

基于概率感知覆盖的无线传感器网络节点优化部署方案

何欣^{1,3}, 桂小林^{1,2}

(1. 西安交通大学 计算机科学与技术系, 陕西 西安 710049; 2. 陕西省计算机网络重点实验室, 陕西 西安 710049;
3. 河南大学 复杂智能网络系统研究所, 河南 开封 475001)

摘 要: 针对无线传感器网络中随机部署节点集划分方法不能保证目标覆盖应用的优化部署问题, 提出了一个基于概率感知覆盖的确定性部署方案。首先利用概率感知模型反映感知的随机特性, 并计算满足用户感知需求的节点最大感知半径。其次, 通过目标点最多层交叠域, 寻找监测目标集的传感器节点候选位置。最后, 基于候选位置点, 利用模拟退火遗传算法, 找出实现目标监测的最少节点数及节点位置。仿真试验表明, 该方案可根据用户的感知需求, 得到最优传感器节点部署方法, 实现无线传感器网络资源的优化配置。

关键词: 无线传感器网络; 目标覆盖; 概率感知模型; 目标点最多层交叠域; 模拟退火遗传算法

中图分类号: TN9198

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)9A-0001-08

Probabilistic disc model based optimal node deployment scheme to target coverage in wireless sensor networks

HE Xin^{1,3}, GUI Xiao-lin^{1,2}

(1. Department of Computer Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. The key Laboratory of Computer Network, Xi'an 710049, China ;

3. The Complex Intelligent Network Systems Institute of Henan University, Kaifeng 475001, China)

Abstract: In wireless sensor networks, since the existing methods of dividing sensors based on the random deployment of nodes can not guarantee the optimal deployment to target coverage, a probabilistic disc model based optimal deterministic deployment scheme of sensor nodes was proposed. Firstly, probabilistic disc model was used to capture the stochastic nature of sensing. And, node sensing radius meeting to user needs was computed. Secondly, the candidate positions where nodes were placed to coverage target set were computed by using the concept of the most multi-overlapping domains of target point. Finally, known the candidate positions, by using simulated annealing genetic algorithm, the optimal positions and the least number of nodes to coverage target set were gained. Simulation results show that the nodes optimal deployment method is obtained based on user needs. The optimal allocation of resources is realized in wireless sensor networks.

Key words: wireless sensor network; target coverage; probabilistic disc model; the most multi-overlapping domain of target point; simulated annealing genetic algorithm

收稿日期: 2010-08-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2008AA01Z410); 国家自然科学基金资助项目(60873071); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(2008AA01Z410); The National Natural Science Foundation of China(60873071); The Fundamental Research Funds for the Central Universities

1 引言

在无线传感器网络中, 由于单个传感器节点的感知能力有限, 如何有效、合理地组织节点间的协作, 实现人们希望的感知需求的技术称为覆盖控制技术。它是无线传感器网络的基础技术, 直接反映了无线传感器网络对环境的感知服务质量^[1~3]。其中, 基于已知离散目标集的目标覆盖技术正逐渐引起人们的关注。文献[4]中引入了目标覆盖问题, 针对已知位置的离散目标集, 采用节点随机部署的方式, 通过划分活跃节点集, 来实现目标的节能监测。文献[5]通过信息覆盖模型来处理目标覆盖问题, 它利用信号的随机特性, 采用参数估计的方法, 以多节点协同方式, 对信号进行整合, 以提高节点对目标的感知精度。文献[6]则针对异构传感器网络, 利用启发式算法实现活跃节点集对目标的覆盖。文献[7]利用数据融合特性, 通过多节点感知合作来提高对目标的感知精度。同时, 分析了覆盖度、网络密度、信噪比之间的关系。由于该方法主要针对高密度网络, 节点较冗余的情况, 因此比较适合区域内节点随机部署的情况。

上述研究均采用的是面向目标覆盖应用的随机部署方式, 其划分的活跃节点集往往存在大量的冗余, 并不能真正实现网络资源的优化配置。因此, 出现了面向目标覆盖应用的确定性部署方式, 它针对位置已知的离散目标点集, 试图寻求最少的传感器节点数及最佳的节点部署位置, 实现目标的监测和数据传输, 以优化网络成本。目前, 面向目标覆盖的确定性部署应用的研究很少被涉及。

