

文章编号: 1000-582X(2012)02-055-05

异构传感器网络成本最优节点部署机制

李 明, 石为人

(重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘 要: 针对异构无线传感器网络中节点的高密度部署情况, 研究了异构传感器节点的优化部署问题。提出一种基于遗传算法的异构节点成本优化部署方法。算法以网络的容错性和覆盖性为约束条件, 以部署的成本为目标函数进行优化计算得到保证网络覆盖和网络容错性所需的节点位置和节点类型。算法既适用于布尔传感模型, 又能应用于概率传感模型。仿真结果表明该算法能快速收敛于最优解, 降低网络部署的成本, 是一种可行的异构无线传感器网络节点部署的解决方案。

关键词: 无线传感器网络; 异构网络; 节点部署; 遗传算法

中图分类号: TP393

文献标志码: A

Optimal sensor deployment scheme for heterogeneous wireless sensor networks

LI Ming, SHI Wei-ren

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: For the high density of distributed heterogeneity nodes in wireless sensor networks (WSNs), the optimal sensor deployment is studied. A cost optimal heterogeneous sensor deployment scheme based on genetic algorithm is proposed. The cost of sensor node deployment is used as objective function for optimization computation subjected to network coverage and fault tolerance to obtain the suitable types and positions of the sensors. The algorithm can be used for boolean sensing model as well as probabilistic sensing model. The simulation results demonstrate that the proposed algorithm converges fast toward the optimal solutions and reduces the cost of sensor deployment, which is feasible for heterogenous nodes deployment in WSNs.

Key words: wireless sensor networks ; heterogeneous networks ; sensor deployment; genetic algorithm

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSNs) 是由随机播撒地或者有规律地部署在监测区域内部和周围的传感器节点构成的一种新型网络。随着微电子技术的发展, WSNs 的技术日趋成熟, 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^[1-3]。

节点部署问题是 WSNs 的一个基本问题, 是保证网络服务质量的重要手段^[4]。近年来, 遗传算法及其改进算法作为问题求最优解的有效工具, 在 WSNs 节点部署优化中得到广泛应用。文献[5]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[6-7]利用改进的

收稿日期: 2011-07-20

基金项目: 863 国家重点基金资助项目 (2006AA780201-2); 博士点基金资助项目 (20060611010)

作者简介: 李明 (1982-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要从事无线传感器网络方向研究, (Tel) 13648418549; (E-mail) sshjlm@163.com。

NSGA-II 解决多目标节点部署优化问题。文献[8]提出一种结合 Hosfield 网络和遗传算法的动态节点选择优化策略。文献[9]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[10]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。以上对节点覆盖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,这些假设有悖于现实,并且同构节点构成的网络具有扩展性差^[11]的特点,针对这些问题,提出了一种基于遗传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,使得网络部署的成本最少。

1 问题描述

假定监测区域 A 为二维平面,监测区域 A 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 $r_k^c \geq 2r_k^s$,保证异构节点部署后构成一个连通的网络。每一种类型的传感器节点的成本为 c_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

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

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

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

其中:决策变量

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

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。式(2)对节点覆盖进行约束,式(3)对决策变量 x_{ik} 取值进行约束,只能取 1 或 0。

1.1 布尔传感模型

布尔模型也称(0 1)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 2 栅格重心之间的距离。在布尔传感模型中, b_i 取非负整数。一般地,为保证网络的健壮性和容错性, $b_i \geq 1$ 。当均匀覆盖时 b_i 为常数且 ≥ 1 。

1.2 概率传感模型

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均相关。采用文献[12-13]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 未能被放置在点 i 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

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

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

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,令 $p_{iik} = 0.999$ 。

2 基于遗传算法的成本最优节点部署算法

异构网络成本最优问题属于组合优化问题,当 $c_{ik} = 1$ 且 $b_i = 1$ 时,上述问题即演化为集合覆盖问题,已证明是 NP 难问题^[12-15],对于规模较大的算法由于运行时间长,显得力不从心。因此,选择合适的近似算法求解成为必要。

遗传算法 GA(genetic algorithm)是一种根据生物进化模型提出的迭代式自适应随机搜索方法。它模拟自然界中生物进化的发展规律,在人工系统中实现特定目标的优化^[16-17]。对于最优化的求解过程始于一组随机解,称为“种群”,种群中每一个解称为

一个个体。个体解的优劣通过“适应度”来评估,适应度高的个体具有较高的生存概率。子代种群由父代通过交叉、变异等遗传运算和适应度评估选择产生,如此反复直至找到全局最优解。

