com); 李腊元(1946-), 男, 教授, 主要研究方向为网络工程、无线 Ad hoc 网络; 李勇(1971-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为无线 Ad hoc 网络、无线传感器网络。

# 1 算法模型的建立

## 1.1 部署模型

在二维平面  $R^2$  上,节点  $n_i$  的覆盖范围是以节点为圆心、 $r_s$  为感知半径的一个圆形区域。整个传感器网络的覆盖范围  $C$  是网络中所有节点覆盖范围的并集。目标区域  $R^2$  被传感器网络完全覆盖,等价于  $R^2$  中的每个点至少被一个节点覆盖。节点  $n_i$  的直接通信范围为一个以  $n_i$  为圆心、通信距离  $r_c$  为半径的圆形区域。每个节点只能与位于该区域内的节点直接通信。

为简化起见,假设无线传感器网络随机部署在二维有界矩形目标区域  $R^2$  内,并且在任意位置上不存在两个以上节点。假设每个传感器通过定位系统能够获悉自己的精确位置,并知道目标区域  $R^2$  的边界。

由上面的假设可知,无线传感器网络节点部署可以看做一个平稳二维 POISSON 点过程。记 POISSON 点过程的密度为  $\lambda$ ,区域  $R^2$  中的传感器节点数  $C(R)$  服从参数为  $\lambda \|R\|$  的 POISSON 分布,即

$$P(C(R) = K) = e^{-\lambda S(R)} (\lambda S(R))^K / K! \quad (1)$$

其中: $S(R)$ 表示区域  $R^2$  的面积。

## 1.2 概率模型

假设  $n$  个传感器节点随机分布在监测区域中,节点的位置为  $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$ , 则第  $i$  个节点观测到的目标测量值<sup>[6]</sup>可表示为

$$a_i = \theta / D_{ij}^\alpha + \delta_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中: $\theta$ 是观测目标发射的信号强度; $\alpha$ 是信号衰减指数, $\alpha > 0$ ; $\delta_i$ 为节点  $n_i$  的观测噪声,服从零均值的高斯分布,即  $\delta_i \sim (0, \sigma)$ ,则节点  $n_i$  的二进制假设检验为

$$H_1 : p(z_i | H_1) = (1 / (\sqrt{2\pi}\sigma)) e^{-(z_i - a_i)^2 / 2\sigma^2} \quad (3)$$

$$H_0 : p(z_i | H_0) = (1 / (\sqrt{2\pi}\sigma)) e^{-z_i^2 / 2\sigma^2} \quad (4)$$

假设所有节点采用相同的检测门限值  $\tau$  进行判决,则根据 Neyman-Pearson 准则得到判决门限和虚警关系为

$$P_{f_i} = \int_{\tau}^{\infty} p(z_i | H_0) dz_i = Q(\tau / \sigma) \quad (5)$$

$$\tau = \sigma Q^{-1}(P_{f_i}) \quad (6)$$

其中: $Q(x) = \int_x^{\infty} (1 / \sqrt{2\pi}) e^{-t^2/2} dt$ 。

所以位于  $(x_j, y_j)$  的观测目标被节点  $n_i$  观测到的感知概率为

$$P_{D_i} = \int_{\tau}^{\infty} p(z_i | H_1) dz_i = Q((\tau - a_i) / \sigma) = 1 - \Phi((\tau - a_i) / \sigma) \quad (7)$$

其中: $Q(x) = \int_x^{\infty} (1 / \sqrt{2\pi}) e^{-t^2/2} dt$ 。

在无线传感器网络中,节点密度通常较高,因此,在监测区域发生的事件会被多个传感器节点同时检测到,此时系统对位于  $(x_j, y_j)$  的观测目标的感知概率可表示为

$$P_D = 1 - \prod(1 - P_{D_i}) = 1 - \prod((\tau - \theta / D_{ij}^\alpha) / \sigma) \quad (8)$$

