

## 感测范围不规则情况下无线传感器网络节点部署算法\*

赵小敏, 毛科技, 何文秀, 钮一波, 陈庆章<sup>+</sup>

(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

### Deployment Algorithm for Wireless Sensor Network with Irregular Sensing Range

ZHAO Xiao-Min, MAO Ke-Ji, HE Wen-Xiu, Niu Yi-Bo, CHEN Qing-Zhang<sup>+</sup>

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

+ Corresponding author: E-mail: qzchen@zjut.edu.cn

Zhao XM, Mao KJ, He WX, Niu YB, Chen QZ. Deployment algorithm for wireless sensor network with irregular sensing range. *Journal of Software*, 2012, 23(Suppl. (1)): 59-68 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12007.htm>

**Abstract:** For irregular sensing range of sensor nodes, the paper proposes a randomly deployment wireless sensor network algorithm based on the Delaunay triangulation and grid. In the deployment algorithm, sensor nodes that have already been started are grouped by Delaunay triangulation, which then calculates the target point TP by the TPM algorithm and chooses the TP as a reference point to start a new node. This algorithm adjusts TP in accordance with grid coverage around nodes and the distance between nodes. The paper also proposes a “border reinforcement mechanism” and “obtuse triangle TP-point optimization strategy” to improve coverage effectively. Experimental results show that the proposed deployment algorithm can effectively use randomly deployed sensor nodes. It can quickly raise coverage to 90% or more and has the feature that makes the redundant cover region less, the coverage rate growing fast, and small amount of nodes can achieve high coverage.

**Key words:** wireless sensor network; node deployment; irregular sensing; Delaunay triangulation; random

**摘要:** 针对传感器节点的感测范围不规则问题,提出了基于Delaunay三角化与网格的无线传感器网络节点随机部署算法.该算法将传感器节点进行Delaunay三角化分组,通过TPM算法计算出各个Delaunay三角形的目标点TP,并把TP作为参考点来选择新启动节点,根据TP点周围网格覆盖情况、节点与节点之间的距离进行调整,提出了边界补强机制及钝角三角形TP点优化策略,从而有效提高了覆盖范围.实验结果表明,所提出的部署算法可以有效利用随机播撒的传感器节点,可快速提升覆盖率至90%以上,具有重复覆盖区域少、覆盖率成长快速的特点,少量的节点达到较高的覆盖率.

**关键词:** 无线传感器网络;节点部署;不规则感测;Delaunay三角化;随机

无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)是由大量具有特定功能的传感器节点以自组织和多跳的方式、相互传递信息、协同地完成特定功能的智能网络<sup>[1]</sup>,以其低功耗、低成本、自组织的特点带来了一场信息感知的变革,已广泛应用于诸如军事领域、农业领域、智能交通、家庭与健康、环境保护等领域.

\* 基金项目: 浙江省自然科学基金(LY12F02036); 浙江省公益性计划应用研究项目(2011C21014, 2012C33085)

收稿时间: 2012-05-05; 定稿时间: 2012-08-17

在一些应用中,传感器节点常常被部署到感兴趣区域(region of interest,简称 ROI)去检测环境参数或探测特定的事件.这些应用会涉及节点部署、能量管理、消息路由、节点定位、网络拓扑等关键问题.由于节点部署的优劣将影响整个网络的性能、复杂度、成本、网络生存时间等,因此节点部署问题显得非常重要.

所谓节点部署问题,就是在一定的区域内(即 ROI),通过适当的策略部署传感器节点以满足某种特定的需求<sup>[2]</sup>.一般而言,仅当无线传感器网络中节点的感测范围能够有效覆盖整个 ROI 时,才能充分发挥功能.因此,节点部署决定着传感器感测物理空间的效果,进而影响传感器网络的服务质量.然而,在很多无线传感器网络应用场景中,节点是被随机撒布到 ROI 中,很难保证覆盖最优化.另一方面,现有的研究都把节点的感测范围抽象成圆,然而在实际应用中,却有很大的出入.

本文研究了切合实际的传感器节点不规则感测模型,并以此为基础提出了基于 Delaunay 三角化与网格的无线传感器网络节点随机部署算法.该算法可以有效利用随机播撒的传感器节点,具有重复覆盖区域少、覆盖率成长快速的特点.

## 1 相关研究工作

节点部署问题最早起源于艺术馆问题<sup>[3]</sup>与圆周覆盖这两个经典的计算几何问题<sup>[4]</sup>.在传统的无线传感器网络节点部署算法的研究中,节点部署在开放的、理想的条件下进行,常常把节点的感测范围抽象成圆,即节点的各个方向的感测半径是相等的,并以此为基础设计出相应的节点部署算法.

