

文章编号: 1001-0920(2010)12-1857-04

## 基于差分进化算法的移动传感器网络节点的分布优化

靳立忠<sup>a</sup>, 常桂然<sup>b</sup>, 贾杰<sup>a</sup>

(东北大学 a. 信息科学与工程学院, b. 计算中心, 沈阳 110819)

**摘要:** 针对传感器节点的分布优化问题, 研究了在保证网络连通性的前提下, 极大化移动传感器网络的有效覆盖面积问题, 提出了一种基于差分进化算法的移动传感器网络节点分布优化机制. 仿真实验结果表明, 该算法能以相对较小的代价快速完成移动传感器网络节点的分布优化, 提高网络的有效覆盖率, 实现移动传感器网络布局的全局优化.

**关键词:** 移动传感器网络; 差分进化算法; 移动节点; 网络覆盖率; 网络拓扑控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

## Node distribution optimization in mobile sensor networks based on differential evolution algorithm

JIN Li-zhong<sup>a</sup>, CHANG Gui-ran<sup>b</sup>, JIA Jie<sup>a</sup>

(a. College of Information Science and Engineering, b. Computing Center, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Correspondent: JIN Li-zhong, E-mail: jinlizhongneu@163.com)

**Abstract:** Aiming at the optimization of node distribution, this paper investigates the problem of maximizing the effective coverage area of mobile sensor networks under the premise of guaranteeing the network connectivity. A node distribution optimization scheme based on differential evolution algorithm is proposed. Simulation results show that the proposed algorithm can quickly achieve node distribution optimization of a mobile sensor network, increase the effective coverage rate, and achieve global optimization of the deployment of the mobile sensor network at a relatively low cost.

**Key words:** Mobile sensor network; Differential evolution algorithm; Mobile node; Coverage rate; Network topology control

### 1 引言

近年来, MEMS (Micro electro mechanical system) 技术的发展已经使得实现结构紧凑、成本低廉的移动传感器成为可能<sup>[1]</sup>, 越来越多的人开始关注移动传感器网络 (MSN). 本文研究全部由具有可控机动能力的增强型节点组成的无线传感器网络, 每个移动节点除了具有传统静态节点的传感、计算和通信能力之外, 还具有一定的机动能力. 对于一些危险场合和动态环境对象 (如灾难现场、紧急救援等), 传统的无线传感器网络部署方法实现起来十分困难, 甚至失效; 而利用由移动节点构成的移动传感器网络, 则可使问题得到解决. 配备相关传感器的移动节点可以自动地在现场部署, 按预定的程序取得一个合适的节点分布密度和网络覆盖, 及时传回实时监测数据.

在移动传感器网络的研究中, 移动节点的部署问题是一个重要的研究方向, 即如何把有限的节点合理放置到监测区域中, 以实现网络监测性能的最大化. 文献 [2] 提出了一种新的基于微粒群模型的移动传感器节点位置优化配置算法. [3] 提出了一种基于改进微粒群算法的移动传感器网络自组织方法, 使得网络在覆盖的均匀性、快速性和连接的可靠性上, 表现较好. [4] 给出了一种用于未知环境的移动传感器网络自部署算法, 该算法结合了人工势场法与确定度网格方法. [5] 利用节点的移动性, 提出了一种基于遗传算法的分布优化机制. 从这些方法可以得出移动传感器网络对监测区域的覆盖问题, 其实质就是在兼顾到节点间通信的基础上, 实现监测范围的最大化, 提高移动传感器网络的有效覆盖率, 获得较优的网络拓扑.

收稿日期: 2009-12-28; 修回日期: 2010-05-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60903159).

作者简介: 靳立忠(1980—), 男, 山东德州人, 博士生, 从事无线传感器网络的研究; 常桂然(1946—), 男, 河北曲周人, 教授, 博士生导师, 从事计算机网络、无线传感器网络等研究.

## 2 问题陈述

假定监测区域  $A$  为二维平面, 监测区域  $A$  被划分为  $m \times n$  的网格<sup>[6]</sup>, 监测区域上的传感器节点的集合表示为

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}. \quad (1)$$

其中  $c_i = \{x_i, y_i, r_i\}$  为节点  $i$  的覆盖模型,  $(x_i, y_i)$  为节点  $i$  的坐标,  $r_i$  为节点  $i$  的感知半径. 本文选取二元感知模型, 认为节点的覆盖范围是一个以节点坐标为圆心、半径为  $r$  的圆形区域. 该圆形区域称为节点的感知圆盘,  $r$  的大小由节点感知单元的能量特性决定.

