

# WSN 中一种规则区域最优覆盖与连通算法研究

孙泽宇<sup>1</sup> 邢萧飞<sup>2</sup>

(洛阳理工学院计算机与信息工程系 洛阳 471003)<sup>1</sup> (中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)<sup>2</sup>

**摘要** 在满足一定覆盖条件下,使用最少传感器节点完成对区域的覆盖与连通已成为无线传感器网络研究的一个具有挑战性的核心问题之一。为此,提出了一种规则区域最优覆盖与连通算法,该算法利用双重正方形将目标节点规划到内正方形区域内,通过传感器节点与目标节点求出关联模型,对于整个覆盖区域则利用概率期望值求出满足覆盖条件的最少传感器节点数,同时给出了外正方形区域边缘节点的连通概率模型及推理过程。实验结果表明,该算法的理论值与模拟结果之间的误差小于 5%,验证了该算法是有效的,降低了网络资源的配置,可以更好地评估网络覆盖和连通性能。

**关键词** 无线传感器网络,覆盖,连通,算法,节点

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Regular Region Algorithm Optimal Coverage and Connectivity in WSN

SUN Ze-yu<sup>1</sup> XING Xiao-fei<sup>2</sup>

(Computer and Information Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471003, China)<sup>1</sup>

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)<sup>2</sup>

**Abstract** It is one of the challenging core issues in the research of WSN that coverage and connectivity can be realized by using the least sensor nodes in certain coverage conditions. An algorithm of optimal coverage in the regular region and connectivity was put forward. Target nodes can be distributed into the range of square by the double square, then association mould can be worked out by sensor nodes and target nodes. By the way, in case of the whole coverage region, the least sensor nodes under coverage can be figured out by using expectation value of probability. At last, connectivity probability mould of fringe nodes within the range of outer square and inference procedures were analyzed. The experiment shows that the error between the theoretical value and simulated result is below 5%. The validity of this algorithm is thus verified. The distribution of network resources is decreased so that network coverage and connectivity can be better evaluated.

**Keywords** Wireless sensor networks(WSN), Coverage, Connectivity, Algorithm, Nodes

### 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network WSN)是由大量廉价具有感知能力、计算能力和通信能力的传感器节点通过自组织所形成的网络,广泛应用在国防、医疗、勘探以及环境监测等各种科学领域里。

覆盖与连接问题已成为无线传感器网络所研究的基本问题之一。传感器节点的部署一般分为确定性部署和随机部署两种。对于确定性部署,它主要研究在二维平面和三维空间上的最优节点部署策略,以人为的方式实现不同网络覆盖度和连通度的要求<sup>[1]</sup>。在有大量传感器节点或网络部署地域不适合人工部署时,通常采用随机的方式来部署网络。另外,绝大多数应用并不要求传感器网络一直保持完全覆盖状态,只要传感器网络中的工作节点对监测区域能够维持一个合理的

覆盖比,就可以完成一定的工作。因此,随机部署的无线传感器网络的覆盖和连通问题非常重要。如何在满足一定覆盖条件下,使用最少传感器节点完成对指定区域的覆盖与连通是一项具有挑战性的课题。基于上述思想,其解决 3 个方面的问题:(1)将所监测的目标节点规划到一个正方形区域内,建立传感器节点与目标节点关联模型,让关注的目标处于多个传感器节点的感应范围之内;(2)对于整个监测区域边长、节点感应半径以及所需的覆盖率,利用概率期望值求出所满足覆盖条件下的最少传感器节点数;(3)在确保调度节点状态平衡和满足网络覆盖质量前提下,考虑到边缘节点存在的实际情况给出连通概率模型,从而达到了在监测目标区域范围内所计算的结果更为精确的目的。通过覆盖区域边长的计算与推理,给出了不同覆盖率和连通率所需部署节点的数量值。