文献[5]提出了3种基于计算几何法的移动节点部署算法,即 VOR,VEC,MinMax.在 VOR 算法中,作者提出利用 Voronoi 图对整个区域进行分割,以区分每个传感器所管辖的监测范围.在 VEC 算法中,认为传感器之间、传感器与监测区域的边界之间都存在着互斥力,由这股互斥力来调整传感器之间、传感器与监测区域边界之间的距离,从而减少重复覆盖的区域.MinMax 算法与 VOR 算法相似,它避免了与靠近移动节点的静态节点因移动节点的移动导致其成为最远节点的情况.

文献[6]提出了一种基于虚拟力的节点部署方法.在随机播撒之后,通过虚拟力算法(VFA)作为节点部署方法来提高覆盖率.在无线传感器网络初始化后,每个“簇”的“簇头”计算出各个节点的位置,该位置能够使得覆盖最优化,然后各个节点移动到计算出的最优位置.但是,由于许多边界节点往往被多个“簇”所共享,这使得部署变得很复杂,因此该算法扩展性较差,不适用于大规模节点的部署.

文献[7]提出了一种增量式的节点部署算法.该算法的基本思想是逐个部署 WSN 节点.综合考虑节点的密度分布和能量等级等情况,利用部署好的节点计算出下一个节点所部署的位置.该算法加入一个节点的时间复杂度为  $O(n \log n)$ ,适用于监控区域未知的情况.

文献[8]提出了一种基于网格移动的 WSN 节点部署算法.网格划分的方法把对 ROI 的覆盖问题转化为对网格点的覆盖问题,以实现用最少的节点对监测区域进行覆盖.该算法通过网格划分和基于概率方式移动,有效地降低了算法时间复杂度.

以上这些部署方法都是在假设节点的感测范围为理想圆的情况下完成的.然而在实际应用中,感测范围为理想圆的节点部署算法并不可靠,一些原本假设可以覆盖的区域实际上是无法覆盖的,从而影响无线传感网络的性能,使得无线传感器网络的服务质量大打折扣.理论和实际测量已证明,节点的感测范围往往是不规则的.

目前,仅有少数文献研究针对感测范围不规则情况下的节点部署方法.文献[9]提出将规则的圆形感测范围拓展为简单多边形感测范围,并以此为基础设计了节点部署算法.为了简化问题的分析,该文献将感测半径的衰弱抽象成衰减因子(fading factor).若一个方向上存在这种衰减因子,则该方向的感测半径减少.因此可以通过对不同方向上的衰减因子的检测,来描述实际条件下的节点感测范围.而通过这种方法得出的节点感测范围近似为简单多边形.然而,该算法只考虑了外部环境因素对节点感测范围的影响,却忽视了由于节点本身所产生的节点感测范围的不规则性.

文献[10]提出了一种能量有效的 CSSC 模型,将能量作为主要的因素加以考虑.该模型的感测范围是由具有可变中心角与可变感测半径的扇形所构成的,依赖于节点之间的剩余能量信息交换.然而,该模型与实际情况相

差较远.另一方面,该文献并未给出针对这种感测模型的有效节点部署算法.

## 2 感测模型

### 2.1 经典感测模型

在传感器感测模型的研究中,主要有两种常见的感测模型:二元感测模型和概率感测模型.

为了降低问题的复杂度,感测模型常常被简化为二元感测模型.假设在感测半径为  $R_b$  的圆形区域内,事件发生的概率为 1,在圆外则为 0.若  $S(s,p)$  表示传感器  $s$  监测到  $p$  点的概率, $d(s,p)$  表示  $p$  点距离传感器  $s$  的欧式距离,其公式(1)表示为

$$S(s,p) = \begin{cases} 1, & \text{if } d(s,p) \leq R_b \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

在实际应用中,传感器节点的感测能力呈现一定的不确定性.若目标点越靠近节点,则节点采集的信息越精细;反之,则节点采集的信息越粗糙.因此,一些学者提出了感测质量随着传感器节点与目标点距离的增加而衰减的概率感测模型.在该模型中,传感器节点  $s$  监测到  $p$  点的概率如公式(2)所示:

$$S(s,p) = \begin{cases} e^{-\alpha d(s,p)}, & \text{if } d(s,p) \leq R_p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\alpha$ 为传感器感测的衰减因子.

二元感测模型和概率感测模型虽然抽象了传感器节点的感测能力,为理想节点的部署提供了依据,然而却忽视了传感器自身的特性和环境的影响.在实际监测中,传感器的感测范围呈现不规则圆形,从而导致原本假设可覆盖的区域实际上是无法覆盖的,影响了无线传感器网络的监测质量.