将任意格点  $(x, y)$  被传感器节点  $i$  所覆盖的事件定义为  $I_i$ , 由前面的定义可知, 该事件发生的概率  $P\{I_i\}$  即为格点  $(x, y)$  被传感器节点  $i$  所覆盖的概率  $P_{\text{cov}}(x, y, c_i)$ . 该概率为一个二值函数, 即

$$P_{\text{cov}}(x, y, c_i) = \begin{cases} 1, & (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \leq r^2; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

若格点  $(x, y)$  到传感器节点  $i$  的距离不大于传感范围  $r$ , 则认为该格点  $(x, y)$  被传感器节点  $i$  覆盖, 且

$$P\{\bar{I}_i\} = 1 - P\{I_i\} = 1 - P_{\text{cov}}(x, y, c_i). \quad (3)$$

其中  $\bar{I}_i$  为  $I_i$  的补, 表示格点  $(x, y)$  未被传感器节点  $i$  覆盖这一事件. 如果  $I_i$  与  $I_j$  无关, 则存在如下关系:

$$P\{I_i \cup I_j\} = 1 - P\{\bar{I}_i \cap \bar{I}_j\} = 1 - P\{\bar{I}_i\}P\{\bar{I}_j\}. \quad (4)$$

节点集  $C$  中只要有一个节点覆盖点  $(x, y)$ , 便认为该格点  $(x, y)$  被节点集覆盖<sup>[7]</sup>, 因此格点  $(x, y)$  被节点集覆盖的概率即为  $I_i$  的并集. 假设所有的随机事件  $I_i$  是相互独立的, 则节点集  $C$  的覆盖率可用下式进行计算:

$$P_{\text{cov}}(x, y, C) = P\left\{\bigcup_{i=1}^N I_i\right\} = 1 - P\left\{\bigcap_{i=1}^N \bar{I}_i\right\} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{\text{cov}}(x, y, c_i)). \quad (5)$$

式(5)表明, 如果所有的节点都没有覆盖到格点  $(x, y)$ , 则该格点  $(x, y)$  为未覆盖点; 否则, 便认为该格点  $(x, y)$  被节点集覆盖.

**定义 1 (区域覆盖率)** 监测区域  $A$  内有  $m \times n$  个网格, 每个网格的面积大小表示为  $\Delta x \times \Delta y$ . 假定每个网格的面积为 1, 每个网格是否被覆盖用节点集覆盖率  $P_{\text{cov}}(x, y, C)$  来衡量. 将节点集  $C$  的区域覆盖率  $R_{\text{area}}(C)$  定义为节点集  $C$  的覆盖面积  $A_{\text{area}}(C)$  与监测区域  $A$  的总面积  $A_S$  之比, 即

$$R_{\text{area}}(C) = \frac{A_{\text{area}}(C)}{A_S} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n P_{\text{cov}}(x, y, C)}{m \times n}. \quad (6)$$

移动传感器网络的节点分布优化问题可描述为: 设有  $N$  个移动传感器节点分布在区域  $A$  上,  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$ , 分布优化达到的要求为满足一定约束条件下的最大网络覆盖, 移动节点根据分布优化算法移动自身位置, 以提高监测区域的网络覆盖率, 获得最优网络拓扑. 分布优化的目标可描述为

$$\max \left\{ \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n P_{\text{cov}}(x, y, C)}{m \times n} \right\}. \quad (7)$$

## 3 基于差分进化算法的移动传感器网络节点的分布优化

差分进化 (DE) 算法是一种新兴的进化计算技术, 它是一种基于群体差异的高效并行搜索方法, 是一种采用实数矢量编码在连续空间进行随机搜索的优化方法, 具有良好的优化性能<sup>[8,9]</sup>. 该方法一经提出, 便得到了众多学者的重视, 并且在许多领域得到了广泛应用. 目前差分进化算法在移动传感器网络中的应用大多集中在路由技术上, 在覆盖问题上的应用目前尚未见到. 该算法符合移动传感器网络覆盖优化的特点, 是差分进化算法应用方面的一次尝试.

