

## Probability-Based $K$ -Coverage Control Approach for Three-Dimensional Wireless Sensor Networks\*

JIAN G Peng\*, CHEN Feng

(Institute of Information and Control, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** For the contradiction between the inherent uncertainty and strong fault-tolerance ability and robustness required in the system during the three-dimensional monitoring with wireless sensor networks, a probability-based  $K$ -coverage control approach for three-dimensional wireless sensor network, PKCCA, is proposed in this paper. The three-dimensional monitoring region is divided into a grid, and a greedy heuristic is used to determine the best placement of one sensor at a time until a preset upper limit on the number of sensors is reached, or  $K$ -coverage with probability  $T$  of the grid points is achieved. Comparing with the traditional random and uniform deployment, the simulation results indicate PKCCA uses less sensors to achieve the same coverage degree and detection precision or same sensors to reach higher coverage degree. The case of preferential coverage (preferential coverage degree and preferential monitoring precision) for sub-regions is also analyzed and simulated.

**Key words:** wireless sensor networks; three-dimensional coverage; coverage control;  $K$ -coverage  
**EEACC:** 6150P

## 基于概率的三维无线传感器网络 $K$ -覆盖控制方法\*

蒋 鹏\*, 陈 峰

(杭州电子科技大学信息与控制研究所, 杭州 310018)

**摘 要:** 针对无线传感器网络在三维空间监测中存在的固有的不确定性与系统应具有较强的容错能力、鲁棒性之间的矛盾, 提出了一种基于概率的三维无线传感器网络  $K$ -覆盖控制方法。对三维待监测区域以网格建模, 用迭代的贪婪启发式方法确定传感器节点在网格中的位置, 每一步迭代完成一个节点的放置, 直到节点总数达到预设的上界或每个网格点以概率  $T$  达到  $K$ -覆盖为止。仿真结果表明, 相对于传统的随机和均匀配置方法, 本方法能使用较少的节点满足相同的覆盖度和监测精度的要求, 或使用相同的节点达到更高的覆盖度。并对整个待监测区域中有优先覆盖要求(覆盖度优先和监测精度优先)的局部区域的情况进行了分析。

**关键词:** 无线传感器网络; 三维覆盖; 覆盖控制;  $K$ -覆盖

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-1699(2009)05-0706-06

无线传感器网络 (WSNs) 是随着无线通信技术、嵌入式计算技术、传感器技术、微机电技术的发展而出现的一种新兴的信息获取技术, 在军事、汽车电子、工业控制、环境监测、医疗卫生、智能家居等领域有很好的应用前景, 尤其在无人值守或恶劣环境下的事件监测和目标跟踪中显示了很大的优势<sup>[1-4]</sup>。

与传统的有线传感器网络相比, 无线传感器网络具有放置灵活、扩展简便、可以有移动节点和自组织网络等特点<sup>[5]</sup>。WSNs 的性能很大程度上取决于传感器节点的配置及其与能耗相关的生命周期。当前对能量高效配置的方法相当关注, 近期提出的传感器网络节点配置算法的焦点在覆盖与连通, 这两方面

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助 (NSFC-60604024); 浙江省科技计划重点项目资助 (2008C23097); 浙江省教育厅科研项目资助 (20060246); 浙江省高校青年教师资助计划项目资助 (ZX060221)

**收稿日期:** 2008-12-10      **修改日期:** 2009-02-08

是影响传感器网络性能和能量高效利用的最重要因素<sup>[6]</sup>。而 WSNs 的覆盖控制问题,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,通过传感器节点放置及路由选择等手段,最终使 WSNs 的各种资源得到优化分配,并进而使感知、传感、通信、监测等各种服务质量得到改善<sup>[7]</sup>。