到稿日期:2010-06-14 返修日期:2010-09-06 本文受河南省科技厅攻关基金(102300410140),河南省教育厅自然科学基金(2010B510016),湖南省杰出青年自然科学基金项目基金(07JJ1010)资助。

孙泽宇(1977-),男,硕士,讲师,主要研究方向为分布式计算、WSN 覆盖与连通,E-mail:llylg\_sun1977@163.com;邢萧飞(1979-),男,博士,主要研究方向为 WSN 覆盖与连通、网络计算。

## 2 相关工作

近几年,许多国内外专家学者对无线传感器网络的覆盖与连通问题提出了许多理论和解决方法。Neelofer Tambili 和 Mohamed Younis 在文献[2]所提出的可移动传感器网络中感知覆盖与恢复连通研究,其思想是把覆盖区域和连通问题作为整体进行研究,利用感知覆盖与恢复连通算法(Coverage Conscious connectivity Restoration C<sup>3</sup>R)从失效节点中恢复一个或多个失效邻居节点,使得每个邻居节点重新定位并逐个代替失效节点恢复到初始位置,进而形成了恢复性连通同时也监测到了覆盖区域所有初始位置的目标节点。文献[3]中 Chi-fu Huang 和 Yu-Chee Tseng 提出节点边缘覆盖算法,用于判定是否被  $k$  个传感器节点覆盖。文献[4]中 Guo liang Xing 等人提出 Co-Grid 算法,其思想是将目标区域划分为边界重叠区域,利用感知概率模型预测机制在各单元内选择节点数目最少的工作配置方式。文献[5]中 Y. Jin 等人在节点随机部署情况下,提出了一个节点位置独立的路由算法(ECCRA),并给出了实现网络一定覆盖条件下的覆盖率的求解公式。以上各种算法在很大程度上都可以完成覆盖与连通,但求解过程过于复杂。另外,随着传感器节点数的增加和覆盖区域的变化,也会使得算法的复杂度随之加大,进而降低了计算效率。文献[6]中 H. Zhang 等人提出一个凸区域的活跃节点集工作时,节点的通信半径大于或等于其两倍感应半径时,才能保证网络完全连通的充分条件。文献[7]中 Xing G 等人所提出的覆盖配置协议(CCP),则是利用节点的局部位置信息进行分布式的节点职能合格性判断,当通信半径大于或等于感应半径 2 倍时,如果网络  $k$ -覆盖给定凸区域,则在该区域中网络是  $k$ -度连通,从而将其协议推广到可以满足多度覆盖要求。根据文献[6]和文献[7]的基本思想,提出了一种双重正方形区域,以建立传感器节点与目标节点关联模型,利用概率期望值求出使用最少部署节点完成对目标区域的覆盖与连通,最后给出有无边缘节点影响条件下的覆盖与连通需要部署节点的数量关系。

## 3 问题定义与网络模型

### 3.1 问题定义

本文所研究的覆盖与连通是基于区域局部定位算法并设有如下基本假设:1)每个节点的覆盖半径和通信半径均呈现圆盘形,且节点的移动是同步进行的;2)通过某种定位算法获取自身节点的具体位置信息;3)所有传感器节点随机均匀部署在边长为  $l$  的正方形监测区域  $\Omega$  内,考虑部署区域的边界因素。

**定义 1** 设二维平面  $E$ ,节点  $s_i$  的坐标  $(x_i, y_i)$ ,目标  $t_k$  的坐标  $(x_k, y_k)$ ,节点  $s_i$  和  $t_k$  之间的欧拉距离小于  $s_i$  感知半径  $r_s$ ,即:  $ES_i = \{t_k | t_k \in E^2, D(s_i, t_k) \leq r_s\}$ ,则称点  $t_k$  被  $s_i$  所覆盖。

**定义 2** 给定目标集合  $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_k\}$  和传感器节点集合  $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ ,在某个时隙中,如果目标集  $T$  中任意一个目标  $t_k$  至少被节点集合  $V$  内 1 个节点所覆盖,则称目标集合  $T$  全覆盖<sup>[8]</sup>。