因此, 本文针对目标覆盖的确定性部署应用开展研究, 提出了一个基于概率感知覆盖的优化部署方案。它针对离散目标点监测应用, 采用概率感知模型, 以反映节点对目标信号感知的随机特性。同时, 为便于后期的节点优化部署, 依据用户的感知需求指标(最低检测率、最高误检率), 求取满足感知性能的节点最大感知半径。在已知感知半径的基础上, 利用目标点最多层交叠域方法, 寻找监测目标集的传感器节点候选位置; 然后, 基于候选位置点, 利用模拟退火遗传算法, 找出实现目标监测的最佳节点数及节点位置。通过该部署方案, 可根据用户的感知需求, 得到最优传感器节点部署方案。由于该方案能够反应节点感知的随机特性, 并能够在检测时间发生的同时, 查找具体的事件源目

标点, 因此, 具有较强的实际应用性。

2 概率感知特性分析

本文采用概率感知模型来反映信号检测的随机特性, 根据用户感知需求(检测率、误检率)计算节点的最大感知半径, 实现了随机特性与几何特性的转换, 为下一步部署操作提供了方便。

2.1 节点概率感知模型

节点通过检测目标点信号的物理量来实现目标点的检测。例如, 声音传感器, 通过采样声音信号的强度来实现对目标点声音信息的检测。这类信号有声音、地震波、红外能量等, 它们的信号强度往往随着距离的增加而衰减。同时, 节点接收的信号还会受到背景噪声、电路信号转换损耗等干扰。因此, 节点接收的信号值如式(1)^[5]。

$$s = \frac{S_0}{d^k} + n \quad (1)$$

其中, S_0 表示目标点释放的物理信号值; d 表示节点到目标点的距离; K 表示信号的路径损耗系数, 根据环境不同, 其取值范围在 $[2.0, 50]$ 中变化^[7]; n 表示噪声干扰, 此处, 认为其服从均值为 0, 方差为 σ 的高斯分布, 即

$$n \sim N(0, \sigma^2)$$

节点将接收到的信号量值与预先设定的阈值 η 相比较, 当其大于阈值的概率满足一个指定的概率值 θ 时, 即认为节点能够感知目标点信号。节点的概率感知模型如式(2)所示。

$$\begin{cases} \text{感知信号, } P(s > \eta) \geq \theta \\ \text{不能感知信号, 其他} \end{cases} \quad (2)$$

但是, 由于噪声干扰的存在, 使得节点取得的概率值会产生误差。因此, 利用检测率 P_D 表示当目标点有事件发生时, 节点能够正确检测的概率; 利用误检率 P_F 表示目标点没有事件发生时, 由于噪声干扰导致节点误检的概率。当检测率 P_D 大于指定值 β , 误检率 P_F 小于指定值 α 时, 认为节点能够正确感知目标点^[7]。节点的概率感知模型的改进式如式(3)。

$$\begin{cases} \text{感知信号, } P_D(s > \eta) \geq \beta \text{ 且 } P_F(s > \eta) \leq \alpha \\ \text{不能感知信号, 其他} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知, 与圆盘感知模型相比, 节点的感知能力考虑了环境的随机特征, 通过检测率与误检

率 2 个指标，反映用户的感知需求，使得感知信息更加精确。

2.2 节点感知半径的设定

由上节改进的概率感知模型可知，当满足式(3)时，即认为节点能够感知目标点信息。为了便于实现对目标的确定性部署，需进行感知随机特性到几何特性的转换，将用户的感知需求指标转换为节点的感知半径，以便于利用节点感知圆的几何特性实现对目标的优化部署。节点感知圆定义如下。

定义 1 节点感知圆：以节点所在位置为圆心，感知半径 R_s 为半径的圆，称为节点感知圆。对分布于该圆内的目标点，节点均能以式(3)形式实现感知。

由于感知半径决定了节点成功感知目标点的范围，因此，如何设定节点感知半径 R_s ，成为节点部署的关键，下面给出感知圆半径的计算方法。

根据节点感知圆的定义可知，节点满足式(3)。利用误检率的定义，可得式(4)：

$$P_F = P(s > \eta) \leq \alpha \quad (4)$$

将式(1)代入式(4)，得

$$P_F = P(s > \eta) = P\left(\frac{S_0}{d^k} + n > \eta\right)$$

由于误检率中 $S_0=0$ ，因此

$$P_F = P(n > \eta) = 1 - P(n \leq \eta)$$

由于 n 是满足方差为 σ 的正态分布，即 $n \sim N(0, \sigma^2)$ ，因此 $P_F = 1 - \Phi\left(\frac{\eta}{\sigma}\right)$ ，其中， Φ 为标准正态分布的累积函数，即

