

Optimal Sensor Deployment Scheme Based on Simulated Annealing Approach in Heterogeneous Wireless Sensor Networks^{*}

LI Ming, SHI Weiren^{*}

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: An optimal heterogeneous sensor differentiated deployment schemes based on simulated annealing algorithm is proposed to solve the problems of the high density of distributing heterogeneity nodes in wireless sensor networks (WSNs) and geographical irregularity of the sensed event. The algorithm uses the cost of sensors deployment as objective function in the context of assuring the coverage and fault tolerant of networks. Finally, simulation results demonstrated that the proposed approach is suitable for solving deployment problems of heterogeneous WSNs.

Key words: wireless sensor network; heterogeneous network; sensor deployment; simulated annealing algorithm

EEACC: 6150P; 7230; 7220

异构无线传感器网络中基于模拟退火算法的成本最优部署机制^{*}

李明, 石为人^{*}

(重庆大学自动化学院, 重庆 400030)

摘要: 针对异构传感器网络节点的高密度部署和监测目标非均匀分布的情况, 提出了一种基于模拟退火算法的成本最优部署方法。算法在保证网络覆盖和容错性的条件下, 以异构节点部署成本最小为优化目标进行操作。仿真结果表明该算法能快速收敛于最优解, 有效降低网络部署的成本, 提高了目标监测质量。

关键词: 无线传感器网络; 异构网络; 节点部署; 模拟退火算法

中图分类号: TP393; TP212.9; TN914; TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-1699(2010)06-0855-04

无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, 简称 WSNs) 是由部署在观测环境附近的大量微型廉价低功耗的传感器节点组成的多跳的网络系统, 目的是实时监测、感知和采集各种对象的信息。这些信息通过无线方式被发送, 并以自组织的网络方式传送到用户终端, 从而实现物理世界、计算世界以及人类社会三元世界的连通。WSNs 在军事国防、环境监测、生物医疗、智能家居、危险区域的远程监控等领域得到了广泛的应用, 已经引起了学术界和工业界的高度重视^[1-2]。

节点部署问题是 WSNs 研究的一个基本问题^[3-5], 是网络投入实际应用的基础。它直接关系到网络监测信息的准确性、完整性和时效性。文献[6]利用遗传算法求解在有限的成本和完全覆盖条件下目标检测节点的优化部署问题。文献[7]提出了一种基于并行粒子群算法的移动节点优化策略。文献[8]利用遗传算法求解最优覆盖节点集, 使得在满足

覆盖要求的同时, 节点数目最少。文献[9]提出了一种量子遗传算法解决 WSNs 中感知节点分布优化问题。文献[10]以网络有效覆盖率为优化目标, 提出了一种基于概率测量模型的粒子群优化策略。以上对节点部署问题的研究大多基于同构节点展开的, 即参与覆盖的节点的寿命、电源能量、感知半径、通信半径、移动能力等都相同, 同时假定节点在监测区域内是均匀分布, 这有悖于现实中目标出现常出现在“热点”区域^[11-12]的趋势, 并且同构节点构成的网络具有扩展性差^[13]的特点。文献[14]对节点的非均匀分布进行研究, 提出了一种基于禁忌搜索的节点部署策略, 提高目标的监测质量, 但同样是假定节点是同构的, 不利于网络的扩展。针对这些问题, 本文提出了一种基于模拟退火算法的异构网络节点部署方法。该方法适用于布尔传感模型和概率传感模型, 能在保证网络连通性、覆盖性和容错性的条件下, 使得网络对目标监测的质量最好和部署的成本最少。

项目来源: 博士点基金资助(20060611010); 传感器网络路由协议自适应机制研究“和”863 计划项目资助(2006AA780201-2); 军民两用智能监控技术和穿戴式智能交互系统研究

收稿日期: 2009-12-22 **修改日期:** 2010-01-18

1 异构节点部署的数学模型

假定监测区域 S 为二维平面,被离散化为 N 个栅格,每个栅格的面积为 1,有 K 种不同类型的传感器节点,其感知半径(r_k^s)和通信半径(r_k^c)已知,且 $r_k^c \geq 2r_k^s$ ($k=1,2,\dots,K$),保证网络在充分覆盖时总是连通的。每种类型的传感器节点的成本为 c_k ($k=1,2,\dots,K$)。在保证覆盖和容错性的前提下,使得网络成本最低的形式化描述为:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K c_{ik} x_{ik} \quad (1)$$

$$s \cdot t \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K a_{ijk} x_{ik} \geq b_j \quad j=1,2,\dots,N \quad (2)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad i=1,2,\dots,N; k=1,2,\dots,K \quad (3)$$

其中决策变量

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{在栅格 } i \text{ 放置类型为 } k \text{ 的传感器节点} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases}$$

