

面向目标覆盖的无线传感器网络确定性部署方法

何欣^{1,2}, 桂小林^{1,3}, 安健¹

(1. 西安交通大学计算机科学与技术系, 710049, 西安; 2. 河南大学计算中心, 475001, 河南开封;
3. 陕西省计算机网络重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对无线传感器网络中随机部署节点集划分法不能保证离散目标点优化部署的问题, 利用目标点最多层交叠域及遗传算法设计了一种面向目标覆盖的最优确定性部署方法. 该方法通过目标点最多层交叠域寻找监测目标点集的传感器节点候选位置, 基于候选位置点并利用遗传算法找出实现目标监测的最少节点数及节点位置. 所提算法中候选位置点的选取简化了遗传算法中的编码工作, 且与适应度函数相结合加速了算法的收敛, 而遗传算法提供了最佳位置点的寻求方式. 仿真试验表明, 所提方法在满足用户感知需求的基础上具有较少的部署节点数, 通常被控制在目标点个数的 30% 以内, 极大地降低了网络部署成本, 实现了无线传感器网络空间资源的优化分配.

关键词: 无线传感器网络; 目标覆盖; 优化部署

中图分类号: TN919.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)06-0006-04

A Deterministic Deployment Approach of Nodes in Wireless Sensor Networks for Target Coverage

HE Xin^{1,2}, GUI Xiaolin^{1,3}, AN Jian¹

(1. Department of Computer Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Computer Center, Henan University, Kaifeng, Henan 475001, China; 3. Shaanxi Province Key Laboratory of Computer Network, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In wireless sensor networks, since the existing method of dividing sensors based on the random deployment of nodes can not guarantee the optimal deployment to target coverage, an optimal deterministic deployment approach of sensor nodes is proposed by using the maximum multi-overlapping domains of target points and the genetic algorithm. Candidate positions where nodes will be placed to cover the target set are calculated using the concept of the maximum multi-overlapping domains of target points, and the genetic algorithm is used to find the least number of nodes to cover the target set and the optimal positions of these nodes from the candidate node positions. The determination of candidate positions simplifies the coding of the genetic algorithm, and accelerates the convergence of the algorithm by combining the effective fitness function. The genetic algorithm provides a way to find the optimal positions. Simulation results show that the proposed approach uses the least number of nodes for deployment, which is usually less than 30% of the number of target points, and guarantees users' sense demand, and that the network deployment cost is significantly reduced. The optimal allocation of space resources is realized in wireless sensor networks.

Keywords: wireless sensor network; target coverage; optimal deployment approach

收稿日期: 2009-10-20. 作者简介: 何欣(1974—),男,博士生;桂小林(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2008AA01Z410);国家自然科学基金资助项目(60873071);陕西省科技攻关资助项目(2007K04-05);西安交通大学重点实验室青年学术骨干培植项目.

在无线传感器网络中,通过空间资源的优化分配来满足用户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,可直接反映无线传感器网络对环境的感知服务质量^[1-2].目前的覆盖技术研究大多集中在区域覆盖的随机部署^[3-4]、确定性部署^[5]以及目标覆盖的随机部署等问题^[6],而针对目标覆盖的确定性部署问题却很少涉及.目标覆盖的确定性部署问题,主要是针对位置已知的离散目标点集来寻求最少的传感器节点数及最佳的节点部署位置,从而实现目标的监测和数据传输,优化网络成本.

本文利用目标点最多层交叠域和遗传算法,提出了一个面向目标覆盖的最优确定性部署方法.该方法首先通过目标点最多层交叠域,寻找监测目标点集的传感器节点候选位置集,然后利用遗传算法对候选位置集进一步优化,去除冗余点,降低部署的节点数.通过二者结合,可得到监测目标集所需的最少节点数及相应节点位置.该方法的应用极大地降低了网络的部署成本,实现了目标覆盖的确定性优化部署.

1 目标点最多层交叉域中的节点候选位置选取

本文采用圆盘感知模型来实现传感器节点对目标点的感知,即传感器节点的感知范围是以节点所在位置为圆心,以 R_s 为半径的圆.当目标点在节点的感知范围内时,节点可以感知到目标点.因此,对于目标点,在一个指定范围内部署传感器节点,该节点均可以感知到目标点.下面对目标点的部署范围进行定义.

