

## 基于准格型策略的无线传感网协作覆盖算法

刘志 裘正定

(北京交通大学信息科学研究所 北京 100044)

**摘要:** 该文提出了一种基于准格型策略的无线传感网协作覆盖 QGCC(Quasi-Grid based Cooperative Coverage) 算法, 通过在随机分布节点中构造准格型结构并结合协作感测模型, 减少活动节点数量, 延长覆盖周期。QGCC 设计了低复杂度的分布式虚拟网格确定方法及能量高效的节点调度策略, 定义了不规则度指标以分析网络的不规则程度对覆盖性能的影响。仿真实验表明, 相比于参照算法, QGCC 能够较大幅度地减少活动节点的数量, 大幅延长网络的覆盖周期; 此外, 该算法的覆盖周期和节点密度具有近似线性的关系, 且比参考算法具有更大的斜率, 说明其对冗余节点具有更高的利用效率。

**关键词:** 无线传感器网络; 准格型策略; 虚拟网格; 协作覆盖

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2010)10-2531-05

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2009.01420

## Quasi-grid Based Cooperative Coverage Algorithm for Wireless Sensor Networks

Liu Zhi Qiu Zheng-ding

(Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A new algorithm named QGCC (Quasi-Grid based Cooperative Coverage) is proposed in this paper, which employs virtual quasi-grid structure and cooperative sensing model to reduce the number of active nodes, and to prolong the coverage lifetime. In QGCC, a low-complexity distributed method is designed to determine the vertexes of grid, and an energy efficient node scheduling scheme is presented. QGCC also introduces a new metric named irregularity to analyze the impact of the deviation between keeper and its ideal vertex. Simulations show that, compared to the reference algorithms, QGCC can efficiently reduce the number of active nodes, and prolong the coverage lifetime. Another notable feature of QGCC is that, the coverage lifetime is approximate linear related to the number of nodes, which means this algorithm can make good use of redundant nodes.

**Key words:** Wireless Sensor Networks (WSN); Quasi-grid strategy; Virtual grid; Cooperative coverage

### 1 引言

覆盖性能是评价无线传感网 WSN(Wireless Sensor Networks)服务质量的一项重要指标。由于能量受限, 延长网络的生命周期成为覆盖问题研究的一项关键内容。为此, 需要在覆盖算法中有效控制活动节点的拓扑分布, 并充分利用冗余节点。

当使用节点来覆盖区域时, 格型拓扑(grid)比随机分布具有明显的优势<sup>[1-4]</sup>。覆盖同样的区域, 当节点的位置服从三角形格型分布时, 所需的节点数最少<sup>[1]</sup>。由于大多数情况下, WSN 节点的初始分布是随机的, 因此, 有很多覆盖算法研究如何从随机分布的节点中构造类似格型的结构<sup>[4-9]</sup>: 文献[4]指出, 在一定的条件下, 从随机分布网络中构造出的

准规则网络等价于在规则格型网络中因节点位置的误差而形成的准格型网络。OGDC(Optimal Geographical Density Control)<sup>[5]</sup>在激活节点时, 要求将要激活的节点与已激活节点中的某两个能最大程度地构成近似正三角形, 其激活过程是串行的。文献[6,7]中用正三角形格型和 slice/lens 结构对节点的激活调度进行约束, 该方法的缺点是 slice 划分过程需要由 sink 节点集中进行。文献[8]试图通过设置两种信标帧传播距离的方式来促使活动节点的拓扑呈近似六边形分布。受环境、信号传播特性等因素的影响, 这种方法难以有效控制拓扑。

从延长覆盖周期的角度出发, 本文提出了基于准格型策略的协作覆盖 QGCC(Quasi-Grid based Cooperative Coverage)算法, 以全局的正三角形虚拟网格来约束活动节点拓扑, 设计了分布式的网格计算方法及节点并行激活轮换策略; 并引入了不规则度指标以分析准格型网的不规则程度对覆盖性能

2009-11-02 收到, 2010-02-15 改回

国家 973 规划基金(2007CB307100)资助课题

通信作者: 刘志 lzliu@126.com

的影响。考虑到绝大多数 WSN 监测的物理信号(如声、光、电磁等)均是以类似广播的形式向外传播的,相邻节点可以协作来提高覆盖效率,因此,QGCC 算法中进一步结合了协作感测模型。本文假设每个节点知道自己的坐标。

