

文章编号: 1001-2486(2009)03-0076-06

## 无线传感器网络中保证覆盖的最少节点部署\*

温俊<sup>1</sup>, 窦强<sup>1</sup>, 蒋杰<sup>1</sup>, 宋磊<sup>1,2</sup>, 窦文华<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073; 2. 解放军理工大学 指挥自动化学院, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 无线传感器网络的能量消耗是空间不均匀的, 但当前多数的部署方法考虑得较少, 网络的能量利用率低, 因此提出了保证覆盖率和网络生存期的最少节点部署问题。基于传感器网络的数据传输特性, 从提高能量效率和降低剩余能量的角度提出了节点数递减的重叠放置方法和节点密度递减的随机部署方法。两种新部署方法比已有部署方法需要的节点数少, 剩余能量低, 因而提高了能量利用率。最后, 仿真实验表明, 两种新部署策略的能量效率是已有方法的 3~4 倍。

**关键词:** 无线传感器网络; 覆盖; 均匀部署; 递减部署

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A

## Coverage-preserved Minimum Deployment in Wireless Sensor Networks

WEN Jun<sup>1</sup>, DOU Qiang<sup>1</sup>, JIANG Jie<sup>1</sup>, SONG Lei<sup>1,2</sup>, DOU Wen-hua<sup>1</sup>

(1. College of Computer, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Institute of Command Automation, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Most sensor deployments so far scarcely consider the non-uniform energy consumption in wireless sensor networks. As a result, considerable energy is wasted and energy utilization is low when networks fail. Therefore minimum nodes deployment problem is raised, which is subject to coverage and networking lifetime threshold. Motivated by delivery characteristics in wireless sensor networks, two solutions, nodes decreasing placement and density decreasing deployment, are presented, aiming at high energy utilization and minimum residual energy. Compared with the existing deployments, the two novel schemes deploy less sensor nodes, maintain less energy when nodes fail. Simulations reveal that energy efficiency of two schemes nearly reaches 3~4 times of the existing solutions.

**Key words:** wireless sensor networks; coverage; uniform deployment; descending deployment

无线传感器网络中常见部署方式主要分为两类: (1) 受控部署, 在可控环境中, 计算所有传感器节点的精确位置, 逐一放置节点, 以获得连通性或覆盖性的最优; (2) 随机均匀部署, 在沙漠、战场等危险环境中, 通常将节点抛撒到目标区域中, 节点落在目标区域内的位置是随机的。

与上述两种部署方式不同, 本文提出了在给定网络覆盖率和生存期时无线传感器网络的最少节点部署问题。从网络的数据传输特性出发, 基于受控部署和随机部署, 分别设计了节点数递减的重叠放置方法和节点密度递减的部署方法, 其中节点数递减的重叠放置是在三角点阵上根据每个位置点到 sink 的距离重复放置多个节点, 距离越近的位置点放置的节点越多; 反之亦然。节点密度递减的部署是将任务区域划分为多个圆环区域, 每个圆环区域内节点随机均匀部署, 但是节点密度随距离增大而降低。数值结果和实验结果表明, 两种部署方法放置的节点数量少, 能量效率高。

## 1 相关工作

最早的与受控部署有关的问题是圆覆盖问题, 文献[1-2]证明了当以半径相同的圆覆盖一个平面时, 三角点阵的排列是获得节点数渐近最少的方式, 而且当节点的感知半径  $r_s$  和通信半径  $r_c$  满足

\* 收稿日期: 2009-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60603061; 60603064)

作者简介: 温俊(1979-), 男, 博士生。

$r_c \geq \sqrt{3}r_s$  时,网络是连通的。Iyengar<sup>[3]</sup> 假设  $r_s = r_c$ , 证明了单连通覆盖的最小节点密度满足  $d_{OPT} \geq 0.522/r_c^2$ , 并给出了方形栅格排列、六边形栅格和基于节点条带部署<sup>[4]</sup> 时的节点密度分别为  $d_{SQR} = 1/r_c^2$ ,  $d_{HEX} = 0.769/r_c^2$  和  $d_{STR} = 0.536/r_c^2$ 。2-连通的部署方式比单连通的网络更可靠, Bai 在文献[5]中给出了在任意的  $r_c/r_s$  的比值下, 2-连通覆盖的渐进最优部署方式。