基于网格的目标覆盖是一种较为常见的 WSNs 覆盖控制方法<sup>[8-11]</sup>,是指当地理环境情况预先确定时,使用二维(或三维)的网格对网络建模,并选择在合适的格点配置传感器节点完成对区域/目标的覆盖<sup>[7]</sup>。文献[8]提出了一种基于网格的覆盖控制算法来解决在价格受限和完全覆盖约束条件下的传感器节点部署问题。该方法虽然适用于三维空间,但其依赖于“精确的”传感器监测,要求传感器在监测时输出一个是/否的二元结果。文献[9]从进攻角度研究覆盖问题,提出了一种兼顾安全和时效性能的启发式的移动轨迹策略,克服了工作盲区和轨迹蔓延的问题。文献[10]针对传感器节点失败的可能性,对不可靠的传感器网络讨论了覆盖与连通的关系。文献[11]针对传感器在读数等方面存在的固有的不确定性,提出了基于概率的传感器网络覆盖控制算法。上述算法均应用于二维平面上,且在覆盖程度上只达到 1-覆盖,即监测区域中的每个目标格点只被一个传感器节点所监测。某些应用场合,如军事应用,系统需具有较强的容错能力和鲁棒性,要求达到 K-覆盖<sup>[12]</sup>,即监测区域的每个目标格点至少被 K 个传感器所监测,其中  $K > 1$ 。基于此,本文提出了一种基于概率的三维传感器网络 K-覆盖控制方法(Probability-Based K-Coverage Control Approach for Three-dimensional Wireless Sensor Networks, PKCCA),以网格对三维待监测区域建模,使得每个网格点至少被 K 个传感器以概率 T 覆盖,为基于传感器网络的监测系统提供了高可靠性,并建立传感器阈值模型(Sensor Threshold Model, STM)以简化计算。对某些网格点有优先覆盖(覆盖度优先和监测精度优先)要求的情形进行了分析和模拟。PKCCA 适用于信号传播能力较弱,但对可靠性要求较高的特殊环境(如水环境)监测中。

本文第 1 部分,建立了 STM,考虑邻居节点对覆盖概率的影响,详细描述了监测区域中目标的覆盖概率的计算方法;第 2 部分,详细描述了 PKCCA 的原理和实现步骤;第 3 部分,通过仿真对 PKCCA 和随机配置方法以及均匀配置方法进行了比较,结

果表明 PKCCA 能使用较少的节点完成相同的覆盖度和监测精度的要求,或使用相同的节点完成更高的覆盖度;第 4 部分,对全文进行了总结。

## 1 目标覆盖概率

与覆盖问题直接相关的是传感器节点的感知模型,感知模型构建了节点物理位置与空间位置的几何关系,可以看作是传感器感知函数的服务质量的度量。假定网络中均采用同构节点,各节点的感知半径相等。节点的感知模型可分为两类:布尔模型和概率模型。在布尔感知模型中,节点的感知范围是一个以节点为圆心,感知距离(由节点硬件特性决定)为半径的圆,节点仅能控制到在该圆内所发生的事件,即当监控对象处在节点的感应区域内时,它被节点监控到的概率恒为 1,而当监控对象处在节点的感应区域之外时,它被节点监控到的概率恒为 0。而在实际的应用场景中,对象被监控到的概率不是个常量,而是由对象与节点之间的距离、节点的物理特性以及节点周围邻居的多少等诸多因素决定的变量,因此概率覆盖模型能够更精确地描述网络的覆盖能力。故本文采用概率模型,以更接近于实际情况。