变量 c_{ik} 表示在栅格 i 放置类型为 k 的传感器节点的成本。 b_j 表示对栅格 j 覆盖度的要求,其值取决于应用需求。

1.1 布尔传感模型

布尔模型也称 01 模型。在该模型中,节点的感知范围是以节点为圆心、最大感知距离为半径的圆,即若目标出现在该圆区域内,则一定能被该节点检测到(值为 1),否则,无法检测到(值为 0)。在该模型下,变量 a_{ijk} 的值取决于栅格 i 与栅格 j 之间的欧氏距离(d_{ij})与类型为 k 的传感器感知半径 r_k^s 的关系

$$a_{ijk} = \begin{cases} 1 & d_{ij} \leq r_k^s \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

为简化计算,以栅格的重心代表此栅格。栅格 i 与栅格 j 之间的欧氏距离(d_{ij})即为两栅格重心之间的距离。在布尔传感模型中, b_j 取非负整数。一般地,为保证网络的健壮性和容错性, $b_j \geq 1$ 。当均匀覆盖时 $b_j = \text{常数}$ 。

1.2 概率模型

在概率模型中,目标被节点检测到的概率与目标和节点之间的距离及方向有关,本文采用文献 [15-16] 的数学模型。监测点 j 被放置在点 i 处类型为 k 传感器节点检测到的概率为:

$$p_{ijk} = e^{-\alpha_k d_{ij}} \quad (4)$$

其中 α_k 为类型为 k 传感器的参数,其值取决于传感器的类型。 d_{ij} 为点 i 和点 j 之间的欧氏距离。点 j 未能被放置在 i 点处类型为 k 传感器节点检测到的概率为:

$$p = 1 - x_{ik} p_{ijk} = \begin{cases} 1 - p_{ijk} & \text{当 } x_{ik} = 1 \\ 1 & \text{当 } x_{ik} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

点 j 不能被所有传感器检测到的概率为:

$$p' = \prod_{i=1}^N \prod_{k=1}^K (1 - x_{ik} p_{ijk}) \leq L \quad (6)$$

L 为概率上界 $0 < L < 1$ 。将式(6)两边取对数进行变换可得

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \ln(1 - x_{ik} p_{ijk}) \leq \ln L \quad (7)$$

由于 $\ln(1 - x_{ik} p_{ijk}) = \begin{cases} \ln(1 - p_{ijk}) & x_{ik} = 1 \\ 0 & x_{ik} = 0 \end{cases}$, 所以

式(7)可变为

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \ln(1 - p_{ijk}) x_{ik} \leq \ln L \quad (8)$$

比较式(8)与式(2)可知,在概率模型下

$$a_{ijk} = -\ln(1 - p_{ijk}), b_j = -\ln L \quad (9)$$

当 $i=j$ 时, $p_{ijk} = p_{iik} = 1$, $(1 - p_{ijk}) = 0$, 取对数无意义,在本文中令 $p_{iik} = 0.999$ 。

2 网络覆盖的优化策略设计

模拟退火算法^[17]是一种模拟物理退火过程的随机搜索算法,它克服了传统爬山法容易陷入局部最优的缺点,具有稳健性、健壮性和高效性等特点,是求解大规模组合优化问题的有效近似算法。

模拟退火算法的主要步骤描述如下:

(1) 设置初始状态 S_0 , 一个确定的初始温度 T_0 , 以及温度下降系数 λ ;

(2) 随机扰动产生状态 S' , 并计算

$$\Delta E = E(S_0) - E(S');$$

(3) 如果 $\Delta E > 0$, 则接受 S' , 否则, 以一定概率

$$\exp(-\Delta E/T) \text{ 接受 } S';$$

(4) 在温度 T 下检验是否达到平衡, 若不平衡则转(2);

(5) 令 $T = T \times \lambda$;

(6) 检验是否达到理论最低温, 若是, 则退火过程结束, 否则转(2)。

将模拟退火应用于本文, 问题的解用一个整型字符串表示, 字符串长度为 $|N| \cdot |K|$, 其中 N 为监测区域中含有的栅格的数目, K 为传感器类型总数。当某一位置部署某种类型的传感器时, 此处栅格的值为 1, 否则为 0。图 1 为解的示意图, 其中 z_1, z_2, z_3 表示候选的放置传感器节点的栅格位置, k_1, k_2, k_3, k_4 表示不同的传感器类型。

z_1	z_2	z_3	z_1	z_2	z_3	z_1	z_2	z_3	z_1	z_2	z_3
0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
k_1			k_2			k_3			k_4		

图 1 解示意图

解的质量用式(10)来衡量,

$$f = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K c_{ik} x_{ik} + M \left\{ \min \left\{ 0, \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K a_{ijk} x_{ik} - b_i \right\} \right\}^2 \right\} \quad (10)$$