### 3.1 适应度函数

差分进化算法在进行搜索过程中基本不利用外部信息, 仅以适应度函数为依据, 利用种群中每个个体的适应度值进行搜索. 因此, 适应度函数的选取至关重要, 将直接影响到差分进化算法的收敛速度以及能否找到最优解. 解的好坏用适应度函数值的大小来评价, 适应度函数值越大, 解的质量越好. 在节点分布优化过程中不仅要求移动传感器网络的有效覆盖率达到最高, 同时还要考虑多种约束. 本文中作为一种实验研究, 仅以区域覆盖率作为目标函数, 因此适应度函数为

$$f(x) = \frac{\text{节点集覆盖的离散点数}}{\text{离散点总数}}. \quad (8)$$

### 3.2 节点分布优化问题在差分进化算法中的编码映射

差分进化算法是基于实数编码的进化算法, 整体结构上与其他进化算法类似. 针对移动无线传感器网络中感知节点的分布问题, 采用实数编码思想<sup>[10]</sup>.

每个个体代表了一种移动传感器节点分布方案, 种群中个体的基因组为

$$g = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}. \quad (9)$$

其中染色体  $c_i = (x_i, y_i)$ ,  $(x_i, y_i)$  即为传感器节点  $i$  在移动传感器网络的监测目标区域内的坐标. 若  $c_i = (0, 0)$ , 则表示此染色体为空, 节点不参与覆盖. 因此, 基因组不仅可以表示传感器节点的位置, 还可以表示传感器节点的数目. 具体的基于节点坐标的编码方案

如图 1 所示.

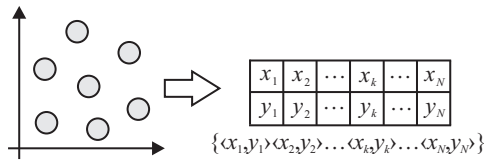


图 1 节点分布方案的编码映射

### 3.3 基于差分进化算法的移动传感器网络节点的分布优化

DE 算法的基本操作包括变异、交叉和选择. DE 算法的主要操作过程是:

令  $x_i(t)$  是第  $t$  代群体中的第  $i$  个个体, 则

$$x_i(t) = (x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{in}(t)),$$

$$i = 1, 2, \dots, N, t = 1, 2, \dots, t_{\max}. \quad (10)$$

其中:  $n$  为构成个体的染色体数, 即向量中变量的个数;  $N$  为群体规模;  $t_{\max}$  为最大进化代数.

1) 生成初始群体. 在  $n$  维空间里随机产生满足约束条件的  $N$  个个体, 实施措施如下:

$$x_{ij0} = \text{rand}_{ij}(0, 1)(X_{ij}^U - X_{ij}^L) + X_{ij}^L,$$

$$i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

其中:  $X_j^U$  和  $X_j^L$  分别为第  $j$  个染色体的上界和下界,  $\text{rand}_{ij}(0, 1)$  为  $[0, 1]$  之间的随机小数.

2) 变异操作. 从群体中随机选择 3 个个体  $x_{p1}, x_{p2}, x_{p3}$ , 且  $i \neq p1 \neq p2 \neq p3$ , 则 DE 算法按照如下方法产生新个体:

$$h_{ij}(t+1) = x_{p1j}(t) + F(x_{p2j}(t) - x_{p3j}(t)). \quad (12)$$

其中:  $x_{p2j}(t) - x_{p3j}(t)$  为差异化向量, 此差分操作是差分进化算法的关键;  $F$  为变异因子.

3) 交叉操作. 交叉操作是为了增加群体的多样性, 具体操作如下:

$$v_{ij}(t+1) = \begin{cases} h_{ij}(t+1), & \text{rand}_{lij} \leq \text{CR} \text{ 或 } j = \text{rand}(i); \\ x_{ij}(t), & \text{rand}_{lij} > \text{CR} \text{ 或 } j \neq \text{rand}(i). \end{cases} \quad (13)$$

其中:  $\text{rand}_{lij}$  为  $[0, 1]$  之间的随机小数;  $\text{CR}$  为交叉概率,  $\text{CR} \in [0, 1]$ ;  $\text{rand}(i)$  为  $[1, n]$  之间的随机整数. 这种交叉策略可确保  $x_i(t+1)$  至少有一个分量存在  $x_i(t)$  的相应分量.

4) 选择操作. 为了确定  $x_i(t)$  是否成为下一代的成员, 将向量  $v_i(t+1)$  和目标向量  $x_i(t)$  的适应度函数值进行比较, 只有当  $v_i(t+1)$  的适应度函数值较  $x_i(t)$  更优时才被选作子代; 否则, 直接将  $x_i(t)$  作为子代. 选择操作的方程为

$$x_i(t+1) =$$

$$\begin{cases} v_i(t+1), & f(v_i(t+1)) > f(x_i(t)); \\ x_i(t), & f(v_i(t+1)) \leq f(x_i(t)). \end{cases} \quad (14)$$

其中  $f(x_i(t))$  为第  $t$  代第  $i$  个个体的适应度函数值.