本文中假设三维待监测区域以网格划分,连续的网格点之间的距离由传感器节点配置所要求达到的精确度确定。

待监测目标被某个传感器节点监测到的概率随目标与传感器节点之间的距离呈指数变化。若待监测目标与传感器节点间的距离为  $d$ ,则目标被该传感器节点监测到的概率为  $e^{-\alpha d}$ ,监测参数 ( $\alpha > 0$ )用来表征目标被传感器节点监测到的概率随距离的增大而减小的速率<sup>[11]</sup>。对待监测区域中的任意两个网格点  $i$  和  $j$  而言,定义监测概率  $p_{ij}$ ,表示网格点  $j$  处的目标被网格点  $i$  处的传感器节点监测到的概率。这里,不考虑三维待监测区域中存在障碍物的特殊情况,则有  $p_{ij} = p_{ji}$ 。考虑到无线传感器网络在水环境监测等应用中,信号衰减较快,当传感器节点对某待监测目标的监测概率小于  $\theta$  时,则认为监测概率为 0,以增强模型对实际环境的反映能力。这样,传感器节点的感知范围就可视为一个球体,且其感知能力与球体的半径有关,参数  $\alpha$  决定了感知球体的大小,称为监测范围阈值。传感器阈值模型(STM)可用式(1)表示:

$$p_{ij} = \begin{cases} e^{-\alpha d}, & e^{-\alpha d} > \theta \\ 0, & e^{-\alpha d} < \theta \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  和  $\theta$  为与传感器物理特性有关的类型参数。

任一点的覆盖概率是一个介于 0 和 1 之间的数,当目标与传感器节点重合时,即  $d = 0$ ,目标被传感器节点监测到的概率为 1。

正如文献[11]所述,传感器监测模型的选择不会限制传感器网络的覆盖控制方法的应用。传感器模型只是算法的一个输入,若运用其它传感器模型也不需要重新设计传感器覆盖控制方法。在实际应用过程中,需要根据监测到的物理数据对传感器模型的参数进行不断调整。本文的算法仿真部分也针对传感器感知模型的参数对覆盖控制效果的影响作了分析。

上述覆盖概率针对节点不存在邻居节点的情况,若节点存在邻居节点,由于邻居节点的感应区域与节点自身的感应区域存在交叠,所以当网格点  $j$  的目标落在交叠区域内,则目标的覆盖概率会受到邻居节点的影响。假设位于网格点  $i$  的传感器节点  $s$  存在  $M$  个邻居节点  $n_1, n_2, \dots, n_M$ 。传感器节点  $s$  以及邻居节点的感应区域分别记为  $R(i), R(n_1), R(n_2), \dots, R(n_M)$ , 则这些感应区域的重叠区域  $D = R(i) \cap R(n_1) \cap R(n_2) \dots \cap R(n_M)$ 。根据概率计算公式,定义处于  $D$  中任一网格点  $j$  的目标的覆盖概率为

$$P(j) = 1 - \prod_{k=1}^M (1 - p_{n_k,j}) \quad (2)$$

其中,  $p_{ij}$  和  $p_{n_k,j}$  为(1)式中定义的假设不存在邻居节点时,网格点  $j$  处的目标分别在网格点  $i$  处的节点  $s$  和邻居节点  $n_k$  的感应区域内的覆盖概率。

## 2 PKCCA 描述

基于概率  $T$  的三维传感器网络  $K$ -覆盖控制方法的设计目标是:对以网格划分的三维待监测区域,求取最少数目的传感器节点并决定其在网格中的放置位置,使得每个网格点都以概率  $T$  实现  $K$ -覆盖,即  $P(j) > T$ 。其中,  $T$  称为监测精度,  $K$  称为覆盖度,是算法的两个输入。

将三维待监测区域划分为  $n \times n \times n$  的网格,共有  $N = n^3$  个网格点,令网格中所有网格点对之间的监测概率矩阵为  $D = [p_{ij}]_{N \times N}$ ,共  $n^6$  个元素,其中,  $p_{ij}$  按照第 1 部分所述的 STM 进行计算。由监测概率矩阵  $D$ ,定义失误概率矩阵  $M = [m_{ij}]_{N \times N}$ ,其中  $m_{ij} = 1 - p_{ij}$ 。用迭代的贪婪启发式方法确定传感器节点在网格中的位置,每一步迭代完成一个传感器节点的放置,更新目标的覆盖概率  $P(j), j = 1, 2, \dots, N$ ,直到节点总数达到预设的上界或每个网格点以概率  $T$  达到足够的覆盖度为止。