用遗传算法解决优化问题时,要解决 3 个关键问题:染色体的设计,交叉策略和变异方法的选择以及适应度函数的设计。对于优化问题,染色体的设计如图 1 所示。

z1	z2	z3									
0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
k1			k2			k3			k4		

图 1 染色体的设计

其中:z1,z2,z3,表示候选的放置传感器节点的栅格位置;k1,k2,k3 表示不同的传感器类型。取 1 或取 0,分别对应是否选择某种类型的传感器节点部署在该区域。染色体的长度为 $|N| \cdot |K|$,N 是候选的可放置传感器节点的栅格总数,K 是传感器类型的数目。优化问题的解可表示为

$$\begin{aligned}
 &(a_{1,k1}, a_{2,k1}, \dots, a_{N,k1}, a_{1,k2}, a_{2,k2}, \dots, \\
 &a_{N,k2}, \dots, a_{1,kK}, a_{2,kK}, \dots, a_{N,kK}), \\
 a_{i,kj} = &\begin{cases} 1, & \text{在栅格 } i \text{ 放置类型为 } kj \text{ 的传感器;} \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad \text{利用}
 \end{aligned}$$

编码映射,建立遗传算法中的初始种群。种群由 S 个个体组成,算法中每个个体的染色体均由 $|N| \cdot |K|$ 个基因组构成,初始化种群为

$$\left. \begin{aligned}
 P_{p01} &= \{g_{11}, g_{12}, \dots, g_{1|N| \cdot |K|}\} \\
 P_{p02} &= \{g_{21}, g_{22}, \dots, g_{2|N| \cdot |K|}\} \\
 P_{poi} &= \{g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{i|N| \cdot |K|}\} \\
 P_{p0S} &= \{g_{S1}, g_{S2}, \dots, g_{S|N| \cdot |K|}\}
 \end{aligned} \right\},$$

交叉策略选择将不同类型的传感器相互交换,示意图如图 2 所示。

z1	z2	z3									
0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
k1			k2			k3			k4		

(a)交叉前

z1	z2	z3									
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0
k1			k2			k3			k4		

(b)交叉后

图 2 交叉示意图

图中假定有 4 种类型的传感器节点需要部署在 3 个区域中。作交叉操作时,将前 2 种类型传感器节点的取值与后 2 种传感器节点的取值对调,即完

成遗传算法的交叉操作。

变异策略,是随机将染色体任意位置的值取反,即将 1 取反变成 0,将 0 取反变成 1。变异策略中是任意取染色体的 2 个位置进行变异操作。

通过适应度函数,GA 就能判断出 1 个解的优劣程度。每个个体的适应度值如式(10)所示

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

其中 M 是罚函数因子,一般取任意大的正整数,比如 M=10 000。

3 算法仿真及结果分析

3.1 布尔传感模型

在 10 m×10 m 区域内随机投放 3 种类型的传感器节点,在保证覆盖和容错性的前提下,求得其成本最优的部署。传感器节点参数如表 1 所示。

表 1 传感器参数表

类型	成本/元	感应半径/m
1	150	2
2	500	4
3	100	1

不等式(2)中,取 $b_i=2$,即要求每个栅格点至少有 2 个节点覆盖。式(10)中 $M=10\ 000$ [9]。运用遗传算法求解的最优部署如图 3 所示,其中○表示空白区域,*表示类型为 1 的传感器节点,六边形表示类型为 2 的传感器节点,+表示类型为 3 的传感器节点。由图 3 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。

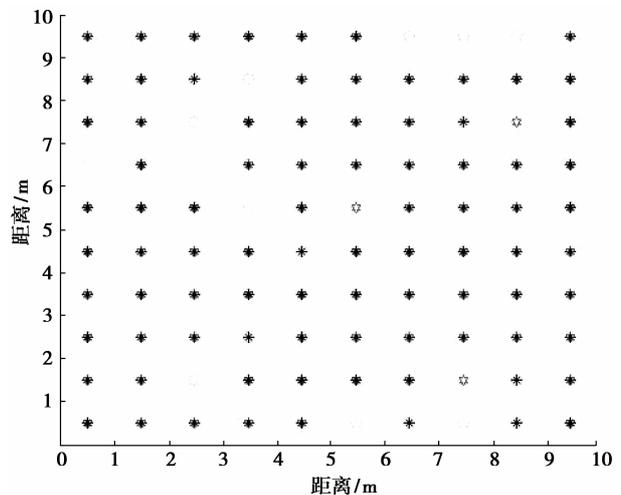


图 3 布尔模型下节点部署示意图

图 4 记录了随着繁殖代数的递增,最优种群适应度和种群适应度变化的性能曲线。从图中可以看出,随着繁殖代数的增加,适应度不断趋于最优解。可见基于遗传算法的节点选择方法获得了理想的节点部署方案,节省了部署成本,满足了应用需求。