根据式(8),当多个传感器节点同时感知同一事件时,系统感知概率  $P_D$  将高于任何单个节点的感知概率  $P_{D_i}$ 。

**定义 1** 如果存在一个工作节点集合,位置为  $(x_i, y_i)$ ,使目标点  $(x_j, y_j)$  处的系统检测概率  $P_D \geq \beta$ ,则称点  $(x_j, y_j)$  满足  $\beta$  概率覆盖。如果一个区域中的所有点都满足  $\beta$  概率覆盖,则称这个区域为完全  $\beta$  概率覆盖。

## 1.3 地域模型

**定义 2** 二维平面  $R^2$  上的一个有限点集  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ ,定义与  $S_i$  相关联的 Voronoi 区域  $V_i = \{P \in R^2 | d(p, s_i) \leq d(p, s_j), j \neq i\}$ 。其中  $d$  为欧氏距离,点集  $\{s_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$  称为 Voronoi 产生点, Voronoi 区域的边称为 Voronoi 边,其顶点称为 Voronoi 顶点,共享一条 Voronoi 边的两个点互为 Voronoi 邻居。集合  $\{V_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$  称为  $R^2$  的 Voronoi 划分。

考虑部署在有界凸区域  $R^2$  上的传感器网络  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 。将传感器节点作为 Voronoi 产生点,可以得到  $R^2$  的唯一 Voronoi 划分。在二维平面上,每个  $V_i$  均是凸多边形。如果  $s_i$  位于集合  $S$  的凸壳边界上,与其关联的 Voronoi 多边形无界。但如果  $R^2$  有界,则无界 Voronoi 多边形将在目标区域边界的限定下变为有界。此时,所有 Voronoi 多边形都有界,从而得到有界 Voronoi 划分,如图 1 所示。

# 2 基于概率感知模型的覆盖控制算法

## 2.1 网络运行环境

- a) 节点随机部署在感知目标区域,算法运行前,所有节点都处于睡眠状态。
- b) 节点无法自由移动。
- c) 节点具有相同的初始能量、相同的处理和通信能力,节点在网络中的地位平等。
- d) 节点之间连接对称。将传感器节点作为 Voronoi 产生点,得到  $R^2$  的唯一 Voronoi 划分。
- e) 节点间的通信距离不小于最大感知距离,即  $r_c \geq r_s$ 。

## 2.2 概率覆盖控制算法(PSMC)

当目标  $n_i$  被感知的概率  $P_{D_i}$  满足  $P_{D_i} \geq \beta$  时,目标  $n_i$  被发现,其中  $\beta$  表示目标被发现的最小概率。 $\beta$  的确定与实际应用环境、软硬件设备条件以及服务质量要求等因素有关,由用户指定。

在实际工作环境中,工作次数较少的节点有较多的能量。让能量较多的节点工作、能量较弱的节点休眠,有利于均衡网络能量,不会导致个别节点的过早死亡。同时选用感知能力较强的节点,可以减少覆盖集的节点个数。因此,算法的主要思想是:每个周期优先唤醒工作次数较少且感知能力较强的节点,组成保证网络覆盖要求的覆盖集。算法的终止条件是:按照所设规则唤醒了足够多的节点,使得它们的覆盖满足网络的概率覆盖要求,即所有 Voronoi 产生点处的目标被感知的概率不小于  $\beta$ 。 $P_{D_i}$  越大,节点  $n_i$  的感知能力越大,其值在算法执行之前计算,作为每个周期计算的输入。具体的算法流程如下:

- a) 输入  $n, \beta, c(i) (i = 1, 2, \dots, n)$ , 其中  $c(i)$  表示节点  $n_i$  的工作次数。
- b) 建立节点唤醒顺序表。根据前面提供的每个节点的工作次数,将工作次数相同的节点归于同一个集合,并按工作次数和感知概率  $P_{D_i}$  从小到大依次排列,得到一个综合节点工作次数和感知能力的节点唤醒顺序表:
 
$$N_1, N_2, N_3, \dots, N_m$$
- c) 覆盖点集  $V_c = \text{null}, i = 1$ 。
- d) 把节点唤醒顺序表中  $N_i$  加入到  $V_c$  中; $c(i)$  减少一个单位,如果  $c(i) \leq 0$ ,则执行第 e) 步,否则继续执行第 d) 步。

e) 分别计算  $V_c$  中的节点工作时对 Voronoi 产生点  $n_k$  的感知概率  $P_{D_i}$  ( $0 < k \leq n$ )。如果  $\min\{P_{D_i}\} \geq \beta$ , 则表明满足要求的覆盖集已经确定, 输出  $V_c$ , 转到第 f) 步执行; 否则,  $i$  增加一个单位, 转到第 d) 步执行。

f) 一个周期的算法运算结束, 等待下一周期的运算。

### 3 实验与仿真分析

为了验证 PSMC 算法的效果, 本文在 PEGASIS 路由协议中加入了 PSMC 算法, 形成 PEGPSMC 协议。PEGASIS 协议是由 LEACH 协议<sup>[7]</sup> 发展而来, 其主要思想是: 在进行数据传输之前, 各节点首先发送测试信号, 通过检测应答来确定离自己最近的相邻节点并作为自己的下一节点, 依次遍历网络中的所有节点最终形成一条链。通过这种方式, 网络中的所有节点都只与最相邻的节点相连, 所以每个节点都以最小功率发送数据分组; 另外, 由各节点轮流充当簇头向基站传送数据, 均衡了能量耗费。PEGPSMC 协议在此基础上根据概率检测的结果关闭部分冗余节点, 从而能更节约能量, 延长网络寿命。

实验仿真采用的是 NS2 网络仿真软件<sup>[8,9]</sup>。仿真中利用了 PEGASIS 协议的节点能量消耗模型<sup>[10]</sup>, 将 PEGASIS 与 PEGPSMC 的节能效果进行比较。仿真参数中信号衰减指数  $\alpha = 0.8$ ,  $\gamma = 0.92$ ,  $P_{f_i} = 0.06$ ,  $\lambda = 0.05$ ,  $\theta = 16$ ,  $\sigma = 1$ 。网络寿命定义为第一个节点死亡, 检测区域出现漏洞。此外, 设各节点的感知半径为 1.6 m, 且当节点能量小于  $E_{\min} = 0.002$  J 时, 认为该节点死亡。

为了对 PEGASIS 和 PEGPSMC 进行全面的比较, 本文从覆盖控制和负载均衡两个方面对算法进行了分析。仿真中分别模拟了节点数量变化、死亡节点数量变化对算法覆盖控制性能的影响, 并分析监测区域大小变化对整个网络节点能耗的影响。

图 2 表示的是节点死亡数量与网络工作时间之间的关系。PEGPSMC 协议曲线的波动很小。这是因为它的能耗被均匀地分担到每个节点上, 第一个节点和最后一个节点的死亡时间非常接近, 与 PEGASIS 协议相比, PEGPSMC 协议使得网络寿命提高了一倍多。

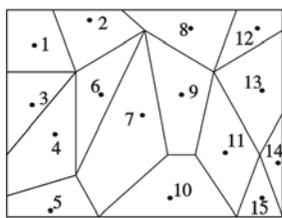


图1 Voronoi划分

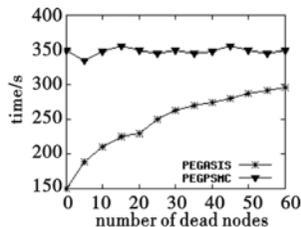


图2 网络寿命与节点死亡数量

图 3 表示的是节点数量与网络寿命之间的关系。一个值得注意的现象是, 当节点数量增加时, PEGASIS 协议不能使网络寿命明显提高, 这是因为 PEGASIS 协议没有考虑到覆盖问题, 所有节点在每轮中都处于活动状态, 使得网络寿命不随节点数量的增加而延长; 而 PEGPSMC 协议充分利用概率覆盖, 只需部分节点就可以覆盖整个区域, 因此多余的节点处于休眠状态, 从而减小节点能量损耗, 以达到延长网络寿命的目的, 同时网络寿命随节点数量的增加而相应的增加。