定义 1 以目标点为圆心、以 R_s 为半径的圆作为目标点部署圆,如图 1 所示.部署圆定义为

$$D(t) = \{x \mid d(x, t) \leq R_s, x \in Q, t \in T\}$$

式中: Q 为监测区域; x 为区域内的点,即 $x \in Q$; $d(x, y)$ 为两点 x, y 之间的距离; T 为目标点集合.当存在两个以上目标点时,其部署圆可能相交,从而产生交叠域.

定义 2 目标点部署圆相交所形成的子域为目标点部署圆交叠域,其表达式为

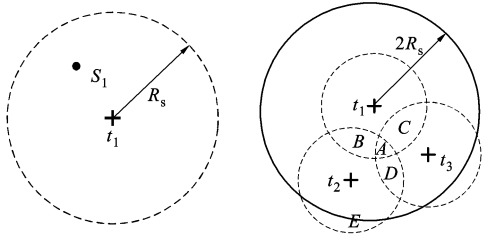
$$C(t) = \{x \mid x \in D(t) \cap x \in D(u), u \in N(t)\}$$

式中: u 是目标点 t 的邻居目标点.

定义 3 与目标点 t 的距离小于 2 倍感知半径的目标点为其邻居目标点,其表达式为

$$N(t) = \{u \mid u \in T, d(u, t) \leq 2R_s\}$$

如图 2 所示,目标点 t_2 和 t_3 是目标点 t_1 的邻居目标点,它们的部署圆交叠,从而形成交叠域,如子域 A, B, C, D .



• 表示传感器节点; + 表示目标点

图 1 目标点部署图

图 2 邻居目标点部署圆交叠域

定义 4 目标点部署圆与其邻居目标点部署圆相交,交叠次数最多的子域为目标点最多层交叠域.目标点最多层交叠域可能不唯一.

由图 2 和定义 4 可知:子域 A 是 3 个目标点的最多层交叠域,若将传感器节点放置在最多层交叠域 A 上,则可同时感知到 3 个目标点;若将传感器节点放置在子域 B, C, D 上,则节点能感知到 2 个目标点;若将传感器节点放置在目标点 t_1, t_2, t_3 部署圆的其他子域上,则 1 个节点仅能感知 1 个目标点.由此可知,位于最多层交叠域内的节点覆盖的目标点个数最多.由此,引出定理 1.

定理 1 对于目标点及其邻居目标点,将传感器节点放置在目标点的最多层交叠域内,则该传感器节点覆盖的目标点数最多.

由定理 1 和图 2 可知,对于 3 个目标点,如果在最多层交叠域 A 上部署节点,则仅需一个节点便可感知到 3 个目标点;如果在子域 B, C, D 上部署节点,则需要 2 个节点;如果在其他子域上部署节点,则需 3 个节点.因此,在最多层交叠域 A 上部署所需的节点数比其他域要少.由此,引出引理 1.

引理 1 对于一个区域内的多目标点,在每个目标点的最多层交叠域内寻找位置点所需的传感器节点总数最少.

可见,对于每一个目标点,欲部署的传感器节点位置应在该目标点的最多层交叠域中选取.

目标点的最多层交叠域及其候选位置点可通过计算几何理论、网格点划分等方式寻找,本文依据文献^[7]中最大交叠域计算方法获得,此处不再重述.

通过目标点的最多层交叠域能够得到欲部署传感器节点的候选位置,但是目标点最多层交叠域由

目标点根据自身与邻居目标点的信息计算得来,只能处理 2 倍感知半径以内的信息,无法针对整个目标点集合作出判断,因此传感器节点的候选位置存在冗余情况。如图 3 所示,4 个目标点存在 3 个最多层交叠域 A、B、C。根据引理 1,在每个交叠域上可选择一个位置点放置传感器(见图 3 中的空心圆点)。通过观测可知,节点有最佳部署位置(见图 3 中的实心圆点),所以通过引理 1,利用最多层交叠域仅能得到节点的候选位置点,而这些位置点并不是最佳部署位置,仍存在冗余情况,需进一步处理,去掉冗余,得到最优部署位置。

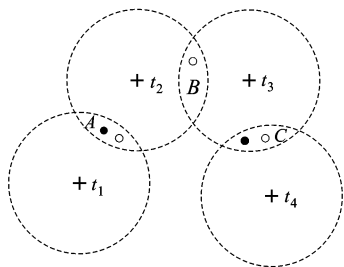


图 3 具有冗余位置的节点分布

2 候选位集优化

本文将遗传算法运用于无线传感器网络的优化部署中,以去除候选位集中的冗余节点位置。

2.1 基于遗传算法的候选位集编码机制

本文利用第 1 节的候选位集进行编码,从而简化了编码方案,降低了搜索空间的复杂度,加快了算法的收敛速度。

假设种群中个体的染色体由 N 个基因组成,则通过目标点最多层交叠域确定传感器节点候选位置个数 N ,并用一个长度为 N 的位串 $(l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_N)$ 来表示,每个 l_i 对应一个候选位置点 (x_i, y_i) ,且