### 2.2 不规则感测模型

对于大部分感测信号来说,传播路径上的障碍物将引起接收信号额外功率损耗,并导致不同方向上接收信号强度变化.这被称为遮蔽效应(shadowing effect),类似于无线电波的传播<sup>[11]</sup>.本文提出的不规则感测模型如图 1 所示,分为圆外、理论可感区、不可靠感测区、可靠感测区这 4 块区域.半径为  $R_c$  的圆形区域为可靠感测区,传感器节点能够 100%地监测到物理事件.在半径为  $R_p$  的圆形区域范围外,超过了传感器节点的感测范围,无法感测到物理事件.介于半径为  $R_c$  和  $R_p$  的环形不规则区域是模糊区域.假设传感器节点在  $k$  方向上的感测半径( $R_k$ )是由两部分组成,分别是置信半径( $R_c$ )和可变半径( $R_v$ ),即

$$R_k = R_c + R_v, \quad R_v \in [0, R_p - R_c] \quad (3)$$

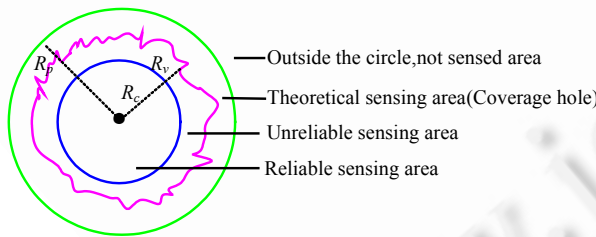


Fig.1 Irregular sensor model

图 1 不规则感测模型

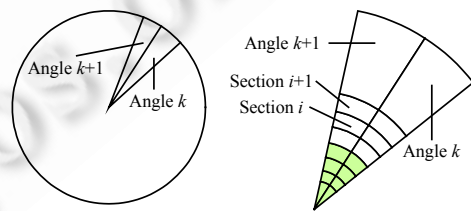


Fig.2 Calculate the schematic of  $R_v$

图 2  $R_v$  计算示意图

为计算  $R_v$ ,如图 2 所示.设  $R_{vk}$  为角度  $k$  的变动感测半径. $D_i$  为区段  $i$  的上限值, $P_i$  为区段  $i$  的感测概率.随机取  $Rad$  为 0~1 的随机值.若  $P_i$  大于  $Rad$ ,则继续做下一区段的计算.否则,变动感测距离  $R_{vk}$  为前一区段的上限值  $D_i$ .角度  $K$  方向的变动感测半径长度是由各个区段的概率来决定的,从而形成各个角度之间的差异.我们参考概率感测模型与实际节点感测范围实验结果,计算传感器节点感测的概率如下定义:

$$S(s, p) = \begin{cases} 0, & d(s, p) > R_p \\ e^{-\xi(d(s, p) - R_c)}, & R_c \leq d(s, p) \leq R_p \\ 1, & d(s, p) < R_c \end{cases} \begin{pmatrix} a_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & a_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中,  $\xi$  为传感器感测的衰减因子, 视具体的应用和具体的传感器类型而定.  $R_c$  为置信半径,  $R_p$  为可变半径,  $R_p$  为理论最大感测半径.

### 3 感测范围不规则情况下的节点部署算法

#### 3.1 相关几何结构

##### 3.1.1 网格

网格是一种简单的几何结构, 单纯地将感兴趣区域划分成大大小小不同的形状, 如矩形划分、六边形划分、菱形划分等. 通过网格划分, 把无线传感器网络区域覆盖问题转换成对网格点的覆盖问题, 可用较少的节点达到对区域的完全覆盖. 若将网格划分得越大, 则计算量越少; 反之, 计算量越大, 其相对精确度也越高.

##### 3.1.2 Delaunay 三角化

Delaunay 三角化又称为 Delaunay 三角剖分, 它是一种几何结构, 常用于数值分析、图形学等领域. 在二维平面上, 给定一组传感器节点  $S = \{S_0, S_1, S_2, \dots, S_n\}$ ,  $n > 3$ . 定义节点  $S_i$  与节点  $S_j$  的距离为  $d(S_i, S_j)$ ,  $V(i) = \{x | d(x, S_i) < d(x, S_j), x \in R^2, j=1, 2, \dots, n\}$ , 即  $V(i)$  中包含的点到节点  $S_i$  的距离比到节点  $S_j$  的距离要短, 则称  $V_i$  为 Voronoi 图的顶点集,  $S_i$  为  $V_i$  的内核. 若将所有的内核相连接, 则形成了  $V_i$  为顶点集的三角剖分  $DT$ .  $DT$  中的三角形称为 Delaunay 三角形.

#### 3.2 感测范围不规则下的节点部署算法

本文提出感测范围不规则下的节点部署算法 (deployment algorithm with irregular sensing range), 简称为 DAWISR 算法.