随机均匀部署方式简单, 节点落在目标区域内的位置是随机的。随机均匀部署通常用‘Poisson 点过程’<sup>[6]</sup> 描述: 假设区域  $A$  位于二维平面上,  $\|A\|$  表示区域的大小,  $\lambda$  为节点密度,  $N(A)$  为区域  $A$  内的节点数, 则  $N(A) = n$  的概率:

$$P(N(A) = n) = \frac{(\lambda \cdot \|A\|)^n e^{-(\lambda \cdot \|A\|)}}{n!} \quad (1)$$

文献[7]则在给定网络部署下提出了求解网络最大生存期的方法。总之, 当前大多受控部署和随机部署方法侧重于考虑覆盖性能、连通性能和网络生存期, 能量效率关注较少。

## 2 模型与问题

假设传感器节点部署在以 sink 为中心的圆形区域内, 节点具有相同的初始能量  $E$ 、感知半径  $r_s$  和通信半径  $r_c$ , 任务区域内单位面积产生感知数据的速率为  $c$ 。感知数据被逐跳转发, 则每跳的平均距离等于节点的通信半径  $r_c$ , 由于数据每次被转发的距离不变, 因而节点发送和接收单位数据时消耗的能量也保持不变, 分别为  $e_t$  和  $e_r$ , 而感知和处理数据消耗的能量被忽略。

### 2.1 数据转发

无线传感器网络中感知数据被逐跳转发至 sink。根据平面上各点到 sink 的不同距离, 将任务区域划分为一组以 sink 为中心、宽度为  $r_c$  的同心圆环。假设整个任务区域恰好被划分为  $H$  个圆环区域, 分别标记为  $A_0, A_1, \dots, A_{H-1}$  (也表示相应区域的面积), 其中  $A_0$  是距离 sink 最近的区域,  $A_{H-1}$  为最外层区域, 则不同圆环内的节点其任务不同: (1) 最外层的节点只发送自身的感知数据; (2) 内层区域节点既发送自身的感知数据又转发外层邻居的数据。因而多跳转发方式使得邻近 sink 的节点比其他节点承担更多的数据转发任务, 能量消耗快, 呈现空间不均匀性。

下面基于理想的数据转发过程讨论各个区域的能量消耗。第  $h$  圆环的面积为  $A_h$ , 那么第  $h$  圆环区域在单位时间内产生的感知数据为  $C_h = A_h c$ , 其中,  $h = 0, 1, \dots, H-1$ 。

由于第  $h$  圆环区域消耗的能量包括发送本圆环感知数据的能量和转发外层区域数据的能量, 则总的能量消耗为  $e(h)$ ,

$$e(h) = [H^2 - (h+1)^2] r_c^2 \pi c e_r + (H^2 - h^2) r_c^2 \pi c e_t \quad (2)$$

上式中的右边第一项是接收外层区域数据时消耗的能量, 第二项是发送本区域及其外层区域数据时消耗的能量。从式(2)可以看出, 按照从内到外的顺序, 虽然圆环区域的面积不断增大, 产生更多的感知数据, 但是由于转发的数据少, 使得最内层消耗的能量最多, 而最外层的最少。