## 2 准格型拓扑下的协作覆盖算法

### 2.1 协作覆盖基本模型

本文采用文献[9]中使用的感测模型。对于任意传感器节点  $i$ , 给定区域中任一目标点  $P$ ,  $i$  对点  $P$  的覆盖强度定义为  $i$  感测到的  $P$  点事件的信号强度  $I(s_i, P)$  为

$$I(s_i, P) = \begin{cases} 1/[1 + \alpha d(s_i, P)]^\beta, & d(s_i, P) \leq R_c \\ 0, & d(s_i, P) > R_c \end{cases} \quad (1)$$

其中  $d$  表示距离,  $\alpha$ ,  $\beta$  为与物理特性相关的参数。 $R_c$  为协作感测模型下节点的最大感测半径。当点  $P$  位于多个传感器节点的共同感测区域时, 多个节点对目标  $P$  的协作覆盖强度 CCI(Cooperative Coverage Intensity)定义为

$$CCI(P) = \sum_{i=1}^n I(s_i, P) \quad (2)$$

给定覆盖门限  $\theta$ , 点  $P$  是否被覆盖采用下式判决。

$$C(P) = \begin{cases} 1, & CCI(P) \geq \theta \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

对于整个网络区域  $A$ , 其被 WSN 完全覆盖的定义为:  $\forall P \in A$ , 都有  $C(P) = 1$ 。

### 2.2 准格型网络的定义及性质

**定义 1** (守护节点集, 准格型网络): 将区域按照正三角形格型进行分割, 得到顶点集为  $Z = \{z_i\}$ , 区域中节点的分布服从 2 维泊松点过程, 节点集为  $V = \{v_i\}$ 。若子集  $S \subset V$ ,  $S = \{s_i\}$ , 使得  $\forall z_i \in Z$ ,  $\forall v_j \in V \setminus S$ ,  $\exists s_i \in S$ , 都有  $d(s_i, z_i) < d(v_j, z_i)$ , 则称集合  $S$  为顶点集  $Z$  的守护节点集, 而把由节点集  $S$  构成的网络称为准格型网络。

为了分析准格型网络的规则性和覆盖性能, 本文定义了不规则度的概念。

**定义 2** (不规则度): 由于节点分布的随机性, 守护节点  $s_m$  的位置与对应的顶点  $z_m$  间存在偏差, 定义区域中所有这种偏差的最大值, 称为该准格型网络的不规则度。

**性质** 准规则网络的不规则度越大, 区域的协作覆盖强度越小。

根据不规则度的定义可知, 对于每一个顶点, 其守护节点的位置可以看作在以顶点为圆心、半径为不规则度的圆平面内服从均匀随机分布。

设准格型网络的不规则度为  $r$ , 任取区域中的一个  $\triangle ABC$ , 研究其内的一点  $K(x_k, y_k)$  的覆盖强度的期望(如图 1)。由式(1)知, 覆盖强度是随距离而快速衰减的。因此, 正三角形内部的覆盖强度只与距离它比较近的那些守护节点相关。不失一般性, 这里只考虑与  $\triangle ABC$  直接相邻的另外 3 个守护节点。 $K$  点的协作覆盖强度的期望可表述为

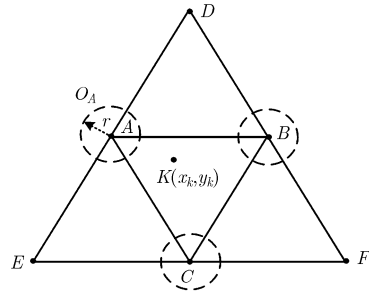


图 1 6 个守护节点影响下格内的协作覆盖强度

$$E[CCI(K)] = \sum_{j=A}^F E[I(s_j, K)] \quad (4)$$

对顶点  $z_A$  而言, 其守护节点  $s_A$  对  $K$  点的覆盖强度的期望为

$$E(I(s_A, K)) = \iint_{O_A} p(x, y) I(s_A, K) dx dy \quad (5)$$

其中  $I(s_A, K)$  由式(1)可得,  $p(x, y)$  为  $s_A$  分布的概率密度为

$$p(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi r^2}, & (x, y) \text{ 在圆 } O_A \text{ 内} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

故有

$$E(I(s_A, K)) = \frac{1}{\pi r^2} \iint_{O_A} I(s_A, K) dx dy$$

同理, 可以求得其他 5 个守护节点对  $K$  点的覆盖强度。可见, 正三角形中一个点的协作覆盖强度的期望只与该点在三角形中的位置及不规则度  $r$  相关; 对于同一个位置而言, 不规则度  $r$  越大, 覆盖强度的期望越小。因此, 为了保证网络的覆盖性能, 在网络运行过程中, 要防止其不规则度不断扩大。这个问题将在 2.5 节进行讨论。