##### 3.2.1 算法构建的环境

在 DAWISR 算法中, 假设无线传感器节点被随机播撒到感兴趣区域, 此后节点位置是固定的, 各个节点不可移动 (包括 Sink 节点). 节点可通过无线传感器网络定位方法获取其在网络中的自身位置信息. 该算法采用集中式的方法, 有一个功能强大的基站来计算与搜集信息, 进而统一进行决策. 集中式算法可以有效地降低各个节点的能源消耗, 同时可以减小误差. DAWISR 算法将传感器节点的状态分为 3 种: 启动状态、休眠状态和消亡状态.

##### 3.2.2 DAWISR 算法思想

本算法将 Delaunay 三角化与网格有机结合起来, 综合 Delaunay 三角化快速计算目标位置的优点和网格提高计算精度的优点, 将已启动的传感器节点分组, 以组为单位来考察各个节点在感测范围不规则时的覆盖情形, 从而决定新启动节点位置. 同时, 该算法通过补强边界机制来弥补三角形内参考点位置不易落入角落的问题. 若参考点位置没有传感器节点, 则选择离参考点位置最近的节点作为新启动的工作节点.

算法通过递归的方式在每一回合启动新节点, 启动新节点之后重新对受影响的传感器节点做 Delaunay 三角化. 重复这些步骤直到启动新的节点已经不能提升有效覆盖率为止.

##### 3.2.3 DAWISR 算法流程

假设感兴趣区域的大小为  $L \times L$  的正方形区域. 在该区域随机播撒大量节点 (节点为静态节点, 不具备移动功能), 到达地面后形成一个集合  $SG$ , 即  $SG = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ , 并置所有节点为休眠状态, 减少能量消耗.

Step 1: 节点集合形成后进入初始化阶段. 在初始化阶段, 通过一定的策略在 4 个角落分别启动一个节点, 以消除 Delaunay 三角化的目标参考点不易落入角落的问题.

Step 2: 对已启动的传感器节点做 Delaunay 三角化.

Step 3: 通过 TPM (target point method) 算法计算出各个 Delaunay 三角形内的目标参考点 (TP).

Step 4: 针对每个 TP, 选择离 TP 最近的传感器节点  $S_i$ , 并计算它到各个相邻节点  $S_j$  的距离  $D(S_i, S_j)$ .

Step 5:作如下判定:若  $D(S_i, S_j) > \varepsilon$ , 则启动该节点, 否则不启动. 与此同时, 把该点加入到工作组 SW 中.

Step 6:若系统满足覆盖率要求或没有新节点加入到 SW, 则结束算法运行. 否则, 重复 Step 2, Step 3 和 Step 4. 对这一回合所产生的新工作组 SW 重新做 Delaunay 三角化.

关于覆盖率的计算, 我们通过网格来实现, 把对面积的覆盖转换成对网格点的覆盖. 将感兴趣区域划分为大小相等的正方形网格, 若网格点  $i$  被覆盖, 则令标志位  $C\_Flag(i)=1$ , 否则  $C\_Flag(i)=0$ . 算法覆盖率定义如下:

$$COV = \frac{\sum_{i=1}^{NG} C\_Flag(i)}{NG} \quad (5)$$

其中,  $NG$  为在感兴趣区域划分的网格总数.

### 3.2.4 DAWISR 算法关键步骤

#### (1) 初始化阶段

目标参考点 TP 大部分在三角形的内部, 因此 Delaunay 三角化呈现由外到内的部署趋势. 为了弥补目标参考点 TP 不易落入角落的问题, 本文提出“边界补强”机制.

首先在  $L \times L$  的正方形感兴趣区域中, 计算的 4 个角落分别选择一个节点, 计算各个节点到 4 个角落的距离, 记为  $DC(N\_ID)$ ,  $N\_ID$  为节点 ID. 并按由小到大的顺序进行排序, 结果放入向量  $VectorCor_j$  中, 其中  $j$  代表角落的序号. 针对每个角落, 选择距离最小的节点, 即  $\text{Min}(DC(N\_ID))$ , 也就是  $VectorCor_j$  的第 1 个元素  $VectorCor_j[1]$ , 并作如下判定: 若  $VectorCor_j[1] \geq \sigma$ , 则启动该节点, 可获得较大的覆盖率增长. 否则计算  $VectorCor_j$  的下一个元素, 以此类推. 其中,  $\sigma$  可取最小保证半径长度. 若  $VectorCor_j[x] < \sigma$ , 则认为超过部署区域面积过多, 取得较小的有效覆盖, 不启动该节点.

#### (2) Delaunay 三角化

在感测范围规则的情况下, 一个 Delaunay 三角形外接圆的圆心, 也就是三角形的外心, 它与三角形三顶点距离相等且距离之和最大. 因此, 外心位置是这个外接圆中最有可能不被任何传感器节点感测到的位置, 在该点加入传感器节点能够得到最大的覆盖率增长.