### 2.2 覆盖率

为了描述网络的覆盖质量, 下面给出了覆盖率的定义。

定义1 覆盖率: 被活跃节点覆盖的区域面积占总面积比例。

受控部署可以确定性地放置节点, 因而可以精确地计算出被覆盖区域的面积, 其覆盖率是确定的。随机部署使得平面上任意点  $p$  是否被感知是一随机事件, 若  $s(p)$  表示为点  $p$  是否被覆盖的状态, 如当  $s(p) = 0$  时表示  $p$  不被任何一个节点感知, 否则  $s(p) = 1$ 。根据 Poisson 点过程的定义, 有如下等式成立:

$$P\{s(p) = 1\} = 1 - P\left\{\text{以 } p \text{ 为圆心, } r_s \text{ 为半径的圆形区域内无活跃节点}\right\} = 1 - e^{-\lambda r_s^2} \quad (3)$$

若  $A_s$  记为被覆盖的区域, 则

$$A_s = \int_A s(p) dp \quad (4)$$

那么随机部署时,网络覆盖率为被覆盖区域面积的期望与总面积之比,

$$g = E\left(\|A_s\| / \|A\| = \|A\| \left(1 - e^{-\lambda r_s^2}\right) / \|A\| = 1 - e^{-\lambda r_s^2}\right) \quad (5)$$

由于任何的无线传感器网都要提供一定质量的覆盖率和连通性,因而下面给出网络生存期的定义。

定义2 网络生存期:当网络的覆盖率低于设定的阈值或不再连通时,网络持续工作的时间。

下面将主要针对网络满足总体覆盖率的约束时讨论最少节点部署问题。

### 2.3 问题描述

通常,具体的网络应用给出了网络覆盖率和生存期的要求,因而在部署网络前需要考虑部署多少节点才合适,即最少节点部署问题:在给定网络覆盖率和生存期时,如何部署最少的传感器节点。最少节点部署问题的意义在于降低构建网络时的硬件成本。

假设每个圆环区域内部署的节点数为 $N_h$ ,那么每个圆环区域的节点能量之和为 $N_h E$ ,而部署的总节点数为 $\sum_{h=0}^{H-1} N_h$ 。若以 $D_{h,j}$ 记为第 $h$ 圆环区域内第 $j$ 个节点的感知区域,则第 $h$ 圆环内所有节点覆盖的区域为 $\bigcup_{j=0}^{N_h} D_{h,j}$ ,那么第 $h$ 圆环区域的覆盖率为

$$g(h) = \left\| \bigcup_{j=0}^{N_h} D_{h,j} \right\| / \|A_h\| \quad (6)$$

因此最少节点部署问题的形式化描述为:

$$\min \sum_{h=0}^{H-1} N_h \quad (7)$$

$$\text{subject to} \begin{cases} g(h) \geq \alpha \\ N_h E \geq e(h) T, \quad h = 0, \dots, H-1 \end{cases} \quad (8)$$

其中 $e(h)$ 见式(2)。从上面描述中可以看出,优化的目标是 minimized 节点数,同时满足覆盖率和网络生存期的约束。

### 3 数量递减的重叠放置

三角点阵排列是节点数最少的优化节点放置,而且当 $r_c \geq \sqrt{3}r_s$ 时节点是连通的,因此我们将以三角点阵排列为基础讨论最少节点的受控部署。

假设 sink 位于三角点阵排列的一个位置点上且 $r_c = \sqrt{3}r_s$ ,那么各个圆环区域的半径为 $(h+1)\sqrt{3}r_s$ ,如图1所示。若以 sink 位置为坐标原点,水平和垂直方向分别为 $x, y$ 轴,参数 $k, m = 0, 1, \dots$ ,则每个位置点的坐标 $(x, y) = \left( \pm(3k+3/2)r_s, \pm(\sqrt{3}m+\sqrt{3}/2)r_s \right)$ 或 $\left( \pm 3kr_s, \pm\sqrt{3}mr_s \right)$ ,那么容易计算第 $h$ 圆环内的位置点个数(记为 $n_h$ ),例如当 $H=5$ 时,各圆环区域的位置点个数为6,12,18,24,30。当节点到 sink 的距离大于 $h\sqrt{3}r_s$ 且不大于 $(h+1)\sqrt{3}r_s$ 时,则称节点位于第 $h$ 圆环内。若将节点逐一地放置在对