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

将其代入式(4)，得

$$\Phi\left(\frac{\eta}{\sigma}\right) \geq 1 - \alpha$$

即， $\eta \geq \sigma \Phi^{-1}(1 - \alpha) \quad (5)$

由检测率的定义，同样可以推出式(6)：

$$\frac{S_0}{d^k} \geq \eta - \sigma \Phi^{-1}(1 - \beta) \quad (6)$$

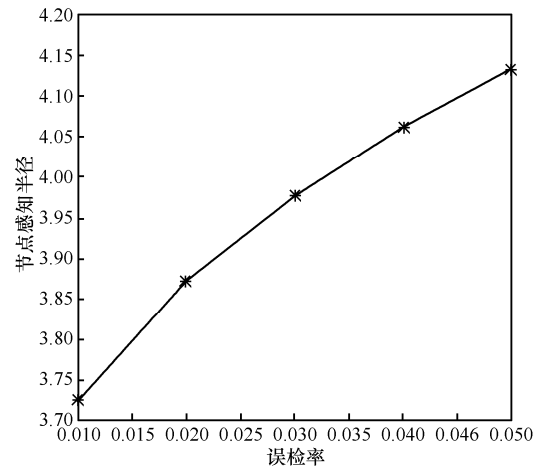
将式(5)代入，得

$$d \leq \left(\frac{S_0}{\sigma(\Phi^{-1}(1 - \alpha) - \Phi^{-1}(1 - \beta))} \right)^{1/k} \quad (7)$$

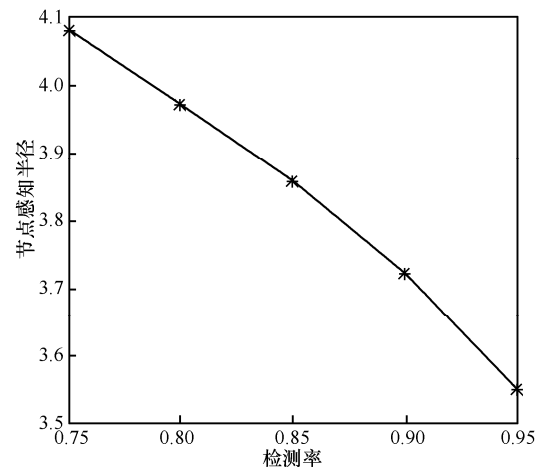
令节点感知圆半径 R_s 取式(7)的上限值，可得到满足概率感知模型式(3)的最大值，即

$$R_s = \left(\frac{S_0}{\sigma(\Phi^{-1}(1 - \alpha) - \Phi^{-1}(1 - \beta))} \right)^{1/k} \quad (8)$$

由式(8)可知，节点的感知半径受到 $(\alpha, \beta, S_0/\sigma, k)$ 影响。其中， S_0/σ 和 k 受到具体环境的制约，可在节点部署前，根据收集到的环境数据来直接设定； α 和 β 则由用户的感知需求决定，因此，本文针对这 2 个参数分析与感知半径的关系。令 $K=2, S_0/\sigma=50, \beta=0.9$ 时，分析误检率对感知半径的影响，发现节点感知半径随着误检率增大而增大，如图 1(a)所示；令 $\alpha=0.01$ 时，分析检测率对节点感知半径的影响，发现节点感知半径随着检测率增大而减小，如图 1(b)所示。此外，由式(8)可看出，感知半径随着 S_0/σ 的增大而增大，随着 K 值的增大减小。



(a) 误检率对节点感知半径的影响



(b) 检测率对节点感知半径的影响

图 1 感知需求对感知半径的影响

2.3 事件源目标点的定位

事件源目标点定位指的是, 如果一个节点监控多个目标点, 且每次仅有一个目标点产生事件, 当节点检测到事件发生时, 需要找出是哪个目标点产生的事件。由于圆盘感知模型采用的是二元值, 它只能检测到事件的发生, 无法找出具体的目标点。而采用概率感知模型, 则可相应地找出产生事件的目标点。其查找原理如下。