准格型协作覆盖算法的基本思想是: 以 sink 为原点对区域进行虚拟的格型划分, 并将划分信息广播到所有节点; 节点利用广播信息独立地确定距离自己最近的顶点, 采用退避式竞争激活, 构成准格型网络; 在协作覆盖模式下, 使用补充激活策略覆盖不满足覆盖门限的区域; 为了保持网络的性能, 利用网格平移的方式实现节点轮换。

### 2.3 网格顶点计算方法与退避式竞争策略

QGCC 算法的一个关键问题是虚拟网格顶点位置的计算。一种方式是由 sink 进行集中式计算, 再广播出去。这种方式扩展性不好, 且会大大增加广播的数据量。由于顶点分布的规律性, sink 的广播消息 (Parameter\_Set\_Msg) 中只需包含它的位置  $P_0(x_0, y_0)$ , 正三角形边长  $l$ , 以及第 1 激活节点相对于自己的角度  $\varphi$ , 则整个区域的划分结果便唯一确定。利用这些参数, 节点可以独立计算出距离自己最近的顶点, 其方法如下:

(1) 节点根据接收的参数, 利用坐标旋转原理, 计算自己在以  $P_0$  为原点, 以角度  $\varphi$  为  $x$  轴的坐标系下的新坐标。假设节点  $v_i$  的坐标为  $(x_i, y_i)$ , 则在新坐标系下的坐标  $(x'_i, y'_i)$  为

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

坐标平移与旋转主要是为了简化后续过程。

(2) 在新坐标下, 节点确定距离自己最近的顶点。由于在正三角形网格下, 所有顶点都可以看成两个直线簇  $\Omega_1, \Omega_2$  中某两条直线的交点 (图 2), 因此这个问题可以转化为从两个直线簇分别找出一条距离  $v_i$  最近的直线  $L_{1j_1}, L_{2j_2}$ , 再求它们的交点。

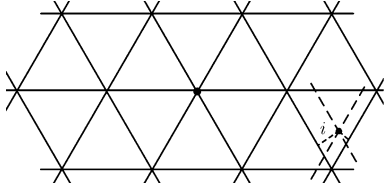


图 2 节点计算离自己最近的顶点

$$\Omega_1 : \{L_{1j} \mid y = \sqrt{3}(x - j_1 \cdot l), j_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots\} \quad (8)$$

$$\Omega_2 : \{L_{2j} \mid y = -\sqrt{3}(x - j_2 \cdot l), j_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots\} \quad (9)$$

为了快速找出这两条直线, 本文采用如下方式: 节点  $v_i$  先计算通过坐标  $(x'_i, y'_i)$ 、斜率分别为  $\sqrt{3}, -\sqrt{3}$  的两条直线  $L'_{1i}, L'_{2i}$ :

$$L'_{1i} : y = \sqrt{3}(x - x'_i) + y'_i, L'_{2i} : y = -\sqrt{3}(x - x'_i) + y'_i \quad (10)$$

得到两者在  $x$  轴上的截距  $x'_i - y'_i/\sqrt{3}, x'_i + y'_i/\sqrt{3}$ ;

再求得满足下述优化问题的  $j_1, j_2$ :

$$\left. \begin{aligned} & \min_{j_1} \left[ (x'_i - y'_i/\sqrt{3}) - j_1 \cdot l \right] \\ & \min_{j_2} \left[ (x'_i + y'_i/\sqrt{3}) - j_2 \cdot l \right] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

则直线  $L_{1j_1}, L_{2j_2}$  为所求。

退避式竞争的原理为: 每一轮初始时, 所有节点的状态为 GRIDKEEPER\_CANDIDATE。节点  $v_i$  找到距离自己最近的顶点 (假设为  $z_m$ ) 后, 计算与

$z_m$  的欧氏距离  $d_i$ , 并根据剩余能量设置竞争定时器  $T_1$ 。如果节点  $v_i$  的定时器  $T_1$  触发, 说明它成功竞争为顶点  $z_m$  的守护节点 ( $s_m$ )。它将自己的状态设置为 ACTIVE, 向外广播 GridKeeper\_Msg 消息, 内容包括:  $z_m$  和节点  $v_i$  的坐标。邻居节点  $v_j$  接收到该消息后, 如果发现自己与发送节点竞争的是同一顶点, 则放弃竞争, 取消定时器  $T_1$ , 设置定时器  $T_2$ , 进入 ACTIVE\_CANDIDATE 状态。