**定义 3** 设节点  $s_i, s_j$  它们所覆盖的目标区域为  $C_i$  和

$C_j$ ,且  $C_i \cap C_j \neq \emptyset$ ,则称节点  $s_i, s_j$  覆盖关联<sup>[9]</sup>。

**定义 4** 无线传感器网络以无向通信图  $G=(V, E)$  作为模型,这里  $V$  是传感器节点集合,且  $|V|=n$ ;当且仅当节点  $p$  和节点  $q$  在相互的通信范围内,则称在  $E$  内存在一个无向边  $(p, q)$ ;节点  $p$  的邻居数量称为节点  $p$  的度,表示为  $d(p)$ ,即它可以与其它节点进行通信的节点的数量;通信图  $G$  的最小节点度表示为  $d_{\min}(G) = \min_{p \in V} \{d(p)\}$ 。

**定义 5** 当通信图  $G$  里的任一对节点都存在一条相通的路径时,称这个网络是连通的,否则就是不连通的。对于一个连通的网络来说,其所有的节点都能够经过一跳或多跳的方式进行通信。反之,在一个不连通的网内会存在一些孤立的子网络,其节点形成一些相互连通的子网络,而各个子网之间并不能相互通信。

### 3.2 参数建立与变量说明

参数建立与变量说明如表 1 所列。

表 1 参数建立与变量说明

参数	变量说明
$l$	正方形覆盖区域的边长
$\Omega$	网络面积,即 $\Omega=l^2$
$n$	随机部署网络节点数量
$r_s$	传感器节点感应半径, $r_s < l$
$r_t$	传感器节点通信半径, $r_t < l$
$E(C)$	传感器节点覆盖面积的期望值
$P(S_n)$	随机部署 $n$ 个节点得到的网络期望覆盖率
$P(C_n)$	随机部署 $n$ 个节点得到的网络连通概率

### 3.3 网络模型

一般情况下,覆盖度直接反映目标被关注的程度,引起关注的目标节点区域具有较高覆盖度<sup>[9,10]</sup>,同时要考虑传感器节点  $p$  位于区域 II 时期望值与覆盖面积之间函数关系,如图 1 所示。

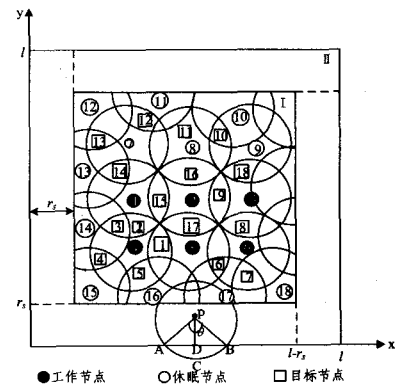


图 1 目标区域关联覆盖与节点  $p$  位于区域 II 时示意图

表 2 传感器节点与目标节点的关联关系

关联目标	关联节点	关联目标	关联节点	关联目标	关联节点
1	4,5	8	3,6	16	2,8
2	1,4	9	2,3	17	2,5
3	1,4,14	10	8,9,10	18	3,9
4	4,14,15	12	7,11	2,3	1,4
5	4,16	13	7,12,13	3,4	4,14
6	5,6,17	14	1,7,13	6,7	6,17
7	6,17,18	15	1,2	13,14	7,13

图 1 给出了传感器工作节点、休眠节点和目标节点之间的关联模型以及传感器节点  $p$  位于覆盖区域 II 时的模型示意图。传感器节点 1,2,3,4,5,6 处于工作状态,其余传感器

节点处于休眠状态,通过感知范围获取目标节点的信息,设频繁项值为2,通过节点覆盖区域与目标节点之间的关联属性<sup>[9]</sup>划分传感器节点与目标节点的关联关系,如表2所列。