定义向量  $L = (L_1, L_2, \dots, L_N)$ ,表示  $N = n^3$  个

网格点的覆盖度集合,其中,元素  $L_j$  表示网格点  $j$  在节点配置过程中所达到的覆盖度。向量  $L$  初始化为全零向量,即  $L = (0, 0, \dots, 0)$ 。将传感器节点放置在某个网格点中,使得该节点对待监测区域中的所有其它网格点的失误概率之和最小。当某个网格点的覆盖度达到指定值时,更新失误概率矩阵,在矩阵中删除该网格点所对应的行与列,以降低失误概率矩阵的维数。

算法的具体步骤如下:

- (1) 传感器节点数初始化为 0;
- (2) 将传感器节点放置在网格点  $k$ ,以使得  $L_k$  最小,其中  $L_k = m_{k1} + m_{k2} + \dots + m_{kN}, k = 1, \dots, N$ ;
- (3) 若  $p(j) > 1 - M_{\max}, j = 1, \dots, N$ ,则对相应的  $L_j$  加 1,更新向量  $L = (L_1, L_2, \dots, L_N)$ ;
- (4) 传感器节点数加 1;
- (5) 若  $L_j$  达到指定的覆盖度,则删除  $M$  矩阵的第  $j$  行和第  $j$  列,更新  $M$  矩阵,置  $N = N - 1$ ;
- (6) 转至第 2 步,直到  $L_j = Cov, j = 1, \dots, N$ ,或者已配置的传感器节点数量超过了预设的上界。

其中,  $M_{\max} = 1 - T$ ,为每个网格点所允许的最大失误概率;  $Cov$  表示每个网格点所要求达到的覆盖度。

PKCCA 的流程图如图 1 所示。

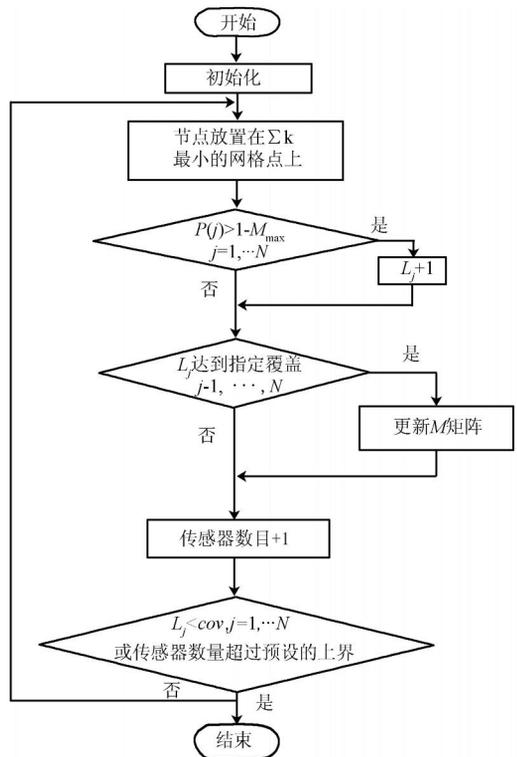


图 1 PKCCA 流程图

对某些网格点有优先覆盖要求(覆盖度优先和监测精度优先)的情形,分别对 PKCCA 做如下的修改:

(1) 覆盖度优先:为每个网格点  $i$  设定不同的覆盖度  $Cov_i$ ,则 PKCCA 的第(6)步中,循环终止条件变为检查每个网格点是否达到各自的覆盖度或传感器节点数量是否超过预设的上界。

(2) 监测精度优先:为每个网格点  $i$  设定不同的监测精度  $T_i$ ,相应网格点的允许的最大失误概率变为  $M_{max}^i = 1 - T_i$ ,则 PKCCA 的第(3)步中,网格点  $i$  的覆盖概率  $P(i)$  与每个网格点的  $M_{max}^i$  作比较。