节点  $v_i$  的定时器  $T_1$  根据式 (12) 进行设置为

$$T_1 = (d_i/l)^2 + c(E_{\max}/E_i) + u \quad (12)$$

式中  $c$  为常数, 用于调整能量和距离在节点激活决策中所占的权重;  $u$  为在  $(0, 0.1)$  上服从均匀分布的随机量;  $E_{\max}, E_i$  分别是节点  $v_i$  的最大能量和剩余能量。

### 2.4 补充激活策略

理想情况下, 只需激活守护节点, 便可以使区域完全满足覆盖强度的要求。但实际中, 由于节点的密度有限, 守护节点的位置和顶点间存在偏差, 造成区域中存在不满足覆盖强度的点。因此, 需要补充激活一部分节点, 以保证整个区域的覆盖质量。

节点  $v_j$  在竞争守护节点失败后, 它会进入 ACTIVE\_CANDIDATE 状态, 并设置定时器  $T_2$ 。当  $T_2$  触发时, 如果  $v_j$  的监测区域仍然没有被完全覆盖, 则  $v_j$  进入 ACTIVE 状态, 并向外发送 Active\_Msg 消息。否则, 它将转入 SLEEP 状态, 直到下一轮开始。  $T_2$  的设置方式为

$$T_2 = (l/(s_1 \cdot d_{ji}))^2 + c(E_{\max}/E_i) + u \quad (13)$$

为了使 ACTIVE 节点能尽量均匀分布, 在补充节点的激活过程中, 本文进一步设计了邻近节点排斥技术。当节点处于 ACTIVE\_CANDIDATE 状态时, 每接收到一个节点  $v_k$  的激活消息 (Active\_Msg 或 GridKeeper\_Msg), 如果该节点与自己的距离小于门限  $d_{th}$ , 则它会受到激活节点  $v_k$  的斥力, 延迟自己的激活时间为

$$T_2 \leftarrow T_2 + \left( \frac{l}{s_2 \cdot d_{jk}} \right)^2 \quad (14)$$

延迟  $T_2$  是为了通过推迟与活动节点距离太近的节点的激活时间, 尽可能使得活动节点相互远离, 从而减少覆盖区域的重叠。这个过程可以看作先激活节点对即将激活节点的排斥作用。上述两式中,  $c, u$  的含义同前;  $s_1, s_2$  为退避时间系数, 用于控制节点延迟的幅度。

由上面的激活过程可以看出, 虚拟网格中不同顶点邻域内的节点可以并行完成激活决策, 缩短了激活所需的时间; 同时, 节点激活与否的竞争范围主要在一个顶点的邻域内, 算法无需全局信息。由

于采用退避式的竞争策略,在每一轮中,一个节点如果成功激活,则向外发送一条消息;如果节点选择睡眠,则无需发送任何消息,可见算法的通信复杂度为 $\Theta(M)$ , $M$ 为活动节点数。每个节点在进行激活与否的决策时,只考虑来自邻居节点的信息,且每个邻居至多考虑一次,其计算复杂度为 $\Theta(n)$ , $n$ 为邻居节点数。

### 2.5 节点轮换策略

节点工作一段时间后,其能量会逐渐下降,并可能死亡。因此,需要在一定的时候进行活动节点轮换,保证覆盖质量。

节点轮换策略中,典型的思路是让每个虚拟顶点附近的节点根据他们与顶点的距离重新进行竞争。在准格型策略下,这种方法会使距离虚拟顶点近的节点很快死亡,导致准格型网络的不规则度不断增大,恶化网络的性能(性质 1)。为了克服这个问题,本文设计了原点主导下的网格平移策略:将原点的位置 $P_0(x_0, y_0)$ 平移一个小的距离 $\Delta l$ 。由前述网格顶点计算过程可知,原点的平移可以造成所有顶点的位置均整体平移 $\Delta l$ 的效果,从而实现网格的平移。如图 3 所示为 16 次平移模式下的原点位置轨迹。