## 4 网络属性计算

### 4.1 网络覆盖

现以图1为例进行分析,将正方形区域 $l$ 划分成区域I和区域II两个部分。在监测区域内随机部署节点,并将这些节点构造在一个有限集合 $S$ 中,每个节点的覆盖面积为 $E(C)$ ,这样每个节点的覆盖概率为 $E(C)/\Omega n$ ,当节点集合为空时,部署的 $n$ 个节点得到网络覆盖率为 $P(S) = (1 - E(C)/\Omega)^n$ 这样就得到了集合 $S$ 不为空集的情况下的网络节点覆盖概率值:

$$P(S) = 1 - (1 - E(C)/\Omega)^n \quad (1)$$

当节点数目 $n \rightarrow \infty$ 时, $\lim_{n \rightarrow \infty} E(P(S)) = 1$ ,这表明当节点数量足够大时,该覆盖区域被完全覆盖。在考虑到边界因素的情况下,求解节点覆盖面积与期望值,正方形区域被划分为区域I和区域II,因此根据概率中期望值的概念,就可以得到网络节点的覆盖的期望值:

$$E(C) = P(\Omega_I)E(C_{\Omega_I}) + P(\Omega_{II})E(C_{\Omega_{II}}) \quad (2)$$

式中, $P(\Omega_I)$ 和 $P(\Omega_{II})$ 分别表示节点被随机部署在区域I和区域II里的概率值; $E(C_{\Omega_I})$ 和 $E(C_{\Omega_{II}})$ 分别表示其相应的覆盖期望值。由于传感器节点的部署服从均匀分布函数,于是得到:

$$P(\Omega_I) = \frac{(l-2r_s)^2}{l^2}, P(\Omega_{II}) = \frac{4r_s(l-r_s)}{l^2} \quad (3)$$

假设节点 $p$ 位于区域I内时,它的覆盖范围被完全包含,则得到覆盖期望值是:

$$E(C_{\Omega_I}) = \pi r_s^2 \quad (4)$$

当节点 $p$ 位于区域II时,其面积应等于其感应圆周的面积减去弓形区域 $S_{ACBD}$ 的面积。 $A$ 和 $B$ 是节点 $p$ 的感应圆周和网络边界的交叉点,其夹角 $\theta$ 是节点 $p$ 和 $A$ 、 $B$ 两点所形成的圆心角,即 $\angle ApB = \theta$ ,其中夹角 $\theta = 2\arccos y/r_s$ 于是得到:

$$E(C_{\Omega_{II}}) = 4 \int_0^{l-r_s} \frac{1}{2} r_s^2 (2\pi - \theta + \sin\theta) dx \int_0^{r_s} \frac{1}{4(l-r_s)r_s} dy \\ = \frac{r_s}{2(l-r_s)} \int_0^{l-r_s} (2\pi - \theta + \sin\theta) dx \int_0^{r_s} dy \quad (5)$$

**定理1** 假设给定感应半径为 $r_s$ 的节点均匀分布在边长为 $l$ 的正方形区域,在考虑边界因素的情况下,节点的覆盖期望值为:

$$E(C) = \left(\frac{r_s}{l}\right)^2 [\pi(l-2r_s)^2 + 2(l-r_s)(2\pi r_s + \frac{\pi}{2} + r_s)] \quad (6)$$

证明:由于传感器节点服从均匀分布函数,由式(2)可得覆盖的期望值为 $E(C) = P(\Omega_I)E(C_{\Omega_I}) + P(\Omega_{II})E(C_{\Omega_{II}})$ ,将式(3)、式(4)、式(5)代入到式(2)可得:

$$E(C) = P(\Omega_I)E(C_{\Omega_I}) + P(\Omega_{II})E(C_{\Omega_{II}}) \\ = \frac{1}{l^2} [\pi r_s^2 (l-2r_s)^2] + \frac{1}{l^2} [2r_s^2 \int_0^{l-r_s} (2\pi - \theta + \sin\theta) dx \int_0^{r_s} dy] \\ = \left(\frac{r_s}{l}\right)^2 [\pi(l-2r_s)^2 + 2(l-r_s)(2\pi r_s + \frac{\pi}{2} + r_s)]$$