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

2.2 适应度函数

在遗传算法中,利用适应度函数可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。在进行适应度函数设计时,本文涉及到 2 个指标:目标点覆盖度和候选位置利用率。

(1) 目标点覆盖度,即个体中包含的已选节点位置所覆盖的目标点数与目标点总数之比,用 f_1 表示, f_1 的值越大越好

$$f_1 = |\bigcup_{i=1}^N (l_i t_i)| / |T|$$

$$l_i t_i = \begin{cases} t_i, & l_i = 1 \\ \emptyset, & l_i = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_i 表示当选择候选位置点 i 时,节点能够覆盖的目标点集合; $|T|$ 表示目标点总数; $|\bigcup_{i=1}^N (l_i t_i)|$ 表示所选节点覆盖的目标节点数。

(2) 候选位置利用率,即已选择的候选位置点数与候选位置点总数之比,用 f_2 表示, f_2 的值越小越好

$$f_2 = \sum_{i=1}^N l_i / N \quad (2)$$

因此,适应度函数 f 应是 f_1 、 f_2 这 2 个指标的加权和

$$\left. \begin{aligned} f &= \omega_1 f_1 + \omega_2 (1 - f_2) \\ 0 < \omega_i < 1, \omega_1 + \omega_2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: ω_i 表示权值,反映 2 个指标对总体适应度的影响,在实际中可根据需要加以确定。

2.3 基本遗传算子

本文采用了选择、交叉、变异 3 个基本遗传算子,描述如下。

(1) 在选择操作中,选择概率采用了轮盘法,即将适应度函数值高的个体以较大的概率保留下来。由式(3)可知,适应度较高的个体通常是那些既满足目标全覆盖,同时冗余节点数又比较少的个体,因此可以将具有较少冗余节点的个体保留在下一代种群中。

(2) 通过交叉算子使算法具有全局空间搜索能力。对选择的父个体进行重组操作,以便在全局范围内寻求具有较少冗余的节点。

(3) 对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。其中,变异概率 P_m 对最优解和迭代次数影响较大: P_m 取值过小,容易陷入局部最优,或者使得迭代次数较大; P_m 取值过大,会因变异个体较多而导致最终值反复变化,无法收敛于最优解。

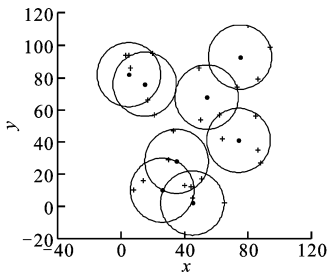
通过上面提供的编码及适应度函数,再利用 3 种基本遗传算子操作,即可设计出合理的遗传算法,以去除候选位置点中的冗余值,求得最优传感器节点部署位置。因篇幅所限,算法的实现代码此处省略。

3 性能分析

场景 1 假设在一个 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的矩形区域内,采用随机方式产生 25 个目标点,节点感知半径为

20 m. 利用最多层交叠域和遗传算法寻求能够感知所有目标点的最佳节点部署位置及节点个数.

在仿真中,采用文献[7]方法得到每个目标点的最多层交叠域,在每个域上非重复地选择节点候选位置,共得到 12 个候选位置点. 在候选位置点的基础上,利用遗传算法求取节点的最佳部署点. 该仿真运行经过了 18 代后,候选位置点不再变化,结果如图 4 所示. 由图 4 可知,采用遗传算法后仅需在 8 个位置点选择最佳部署点,比执行遗传算法前的节点位置数降低了 33%.



圆圈表示节点感知范围;+表示目标点;
•表示传感器最佳节点位置
图 4 节点最佳部署位置

场景 2 分析了不同目标点密度、感知半径对目标点最多层交叠域以及遗传算法产生的候选位置集、最佳位置集的影响.

(1)在节点感知半径为 20 m 的情况下,通过仿真结果(见图 5)来分析不同的目标点数及分布位置对候选位置集、最佳位置集及遗传算法执行代数数的影响.