应的位置点上,则根据数据转发的假设,单位时间内各个圆环区域消耗的能量为 $\sum_{i=h+1}^{H-1} n_i E_r + \sum_{i=h}^{H-1} n_i E_t$ ,其中, $h=0, 1, \dots, H-1, E_t = \pi r_s^2 c e_t, E_r = \pi r_s^2 c e_r$ 。

单个节点的生存期是有限的,单重覆盖的部署不能确保网络生存期为 $T$ 的要求,因而需要在一些位置点上放置多个节点,放置的节点数应使得网络达到给定的生存期时所有节点剩余能量为0。由于最外层节点不需转发数据,单个节点工作时间最长,记为 $T_0 = E/E_t$ ,因而以单重覆盖时,最外层区域的节点持续工作时间作为节点生命周期,那么在网络生存期 $T$ 内至少需要 $T/T_0$ 个生命周期。

因此,若整个网络工作一个生命周期,那么第 $h$ 圆环区域消耗的能量为 $\sum_{i=h+1}^{H-1} n_i E E_r / E_t + \sum_{i=h}^{H-1} n_i E$ ,其中, $h=0, 1, \dots, H-1$ 。由于整个网络生存期内每个圆环区域消耗的能量是单个周期时的 $T/T_0$ 倍,因而在给定网络生存期 $T$ 时,第 $h$ 圆环内部署的最少节点数 $N_h$ 为

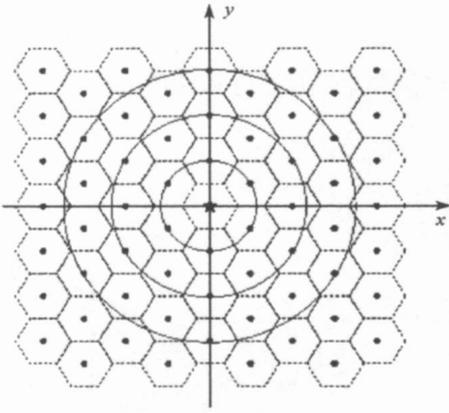


图1 对称的三角点阵排列  
Fig. 1 Symmetric triangular lattice

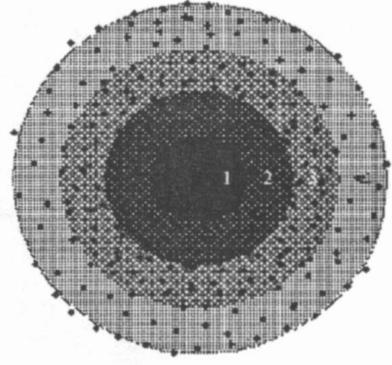


图2 密度递减部署  
Fig. 2 Density decreasing deployment

$$N_h = \frac{T}{rT_0} \left( \sum_{i=h+1}^{H-1} n_i E_r / E_t + \sum_{i=1}^{H-1} n_i \right) \blacktriangleleft \quad (9)$$

由于每个圆环内存在  $n_h$  个位置点, 则第  $h$  圆环内每个位置点放置的节点数为  $\frac{T}{rT_0} \sum_{i=h+1}^{H-1} n_i E_r / E_t + \frac{T}{rT_0} \sum_{i=h}^{H-1} n_i \blacktriangleleft$ 。从上述结论中可以看出, 离 sink 越近的区域, 部署的节点越多, 每个位置点上放置的节点也越多。