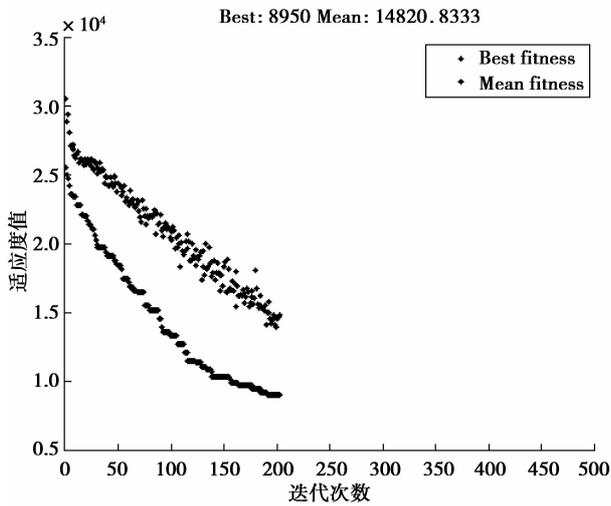


图 4 布尔模型下适应度变化的性能曲线

3.2 概率传感模型

同样在 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 区域内投放 3 种类型的传感器节点,求其成本最优的部署。传感器节点的参数如表 2 所示。

表 2 传感器参数表

类型	成本/元	感应半径/m	退化系数
1	150	2	0.5
2	500	4	0.4
3	100	1	0.6

不等式(2)中,取 $b_i = 0.99$ 即 $L = 0.01$,也就是每个栅格点被节点覆盖的概率至少为 0.99。式(10)中 $M = 10\ 000$ [9]。运用遗传算法求解的最优部署如图 5 所示,其中 \circ 表示空白区域, $*$ 表示类型为 1 的传感器节点,六边形表示类型为 2 的传感器节点, $+$ 表示类型为 3 的传感器节点。图 6 是函数值(性能函数)随迭代次数增加的变化趋势图,从图中可以看出,最优适应度函数(黑色曲线)和种群的平均适应度函数(蓝色曲线)可以很快收敛到最优解。

3.3 算法比较

为了检验算法得到的结果,作者作了另一组实验。作者将得到的结果(此处以布尔传感模型下结果为例,概率传感模型下对比结果与之类似)与数学规划软件 LINGO 得到的结果相比较,得到的结果如表 3 所示

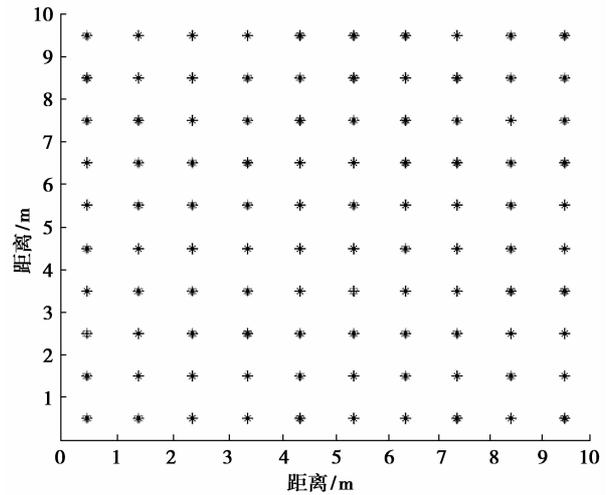


图 5 概率模型下节点部署示意图

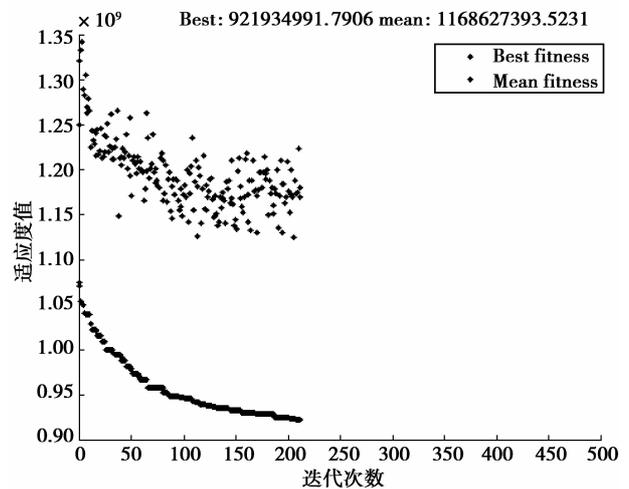


图 6 概率模型下适应度变化的性能曲线

表 3 算法结果比较表

N	Z_LINGO	Z_GA	Standare Dev.
16	700	900	28.56
25	1 000	1 100	10
36	1 200	1 600	33.3
49	1 550	2 350	51.61
64	2 050	2 800	36.59
81	2 450	3 250	32.65
100	2 950	3 750	27.12