利用式(1), 根据节点接收到的信号值, 近似得出目标点的估计值。

$$\hat{S}_0 = sd^k \quad (9)$$

在估计值的基础上, 寻找事件源节点, 该点应是估计值最接近事件发生值的点。例如, 假设 $K=2$, $S_0=32$, $\sigma=0.64$, $\beta=0.9$, $\alpha=0.01$ 时, 根据式(8)求出感知半径为 3.72m, 根据式(5)求出事件发生的阈值 η 为 1.49。根据式(3)可知, 在以 3.72 为半径的感知圆范围内, 当节点测定事件发生时, 其检测率和误检率均应满足用户需求 (0.01,0.9)。此时, 假设节点检测 2 个目标点 T_1 和 T_2 , 两目标点距离节点的距离分别为 2m 和 1m, 如图 2 所示。

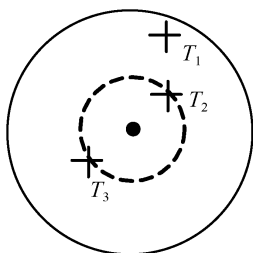


图 2 目标点测定

分别以不同事件发生为条件, 展开论述如下。

1) 假设目标点 T_1 处有事件发生。

首先, 根据式(1), 求出节点感知的物理量应为 $32/2^2-0.82=7.18$, 大于事件发生阈值 1.49, 因此可判断有事件发生。

然后, 根据式(9)得出目标点 T_2 和目标点 T_1 的估计量 7.18 和 28.7。 T_1 的估计量最接近事件发生值。因此, 可判断出事件发生的目标点应该是 T_1 。

2) 假设目标点 T_2 处有事件发生。

首先, 根据式(1), 节点感知的物理量应为 $32/1^2-0.82=31.18$, 大于事件发生的阈值, 因此有事件发生。

然后, 根据式(9)得出目标点 T_2 和目标点 T_1 的估计量 31.18 和 124.72。 T_2 的估计量最接近事件发

生值。因此, 可判断出事件发生的目标点是 T_2 。

3) 如果增加一个目标点 T_3 时, 因为 T_2 和 T_3 距离节点的距离相等, 则其计算的物理量值相同, 无法区分发生事件的目标点。这 2 个目标点处于同一个圆上, 称该圆为等势圆, 图 2 中用虚线圆表示, 其定义如下:

定义 2 等势圆: 在概率感知模型所确定的感知圆内, 如果目标点与传感器节点的距离相同, 则称它们位于等势圆上。位于等势圆上的目标点估测的能量值相同, 因此, 无法区分事件发生的目标点。

由上述分析可知, 基于概率感知模型, 可适当找出发事件的目标点, 但是, 无法区分位于等势圆上的目标点。因此, 如需精确判定事件源目标点时, 在部署后期就必须通过手动方式进行节点位置调整, 以避免节点覆盖的目标点处于同一个等势圆上。

3 基于概率感知的节点优化部署方案

通过上述分析, 实现了基于随机特性的用户感知需求指标到节点感知半径的几何转换。以此为基础, 利用计算几何原理, 本文提出了基于概率感知的节点优化部署方案, 先由用户的感知需求计算节点的最大感知半径, 并以该值设定目标点部署圆, 利用最多层交叠域算法选取节点候选位置; 然后, 通过遗传算法去除冗余点, 得到最佳候选位置。

3.1 部署节点的初始位置选取

1) 基于用户感知需求的目标点部署圆。

通过式(8), 根据用户的感知需求 $\langle \alpha, \beta \rangle$, 求取节点的最大感知半径 R_s 。以该值为基础, 设计目标点部署圆。

定义 3 目标点部署圆: 以目标点为圆心, 以最大感知半径 R_s 为半径的圆, 称为目标点部署圆。位于部署圆内任意位置的节点, 均可以感知该目标点。如图 3 所示, 虚线圆表示目标点 $t_1 \sim t_4$ 的部署圆。

已知目标点集, 如何选取节点位置, 使得部署节点数量既少又能满足对目标的覆盖, 是面向目标覆盖部署方法的主要任务。据此, 本文利用目标点最多层交叠域, 实现节点候选位的选取。