其中, M 是罚函数因子, 一般取任意大的正整数。

3 算法性能测试

3.1 仿真参数设置

假定部署区域为 $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$, 监测目标出现的概率服从有边界的帕累托分布^[11-12], 密度函数为:

$$F(k) = \frac{1 - (a/k)^\alpha}{1 - (a/b)^\alpha} \quad (11)$$

在部署区域内根据式子(11)所示的 Pareto 分布产生一定数量的目标, 其中包含目标数量多、密度大的部分区域称为“热点区域”。本文目标分布示意图如图 2 所示, 具体参数设置为: 目标总数为 150, 其余参数 $\alpha = 1.1, a = 3, b = 100$ 。

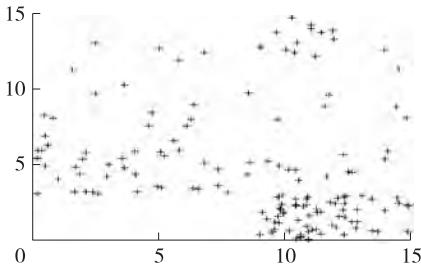


图 2 目标分布示意图

系统中共有三种类型的传感器节点, 其参数如表 1 所示。

表 1 传感器参数表

类型	技术参数	感知半径/m	成本/Yuan
1	0.49	6	150
2	0.25	10	250
3	0.64	2	100

每个栅格中目标出现的阈值由系统根据目标分布自动生成, 式子(10)中, $M = 10000$ 。

3.2 结果及分析

本文以概率传感模型下的仿真结果为例(布尔传感模型下结果与此类似)进行分析。模拟退火算法的算法性能如图 3 所示, 其中(a)(b)分别为当前函数值和最好的函数值随着迭代次数变化的曲线图。从图中可以看出, 经过 5 100 次迭代, 算法收敛到最优解 5 150。(c)(d)分别为当前传感器的部署和当前最优的部署节点示意图。运用模拟退火算法求得的节点成本最优部署如图 4 所示。其中红色 * 表示类型为 1 的传感器节点, 绿色六边形表示类型为 2 的传感器节点。蓝色 + 号表示类型为 3 传感器节点, 其他表示空白区域(在图 3 的(c)、(d)中黄色

○表示空白区域)。由图可以看出, 由于边界效应的存在, 在边界处布置的节点数较多, 密度较大。

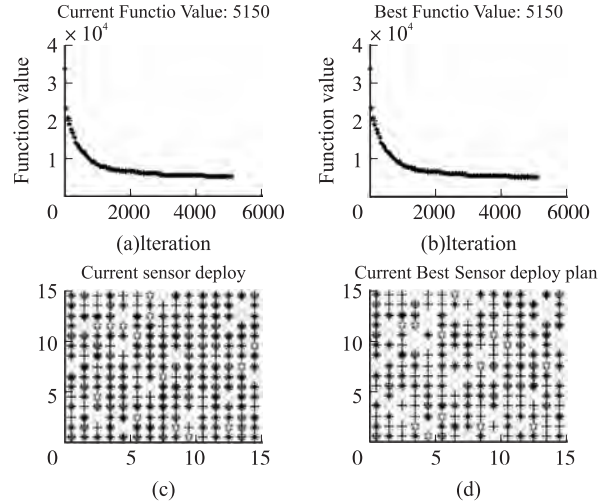


图 3 算法性能评估

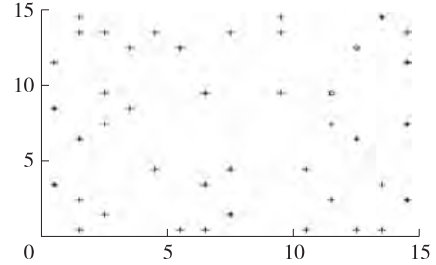


图 4 异构节点成本最优部署图

3.3 结果比较

为了考察算法与现有算法的性能比较, 作者做了另一组实验, 用本文的算法得到的结果与用 LINGO 得到的结果从最终结果和算法消耗的时间两方面进行比较。比较结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 实验结果对比表

N	Z_LINGO	Z_SA	Standare Dev.
100	1450	1616	11.45
121	1752	1945	11.01
144	2015	2104	4.42
169	2350	2273	-3.28
196	2750	2670	-2.90
225	2950	3034	2.85

表 3 算法所用时间比较(时间单位:s)

N	T_Z_LINGO	T_Z_SA	Standare Dev.
100	10000 *	12.28	-99.87
121	10000 *	22.80	-99.77
144	10000 *	32.79	-99.67
169	10000 *	44.59	-99.55
196	10000 *	63.10	-99.37
225	10000 *	75.30	-99.25