PKCCA 计算复杂度是  $O(mN)$ ,其中,  $m$  是满足整个三维监测区域覆盖要求所需的传感器数量。因为  $m$  未知,可用  $N$  作为  $m$  的一个上界,故 PKCCA 的复杂度为  $O(N^2)$ 。

### 3 仿真算例

本文对上述算法在 Matlab7.0 上进行了仿真,通过对预先设定的监测精度  $T$  和覆盖度  $K$ ,决定传感器节点的放置,以最小化传感器节点数量。在仿真中,将三维待监测区域划分为  $5 \times 5 \times 5$  的网格,共 125 个网格点,每个网格点的覆盖度为 3,即每个网格点都至少被 3 个传感器节点以概率  $T$  所监测。

监测参数 表征目标被传感器节点监测到的概率随距离的增大而减小的速率,监测范围阈值 表征传感器节点的感知范围,每个网格点所允许的最大失误概率  $M_{max}$  表征了覆盖控制算法的监测精度,以上参数的选取直接影响完成覆盖任务所需的传感器节点数量。针对不同的监测参数 ,监测范围阈值 和允许的最大失误概率  $M_{max}$ ,比较了 PKCCA、随机配置的三维传感器网络 K-覆盖控制方法(Random Deployed K-Coverage Control Approach for Three-dimensional Wireless Sensor Networks, RDKCCA),每次迭代中节点随机配置,直到节点总数达到预设的上界或每个网格点以概率  $T$  达到覆盖度  $K$  为止)、均匀配置的三维传感器网络 K-覆盖控制方法(Uniformly Deployed K-Coverage Control Approach for Three-dimensional Wireless Sensor Networks, UDKCCA,将一定数量的传感器节点均匀配置在三维待监测区域,视其能以概率  $T$  达到的覆盖程度)所需配置的节点数量和对参数的灵敏度。

#### 算例 1

STM 中,取监测范围阈值  $\beta = 0.2$ ,每个网格点允许的最大失误概率  $M_{max} = 0.4$ ,即每个网格点至少以概率 0.6 达到 3-覆盖。比较 PKCCA 与 RD-

KCCA 所需传感器节点数随着监测参数 增大的变化趋势。仿真结果如图 2 所示,从图中可知,对相同的监测区域达到 3-覆盖的目标,PKCCA 和 RDKCCA 所需的节点数随着监测参数 的增大而增加。因为 取值越大,由 STM 可知传感器节点的监测能力越弱,故需要配置更多的节点来完成相应的覆盖任务。另外,在相同的监测参数下,PKCCA 所需的节点数明显少于 RDKCCA,尤其当 取值比较大时,即传感器感知能力较弱时,这一趋势更加明显。因此,PKCCA 适用于信号传播能力较弱的环境中,能提供较高的可靠性。

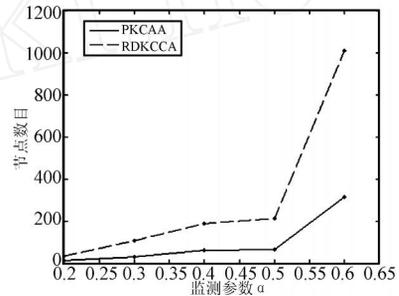


图 2 PKCCA 和 RDKCCA 所需节点数随 变化的趋势算例 2

相应地,取监测参数  $\alpha = 0.3$ ,网格点允许的最大失误概率  $M_{max} = 0.4$ ,比较 PKCCA 与 RDKCCA 所需节点数随着监测范围阈值增大的变化趋势。由图 3 可知,对相同的待监测区域达到 3-覆盖,监测范围阈值 越大,PKCCA 和 RDKCCA 所需的节点数越多。因为 取值越大,由 STM 可知传感器节点的感知球体积越小,即每个传感器节点的监测范围越小,需要配置更多的节点来完成相应的覆盖任务,与算例 1 中分析的监测参数 增大时所引起的效果一样。另外可看出,对于同一监测范围阈值 ,PKCCA 所需的节点数明显少于 RDKCCA,尤其当 取值较大时,即传感器节点感知范围较小时,这一趋势尤为明显。 的变化对 RDKCCA 的影响较大,而 PKCCA 对 的变化具有较强的鲁棒性。