5) 终止判断. 令由 4) 所产生的新种群为

$$x(t+1) = (x_1(t+1), x_2(t+1), \dots, x_N(t+1)). \quad (15)$$

记  $x(t+1)$  中的最优个体为  $x_{\text{best}}(t+1)$ . 若满足精度要求或整个进化已达到进化代数  $t_{\max}$ , 则终止并输出  $x_{\text{best}}(t+1)$  作为最优解; 否则, 置  $t = t+1$ , 转 2).

## 4 算法仿真和性能比较

为验证算法的有效性, 在 Matlab 环境下设计了相应的仿真程序, 并对算法进行评估, 以便通过相关的仿真测试和比较对算法本身进行改进. 设置式 (10) 中的种群个体数  $N = 40$ , 最大迭代次数  $t_{\max} = 150$ , 式 (12) 中的变异因子  $F = 0.5$ , 式 (13) 中的交叉概率  $\text{CR} = 0.7$ . 在  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  的监测区域内对 31 个移动传感器节点的分布优化如图 2 所示, 考虑现有 zigbee 协议的传感器节点的有效通信距离为  $35 \sim 70 \text{ m}$ , 即保证移动传感器网络在充分覆盖的情况下, 网络总是连通的. 算法中设置传感器节点的有效感知半径为  $12 \text{ m}$ .

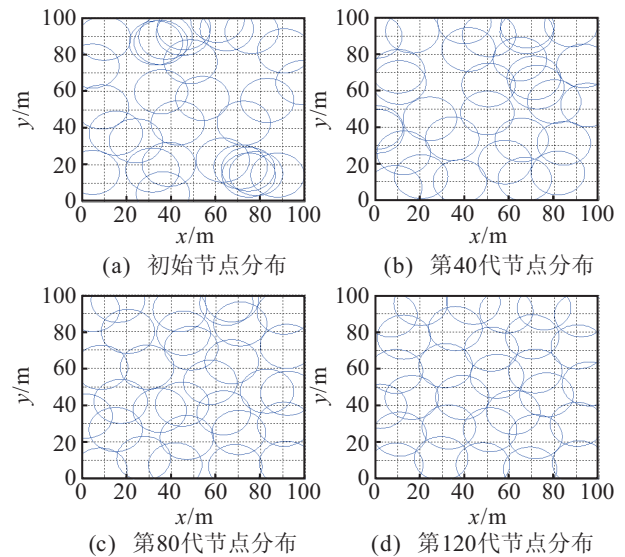


图 2 100 m 区域内 28 个节点分布优化图

在保证传感器节点感知参数以及监测区域不变的情况下<sup>[11]</sup>, 考察随机投放时传感器节点的有效覆盖率变化. 不同传感器节点部署密度下的网络有效覆盖率曲线如图 3 所示, 图中每个点均为随机投放 500 次以后取得的平均值. 从图中可以看出, 在随机播撒模型下, 要完成 90% 的覆盖率, 至少需要超过 75 个节点. 由图 4 所示的差分进化算法收敛曲线可知, 采用基于差分进化算法的优化机制对移动传感器节点的位置进行动态调整, 只需 31 个移动传感器节点即可完成监测目标区域所需要的有效覆盖率.

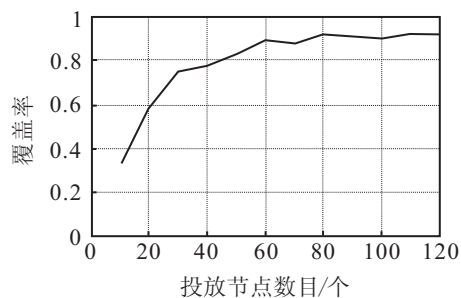


图 3 网络覆盖率节点密度变化曲线

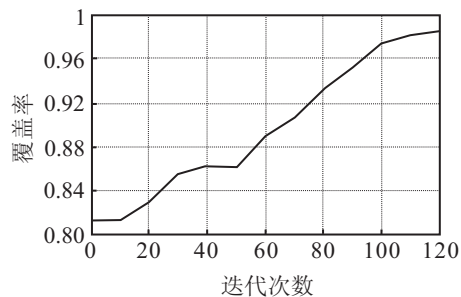


图 4 差分进化算法收敛曲线

在相同的监测环境下,本文算法与文献[2]覆盖算法相比,收敛速度较快,分布优化效果较之更加理想.与文献[5]覆盖算法相比,在达到相同的优化效果情况下,本文算法所需节点感知半径相对较小,且所需节点数目较少.在相同实验环境下,达到相同的优化效果,本文算法所需节点感知半径为12 m,节点数目为31;文献[5]的节点感知半径为13 m,节点数目为35.