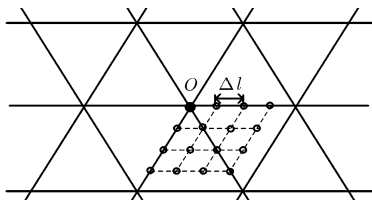


图 3 原点在 16 均匀平移时的位置轨迹

## 3 实验仿真

仿真采用的传感器参数与文献[5]相同: $\alpha = 0.1$ ,  $\beta = 4$ ;覆盖周期定义为:网络由完全覆盖到覆盖率下降 1%所经历的时间。参照算法选择了 CCP<sup>[10]</sup>, OGDC<sup>[5]</sup>和 EECDC<sup>[9]</sup>。由于 QGCC 和 EECDC 使用覆盖门限 $\theta$ 表征覆盖,而 OGDC 和 CCP 采用的是布尔覆盖半径 $R_b$ 。为便于比较,仿真中对于协作覆盖算法中的覆盖门限 $\theta$ 和布尔感测模型下节点的覆盖半径 $R_b$ 按进行等价换算,仿真中所用的几组数据参见表 1。

表 1 仿真所用的覆盖门限与感测半径

$\theta$ (归一化强度)	$R_b$ (m)
1/16	10
1/10	7.78
1/5	4.95

### 3.1 活动节点数与覆盖周期

图 4, 图 5 显示了覆盖门限 $\theta = 1/16$ (感测半径 $R_b = 10$  m)的情形下,当节点总数从 200-900 变化时,4 种算法的活动节点数与覆盖周期。如图所示,当节点数为 200 时,QGCC 的活动节点数比 EECDC 少 32%,覆盖周期长 28%;当节点数为 900 时,活动节点数比 EECDC 少 50%,覆盖周期长 78%。从两图中还可以看到,OGDC 和 EECDC 的活动节点数随节点总数的增加而增加,而 QGCC 的活动节点数则比较稳定。其原因是,OGDC 和 EECDC 的算法中,对激活定时器的设置没有考虑由于排队、邻近节点发送冲突等因素的所造成的通信延迟,由于这种延迟会造成节点在进行激活决策时不能获得完整的活动邻居信息,从而使得节点的激活概率增加;且随着节点密度的增大,这种延迟还会进一步增加,恶化算法性能。而在 QGCC 算法中,由于采用退避式竞争及邻近节点排斥技术,使得邻居节点间的发送冲突大大减少,因此活动节点数随节点总数的变化不大。(关于 OGDC 的类似结论可参见[11]。)

### 3.2 覆盖门限的影响

QGCC 和 EECDC 均采用了协作覆盖的方式,这里进一步比较两种算法在覆盖门限变化时的活动节点数与覆盖周期。由图 6 可见,随着覆盖门限的提高,两个算法的活动节点数均逐渐增加,但两者间的差别逐渐减少。这是因为,当覆盖门限提高后,相当于单个节点的覆盖范围减少,在同样的节点部署下,等价于冗余节点数量减少。因此,QGCC 算法的优化空间减小,两个算法的性能逐渐靠近。3 种门限情形下的覆盖周期表现如图 7 所示,从中可见,覆盖周期的曲线也表现出了和图 6 相似的规律。图 7 还说明,在 3 种不同的门限下,两个算法的曲线随节点总数的变化均表现了较好的线性关系,说明两者都能很好地利用冗余节点来延长网络的覆盖周期。但 QGCC 算法的斜率更大,说明其对冗余节点的利用效率更高。

### 3.3 算法的初始化时间

这里将从一轮开始到所有节点完成决策所需的时间定义为算法的初始化时间。在这段时间里,网络不能保证需要的覆盖性能,因此,初始化时间应该越短越好。4 种算法的初始化时间如表 2 所示(其中 CCP 项指的是算法开始阶段所用的时间):

可以看出,OGDC 和 EECDC 算法每轮的初始化时间最短,平均不到 1 s;而本文提出的 QGCC 算法,其初始化时间平均为 1.411 s,比前两者略大,但远小于 CCP。一方面,由于 QGCC 算法使用了邻近节点排斥技术,一个节点的激活会使得其邻近