然而在感测范围不规则情况下, 选择外心作为新加入节点的参考位置并不准确, 它忽略了节点不规则对目标参考位置的影响. 因此本文在感测范围不规则情况下, 提出新的目标参考点计算方法, 称为 TPM, 如图 3 所示.

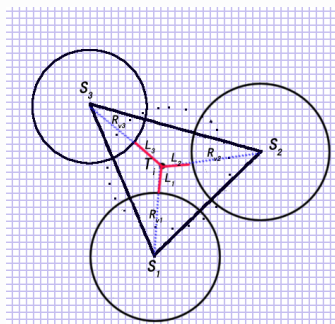


Fig.3 New target reference point calculation method

图 3 新目标参考点计算方法

为了使节点在  $T_i$  位置启动后获得最大覆盖率增长, 最可能地减少重复覆盖面积, 令  $L_1=L_2=L_3$ , 即

$$T_i S_1 - R_{v1} = T_i S_2 - R_{v2} = T_i S_3 - R_{v3} \quad (6)$$

设  $S_1, S_2, S_3$  坐标分别为  $(X_A, Y_A), (X_B, Y_B), (X_C, Y_C)$ , 可得:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{(C_x - X_B)^2 + (C_y - Y_B)^2} - R_{v2} &= \sqrt{(C_x - X_A)^2 + (C_y - Y_A)^2} - R_{v1} \\ \sqrt{(C_x - X_B)^2 + (C_y - Y_B)^2} - R_{v2} &= \sqrt{(C_x - X_C)^2 + (C_y - Y_C)^2} - R_{v3} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

定义第  $R$  回合 Delaunay 三角化后所形成的 Delaunay 三角形集合为  $DT_R$ , 即

$$DT_R = \{\Delta_{R1}, \Delta_{R2}, \Delta_{R3}, \dots, \Delta_{Rt}\} \quad (8)$$

接着,计算第  $R$  回合所产生的各个 Delaunay 三角形目标参考点,即

$$O_M = \{TP(\Delta_{R1}), TP(\Delta_{R2}), TP(\Delta_{R3}), \dots, TP(\Delta_{Rt})\} \quad (9)$$

其中,  $TP(\Delta)$  表示为 Delaunay 三角形的目标参考点函数。

实际应用中,在目标参考点位置附近并不一定恰好有一个节点,本算法启动离  $TP$  最近的节点.令  $NeiN(TP)$  作为  $TP$  周围临近的传感器节点所组成的集合,  $t_{TP}$  为新激活节点的目标位置,则

$$NeiN(TP) = \{Ne_1, Ne_2, Ne_3, \dots, Ne_n\} \quad (10)$$

$$t_{TP} = \min(Dis(Ne_1, TP), Dis(Ne_2, TP), Dis(Ne_3, TP), \dots, Dis(Ne_n, TP)) \quad (11)$$

设第  $R$  回合新激活节点的集合为  $I_R$ , 第  $R$  回合所有已激活节点的集合为  $SW_R$ , 则:

$$SW_R = SW_{R-1} \cup I_R \quad (12)$$

在每回合启动新节点之后,将原 Delaunay 三角形外接圆包含此点的三角形打散并重新执行 Delaunay 三角化,这体现了 Delaunay 三角化具有区域特性。

### (3) 节点密集的情况

随着启动节点的增加,节点部署越来越密集,从而导致重复覆盖区域面积增大.需要一套机制来防止节点密集时过多的重复区域。

本算法中,在启动新节点的同时,进行如下判定:若该新节点与其他任意一点的距离小于  $\phi$ , 则不启动该节点(若启动该节点则导致重复覆盖的区域扩大,启动该节点的效益不高).  $\phi$  随着置信半径的变动而变化,其值由如下方法决定:

在图 4 中,3 个节点两两相距两倍的置信半径距离,出现了潜在的盲区(图中圆形范围表示置信区域).由于节点感测范围呈现不规则性,3 个节点之间的未覆盖区域仍然有  $P\%$  的概率受到 3 个节点的覆盖。

若假设置信半径  $R_c = 0.6R_p$  ( $R_p = 10\text{m}$ ,  $\xi = 0.2$ ), 距离节点  $0.9R_p$  的感测概率为 54.8%. 由文献[12]可知,当周围存在  $K$  个传感器节点监测时,一个传感器节点的覆盖概率定义为被  $K$  个传感器节点至少有一个节点监测到的概率:

$$I(p, K) = 1 - \prod_{k=1}^K [1 - P(p, S_k)] \quad (13)$$

其中,  $P(p, S_i)$  代表在点  $p$  的目标被传感器节点  $S_i$  探测的概率。

若在目标参考点  $TP$  周围至少存在 3 个传感器节点,则以  $0.9R_p$  为最短距离  $\phi$ , 由公式(13)可得 83.6% 的感测概率,可取  $\phi = 0.9R_p$ . 若希望得到更高的覆盖率,则可将  $\phi$  向下调整.  $\phi$  的取值取决于不同的应用环境以及不同的传感器类型。