**定理2** 给定边长为 $l$ 的正方形区域,节点感应半径是 $r_s$ 和较小参数 $\epsilon$ ,为了确保网络覆盖率的期望值不小于 $\epsilon$ ,则部署节点的数量至少是 $\ln(1-\epsilon)/\ln(1-\frac{E[C]}{\Omega})$ 。

证明:根据式(1),其应该满足 $P(S_n) = 1 - (1 - \frac{E[C]}{\Omega})^n \geq \epsilon$

,这样,就得到 $n \ln(1 - \frac{E[C]}{\Omega}) \leq \ln(1 - \epsilon)$ 。由于 $\ln(1 - \frac{E[C]}{\Omega}) < 0$ ,于是得到 $n \geq \ln(1 - \epsilon)/\ln(1 - \frac{E[C]}{\Omega})$ ,定理2证明完毕。

### 4.2 网络连通

由定义4可知 $d_{\min}(G) > 0$ 是通信图 $G$ 连通的必要条件,而不是充分条件。这样就得到 $P(C_n) \leq P(d_{\min}(G) > 0)$ ,在实际工作中,如无法得知节点密度的情况下, $P(C_n)$ 的下限具有更大的意义。假定网络通信图是从仅存在孤立节点的空图开始,增加节点通信半径 $r_t$ 的同时节点相应的通信链路数量也相应增加;当节点取得最小节点度 $k$ 时,这个图也成为一个 $k$ 连通图。如果在网络图中,移走任意 $k-1$ 个节点之后,这个图仍是连通的,则称其为 $k$ 连通图。因此,对于 $k=1$ 来说,只要它的通信半径 $r_t$ 足够大,使得 $d_{\min}(G) > 0$ ,那么这个网络就成为一个连通的图,即: $P(C_n) = P(d_{\min}(G) > 0)$ 。由于节点的分布是独立的,根据式(1)可得,对于任意节点的 $p$ 且 $(P \in G)$ 的节点连通率的极限值: $\lim_{n \rightarrow \infty} [1 - (1 - \frac{S_p}{\Omega})^n] = 1 - e^{-nS_p/\Omega}$ 根据文献[11]可得到 $G$ 的最小节点度值为:

$$P(d_{\min}(G) > 0) = \prod_{\forall p \in G} (1 - e^{-nS_p/\Omega}) \quad (7)$$

式中, $S_p$ 表示节点 $p$ 的有效通信面积,在不考虑边界因素影响时, $P(C_n) = P(d_{\min}(G) > 0) = (1 - e^{-n\pi r_t^2/l^2})^n$ 。实际上,当节点 $p$ 处于区域I时, $S_p$ 的值等于节点 $p$ 的通信圆面积;当节点 $p$ 处于区域II时, $S_p$ 的值等于其通信圆面积 $\pi r_t^2$ 减去弓形 $S_{ACBD}$ 的面积,于是得到:

$$P(d_{\min}(G) > 0) = (1 - e^{-n\pi r_t^2/l^2})^{4\pi r_t(l-r_t)/l^2} \times \prod_{\forall p \in \Omega_{II}} (1 - e^{-nS_p/\Omega}) \quad (8)$$

假设节点 $q$ 处于正方形部署区域的边界, $S_p > S_q$ ,此时 $S_q = \frac{1}{2} \pi r_t^2$ ,于是得到:

$$\prod_{\forall p \in \Omega_{II}} (1 - e^{-nS_p/\Omega}) > \prod_{\forall p \in \Omega_{II}} (1 - e^{-nS_q/\Omega}) \\ = (1 - e^{-\frac{1}{2}n\pi r_t^2/l^2})^{4\pi r_t(l-r_t)/l^2} \quad (9)$$

