

WSN 中规则区域的最优覆盖研究

顾 兵

(华中科技大学武昌分校,湖北 武汉 430064)

摘要:无线传感网是近年来快速发展的新技术,覆盖与连接是无线传感器网络研究中的核心问题,因而引起业界普遍关注并成为研究热点。针对无线传感网最优覆盖问题,明确了最优覆盖的概念与定义,提出一种运用分形理论自相似性原理进行区域划分以构建最优覆盖模型的方法。通过分析及实验,表明该模型在区域覆盖和面向目标覆盖的无线传感器节点的优化部署上,具有简单快速、容易实现全覆盖而且冗余及网络功耗较小的特点,能有效地降低网络部署成本和能耗。

关键词:无线传感网;覆盖与连接;最优覆盖;分形;自相似性;优化部署

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)01-0107-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.01.027

Research on Optimal Coverage Problem of Regular Region in WSN

GU Bing

(Wuchang Branch of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430064, China)

Abstract: The technology of WSN has developed rapidly recently. Coverage and connectivity is the core of WSN research. So it is paid the attention by the industry, and become the research focus. For wireless sensor network optimal coverage problem, a method of constructing the network optimal covering model is presented in this paper, which uses the fractal theory of self-similarity to divide observation region. At the same time, put forward the optimal covering concept and definition. Through the analysis and simulation results show that the wireless sensor node deployment optimization of the model in the regional coverage and object oriented coverage, has characteristics of the simple and rapid, easy to achieve full coverage and redundancy, and smaller network power, can effectively reduce the network deployment cost and energy consumption.

Key words: wireless sensor network; coverage and connectivity; optimal coverage; fractal; self-similarity; optimal deployment

0 引言

无线传感网(WSN)是近年来伴随着通信网络、计算技术而快速发展起来的一种新技术,是当前理论、技术及应用研究的热点,其在国防军事、环境监测、医疗、勘探等诸多科学领域的应用呈快速增长的态势。无线传感网络^[1]由大量廉价的密集分布的传感器节点组成,每个传感器节点包括有传感单元、计算模块、通信模块、电源模块,具有汇集、处理和传输信息的能力,但其计算、通信、存储及功耗等能力有较多限制。在资源受限的条件下,如何通过空间资源的优化分配以满足用户对所观测区域或目标点的感知需求,即所谓覆盖与连接问题成为无线传感网络研究的基本问题^[2]。覆盖控制问题的研究有三个方面:区域覆盖、点覆盖和运

动覆盖。无论是区域覆盖或者点覆盖,都有随机部署和确定性部署的问题。其核心是如何用较少的传感器节点使较大的观测区域或区域内离散目标点集所发生的事件和现象可以被感知。

近来,许多专家学者对无线传感网络的覆盖与连通问题作了深入研究,提出许多理论和解决方法^[3];何欣等人提出基于遗传算法的面向目标覆盖的确定性部署方法,该方法先利用目标点最多层交叠域寻找传感器节点候选位置集,再利用遗传算法去除候选集中的冗余点以获取满足目标监测需要的最小节点数和节点位置的优化部署^[4];贾杰等人提出基于遗传算法的最优覆盖节点集选择方法,该研究用节点集覆盖概率确定网络覆盖模型,并通过基于遗传算法的节点集搜索机制,在保证充分覆盖条件下,让部分冗余节点进入低功耗休眠状态,形成最优覆盖^[5];孙泽宇等人提出基于传感器节点与目标节点的关联关系模型和覆盖与连通概率模型的最优覆盖算法^[6];邢萧飞等人提出应用鲁洛三角形的K度覆盖算法^[7];以及张红武等人提出一

收稿日期:2012-05-15;修回日期:2012-08-18

作者简介:顾兵(1957-),男,湖北随州人,副教授,高级工程师,CCF会员,中国电子学会高级会员,主要研究方向为计算机组成与体系结构、物联网工程等。

种采用关键目标优先覆盖策略和节点能效最大化策略的启发式贪心最优覆盖算法^[8],用以延长网络覆盖生命周期。这些方法对于无线传感网络区域覆盖问题计算精度有较大提高,但在以上文献[3-7]中,较少考虑能耗问题,或只考虑能耗而对节点数目及覆盖率考虑不足,并且大多都存在着计算复杂度较高的问题,且只涉及对随机性覆盖的研究。