当节点密集时,由于可选择节点不多而选择了较远的节点,这样就产生了钝角三角形的情形,如图 5 所示.这通常将导致目标参考点在三角形区域的外部,这将从一定程度上影响算法的性能。

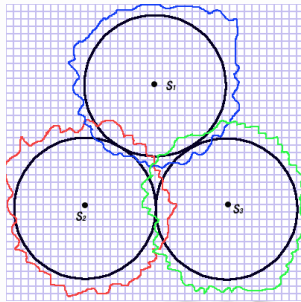


Fig.4 Dealing with the case when the node intensive

图 4 处理节点密集时的情形

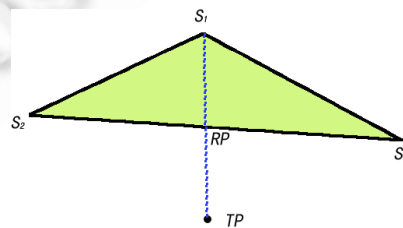


Fig.5 Dealing with the case of obtuse triangle

图 5 处理钝角三角形的情形

由图 5 可知,  $\Delta S_1 S_2 S_3$  为钝角三角形,计算得到其目标参考点为  $TP$  点.为了避免目标参考点超过 ROI,我们将



目标参考点  $TP$  与  $S_1$  进行连线,与  $S_2S_3$  线段的交点为  $RP$ ,取  $RP$  作为新节点加入目标参考点.这样可以弥补边界缺少覆盖的情况,提升算法的整体覆盖率.设 Delaunay 三角形 3 顶点  $S_1, S_2, S_3$ ,坐标分别为  $(X_A, Y_A), (X_B, Y_B), (X_C, Y_C)$ ,其中  $\angle S_2S_1S_3$  为钝角,  $TP$  的坐标为  $(C_x, C_y)$ .  $RP(X_o, Y_o)$  为线段  $S_2S_3$  与线段  $S_1TP$  的交点,可求得  $X_o, Y_o$  的坐标,即

$$\begin{cases} X_o = \frac{b_2 - b_1}{k_1 - k_2} \\ Y_o = \frac{k_1(b_2 - b_1) + b_1(k_1 - k_2)}{k_1 - k_2} \end{cases} \quad (14)$$

其中,

$$\begin{cases} k_1 = \frac{Y_A - Y_C}{X_A - X_C}, b_1 = \frac{Y_A(X_A - X_C) - X_A(Y_A - Y_C)}{X_A - X_C} \\ k_2 = \frac{Y_B - Y_C}{X_B - X_C}, b_2 = \frac{Y_B(X_B - X_C) - X_B(Y_B - Y_C)}{X_B - X_C} \end{cases} \quad (15)$$

#### 4 算法验证

为了验证本文所提出的不规则感测模型及其节点部署算法的性能,我们在 MATLAB 平台下进行仿真实验.假设无线传感器节点的感知半径最大为 10m,部署在矩形网格状的感兴趣区域大小为  $100\text{m} \times 100\text{m}$  中,设网格大小为  $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ ,共 40 000 个网格点.

##### 4.1 不规则感测模型

本文所提出的不规则感测模型仿真实验结果如图 6 所示.从图中我们可以看到,圆形范围内为置信区域,圆形范围外为可变区域.在置信半径  $R_c$  确定的情况下,传感器感测的衰减因子  $\xi$  数值越大,节点的感测衰减程度越大.  $\xi$  值可根据具体的应用环境来确定,在环境恶劣、对感测信号影响越大的应用中,应调高  $\xi$  值.

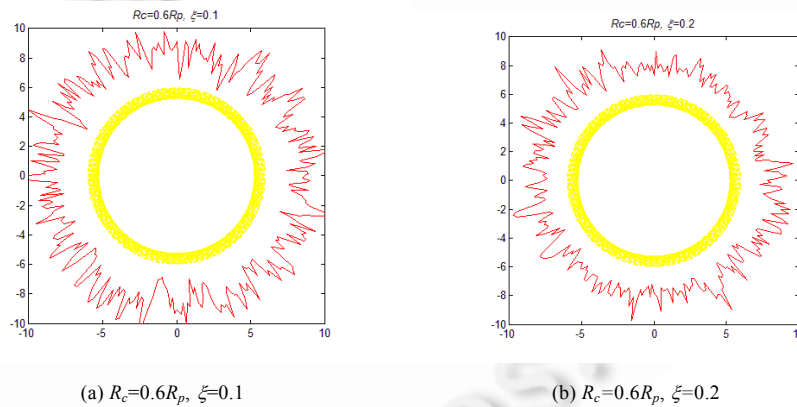


Fig.6 Simulation results of irregular sensing model

图 6 不规则感测模型的仿真结果

##### 4.2 DAWISR算法运行结果与分析

在 DAWISR 算法中,先在 4 个角各部署一个节点,通过 Delaunay 三角化进行区域划分,寻找感兴趣区域中最可能尚未被覆盖的区域,从四周到中心,从稀疏到密集.图 7 是在不同节点数情况下 DAWISR 算法的仿真结果,其中  $R_c=0.6R_p, R_p=10\text{m}, \xi=0.2$ .