#### 4 密度递减的节点部署

随机均匀部署中, 节点落入任何子区域内的节点数只与该区域的面积相关而与位置无关。下面根据多跳的数据转发模型, 讨论满足覆盖率的随机部署方法。与受控部署的覆盖特性不同, 随机部署的覆盖率体现的是平均性能, 而且落入每个圆环区域内的节点规模也不能使用确定的节点数描述, 而常用节点密度衡量。若  $\lambda_h$  表示单重覆盖时的节点密度, 要求区域覆盖率不小于  $\alpha$ , 那么

$$\lambda_h = -\ln(1-\alpha) / (\pi r_h^2) \quad (10)$$

上式给出了随机部署策略下, 覆盖率不小于  $\alpha$  时的最小节点密度, 也是节点调度算法获得的最小活跃节点密度。根据数据转发的假设, 单位时间内各个圆环区域平均消耗的能量为  $\sum_{i=h+1}^{H-1} A_i \lambda_i E_r + \sum_{i=h}^{H-1} A_i \lambda_i E_t$ , 其中  $h = 0, 1, \dots, H-1$ 。

与上节的理由相同, 也以最外层区域单重覆盖的节点持续工作时间作为节点生命周期  $T_0$ , 则  $T_0$  的值仍等于  $E/E_t$ 。为了使网络能够持续工作  $T$  时间, 需要为每个圆环区域部署更多的节点, 部署的节点密度应满足覆盖率和剩余能量最少的原则。若第  $h$  圆环区域部署的节点密度记为  $\lambda_h$  ( $h = 0, \dots, H-1$ ), 由于每个圆环区域内部署的节点所携带的能量不小于在网络生存期  $T$  内节点消耗的能量, 因而第  $h$  圆环区域的节点密度为

$$\lambda_h = T \left( \sum_{i=h+1}^{H-1} A_i \lambda_i E_r + \sum_{i=h}^{H-1} A_i \lambda_i E_t \right) / (EA_h) \quad (11)$$

从上式可以看出, 与随机均匀部署策略不同, 密度递减部署时各圆环内部署的节点密度与  $h$  成单调减的函数关系, 离 sink 越近的区域, 节点越密集, 反之越小 (如图 2 所示), 与数量递减放置的结果类似。

#### 5 性能评估

为了评估节点数递减的重叠放置和密度递减部署的能量效率, 首先使用 Matlab 工具比较 4 种部署策略的数值结果, 然后又在 Glomosim 上设计了仿真程序, 默认的参数为: 网络部署在  $84\text{m} \times 84\text{m}$  的矩形

区域内, sink 位于区域的中心, 参考了实际传感器节点的性能指标<sup>[8]</sup>, 假设节点的感知半径为 6m, 通信半径为 10.4m, 通信带宽 20kbps, 发送功率 20mW, 接收功率 15mW, 活跃节点每秒产生 64b 数据, 节点初始能量 0.64J, 网络覆盖率  $\alpha$  为 0.8。仿真实验忽略了处理数据、空闲等待和调度算法的能耗。