2) 目标点最多层交叠域。

定义 4 邻居目标点: 与目标点 t 的距离小于 2 倍节点感知半径的目标点, 称为邻居目标点。如图 3 所示, 目标点 t_2 、 t_3 、 t_4 是目标点 t_1 的邻居目标点。

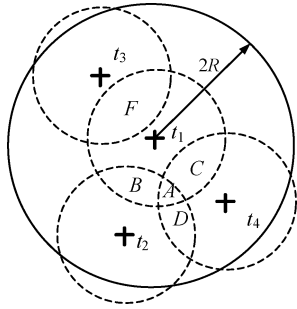


图3 目标点最多层交叠域

定义 5 目标点最多层交叠域：目标点部署圆与其所有邻居目标点部署圆相交，交叠次数最多的子域，称为该目标点的最多层交叠域。如图 3 所示，目标点 t_1 与邻居目标点的交叠域有很多，其中，仅子域 A 为目标点 t_1 的最多层交叠域。

3) 初始候选位集选取。

由目标点最多层交叠域的概念可知，在最多层交叠域内的节点覆盖的目标点个数最多，引出定理 1。

定理 1 已知区域内的目标点集，部署传感器节点时，在每个目标点的最多层交叠域内寻找位置点，与在其他子域内寻找位置点相比，所需的传感器节点总数最少。

由定理 1 可知，针对目标覆盖应用，指出了—个部署传感器节点的方式。即已知区域内的目标点集，部署传感器节点的位置应该在每个目标点的最多交叠域内选择，这样所需的传感器节点总数比在其他域内寻找位置点所需的个数要少。其中，目标点的最多层交叉域、及其上位置点可通过计算几何原理得到，本文利用文献[8]中最大交叠域计算方法获得，此处不再重述。

3.2 基于模拟退火遗传算法的候选位优化

利用最多层交叠域，能够得到针对目标集的节点初始候选位集。如图 4 所示，4 个目标点 $t_1 \sim t_4$ ，存在 3 个最多层交叠域。根据定理 1，在每个交叠域上可选择—个位置点放置传感器，得到候选位 $S_1 \sim S_3$ 。然而，通过观测可知，该初始候选位集仍存在冗余点 S_2 。因此，为节省部署节点数，去除冗余点，

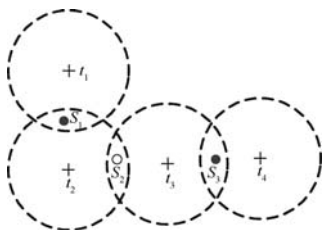


图4 具有冗余点的初始候选位集

需要对初始候选位集进一步优化，本文采用模拟退火遗传算法来加以实现。

3.2.1 面向候选位优化的模拟退火遗传算法设计

本文利用模拟退火遗传算法对初始候选位集进行优化，去除冗余点。该算法将模拟退火算法与遗传算法相结合，利用遗传算法的遗传算子实现新个体的寻找，使用模拟退火中的 Metropolis 准则进行新个体接受度的判断。主要涉及到的关键点有个体的编码设计、适应度函数设定、遗传算子的选择以及新个体接受度。

1) 基于候选位集的编码设计。

将初始候选位集作为编码空间，种群中个体用一个长度为 N 的位串来表示。即 $(P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_N)$ 。每个 P_i 对应一个初始候选位置点 (x_i, y_i) ，且

$$P_i = \begin{cases} 1, & \text{选取该候选位置点} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