**定理3** 给定一个边长为 $l$ 的正方形区域,节点数量值为 $n$ ,节点的通信半径是 $r_t$ ,在考虑边界因素的情况下,网络的连通概率的下限如下:

$$P(C_n) > [(1 - e^{-n\pi r_t^2/l^2})(1 - e^{-\frac{1}{2}n\pi r_t^2/l^2})]^{4\pi r_t(l-r_t)/l^2}$$

证明:将式(7)、式(8)、式(9)代入 $P(C_n) = P(d_{\min}(G) > 0)$ 即可求证。给定 $l=100\text{m}$ , $r_t=40\text{m}$ ,根据定理3,在考虑边界区域的情况下,部署124个节点取得网络连通的概率大于99%,即网络达到了完全连通。

为了实现网络的不同覆盖与连通率,需要部署节点的数量关系如表3所列,在这个表上可以查找到相应的需要部署节点的数量值。当网络覆盖与连通率较大(一般是 $\geq 99\%$ )时,就可以认为网络是完全覆盖与连通的<sup>[12,13]</sup>;当网络连通

率  $P(C_n)$  等于网络覆盖率  $E(S_n)$  时,从表 3 中可以看出,取得与网络连通率相同值的网络覆盖率时,需要部署更多的节点。

表 3 不同网络规模下不同网络覆盖与连通所需部署节点数量

	l=100m		l=200m		l=300m	
	coverag	connect	coverag	connect	coverag	connect
10%	1	5	4	43	8	124
20%	2	6	7	50	16	132
30%	3	8	11	56	25	144
40%	4	10	15	61	36	152
50%	5	13	21	68	48	166
60%	7	17	27	75	64	184
70%	9	20	36	82	82	205
80%	11	25	48	91	110	242
90%	16	30	68	106	158	294
100%	33	43	136	151	314	350

## 5 性能评价

为更好地评估网络性能,利用 MATLAB6.5 进行了仿真实验。通过改变覆盖区域范围,实现不同网络覆盖与连通规模,进而更好地评估模型在不同规模下的性能,主要体现在实现网络不同覆盖与连通率的情况下所需要部署最少节点的数量,每次仿真实验均为 50 次的平均值。不同网络规模下的节点覆盖率变化曲线图,如图 2 所示。

图 2 显示了在不同网络规模下实现不同节点覆盖率所需要部署的传感器节点数量图。从图中可以看到,随着网络规模的扩大,要满足一定的网络覆盖率需求时,所需部署节点的数量也会随之增加,并且网络的覆盖率越高,需要部署节点的数量增加得越快,从而使所关注的目标节点实现完全覆盖。

图 3 显示了在不同网络规模下实现不同网络连通率所需要部署的传感器节点数量图。随着网络规模的扩大,若实现一定的网络连通率,需要部署节点的数量也会随之增加,当连通率较高时,需要部署节点的数量增加较快。