## 5 结 论

本文研究了移动传感器网络的优化覆盖问题,即如何把有限的节点合理放置到监测区域中,以实现网络监测性能的最大化<sup>[12]</sup>.在保证网络连通性的前提下,对极大化移动传感器网络的有效覆盖面积进行了研究.阐述了移动传感器网络覆盖控制模型的精确数学定义,提出了一种基于差分进化算法的移动传感器网络节点的拓扑优化机制.该机制以移动传感器网络有效覆盖率为优化目标,通过差分进化算法搜索全局最优布局方法.仿真结果表明,该机制能有效收敛于最优解,提高移动传感器网络的整体覆盖率,为以后的移动传感器网络拓扑提供了可靠的方案.

## 参考文献(References)

[1] Pei Z Q, Xu C Q, Teng J. Relocation algorithm for non-uniform distribution in mobile sensor network[J]. *J of Electronics*, 2009, 26(2): 222-228.  
 [2] 户晓玲,曾建潮.基于微粒群模型的移动传感器网络部署研究[J].*计算机技术与发展*, 2009, 19(10): 81-85.  
 (Hu X L, Zeng J C. Deployment of wireless sensor networks mobile nodes based on particle swarm

optimization model[J]. *Computer Technology and Development*, 2009, 19(10): 81-85.)

- [3] 王巍,彭力.基于改进微粒群算法的移动传感器网络自组织[J].*计算机工程与设计*, 2009, 30(3): 654-658.  
 (Wang W, Peng L. Self-deployment of mobile sensor network based on improved particle swarm optimization[J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, 30(3): 654-658.)  
 [4] 宋光明,庄伟,魏志刚,等.用于未知环境的移动传感器网络自部署算法[J].*华南理工大学学报*, 2006, 34(9): 26-30.  
 (Song G M, Zhang W, Wei Z G, et al. Self-deployment algorithm for mobile sensor networks in unknown environment[J]. *J of South China University of Technology*, 2006, 34(9): 26-30.)  
 [5] 张石,鲍喜荣,陈剑,等.无线传感器网络中移动节点的分布优化问题[J].*东北大学学报*, 2007, 28(4): 489-492.  
 (Zhang S, Bao X R, Chen J, et al. Optimal distribution of mobile nodes in wireless sensor network[J]. *J of Northeastern University*, 2007, 28(4): 489-492.)  
 [6] 石为人,袁久银,雷璐宁.无线传感器网络覆盖控制算法研究[J].*自动化学报*, 2009, 35(5): 540-545.  
 (Shi W R, Yuan J Y, Lei L N. Research on wireless sensor network coverage control algorithm[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(5): 540-545.)  
 [7] 贾杰,陈剑,常桂然,等.无线传感器中基于遗传算法的优化覆盖机制[J].*控制与决策*, 2007, 22(11): 1289-1301.  
 (Jia J, Chen J, Chang G R, et al. Optimal coverage scheme based on genetic algorithm in wireless sensor networks[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(11): 1289-1301.)  
 [8] Xu X J, Huang X P, Qian D L. Adaptive accelerating differential evolution[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2008, 5(1): 87-92.  
 [9] Su H J, Yang Y P, Wang Y J. Research on differential evolution algorithm: A survey[J]. *System Engineering and Electronics*, 2008, 30(9): 1793-1797.  
 [10] 贾杰,陈剑,常桂然,等.移动传感器网络基于安全连接的节点位置优化[J].*软件学报*, 2009, 20(4): 1038-1047.  
 (Jia J, Chen J, Chang G R, et al. Optimal sensor deployment based on secure connection in mobile sensor networks[J]. *J of Software*, 2009, 20(4): 1038-1047.)  
 [11] Ma K, Zhang Y Y, Trappe W. Managing the mobility of a mobile sensor network using network dynamics[J]. *IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems*, 2008, 19(1): 106-120.  
 [12] 吕超,王硕,谭民.水下移动传感器网络研究综述[J].*控制与决策*, 2009, 24(6): 801-812.  
 (Lv C, Wang S, Tan M. Survey on mobile underwater wireless sensor networks[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(6): 801-812.)