2) 适应度函数设计。

适应度函数对种群中的个体进行定量评价，为选择、交叉等操作提供决策参考。本文在进行适应度函数设计时，主要涉及 2 个指标：目标点覆盖度和候选位利用率。

① 目标点覆盖度。

它指的是个体中包含的已选择节点位置所覆盖的目标点数与目标点总数之比，使用函数 f_1 表示，该值越大越好。

$$f_1 = \frac{\left| \bigcup_{i=1}^N P_i T_i \right|}{|T|} \quad (10)$$

$$P_i T_i = \begin{cases} T_i, & P_i = 1 \\ \emptyset, & P_i = 0 \end{cases}$$

式(10)中， T_i 表示节点在候选位置点 i 时覆盖的目标点集合； T 表示总目标点集合； $||$ 表示集合元素的个数。

② 候选位利用率。

它指的是个体选取的候选位数与总候选位数之比，使用函数 f_2 表示，该值越小越好。

$$f_2 = \sum_{i=1}^N l_i / N \quad (11)$$

因此，适应度函数应是这 2 个指标的加权和。

$$f = K_1 f_1 + K_2 (1 - f_2) \quad (12)$$

$$0 < K_1 < 1, K_1 + K_2 = 1$$

其中, K_i 表示权值, 反应 2 个指标对总体适应度的影响。

3) 新个体接受度计算。

利用模拟退火中的 Metropolis 准则进行新个体接受度计算, 如式(13)。即当新个体适应度函数值大于遗传算子操作前个体的适应度时, 则直接接受, 否则按下概率值有选择接受。

$$\min\{1, \exp((f_{\text{new}} - f_{\text{now}})/T_k)\} > \text{random} \quad (13)$$

式中, f_{new} 表示新产生个体的适应度函数值; f_{now} 表示遗传算子操作前个体的适应度函数值; T_k 原表示某时刻温度, 此处作为迭代控制参数; random 表示在 (0, 1) 中产生一个随机数。

4) 遗传算子选择。

为简化遗传算法, 本文仅采用了选择、交叉和变异 3 个基本遗传算子。

① 选择操作。

采用概率的方法从父代种群中选择个体, 选择概率为 P_s 。

$$P_s(j) = \frac{f(j)}{\sum_{m=1}^M f(m)}, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (14)$$

式中, M 表示种群的大小, $f(j)$ 对应个体 j 的适应度函数。选择操作将适应度较高的个体以较大的概率保留下来, 通过式(12)可知, 适应度值较高的个体, 通常是那些既满足目标全覆盖, 同时冗余节点数又较少的个体。因此, 可以将具有较少冗余点的个体保留到下一代种群中。

② 交叉操作。

对选择操作产生的新个体执行交叉运算, 并通过式(13)判断是否接受产生的新个体。交叉操作使算法具有全局空间的搜索能力, 通过对选择的父个体进行重组操作, 在全局范围内寻求具有较少冗余节点的可能性。

③ 变异操作。

利用预先指定的变异概率 P_m , 选择新产生的个体, 对某个基因位取反操作, 并通过式(13)判断是否接受产生的新个体。新种群中的个体执行变异操作, 可以避免算法局部收敛, 克服早熟现象。最终, 增加得到具有较少冗余点个体的概率。

3.2.2 模拟退火遗传算法实现

算法使用的参数定义如下: M 为种群大小; P_m 为变异概率; T_k 为某时刻温度; u 为温度冷却参数。

算法 1 面向候选位优化的模拟退火遗传算法

step1 初始化控制参数。

- 1) 初始化种群 P 。
- 2) 设定初始温度、变异概率 P_m 等。

step2 对当前种群执行遗传算子操作, 直到产生新种群。

- 1) 利用式(12), 计算种群 P 中所有个体的适应度函数值 f 。
- 2) 利用适应度函数值 f , 通过式(14)对适应度函数值较大的个体执行选择操作。
- 3) 对选择复制后的个体执行交叉操作, 交叉位 p_0 随机生成, 同时计算新产生个体的适应度函数值, 并根据式(13)判断是否接受新个体。
- 4) 对交叉操作后得到的新个体, 依据变异概率 P_m 值, 执行变异取反操作, 变异位 p_1 随机生成。同时, 计算新产生个体的适应度函数值, 并根据式(13)判断是否接受新个体。

step3 $T_k = uT_k$ 。

step4 循环执行 step2 和 step3, 直到收敛条件满足。

算法结束。

通过该算法, 可以去冗余候选位, 得到覆盖目标集的最优候选位集, 从而实现资源优化的目标。

4 性能分析

场景 1 通过仿真, 分析本文提出的优化部署方案的性能。仿真情景假设在一个 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的矩形区域内, 目标点为 100 个, 采用随机方式产生, $K=2$, $S_0/\sigma=1\ 000$, $\beta=0.95$, $\alpha=0.01$, $u=0.9$, 初始温度 $T_0=8\ 000$ 。目标点分布如图 5 所示, 目标点用 “+” 表示。