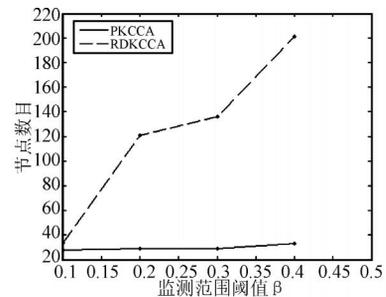


图 3 PKCCA 和 RDKCCA 所需节点数随 变化的趋势算例 3

作为对比,取监测参数  $\alpha = 0.3$ ,监测范围阈值

= 0.2, 比较 PKCCA 与 RD KCCA 所需节点数随网格点允许的最大失误概率  $M_{max}$  变化的趋势。由图 4 可知, 对相同的监测区域达到 3-覆盖,  $M_{max}$  越大, PKCCA 和 RD KCCA 所需的节点数越少。因为网格点的允许的最大失误概率越大, 即监测要求越低, 则只需较少数量的传感器完成覆盖任务。另外, 从仿真结果也可看出, 对同一允许的最大失误概率  $M_{max}$ , PKCCA 所需的节点数明显少于 RD KCCA。尤其在  $M_{max}$  取值比较小时, 即对监测精度要求较高时, 完成相同的覆盖任务, PKCCA 所需的传感器节点数远远少于 RD KCCA。

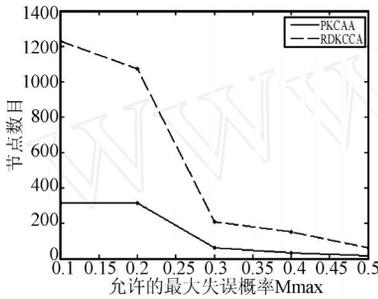


图 4 PKCCA 和 RD KCCA 所需节点数随  $M_{max}$  的变化趋势

对于在待监测区域中有优先覆盖要求的子区域的情况, 如图 5 所示。算例 4 和算例 5 分别分析了对该子区域进行覆盖度优先和监测精度优先的覆盖。

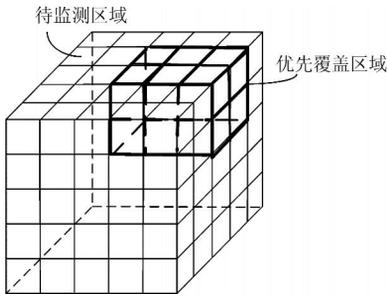


图 5 待监测区域中的优先覆盖区域

算例 4

对覆盖度优先的情形, 假设图 5 中, 要求优先覆盖区域的网格点达到 3-覆盖, 其它网格点只需达到 2-覆盖。仿真中, 取监测范围阈值  $\theta = 0.2$ , 网格点允许的最大失误概率  $M_{max} = 0.4$ , 比较 PKCCA 与 RD KCCA 所需节点数随着监测参数  $\alpha$  增大的变化趋势。由图 5 可知, 随着增大, PKCCA 和 RD KCCA 所需的节点数增多, 而 PKCCA 所需节点数明显少于 RD KCCA。当  $\alpha$  值较大时, PKCCA 所需的节点数远少于 RD KCCA, 其原因与算例 1 中所述一致。对比图 2 与图 6 可知, 对同一监测参数  $\alpha$  而言, 算例 4 中 PKCCA 所需节点数比算例 1 中 PKCCA 所需节点数要少, 因为算例 4 的监测要求 (优先覆盖