对于确定性覆盖问题的研究较少,但上述文献对确定性覆盖及节点部署的研究可提供很好的借鉴。针对此问题,提出一种利用分形理论的自相似性原理划分规则区域的无线传感网络最优覆盖模型的构造方法,该方法通过使用较少的传感器节点可实现对指定的规则观测区域的区域最大连通覆盖、较小能耗和快速的节点部署。

1 无线传感器网络覆盖模型

采用文献[4]的圆盘感知模型以实现无线传感器节点对于观测目标点或观测区域所发生事件及现象的感知。即传感器节点的感知范围是以节点所在位置为圆心,以 r 为半径的圆,为简化起见,设各传感器节点的感知半径相同。

1.1 网络覆盖问题描述

定义 1(感知范围):对于部署在一个二维平面 E 的给定区域 A 上节点 s_i ,其覆盖区域定义为:

$$As_i = \{p_k \mid p_k \in A, d(p_k, s_i) \leq r_i\} \quad (1)$$

式中 As_i 为被无线传感器节点 s_i 所覆盖观测区域, p_i 为该节点所在位置坐标 (x_i, y_i) , p_k 为该区域内的任意一点坐标 (x_k, y_k) 。

定义 2(区域覆盖):设二维平面 E 的给定区域 A 上有无线传感器节点集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$,若该区域上任一坐标为 (x, y) 的点 T ,至少被一个无线传感器节点 s_i 所覆盖,则称该区域被 S 覆盖。记为:

$$AS_{cov} = \{T \mid T \in As_i, \exists s_i \in S, d(p_i, T) \leq r_i\} \quad (2)$$

定义 3(k 重覆盖):若观测区域 A_i 至少同时被 k 个传感器节点所覆盖,即满足以下关系式:

$$A_i(k) \in \prod_{i=c}^{c+k} As_i, i \leq c \leq n, A_i(k) \in AS_{cov} \quad (3)$$

上式说明若观测区域同时被 k 个无线传感器节点所覆盖,则称该区域(或目标观测点)被 k 重覆盖。 k 重覆盖表明存在冗余无线传感器节点,其会对网络系统的计算、存储及功耗产生影响。

定义 4(覆盖率):对于给定观测区域 A 和一组无线传感器节点 S ,该区域无线传感器节点的覆盖率定义为覆盖区域 AS_{cov} 与区域面积 A 之比:

$$R_{cov} = \frac{AS_{cov}}{A} \times 100\% \quad (4)$$

上式计算结果如为 1,则称该区域被 S 全覆盖。

对于被无线传感器网络节点集合 S 所覆盖的区域 A 的拓扑结构,可以用无向图 $G = (S, E, \varphi)$ 表示,其中 S 是传感器节点集合, $|S| = n$ 。当 A 内的无线传感器节点 s_i 和 s_j 的相互间距离满足 $d(p_i, p_j) \leq r_i + r_j$,则在 A 内存在一条边 (p_i, p_j) , E 是边的集合, $E \cap S = \emptyset$ 。 φ 是 E 到 $\{s_i s_j \mid s_i, s_j \in S\}$ 的映射,称为关联函数。如果 $\Phi_G(e) = s_i s_j$,则 s_i 和 s_j 是 e 的端点,此时称 s_i 与 s_j 相邻。对于图 G ,其中一个顶点和边的非空有限序列 $w = s_0 e_1 s_1 e_2 \dots s_n v_n$,称之为 G 的一个途径。如果途径 w 中的顶点互不相同,则称 w 为通路。

定义 5(连通性):若图 G 中的两个顶点都是连通的,则称 G 为连通图,其连通分支数目 $w(G) = 1$ 。

对于指定矩形区域的圆覆盖问题,许多人运用计算几何方法进行专门研究,提出各种用 1, 2, 3, ..., 8, 11 个圆实现矩形平面的最优覆盖的方案。总的来说,这些最优覆盖,其指定区域与覆盖圆半径关系固定,难于适应实际应用中传感器节点感知半径与观测区域边长不相关联的场合,而且,这些方案中覆盖圆半径及数量各不相同,即其没有考虑能耗问题,因此,尚不能直接用于无线传感器网络覆盖问题研究中。