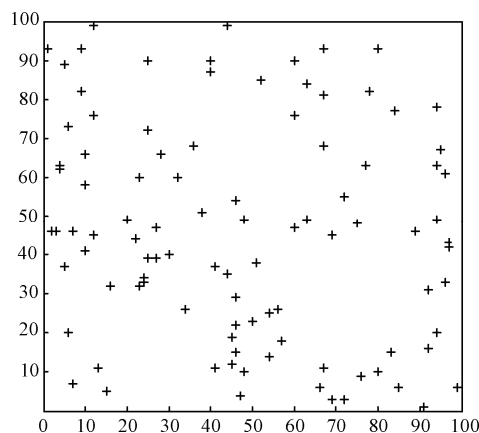


图 5 初始区域目标点分布

首先，通过式（8）求得满足用户需求的节点感知半径为 15.86m。然后，利用文献[8]中的方法，得到每个目标点的最多层交叠域，在每个域上非重复的选择节点候选位置，用符号“+”表示节点的候选位置，如图 6 所示，图中圆代表节点感知范围。从图中可知，共有 32 个候选位置点。

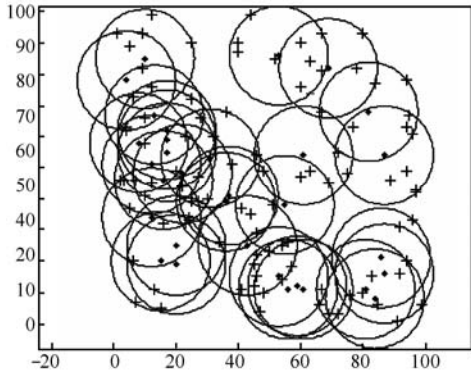


图 6 节点候选位置分布

然后，利用模拟退火遗传算法，在初始候选位集的基础上，求取节点的最佳部署点。通过仿真运行，经过 33 代后，候选位置点不再变化。如图 7 所示，图中圆代表节点感知范围符号，“.”表示节点的最佳位置。

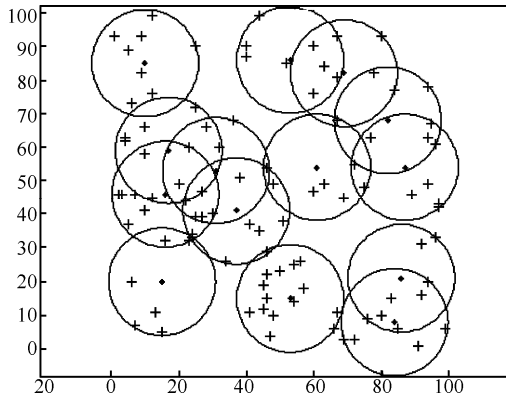


图 7 节点最佳部署位置

由图 7 可知，经过模拟退火遗传算法的挑选，仅余下 14 个位置点作为最佳部署点，比执行遗传算法前，节点位置数降低了 56%。

通过整个仿真过程可知，利用概率感知模型，可以将用户的感知需求转变为具体的节点感知半径；然后将模拟退火遗传算法与目标点最多层交叠域方法相结合，以求得满足用户感知需求的最佳位置点。

场景 2 分析用户感知需求指标，对使用目标

点最多层交叠域、以及模拟退火遗传算法产生的初始候选位、最佳候选位的影响。仿真情景假设参数与前相同。

仿真结果如表 1 所示，当用户感知需求逐渐降低时，即误检率增加、检测率减小时，根据公式求得的最大节点感知半径逐渐增大，这说明检测精度的降低增大了节点的感知范围；同理，当检测精度增加时，节点的检测范围应减小。从表 1 中还可看到，初始候选位数呈减小趋势，但是在半径 19.64m 处出现了反复，这是因为在该半径情况下出现了不唯一的最大层交叠层域。此外，随着半径增大，最后求得的最佳候选位数呈逐渐减小趋势，这说明虽然出现冗余的候选位置点，但采用模拟退火遗传算法后，能够通过优化去除冗余点。

表 1 用户感知需求对部署方案的影响

| 误检率 | 检测率 | 感知半径 | 初始候选位数 | 最佳候选位数 |
|------|------|-------|--------|--------|
| 0.01 | 0.95 | 15.86 | 32 | 14 |
| 0.02 | 0.90 | 17.31 | 27 | 13 |
| 0.03 | 0.85 | 18.51 | 23 | 12 |
| 0.04 | 0.80 | 19.64 | 27 | 12 |
| 0.05 | 0.75 | 20.76 | 23 | 10 |