区域达到 3-覆盖, 其它网格点达到 2-覆盖) 比算例 1 的监测要求 (所有网格点达到 3-覆盖) 低。由于节点配置的随机性, 在同一监测参数下, 对比算例 1 与算例 4 中 RD KCCA 所需的节点数, 不能像 PKCCA 那样得出定性的结论。

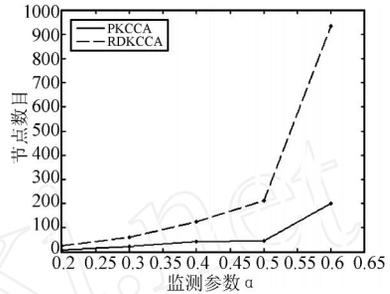


图 6 覆盖度优先, PKCCA 和 RD KCCA 所需节点数随  $\alpha$  的变化趋势

算例 5

对监测精度优先的情形, 假设图 5 中, 要求优先覆盖区域的网格点以 95% 的概率被监测, 即这些网格点的允许的最大失误概率  $M_{max}^{优先} = 0.05$ , 对其它网格点允许的最大失误概率  $M_{max}$  取不同的值, 观察 PKCCA 和 RD KCCA 所需节点数随  $M_{max}$  增大的变化趋势。整个区域要求达到 3-覆盖, 取监测参数  $\alpha = 0.3$ , 监测范围阈值  $\theta = 0.2$ 。由图 7 中可知, 随着  $M_{max}$  的增加, 对相同的区域达到 3-覆盖, PKCCA 和 RD KCCA 所需节点数大体呈减少趋势。且对同一允许的最大失误概率  $M_{max}$ , RD KCCA 所需节点数远远多于 PKCCA, 尤其当  $M_{max}$  取值较小时, 即对监测精度要求较高时, 这一趋势更加明显, 其原因与算例 3 中相似。比图 4 与图 7, 可以发现, 对同一允许的最大失误概率  $M_{max}$  而言, 算例 5 中 PKCCA 所需节点数比算例 3 中的要多, 因为算例 5 监测要求 (优先覆盖区域监测精度达到 95%, 其它网格点的监测精度相应变化, 但小于 95%) 比算例 3 的监测要求 (所有网格点的监测精度都相应变化, 且小于 95%) 高。由于节点配置的随机性, 在同一允许的最大失误概率下, 对比算例 3 与算例 5 中 RD KCCA 所需

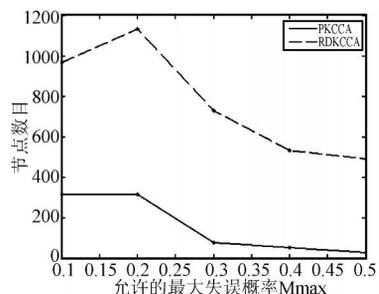


图 7 监测精度优先, PKCCA 和 RD KCCA 所需节点数随  $M_{max}$  变化的趋势

的节点数,不能像 PKCCA 那样得出定性的结论。图 6 中, RDKCCA 所需节点数量的曲线出现起伏,是由于节点配置的随机性所引起的。

算例 6

将一定数量的传感器节点放置于三维待监测区域中,要求达到尽可能高的整体覆盖度。图 8 中比较了随节点数变化,PKCCA 和 RDKCCA 以及 UD-KCCA 所能达到的覆盖度。三种方法的监测精度均为 60%,监测参数 = 0.3,监测范围阈值 = 0.2。从图中可看出,节点数越大,三种方法所能达到的整体覆盖度也越大,在相同节点数下,PKCCA 的覆盖度高于 UDKCCA,UDKCCA 又高于 RDKCCA。如在待监测区域中放置 100 个节点, RDKCCA 只能达到 3-覆盖,UDKCCA 能达到 6-覆盖,PKCCA 则能达到 10-覆盖。