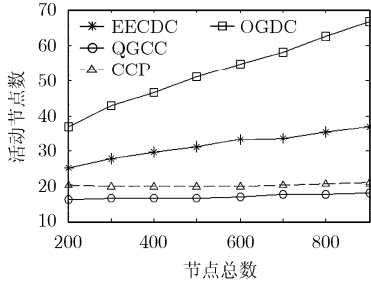


图 4 覆盖门限为 1/16 时的活动节点数与节点总数的关系

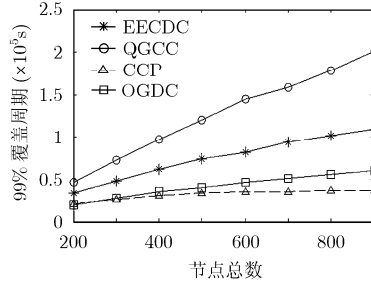


图 5 覆盖门限为 1/16 时的覆盖周期与节点总数的关系

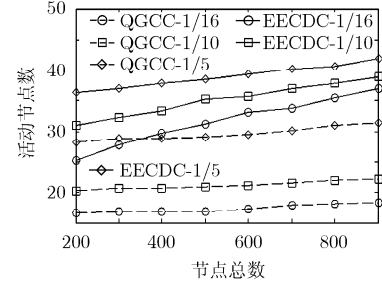


图 6 激活节点数与覆盖门限的关系

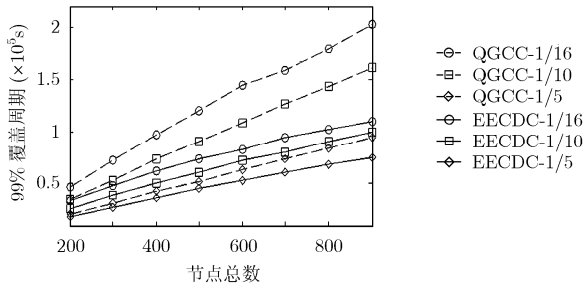


图 7 99%覆盖周期与覆盖门限的关系

表 2 各算法的初始化时间

算法名称	CCP	QGCC	OGDC	EECD
初始化时间(s)	123.2	1.411	0.451	0.464

的节点推迟进行决策的时间, 使得算法的初始化时间变长; 另一方面, 由于算法中不同顶点邻域的节点是并行进行决策的, 因此初始化的时间随网络规模的变化不大; 另外, 算法中还采用了退避系数  $s_2$  来调节每次退避的步长。因此, 算法的初始化时间能够保持在一个合理的范围内。

#### 4 结束语

最大化无线传感网络的生命周期是 WSN 覆盖算法研究中的一项重要内容。本文在分析现有算法的基础上, 提出了 QGCC 算法, 设计了分布式的网格顶点计算方法, 定义了不规则度指标来定性分析不规则程度对覆盖性能的影响, 设计了并行的节点激活轮换策略。仿真实验表明, QGCC 算法能够大大减少覆盖所需的活跃节点数, 延长网络的覆盖周期; 且算法的覆盖周期与节点总数呈近似线性的关系, 说明它能够高效的利用区域中的冗余节点。

#### 参 考 文 献

[1] Kershner R. The number of circles covering a set[J]. *American Journal of Mathematics*, 1939, 61(3): 665-671.  
 [2] Wang Y C, Hu C C, and Tseng Y C. Efficient placement and dispatch of sensors in a wireless sensor network[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(2): 262-274.

[3] Bai X L, Yun Z Q, and Xuan D, et al. Deploying four-connectivity and full-coverage wireless sensor networks[C]. *IEEE INFOCOM 2008*, Phoenix AZ, USA, Apr. 15-17, 2008: 906-914.  
 [4] Liu X W and Haenggi M. Toward quasiregular sensor networks: topology control algorithms for improved energy efficiency[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2006, 17(9): 975-986.  
 [5] Zhang H H, Hou J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. *Ad hoc and Sensor Networks*, 2005, 1(1/2): 89-124.  
 [6] Ammari H M and Das S K. Joint k-coverage, duty-cycling, and geographic forwarding in wireless sensor networks[C]. *IEEE Symposium on Computers and Communications*, Sousse, Tunisia, Jul. 5-8, 2009: 487-492.  
 [7] Ammari H M and Das S K. Clustering-based minimum energy wireless m-connected k-covered sensor networks[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2008, 4913: 1-16.  
 [8] Jiang J R and Sung T M. Energy-efficient coverage and connectivity maintenance for wireless sensor networks[J]. *Journal of Networks*, 2009, 4(6): 403-410.  
 [9] Yang B W and Yu H Y. An energy efficient cooperative density control algorithm in large wireless sensor networks[C]. *Wireless Communications and Networking Conference 2007*, Hong Kong, China, Mar. 11-15, 2007: 4105-4109.  
 [10] Xing G L, Wang X R, and Zhang Y F, et al. Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 2005, 1(1): 36-72.  
 [11] Olveczky P C and Thorvaldsen S. Formal modeling and analysis of wireless sensor network algorithms in real-time maude[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2007, 4468: 122-140.

刘 志: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络。  
 裘正定: 男, 1944 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号与信息处理、多媒体通信及 IP 网络技术。