在表 2 中, 第一列为部署区域中的栅格数目, 第二列和第三列分别为用 LINGO 和本文算法得到的结果, 最后一列为标准方差, 计算公式为:

$$100 \times \frac{Z_SA - Z_LINGO}{Z_LINGO} \quad (12)$$

从表2可以看出,随着栅格数目的增加,本文的算法与LINGO得到的结果方差越来越小,两种方法得到的结果逐渐逼近。

表3是本文所用的算法与LINGO计算出结果所用时间的比较,其中第一列为区域中栅格的数目,第二列和第三列分别为用LINGO和本文算法得出结果所用的时间,最后一列为标准方差,计算公式同式(12)。表中10 000*代表执行时间的最大值,从表2和表3可以看出,本文算法较之LINGO,在算法运行时间上具有明显的优势,具有较好的收敛性能,同时结果与之相比,具有较高的准确性。

4 结论

本文研究了异构无线传感器网络的节点的成本优化覆盖问题,提出了基于模拟退火算法的优化覆盖策略。该方法既能适用于节点的布尔感知模型,又能应用于节点的概率感知模型。仿真结果表明,本文提出的优化方法有效收敛于最优解,在保证网络的容错性和健壮性的前提下,降低了网络部署的成本,提高了网络对目标监测的质量。

本文研究的是一种确定性异构节点部署方法,节点的位置预先计算后进行部署。在实际中,节点的位置一般不能预先得到,特别是通过飞机播撒的方式进行部署时,今后的工作将集中于解决在节点位置近似于最优位置时部署优化以及通过移动节点完成网络二次部署优化问题;同时本文研究的异构节点部署仅仅假定其感知半径不同,下一步的工作将解决在节点的寿命,状态切换能力,移动性能等不同的情况下,节点的优化部署问题。

参考文献:

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282 - 1291.
- [2] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee, Dipak Ghosal. Wireless Sensor Network Survey[J]. IEEE Computer Networks, 2008, 52(12): 2292 - 2330.
- [3] Amitabha Ghosh, Sajal K Das. Coverage and Connectivity Issues in Wireless Sensor Networks: A Survey[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2008, 4(3): 303 - 334.
- [4] Mohamed Younis, Kemal Akkaya. Strategies and Techniques for Node Placement in Wireless Sensor Networks: A Survey[J]. Ad Hoc Networks, 2008, 6(4): 621 - 655.
- [5] 俞靓, 王志波, 骆吉安, 等. 面向移动目标追踪的无线传感器网络 QoS 指标体系设计[J]. 计算机学报, 2009, 32(3): 441 - 462.
- [6] 胡宁, 张德运. 无线传感器网络中目标检测节点的优化部署[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(8): 906 - 910.
- [7] 王雪, 王晟, 马俊杰. 无线传感网络移动节点位置并行微粒群优化策略[J]. 计算机学报, 2007, 30(4): 563 - 568.
- [8] 贾杰, 陈剑, 常桂然, 等. 无线传感器网络中最优覆盖节点集的求解算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(11): 1560 - 1563.
- [9] 付华, 韩爽. 基于新量子遗传算法的无线传感器网络感知节点的分布优化[J]. 传感技术学报, 2008, 21(7): 1259 - 1263.
- [10] 林祝亮, 冯远静. 基于粒子群算法的无线传感网络覆盖优化策略[J]. 计算机仿真, 2009, 26(4): 190 - 193.
- [11] Yu CS, Shin KG, Lee B. Power-Stepped Protocol: Enhancing Spatial Utilization in a Clustered Mobile Ad Hoc Network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(7): 1322 - 1334.
- [12] Watts DJ, Strogatz SH. Collective Dynamics of 'Small-World' Networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440 - 442.
- [13] Gupta P, Kumar P R. The Capacity of Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388 - 404.
- [14] Aitsaadi N, Achir N, Boussetta K, et al. A Tabu Search WSN Deployment Method for Monitoring Geographically Irregular Distributed Events[J]. SENSORS, 2009, 9(3): 1635 - 1643.
- [15] Dhillon S S, Chakrabarty K, Iyengar S S. Sensor Placement for Grid Coverage under Imprecise Detections[C]//Proc. International Conference on Information Fusion, Annapolis: IEEE Press, 2002: 1581 - 1587.
- [16] Dhillon S S, Chakrabarty K. Sensor Placement for Effective Coverage and Surveillance in Distributed Sensor Networks[C]//Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, New Orleans: IEEE Press, 2003: 1609 - 1614.
- [17] 樊晓宇, 王玉宝, 卢国伟, 等. 基于遗传模拟退火算法的压力传感器温度补偿系统[J]. 传感技术学报, 2008, 21(9): 1532 - 1535.



李明(1982 -), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络及其应用, 普适计算, sshjlm@163.com;



石为人(1948 -), 男, 重庆市人, 教授, 博士生导师, 国家“985工程”科技创新平台重庆大学测控及遥感信息传输研究院院长, 研究方向为智能感知、控制与决策, wrs@cqu.edu.cn.