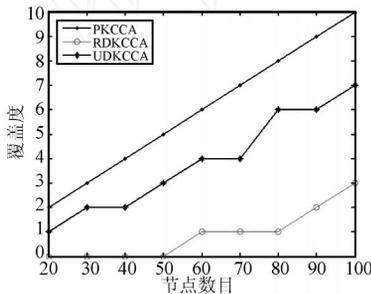


图 8 PKCCA、RDKCCA 和 UDKCCA 所能达到的覆盖度随节点数变化的趋势

4 结语

将无线传感器网络应用于环境监测,待监测区域多为三维空间,传感器节点在读数等方面存在固有的不确定性,而整个网络必须具有较强的容错能力和鲁棒性,因此本文提出了一种基于概率的三维无线传感器网络 K-覆盖控制方法(PKCCA),并针对水环境等信号传播能力较弱的特殊环境监测提出了传感器阈值模型(STM),并详细分析了传感器节点及其邻居节点对监测目标的覆盖概率影响。仿真结果表明,对于 STM 中的监测参数,监测范围阈值以及监测区域中每个网格点允许的最大失误概

率  $M_{max}$  的不同取值,对同一待监测区域实现相同的覆盖度和监测精度,PKCCA 使用的节点数量少于 RDKCCA;配置相同数量的传感器节点,PKCCA 达到的覆盖度比 RDKCCA 和 UDKCCA 高。并对整个监测区域中有优先覆盖要求(覆盖度优先和监测精度优先)的局部区域的情况进行了分析和模拟,同样表明 PKCCA 优于 RDKCCA。较其它只达到 1-覆盖,或用确定性感知模型的覆盖控制方法而言,本文在部署传感器节点时增加了覆盖度集合,以满足对监测区域中任意子区域的不同覆盖度的要求,为信号传播能力较弱的特殊环境监测提供了一个高可靠性与鲁棒性的解决方案。

参考文献:

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [2] 宋亚辉, 李凤保, 李在铭. 无线传感器网络能效技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1665-1667.
- [3] 蒋鹏. 基于无线传感器网络的湿地水环境远程实时监测系统关键技术研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(1): 183-186.
- [4] 李凤保, 李凌. 无线传感器网络技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 559-561.
- [5] 李国华, 田辉, 崔鸿雁, 沈树群. 无线传感器网络中一种基于能量策略的路由算法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(1): 168-171.
- [6] 刘丽萍, 王智, 孙优贤. 无线传感器网络部署及其覆盖问题研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(9): 1752-1757.
- [7] 任彦, 张思东, 张宏科. 无线传感器网络中覆盖控制理论与算法[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 422-433.
- [8] Krishmendu Chakeabarty, S. Sitharama Iyengar, Hairong Qi. Grid Coverage for Surveillance and Target Location in Distributed Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2002, 51(12): 1448-1453.
- [9] 秦宁宁, 张林, 山秀明, 徐保国. 无线传感器网络启发式移动轨迹策略的研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(3): 707-711.
- [10] Shakkottai S, Srikant R, Shroff N. Unreliable Sensor Grids: Coverage, Connectivity and Diameter [C]// Bauer F, ed. Proc. of the IEEE Infocom. San Francisco: IEEE Press, 2003. 1073-1083.
- [11] Dhillion S S, Chakrabarty K, Iyengar S S. Sensor Placement for Grid Coverage Under Imprecise Detections. Proc. of International Conference on Information Fusion [C], USA: 2002, 1581-1587.
- [12] Santosh Kumar, Ten H. Lai, Jozef Balogh. On K-Coverage in a Mostly Sleeping Sensor Network [C]// MobiCom '04, Sept. 26-Oct. 1, 2004, Philadelphia, Pennsylvania, USA.



蒋 鹏(1975-),男,1999 年于浙江大学获得学士学位,2004 年于浙江大学获得博士学位,现为杭州电子科技大学副教授,硕士生导师,主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统、智能仪表, pjiang@hdu.edu.cn



陈 峰(1984-),女,2006 年于浙江工商大学获得学士学位,现为杭州电子科技大学硕士生,主要研究方向为无线传感器网络覆盖控制方法, chen-feng20041021@163.com