由图 5 可以看出:候选位置点数随着目标点数的增加而增大;遗传算法的迭代次数不仅与候选节点数(编码长度)有关,而且与初始种群的选择、迭代中个体概率的选择有关,呈现随机性,但迭代次数总体较小;最佳部署位置点数呈增长趋势,但增长缓慢,且被控制在目标数的 30%以内.

(2)在目标点数为 25 的情况下,通过仿真结果(见图 6)来分析节点感知半径对候选位置集、最佳位置集及遗传算法执行代数的影响.

由图 6 可以看出:候选位置点数随着节点感知半径增大而逐渐减小;遗传算法的迭代次数仍呈现随机性,且迭代次数总体较小;最佳部署位置点数呈减小趋势.

场景 3 将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[6]. 假设在一个 100 m×100 m

的矩形区域内,节点的感知半径为 20 m,目标点密度依次增大,且位置随机分布. 仿真结果如图 7 所示. 从图 7 可看出,遗传算法寻找到的最佳位置点数要少于贪婪算法寻得的结果,即遗传算法能够找到比贪婪算法更优的解.

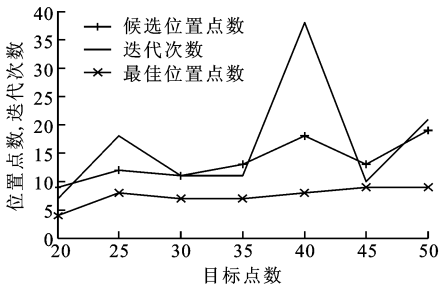


图 5 基于目标点的性能评价

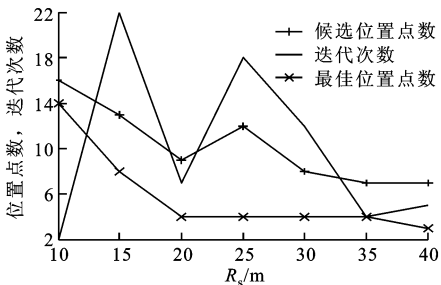


图 6 基于感知半径的性能评价

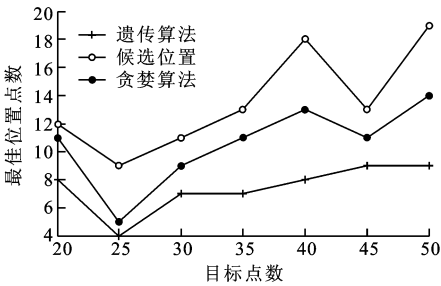


图 7 两种算法的性能评价

4 结 论

本文针对目标覆盖的确定优化部署问题,首先利用目标点最多层交叠域来寻找监测目标点集的传感器节点候选位置集,然后利用遗传算法去除候选集中的冗余点,以获得监测目标所需的最少节点数及节点位置. 仿真结果表明,本文方法在满足用户感知需求的基础上,具有较少的部署节点数,通常在目标点数的 30%以内,极大地降低了网络的部署成本. 另外,节点最优部署位置数受到节点感知半径、目标点密度的影响,但总体变化趋势较缓,且遗传算

法的进化代数被控制在一个较小的范围内。

在上述研究的基础上,我们后续需要解决的问题包括遗传算法的局部收敛、早熟,部署节点集的连通性,以及节点感知的随机特性等。

参考文献:

- [1] BALISTER P, KUMAR S R. Deterministic deployment of sensors in the presence of failures and placement errors [C]// Proceeding of the IEEE 28th Conference on Computer Communications. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2009:2896-2900.
- [2] 李善仓,张德运. 一种高效节能分布式传感器网络覆盖协议[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(10):1132-1136.
LI Shancang, ZHANG Deyun. Distributed high efficiency and energy-saving coverage protocol of wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(10):1132-1136.
- [3] GALLAIS A, CARLE J, SIMPLOT-RYL D, et al.

Localized sensor area coverage with low communication overhead [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(5):661-672.

- [4] WANG B, KEE C C, SRINIVASAN V, et al. Information coverage in randomly deployed wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8):2994-3004.
- [5] 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.
- [6] XU X, SAHNI S. Approximation algorithms for sensor deployment [J]. IEEE Transactions on Computers, 2007, 56(12):1681-1695.
- [7] HE Xin, YANG Hua, GUI Xiaolin. The maximum coverage set calculated algorithm for WSN area coverage [J]. Journal of Networks, 2010, 5(6):650-657.

(编辑 苗凌 刘杨)