其中表中第一列 N 为部署区域的栅格数目,第二列为用 LINGO 软件得到的结果,第三列为用本文算法得到的结果。表中最后一列为标准方差,计算公式为

$$100 \times \frac{Z_{GA} - Z_{LINGO}}{Z_{LINGO}} \quad (11)$$

从表中可以看出,随着 N 值的增加,由 2 种计算方法得到的标准方差逐渐减小,2 种方法得到结

果趋于接近。

4 结 语

研究了无线传感器网络的成本最优覆盖问题,提出了基于遗传算法的优化覆盖策略。仿真结果表明,提出的优化方法有效收敛于最优解,降低了网络部署的成本。

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在节点位置近似于最优位置时部署优化问题;同时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] AKYILDIZ F, SU W, SANAKAMANIAM Y. Wireless sensor networks: a survey [J]. IEEE Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] HILL J, SZEWCZYK R, WOO A, et al. System architecture directions for networked sensors [C] // Proceedings of the 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, Nov. 12-15, 2000, Cambridge, MA, USA. New York: ACM Press, 2000: 93-104.
- [3] RAMANATHAN R. A brief overview of Ad Hoc networks: challenges and directions [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(5): 20-22.
- [4] AMITABHA G, SAJAL K D. Coverage and connectivity issues in wireless sensor networks: a survey [J]. Pervasive and Mobile Computing, 2008, 4(3): 303-334.
- [5] 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.
JIA JIE, CHEN JIAN, CHANG GUI-RAN, et al. Optimal coverage algorithm of sensor nodes set selection in wireless sensor network [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2007, 28(11): 1560-1563.
- [6] 贾杰, 陈剑, 常桂然, 等. 基于节点协同覆盖的传感器网络寿命最大化模型 [J]. 控制与决策, 2009, 24(8): 1181-1186.
JIA JIE, CHEN JIAN, CHANG GUI-RAN, et al. Optimal lifetime model based on multi-nodes cooperation coverage in wireless sensor networks [J]. Control and Decision, 2009, 24(8): 1181-1186.
- [7] JIA J, CHEN J, CHANG G R, et al. Energy efficient coverage control in wireless sensor networks based on multi-objective genetic algorithm [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2009, 57(11-12): 1756-1766.
- [8] 王晟, 王雪, 毕道伟. 无线传感器网络动态节点选择优化策略 [J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 188-195.
WANG SHENG, WANG XUE, BI DAO-WEI. Dynamic sensor selection optimization strategy for wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(1): 188-195.
- [9] 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.
HU NING, ZHANG DE-YUN. Optimized placement of nodes for target detection in sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(8): 906-910.
- [10] 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.
FU HUA, HAN SHUANG. Optimal sensor node distribution based on the new quantum genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(7): 1259-1263.
- [11] GUPTA, P KUMAR P R. The capacity of wireless networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388-404.
- [12] DHILLON S S, CHAKRABARTY K, IYENGAR S S. Sensor placement for grid coverage under imprecise detections [C] // Proceedings of the 5th International Conference on Information Fusion, July 8-11, 2002, Annapolis, MD, USA. Annapolis: IEEE Press, 2002: 1581-1587.
- [13] DHILLON S S, CHAKRABARTY K. Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks [C] // Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, March 17-19, 2003, New Orleans, Louisiana, USA. New Orleans: IEEE, 2003: 1609-1614.
- [14] LEMKE C E. Set covering by single-branch enumeration with linear-programming subproblems [J]. Operations Research, 1971, 19(4): 998-1022.
- [15] GAREY M R, JOHNSON D S. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness [M]. New York: Freeman, 1979.
- [16] GEN M, CHENG R. Genetic algorithms and engineering design [M]. New Jersey, USA: John Wiley & Sons Press, 1996.
- [17] 郭绍永, 谈冉. 遗传算法在无线传感器网络中的应用 [J]. 微计算机信息, 2009, 25(4): 125-127.
GUO SHAO-YONG, TAN RAN. The application of genetic algorithm in wireless sensor network [J]. Microcomputer Information, 2009, 25(4): 125-127.