图 4 表示的是监测区域面积与网络寿命的关系。可以看到, 随着监测区域的变大, PEGPSMC 协议仍然能保持较好的性能。由于 PEGPSMC 协议采用了 PSMC 算法, 因此在相同的区

域面积下, PEGPSMC 协议的性能优于 PEGASIS 协议。但是, 随着区域面积的增大, 节点密度的减小, PEGPSMC 协议的覆盖控制的优越性逐步降低, 且由于分簇所带来的能量消耗, PEGPSMC 协议的性能下降较快。

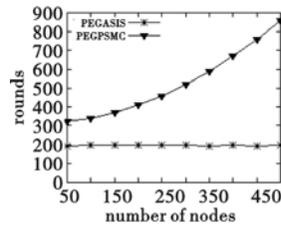


图3 网络寿命与节点数量

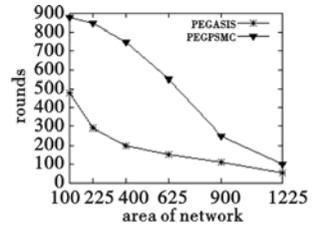


图4 监测区域面积与网络寿命

### 4 结束语

本文针对随机分布的无线传感器网络的覆盖控制问题进行了讨论。在概率探测模型的基础上, 提出了 PSMC 算法, 并把它嵌入到 PEGASIS 协议中, 形成了 PEGPSMC 协议。该协议在保持一定的网络概率覆盖度的前提下, 只开启最少的节点进行工作, 使得网络中大量冗余节点进入休眠状态。仿真结果表明, PEGPSMC 协议能够有效地减少网络能量的开销, 延长网络的寿命。如果把这种算法运用到无线传感器网络的 QoS 路由协议的研究上会有很大的帮助, 这也是笔者今后继续研究的重点。

### 参考文献:

- [1] XING Guo-liang, LU Chen-yang, PLESS R, *et al.* Co-grid: an efficient coverage maintenance protocol for distributed sensor networks [C]//Proc of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. 2004:414-423.
- [2] AHMED N, KANHERE S, JHA S. Probabilistic coverage in wireless sensor networks [C]//Proc of IEEE Conference on Local Computer Networks. 2005:672-681.
- [3] ZHANG Ding-xing, XU Ming, CHEN Ying-wen, *et al.* Probabilistic coverage configuration for wireless sensor networks [C]//Proc of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2006:1-4.
- [4] SHEU J P, LIN Huang-fu. Probabilistic coverage preserving protocol with energy efficiency in wireless sensor networks [C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2007:2631-2636.
- [5] GUO Wen-jing, ZHANG Wei. PEGASIS protocol in wireless sensor network based on an improved ant colony algorithm [C]//Proc of the 2nd International Workshop on Education Technology and Computer Science. 2010:64-67.
- [6] WANG Bang, WANG Wei, SRINIVASAN V, *et al.* Information coverage for wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(11):967-969.
- [7] ASADUZZAMAN, KONG H Y. Code combining based cooperative LEACH protocol for wireless sensor networks [J]. IEICE Trans on Communications, 2009, E92. B(6):2275-2278.
- [8] 王永胜, 吴德伟, 刘勇. 基于 NS2 网络仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2004, 21(11):257-259.
- [9] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS 与网络模拟 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003:57-88.
- [10] YIN Liu-guo, WANG Chang-mian. An energy-efficient routing protocol for event-driven dense wireless sensor networks [J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2009, 16(3):154-164.