1.2 规则区域确定性覆盖分析

分形是创建于 20 世纪 70 年代中期的数学理论^[9],它为研究自然界中各类复杂形状和结构提供了简单工具,因而在诸多领域得到广泛的应用。其研究也成为科学前沿之一。分形的自相似性是其基本特征,自相似性的概念为人们提供了从部分认识整体的方法。在分形中,每一组成部分都在特征上和整体相似,仅仅是尺度上的不同。自相似性定义为不论多小的局部,放大足够的倍数时,均能与整体保持一致的形状。此外,分形的另一个普遍特征是具有无限的细致性。即只要对所选位置进行放大,则无论放大多少倍,对所研究的图像的复杂性不会减少。这两个特性反映出观测事物的新观点:即标度变换下的规则性与简单性^[10]。

基于分形理论对无线传感器网络覆盖问题进行研究,首先构造出简单的单位区域最优覆盖模型,然后运用自相似性,通过划分的方法构造局部简单而整体精细复杂的规则区域最优覆盖模型。

设每个传感器节点的感知域由(1)式确定,采用归一化方法,设覆盖区域是边长为 1 的正方形,传感器节点感知半径为 $\sqrt{2}/4$,其中心位于距每边 1/4 的交点上,按此方法构造出来 4 叶形单位区域覆盖模型如图 1 所示。

在 4 叶形单位区域覆盖模型中,使用 4 个传感器节点可对指定区域进行全覆盖。其中 4 个叶形区域为

2 重覆盖,其面积为 $(\pi-2)/4$,占整个覆盖区域的 28.5%。

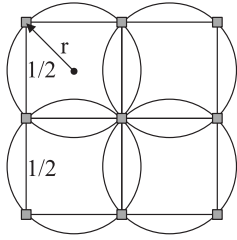


图1 基本的4叶形单位区域覆盖模型

现在将观测区域扩大为原来的4倍,根据自相似性原理,可用图1的4叶形单位区域覆盖模型来构造所观测区域的覆盖结构如图2所示。

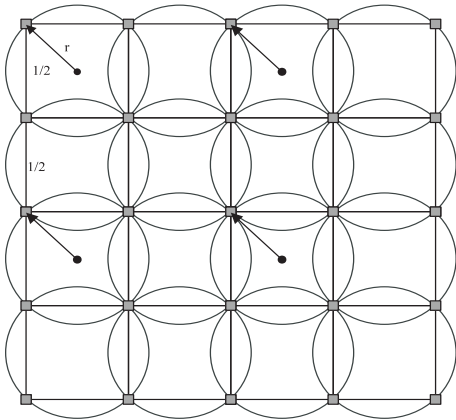


图2 观测区域扩大4倍后的4叶形区域覆盖结构

从图2容易看出,只需按图示的确定位置部署16个传感器节点,则可实现指定区域的全覆盖。其中有16个叶形区域为2重覆盖,其面积为 $3(\pi-2)/2$,占整个覆盖区域的42.75%。

继续将观测区域扩大为原来的16倍,用上图方法构造新的区域覆盖模型如图3所示。

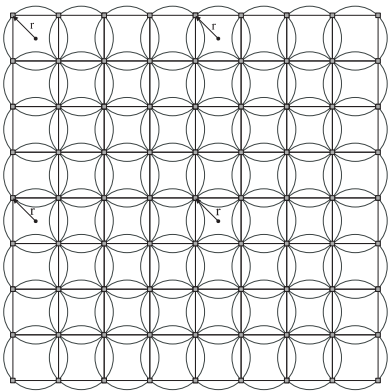


图3 观测区域扩大16倍的4叶形区域覆盖模型

同样,易计算所需传感器节点数目为64个,按图示确定位置部署,则可实现给定区域的全覆盖。其中有冗余的2重覆盖区域面积为 $7(\pi-2)$,所占比例为 $7(\pi-2)/16 \times 100\% = 49.875\%$ 。

对于所监测的实际区域,不断按照上述方法划分,直到所划分的局部小区域与传感器节点所能感知的区

域(如图1所示)相匹配。如此则可构造出一个冗余节点较少而能实现对给定区域全覆盖的连通的无线传感网络。

1.3 主要参数计算

(1) 观测区域上所需部署的传感器节点数目。

对照4叶形单位正方形区域覆盖模型,易计算每增加单位面积,传感器节点数目增加4个,则对于边长为 n 的正方形观测区域($n = 1, 2, \dots, N$),其在确定位置需部署的传感器节点数目为:

$$K = 4n^2 \tag{5}$$

(2) 区域覆盖率。

按照上面分形覆盖模型部署所需的传感器节点,则可实现对所观测区域的全覆盖。

(3) 冗余情况。

易证采用上述覆盖模型,在单位正方形区域内的4叶形区域存在2重覆盖,每个叶型面积为:

$$A_i(2) = \frac{(\pi - 2)}{16} \tag{6}$$

当所观测区域边长为 nr 时,4叶型2重覆盖区域面积为:

$$A_n(2) = (\pi - 2)[n^2 + n]/4 \tag{7}$$

其占整个覆盖区域比例用(4)式计算如下:

$$(\pi - 2) \times \frac{n + 1}{4n} \times 100\% \tag{8}$$

1.4 推广到规则矩形平面区域

以上确定性覆盖的区域限定在正方形上,现将其推广到矩形平面。设矩形区域为 $n \times m, m \leq n, m, n \in N$ 。采用边长为1的单位正方形划分,形成 m 行 n 列的观测区域,对每个小正方形区域仍采用图1的4叶形单位区域覆盖模型构造矩形区域覆盖:

(1) 矩形观测区域上需部署的传感器节点数目。

根据图1的4叶形单位区域覆盖模型,知每单位面积所需传感器节点数目为4,则对于边长为 $n \times m$ 的矩形观测区域($n, m \in N, m \leq n$),其在确定位置需部署的传感器节点数目为:

$$K = 4 \times n \times m \tag{9}$$

(2) 区域覆盖率。

按照以上覆盖模型确定点部署所需的传感器节点,则可实现对所观测区域的全覆盖。

(3) 冗余情况。

可证在 $n \times m$ 的矩形观测区域中存在2重覆盖的叶型面积为:

$$A_i(2) = \frac{(\pi - 2)[2 \times n \times m - (n + m)]}{8} \tag{10}$$

占整个覆盖区域比例为:

$$(\pi - 2) \times \frac{2nm - (n + m)}{8nm} \times 100\% \tag{11}$$

1.5 推广到一般情况下矩形平面区域

现将其推广到更具普遍性的矩形区域。大多数情况下,矩形区域边长不能刚好是传感器节点感知圆盘半径的整数倍,但仍可以用边长为 1 的单位正方形进行划分,其最为不利的覆盖情况如图 4 所示。在边缘有一些三角形区域未能覆盖。

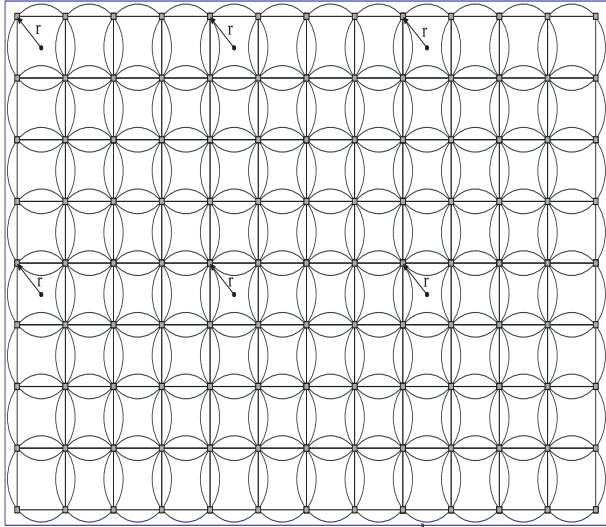


图 4 矩形区域最小覆盖率模型

易证,最不利情况下观测区域矩形面积为:

$$\frac{4nm + 2(\sqrt{2} - 1)(n + m) + 2 - 2\sqrt{2}}{4} \quad (12)$$

可被传感器节点覆盖的面积为:

$$nm + (n + m) \times (\pi - 2)/8 \quad (13)$$

区域覆盖率可由(9)式计算出:

$$\begin{aligned} R_{\text{cov}4} &= \frac{AS_{\text{cov}}}{A} \times 100\% \\ &= \frac{8nm + (\pi - 2)(n + m)}{8nm + 4(\sqrt{2} - 1)(n + m) + 6 - 4\sqrt{2}} \times 100\% \end{aligned} \quad (14)$$

当 $n = m = 2$ 时,按上式可计算出其传感器节点的覆盖率为 93.8%,观测区域划分越多,也即 n, m 值愈大,则覆盖率 R_{cov} 愈接近 1,即可实际上达到全覆盖。

2 最优覆盖的讨论

文献[4~8]及其它许多人员在对无线传感网络覆盖问题的研究中,都提到最优覆盖的问题,但最优覆盖的含义不够清晰,特提出定义如下:

定义 6(最优覆盖):对于给定规则区域,使用最少传感器节点数目 $|S_{\min}|$ 和最低功耗 w_{\min} 能实现最大区域覆盖或对指定目标集的覆盖 (R_{covmax}):称为该区域(目标集)的最优覆盖。

对于无线传感网络而言,资源受限是其主要特征,因此在论及最优覆盖问题时,能耗是需要考虑的重要因素。作为无线通信设备,传感器节点在工作的功耗

可由下式计算^[11]:

$$w_{tr} = l \times E_{\text{elec}} + l \times \varepsilon_{fs} \times d^2 \quad d \leq d_0 \quad (15)$$

其中: l 是传输数据包长度;

E_{elec} 是无线收发电路所消耗的能量;

ε_{fs} 是自由空间模型放大器的消耗能量;

d 是收发数据的传感器节点间距离;

d_0 是常数,取决于传感器网络应用环境。

在自由空间传播条件下,随着传播距离的增大,大部分发射功率都会散失掉,接收机只捕获到发射功率的一小部分。换言之,功耗随传播距离的增大而成为能量消耗的一个主要部分,当传播距离增大一倍时,功耗将会增大 4 倍。因此,综合考虑无线传感器网络功耗、节点数量、区域连通性和覆盖率等因素的优劣,才可说明是最优覆盖。

据此,以 4 叶形单位正方形覆盖模型为基础,应用分形自相似性划分规则区域构造的 4 叶形网络覆盖模型是最优覆盖模型。

其证明如下:

(1)设边长为 1 的单位正方形,如果用一个圆覆盖该单位正方形,则最小半径为 $\sqrt{2}/2$ 。当区域扩展时,采用自相似性原理进行划分,使用 1 个圆的覆盖模型构造的区域覆盖如图 5 所示。

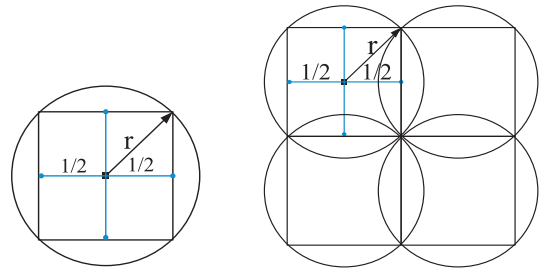


图 5 单个圆的覆盖模型

对于 $n \times m$ 单位区域,其所需的传感器节点数量为 $n \times m$,因其传感器节点感知半径为 4 叶形覆盖模型中传感器节点感知半径的 2 倍,则在其通信时,功耗增大了 4 倍。故综合考虑功耗和覆盖率,4 叶形覆盖模型为优。

(2) J. B. M. Melissen 等人对矩形平面的圆最优覆盖问题^[12]进行了深入研究,分别最多用 5、6、7、8 以及 11 个圆来完成覆盖。以 7 个圆对单位正方形覆盖为例来说明,当采用划分方法对于 $n \times m$ 个单位的指定区域构造网络覆盖模型时,其所需的传感器节点数量为 $7 \times n \times m$,多于文中使用 4 个圆的单位正方形覆盖模型所需的传感器节点数目,并且 7 圆覆盖模型中存在 3 重覆盖区域,多重覆盖率较高,即存在较多的冗余节点。在功耗方面,该模型的覆盖圆半径为 0.2742918,大于 4 叶形覆盖模型中覆盖圆的半径,其两相邻节点通信距离大于后者,故 7 圆覆盖模型的功耗

高于4叶形覆盖模型。

易证以其它单位正方形多圆最小覆盖为基础,采用划分方法构造的规则区域覆盖模型在综合考虑节点数目、节点冗余(多重覆盖率)以及功耗因素方面低于4叶形覆盖模型的性能,故文中讨论的以4圆为基础的4叶形覆盖模型为最优覆盖,证毕。

3 最优覆盖实验分析

文献[4]在100m×100m的矩形区域内采用随机方式产生25个目标点,节点感知半径设定为20m,运用该文中提出的基于遗传算法的面向目标覆盖方法,需要由8个传感节点完成对于目标点集的覆盖。

按照相同的环境,在Matlab中采用文中所提的4叶形网络覆盖模型为基础的算法在预定位置设置传感器节点,在观测区域内可布置16个节点即可完成全覆盖,并通过2重覆盖保障观测区域的连通性。同样在该区域随机散列分布25个目标观测点,经过30次反复测试,平均需要启用7到8个传感器节点即可在保证连通性的条件下完成对于离散目标点集的全覆盖。其确定性部署及覆盖情况如图6所示。