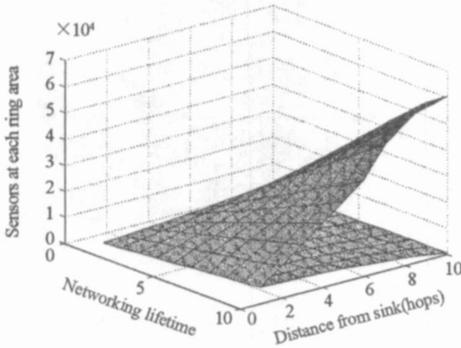


图3 每个圆环区域内的节点数  
Fig. 3 Node count at each ring area

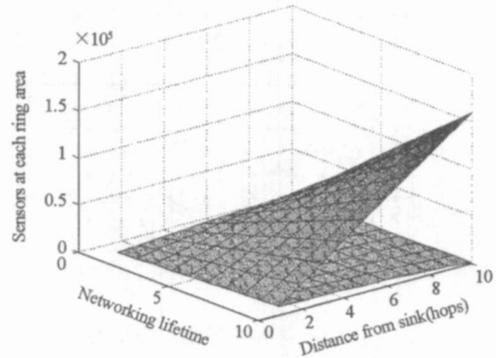


图4 每个圆环区域内的节点数  
Fig. 4 Node count at each ring area

## 5.1 数值结果

下面给出了节点数递减放置、密度递减部署、节点数均等放置和随机均匀部署的数值结果。图3是节点数递减放置和节点数均等放置在每个圆环区域内节点数的对比结果, 其中下方的曲面对应于节点数递减放置, 上方的曲面对应于节点数均等放置。总的来说, 每个圆环区内的节点数随网络生存期增长而增加, 但是节点数递减放置时到 sink 越近, 放置的节点数越多, 越远时则越少, 而节点数均等放置时离 sink 越远的区域, 放置的节点数却越多, 与距离近似成线性增长。图4是密度递减部署和随机均匀部署在每个圆环区域部署的平均节点数对比结果, 结论与图3类似。

## 5.2 仿真实验

仿真实验中受控部署和随机部署的网络生存期计算方法不同。受控部署在大部分的网络生存期里是完全覆盖的, 直到最后阶段逐渐降至  $\alpha$  或 sink 不再接收到数据时网络失效。随机部署中调度算法使得覆盖率近似于  $\alpha$ , 活跃节点密度等于  $\lambda_0$ , 当未失效的节点密度小于  $\lambda_0$  或 sink 不再接收到数据时网络失效。

表1是节点数均等放置与递减放置时, 各个圆环区域部署的节点数和观察的网络生存期。表中第1列是以  $T_0$  为单位的理论网络生存期, 而右侧生存期列的值为实验中观察的网络生存期。从数值中可以看出, 均等放置时网络生存期可以达到理论的设计值, 而递减放置时略低于理论值, 其原因是最短路径的数据路由算法使得节点转发的流量不均衡, 导致节点递减放置策略中的一些节点提前失效, 而节点数均等放置通常在每个位置点存在较大的节点冗余, 因而网络生存期可以达到理论值。但是递减放置的节点效率要高得多, 例如使用单个节点对网络生存期的贡献(观察的网络生存期/总节点数)来衡量, 递减放置时单个节点的贡献率为 0.301%, 而均等放置为 0.0893%, 前者的节点效率是后者的 3.37 倍。

表1 两种受控部署放置的节点数

Tab. 1 Number of sensors placed by two controlled deployment

$T/T_0$	节点数均等放置					节点数递减放置				
	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	生存期	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	生存期
1	102	204	306	408	1.000	102	96	72	24	0.886
2	204	408	612	816	2.000	204	192	144	48	1.768
3	306	612	918	1224	3.000	306	288	216	72	2.652
4	408	816	1224	1632	4.000	408	384	288	96	3.526

表2是随机均匀部署与密度递减部署时, 各个圆环区域部署的平均节点数和观察的网络生存期。实验中为克服最外层圆环区域的边界效应, 在密度递减部署方式下, 最外层圆环区域在理论计算值上增加了密度为  $\lambda_0$  的节点, 在当前参数设置下, 最外层增加了 34 个节点。数据结果显示了与表1相似的规律, 密度递减部署时节点贡献率为 0.210, 随机均匀部署时为 0.047, 前者的节点效率是后者的 4.47 倍。

表2 两种随机部署放置的节点数

Tab.2 Number of sensors placed by two random deployment

$T/T_0$	随机均匀部署					密度递减部署				
	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	生存期	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	生存期
1	132	395	658	922	0.992	132	116	84	68	0.686
2	264	790	1316	1843	1.964	264	232	167	102	1.504
3	395	1185	1974	2764	2.880	395	348	250	136	2.234
4	527	1579	2632	3685	3.750	527	464	334	170	3.004