场景 3 将模拟退火遗传算法与常用的寻找局部最优解算法——贪婪算法进行性能比较。用于节点部署的贪婪算法改编自文献[9]。假设在一个 100m×100m 的矩形区域内，节点感知半径固定为 20m,目标点密度依次增大，且位置随机分布。

仿真结果如图 8 所示，从图中可看到，模拟退火遗传算法寻找到的优化候选位数要少于贪婪算法寻得的结果，即该算法能够找到比贪婪算法更优化的解。

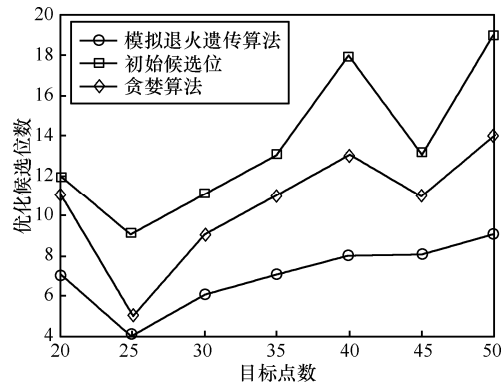


图 8 两算法性能比较

5 结束语

针对目标覆盖的确定性部署应用, 本文采用概率感知模型, 以反映节点对目标信号感知的随机特性。同时, 为便于后期的节点优化部署, 根据用户的感知需求, 即最低检测率、最高误检率指标, 求取满足感知性能的最小节点最大感知半径。在已知感知半径的基础上, 利用目标点最多层交叠域方法, 寻找监测目标集的传感器节点候选位置; 然后, 基于候选位集, 利用模拟退火遗传算法, 找出实现目标监测的最佳节点数及节点位置。该方案能够反应节点感知的随机特性, 并能够在检测时间发生的同时, 查找具体的事件源目标点, 具有较强的实际应用性。

在事件源目标点定位方面, 本文提出的方法虽然在大多数情况下能够实现事件源目标点的定位, 但是仍无法解决等势圆上目标点的区别问题。因此, 本文下一步将在事件源目标点定位方面继续开展研究。

参考文献:

- [1] ANTOINE G, JEAN C, DAVID S R, *et al.* Localized sensor area coverage with low communication overhead[J]. IEEE Transaction Mobile Computing, 2008,7(5):661-672.
- [2] WANG Y C, TSENG Y C. Distributed deployment schemes for mobile wireless sensor networks to ensure multilevel coverage[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008,19(9): 1280- 1294.
- [3] BALISTER P, KUMAR S. Random vs deterministic deployment of sensors in the presence of failures and placement errors[A]. Proceedings of the IEEE 28th Conference on Computer Communications (INFOCOM 2009)[C]. Brazil, 2009.2896-2900.
- [4] CARDEI M, THAI M T, LI Y S, *et al.* Energy-efficient target cover-

age in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the IEEE 24th Conference on Computer Communications (INFOCOM 2005)[C]. Miami, 2005. 1976-1984.

- [5] WANG B, CHUA K C, SRINIVASAN V, *et al.* Information coverage in randomly deployed wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007,6(8) :2994-3004.
- [6] SHIH K P, CHEN H C, CHOU C M, *et al.* On target coverage in wireless heterogeneous sensor networks with multiple sensing units[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2009,(32):866-877.
- [7] XING G L, TAN R, LIU B Y, *et al.* Data fusion improves the coverage of wireless sensor networks[A]. International Conference on Mobile Computing and Networking Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2009)[C]. China, 2009.157-168.
- [8] HE X, YANG H, GUI X L. The maximum coverage set calculated algorithm for WSN area coverage[J]. Journal of Networks, 2010,5(6): 650-657.
- [9] XU X, SAHNI S. Approximation algorithms for sensor deployment[J]. IEEE Transactions on Computers, 2007, 56(12):1681-1695.

作者简介:



何欣 (1974-), 男, 河南开封人, 西安交通大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络覆盖感知技术和物联网。



桂小林 (1966-), 男, 江西新余人, 博士, 西安交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、可信计算和云计算。