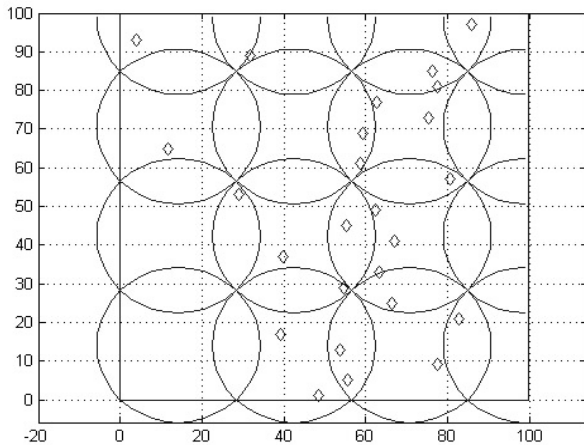


图6 4叶形覆盖模型对于随机分布目标点集的覆盖

采用4叶形网络覆盖模型,完成对于上图给定区域的全覆盖,需用16个传感器节点,而对于指定目标观测点的全覆盖,只需用到全部节点的约50%。

基于分形划分的4叶形网络覆盖模型具有以下特点:

(1)该方法在传感器节点配置上,无需文献[8]所提及算法那样,需用定位装置或通过计算以了解目标节点的位置信息,而是依据分形模型的拓扑结构直接部署传感器节点。这在资源受限的无线传感网络应用中,会有效缩短组网时间,减少节点在定位时的计算、存储、传输等开销,以降低功耗。

(2)与其它算法相比,因其重叠区域是2重覆盖,与一些部署会产生 K 重覆盖($K \geq 2$)相比,其冗余节

点数目较少。且其工作节点数目可由(5)、(9)等表达式准确计算,并可保证连通性,以及对于观测区域或区域内的目标观测点集的全覆盖。

4 结束语

网络覆盖是无线传感器网络的基本问题,已有许多学者对各类无线传感网络覆盖问题进行了研究^[10-13],并提出多种算法以期提高网络覆盖率,减少冗余,降低功耗。运用分形的自相似性原理研究网络覆盖,提出一种基于分形自相似性原理进行划分的方法构造网络覆盖模型,该模型对观测区域以及离散的目标观测点理论上可实现全覆盖,其传感器节点部署简单快速,计算准确,无需定位计算,并可保证网络连通性,重复覆盖所占比例适中,既可保证连通性,又可减少冗余节点、有效降低功耗。这在资源受限的无线传感网络应用中尤为重要。

参考文献:

- [1] 顾均. 无线传感网络覆盖算法及仿真研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(9): 146-149.
- [2] 张西红, 周顺, 陈立云, 等. 无线传感网络技术及其军事应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 121-141.
- [3] 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.
- [4] 何欣, 桂小林, 安健. 面向目标覆盖的无线传感网络确定性部署方法[J]. 西安交通大学学报, 2010, 46(6): 6-10.
- [5] 贾杰, 陈剑, 常桂然, 等. 无线传感器网络最优覆盖节点集的求解方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(11): 1560-1563.
- [6] 孙泽宇, 邢萧飞. WSN中一种规则区域最优覆盖与连通算法研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(5): 79-82.
- [7] 邢萧飞, 孙泽宇. 无线传感器网络中应用鲁洛三角形的K度覆盖算法[J]. 计算机科学, 2011, 38(1): 66-68.
- [8] 张红武, 王宏远, 丰洪才. 一种无线传感器网络目标的分布式最优覆盖算法[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(1): 17-21.
- [9] 李水银, 吴记桃. 分形与小波[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1-39.
- [10] 黄席樾, 张著洪, 何传江, 等. 现代智能算法理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 157-186.
- [11] 马杰良, 王焱, 顾蕾蕾. 基于覆盖率的无线传感器网络LEACH协议研究及改进[J]. 传感技术学报, 2011, 24(12): 1777-1781.
- [12] Melissen J B M, Schuur P C. Improved Coverings of a Square with Six and Eight Equal Circles[J]. The Electronic Journal of Combinatorics, 1996, 3(1): 1-9.

WSN 中规则区域的最优覆盖研究

作者: [顾兵](#)
作者单位: [华中科技大学武昌分校, 湖北 武汉 430064](#)
刊名: [计算机技术与发展](#)
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2013(1)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201301029.aspx