假设  $T = 4T_0$ , 图5给出了两种受控部署的理论和实验的能量效率, 横坐标是圆环区域到 sink 的距离, 纵坐标是在网络失效时消耗的能量与节点总能量的比值, DCMt 代表递减放置的理论值, DCMs 是递减放置的观察值, UNMt 是均等放置的理论值, UNMs 是均等放置的观察值。数据显示节点数递减放置时各圆环的能量效率在 0.8 附近(实验中覆盖率设定为 0.8), 距离对能量效率影响有限。节点数均等放置时, 能量效率依赖于圆环区域到达 sink 的距离, 距离越远, 节点消耗的能量越少, 能量效率越低。图6给出了随机均匀部署和密度递减部署时各圆环区域的能量效率, 可以看出, 密度递减部署相对于随机均匀部署大大地改善了能量效率。

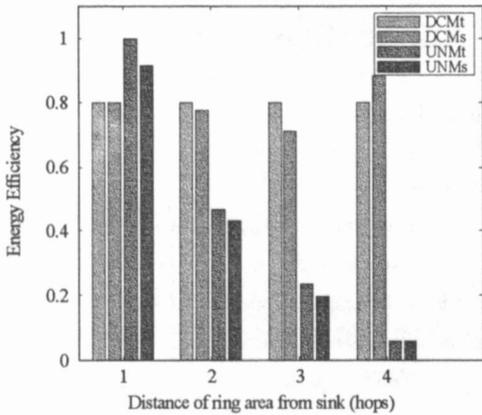


图5 两种受控部署的能量效率

Fig.5 Energy efficiency of two controlled deployments

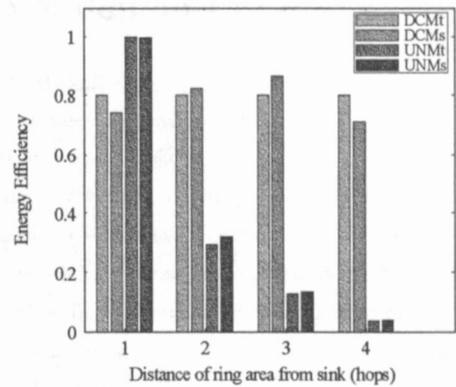


图6 两种随机部署的能量效率

Fig.6 Energy efficiency of two random deployments

## 6 总结

节点数均等放置和随机均匀部署是目前被采用较多的无线传感器网络部署方法, 但是其能量效率随着网络规模的增大而减小, 因而本文提出了保证覆盖率和网络生存期的最少节点部署问题, 目标是节点能量效率的最大化。针对该问题, 本文给出了节点数递减的重叠放置和节点密度递减的随机部署策略, 其主要思想是把任务区划分为多个圆环, 依据每个圆环内的能量消耗估算放置的节点数和节点密度, 理论和数值结果显示新部署策略比已有的策略需要的节点少, 能量效率高。

## 参考文献:

- [1] Keshner R. The Number of Circles Covering a Set[J]. American Journal of Mathematics, 1939,61: 665- 671.
- [2] Zhang H,Hou J C. Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks, Wireless Ad Hoc and Sensor Networks[J]. An International Journal, 2005, 1: 89- 123.
- [3] Rajagopal I, Koushik K, Suman B. Low coordination Topologies for Redundancy in Sensor Networks[C]//Proceedings of the 6<sup>th</sup> ACM International Symposium on Mobile ad Hoc Networking and Computing, ACM,Urbana-Champaign, IL, USA, 2005.
- [4] Jia X, Kim D, Makki S, et al. Power Assignment for K-connectivity in Wireless Ad Hoc Networks[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2005, 9: 213- 222.
- [5] Bai X, Kumar S, Yun Z, et al. Deploying Wireless Sensors to Achieve both Coverage and Connectivity[C]//Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (ACM MobiHoc), Florence,Italy, 2006.
- [6] Honghai Z, Jennifer H. On Deriving the Upper Bound of A-lifetime for Large Sensor Networks[C]//Proceedings of the 5<sup>th</sup> ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, ACM, Roppongi Hills, Tokyo, Japan, 2004.
- [7] 潘晏涛, 彭伟, 卢锡城. 求解传感器网络最大生存时间的最大流算法[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(3).
- [8] XBOW Mote Specifications[EB]. <http://www.xbow.com>.