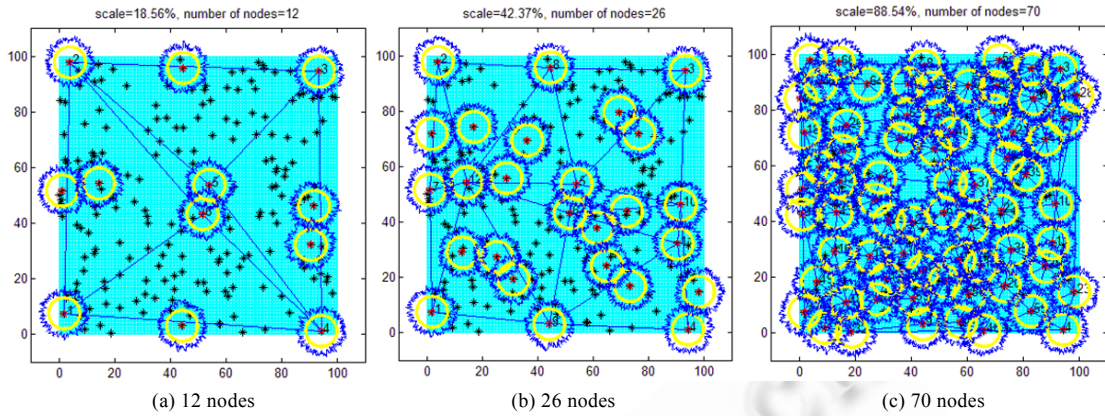


Fig.7 Different nodes DAWISR algorithm simulation results

图 7 不同节点数的 DAWISR 算法仿真结果

为了分析 DAWISR 算法在不同  $R_c$  情况下的部署覆盖情况,实验分别讨论  $R_c$  为  $0.4R_p, 0.5R_p, 0.6R_p$  时的覆盖情况,取  $\xi$  为 0.2,  $\phi$  为  $0.9R_p$ ,图 8 给出不同置信半径的覆盖率比较.对于部署算法来说,随着启动节点的增多,相对应的覆盖率随之增大.置信半径越大,所对应的覆盖率也越高.

本文提出了 TPM 算法,用来计算新启动节点的参考位置,弥补了感测范围不规则所造成的误差.我们对目标参考点计算的差异进行了实验比较,取  $\xi$  为 0.2,  $R_c$  为  $0.6R_p$ ,  $\phi$  为  $0.9R_p$ ,实验结果如图 9 所示.从图中我们可以看到,TPM 算法比传统的选择外心作为目标位置的方法较优,仿真结果表明覆盖率平均提高了 4%.

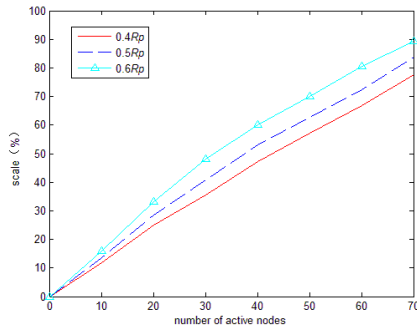


Fig.8 Coverage comparison of the different confidence radius

图 8 不同置信半径的覆盖率比较

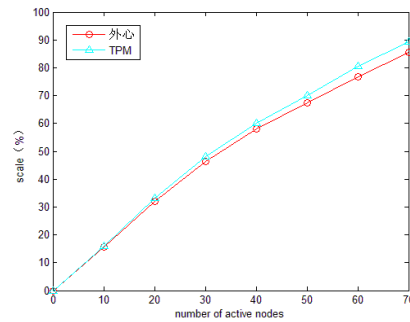


Fig.9 Comparison of circumcenter and the TPM algorithm

图 9 外心与 TPM 算法的比较

在 DAWISR 算法中,为了使得边界得到有效覆盖,提出了补强边界机制.钝角三角形目标参考点位置在三角形区域的外部,为了防止边界区域节点超过感兴趣区域,本文提出了钝角三角形 TP 点优化策略,有效地提高了边界节点的覆盖率.从图 10 中我们可以看到,钝角三角形 TP 点优化策略可以有效地提高有效覆盖率,仿真结果表明,可提高覆盖率 3%左右.