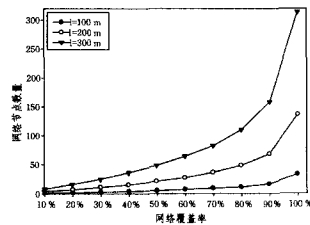


图 2 不同网络规模下的节点覆盖率变化曲线

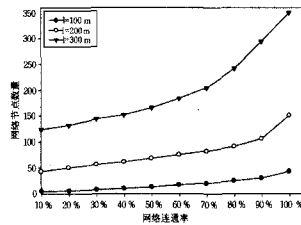


图 3 不同网络规模下节点连通率变化曲线

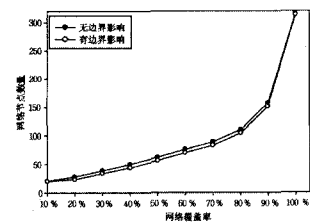


图 4 有无考虑边界影响下网络覆盖率变化曲线

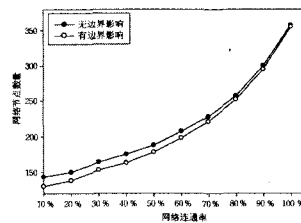


图 5 有无考虑边界影响下网络连通率变化曲线

在考虑了有无边界影响情况下的覆盖与连通率。图 4 和图 5 表示在有无边界影响条件下,相同网络规模  $l=300m$  覆

盖与连通率下需要部署的传感器节点的数量对比。从图中可以看到,随着网络覆盖与连通率的增大,需要节点的数量大幅度增加;当网络的覆盖与连通率增大时,对边界的影响逐渐变小,后趋于平衡状态。

图 4 和图 5 反映的是在有无考虑边界影响条件下,实现不同的覆盖与连通率需要部署节点的数量图。与考虑边界影响下相比,所部署节点数量稍微增加,随着节点数量增加,节点之间的密度也会随之变大,对边界的影响有所降低。

**结束语** 针对无线传感器网络中随机部署节点的网络覆盖和连通问题,给出了传感器节点与目标节点关联关系模型。在考虑边界影响的情况下,提出了一个覆盖和连通概率模型。它能够简化网络覆盖与连通的计算复杂度,提高算法执行效率,在满足一定网络覆盖和连通率要求下,能更加精确地求解出所需部署节点的数量值。最后,通过模拟实验结果验证了理论求解的正确性和算法的有效性。

## 参考文献

- [1] 毛莺池,梁奕,周晓峰.一种能量异构自适应的无线传感器网络覆盖控制协议[J]. 计算机科学,2009,36(5):39-44
- [2] Tamboli N, Younis M. Coverage-aware Connectivity restoration in mobile sensor network[J]. Journal of Network and Computer Applicatipns,2010,33:363-374
- [3] Huang Cui-fu, Tseng Y-C. The Coverage Problem in a Wireless Sensor Network[J]. Mobile Networks and Applications,2005,10:519-528
- [4] Xing Guo-liang, Lu Chen-yang, Pless R. Co-grid: an Efficient Coverage Maintenance Protocol for Distributed sensor Networks [A]//IPSN'04[C]. Berkeley, California, USA,2004:414-423
- [5] Jin Y, Jo J Y, Wang L, et al. ECCRA: An energy-efficient coverage and connectivity preserving routing algorithm under border effects in wireless sensor networks[J]. Computer Communication,2008,31:2398-2407
- [6] Zhang H, Hou J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. International Journal of Wireless Ad Hoc and Sensor Networks,2005,5:89-124
- [7] Xing G, Wang X, Zhang Y, et al. Integrated Coverage and Connectivity Configuration for Energy Conservation in Sensor Networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks,2005,1:36-72
- [8] 周浦城,崔逊学,王书敏,等.基于虚拟力的无线传感器网络覆盖增强算法[J]. 系统仿真学报,2009,21(5):1416-1420
- [9] 刘丽萍,张强,孙雨耕.无线传感器网络多目标关联覆盖[J]. 天津大学学报,2009,42(6):483-490
- [10] 张晋,刘大昕,徐悦竹,等. WSN 关键区域覆盖启发式优化算法[J]. 计算机工程,2009,35(14):16-20
- [11] Penrose M D. On  $k$ -connectivity for a geometric random graph [J]. Wiley: Random Structure and Algorithms,1999,15:145-164
- [12] 张红武,王宏远,裴小兵.一种无线传感器网络目标的最优覆盖算法[J]. 小型微型计算机系统,2009,30(11):2146-2152
- [13] 胡劲文,梁彦,潘泉.无线传感器网络网络部分覆盖算法及连通性研究[J]. 计算机工程与应用,2008,44(3):24-27