由于没有比较的参考系,本文将不规则感测模型应用到随机部署策略中,即基于不规则感测模型的随机部署算法(简称 IrrRandom),并与本文的 DAWISR 算法相比较,证明其有效性.实验结果如图 11 所示.DAWISR 算法具有较大的优越性,在启动节点数为 70 个节点时,能快速达到覆盖率 90%左右,比随机部署算法平均高出 20%.



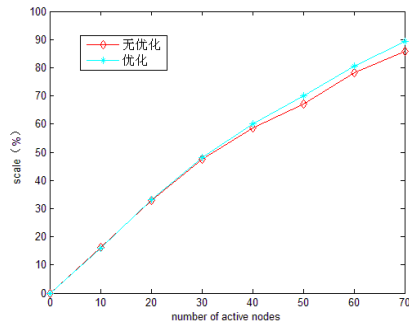


Fig.10 Obtuse triangle TP optimization strategy

图 10 钝角三角形 TP 点优化策略

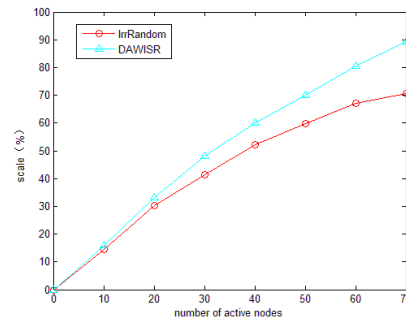


Fig.11 DAWISR algorithm performance

图 11 DAWISR 算法性能

## 5 结 论

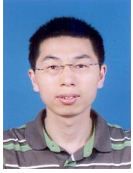
本文提出了一种感测范围不规则情况下的无线传感器网络节点部署算法,即 DAWISR 算法,可有效利用随机播撒的传感器节点,快速提升覆盖率至 90%以上,具有重复覆盖区域少、覆盖率成长快速的特点.算法考虑了节点感测范围不规则对部署性能的影响,提出 TPM 算法计算新节点启动的参考位置,仿真结果表明,比选择外心作为目标位置的方法可提高 4%的覆盖率.通过钝角三角形 TP 点优化策略来防止覆盖率缺失.可提高覆盖率 3%左右.在下一步的工作中,我们将研究不同功率下的节点部署方法以及三维空间的节点部署方法.

## References:

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002,38(4): 393–422.
- [2] Fu ZX, Xu ZL, Huang C, Wu XB. Survey on sensor deployment problem in wireless sensor networks. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2008,27(3):116–120 (in Chinese with English abstract).
- [3] O'Rourke J. *Art Gallery Theorems and Algorithms*. New York: Oxford University Press, 1987.
- [4] Williams R. *The Geometrical Foundation of Natural Structure: A Source Book of Design*. New York: Dover Publications, 1979.
- [5] Wang GL, Cao GH, La Porta TF. Movement-Assisted sensor deployment. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2006,6(6):1–13.
- [6] Zou Y, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks. *ACM Trans. on Embedded Computing Systems*, 2004,3(1):61–91.
- [7] Clouqueur T, Phipatanasuphorn V, Ramanathan P, Saluja KK. Sensor deployment strategy for target detection. In: *Proc. of the ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*. New York: ACM Press, 2002. 42–48.
- [8] Meguerdichian S, Koushanfar F, Qu G, Potkonjak M. Exposure in wireless ad-hoc sensor networks. In: *Proc. of the ACM MobiCom 2007*. New York: ACM Press, 2007. 139–150.
- [9] Boukerche A, Fei X. A coverage-preserving scheme for wireless sensor network with irregular sensing range. *Ad Hoc Networks*, 2007,5(8):1303–1316.
- [10] Soreanu P, Volkovich Z. Energy-Efficient circular sector sensing coverage model for wireless sensor networks. In: *Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Sensor Technologies and Applications*. Washington: IEEE Computer Society, 2009. 229–233.
- [11] Tsai Y-R. Sensing coverage for randomly distributed wireless sensor networks in shadowed environments. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2008,57(1):556–564.
- [12] Onur E, Ersoy C, Delic H. Sensing coverage and breach paths in surveillance wireless sensor networks. In: *Proc. of the 15th IEEE Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. New York: IEEE Press, 2004. 984–988.

## 附中文参考文献:

- [2] 傅质馨,徐志良,黄成,吴晓蓓.无线传感器网络节点部署问题研究. *传感器与微系统*,2008,27(3):116–120.



赵小敏(1976—),男,浙江文成人,博士生,副教授,主要研究领域为无线传感器网络,网络信息安全.



钮一波(1986—),男,硕士,主要研究领域为无线传感器网络.



毛科技(1979—),男,博士生,助理研究员,主要研究领域为无线传感器网络.



陈庆章(1955—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为无线传感器网络,CSCW.



何文秀(1979—),女,博士生,讲师,主要研究领域为无线传感器网络.

www.jos.org.cn

www.jos.org.cn