基于微粒群模型的移动传感器网络部署研究

户晓玲,曾建潮
(太原科技大学 复杂系统与计算智能实验室,山西 太原 030024)

摘 要:传感器节点的部署是无线传感器网络中的很重要的问题,因为它反映了传感器网络的成本和监视能力。为了减少传感器节点部署时产生的覆盖盲区,提高网络的覆盖率,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。该算法根据节点的位置信息建立节点部署优化模型,利用微粒群算法求解该优化模型,优化过程中的最优解作为节点的最终配置位置。仿真结果表明该算法最大可能地减少了网络中的覆盖盲区,有效改善了网络的覆盖率。

关键词:无线传感器网络;部署;微粒群算法;覆盖盲区
中图分类号:TP393 **文献标识码**:A **文章编号**:1673-629X(2009)10-0081-04

Deployment of Wireless Sensor Networks Mobile Nodes Based on Particle Swarm Optimization Model

HU Xiao-ling, ZENG Jian-chao
(Complex System and Computational Intelligence Laboratory, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The deployment of the nodes is of importance in WSN, it reflects the cost and the capability of monitoring. In order to reduce the coverage holes and improve the coverage rate in wireless sensor networks, a new algorithm for optimizing the deployment of mobile nodes is presented, which is based on the particle swarm optimization (PSO) model. The PSO is used to optimize the position of mobile nodes, the deployment of the nodes can be obtained by the optimal solution. Results of simulation show that the algorithm can reduce the coverage holes utmostly, and improve the coverage rate efficiently.

Key words: wireless sensor network; deployment; PSO; coverage holes

0 引 言

无线传感器网络是由大量部署在监测区域内的微型传感器节点通过无线通信方式形成的多跳自组织网络系统,能够协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并将信息发给观察者[1]。无线传感器网络在军事、环境、生物和商业应用方面有很大的应用价值[2]。无线传感器网络的节点部署,即通过一定的算法布置散落在监测区域内的传感器节点,优化现有的网络资源[3]。在军事应用中,节点通过飞机撒播等手段密集地撒布于人员不便于到达的敌方阵地内,由于节点一般通过电池供电,其能源有限。当网络运行到某个时间后,一部分节点可能因为电池能量有限或遭破坏等原因而失效,使网络出现覆盖盲区[4]。为了使无线传感器网络作为整体仍能完成观察任务,可以采用移动节点根据战况快速自适应的调整和部署新的传感器网络,尽可能减少覆盖盲区,在能耗最小的情况下最大可能地完全覆盖监测区域。因此,移动传感器网络部署被广泛研究[5]。

国内外有关无线传感器网络的节点部署问题已有不少人研究[6],提出了一些有效的移动传感器节点优化配置算法,有 Zou 和 Chakrabarty 提出的虚拟力(Virtual Force Algorithm, VFA)算法[7]、Heo 和 Varshney 提出的 DSSA 算法和遗传算法[8]等。这些算法在扩大网络覆盖范围方面表现突出。然而,由于这些算法中存在节点对覆盖盲区的覆盖程度很低、节点的分布不够均匀等问题,无法实现全局最优。

基于以上问题,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。该算法利用微粒群算法优化移动节点的位置,优化过程中的最优解作为节点的最终配置位置。仿真结果表明该算法有效地改善了网络的覆盖率。

收稿日期:2009-01-08;**修回日期**:2009-04-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60674104)
作者简介:户晓玲(1981-),女,陕西渭南人,硕士研究生,研究方向为智能最优化方法;曾建潮,教授,博士生导师,主要研究方向为智能控制、系统建模与仿真等。

1 无线传感器网络节点部署优化模型

1.1 节点部署问题描述

无线传感器网络的部署问题可以分为覆盖和连接两个部分。当节点之间的通信距离 R_c 大于两倍的传感器节点的感知范围 R_s 时可以认为节点的覆盖问题可以包含连接问题[9]。文中就是在上述情况下研究网络的节点部署问题。在研究无线传感器网络的节点部署之前，根据网络的特点引入覆盖率和节点的感知模型两个概念。

1.1.1 覆盖率

覆盖率一般定义为所有节点覆盖的总面积与监测区域总面积的比值，其中节点覆盖的总面积取集合概念中的并集，而且覆盖率是小于或等于 1 的。

$$\sigma = \frac{\bigcup_{k=1}^{n} A_k}{A_s} \tag{1}$$

其中：σ 代表覆盖率，A_k 表示第 k 个节点的覆盖面积，n 代表节点的数目，A_s 表示整个监测区域的面积。

1.1.2 节点感知模型

无线传感器网络的覆盖问题通常与每个节点的感知模型及所有节点的位置部署紧密相关。无线传感器网络中每个节点的感知模型通常遵循二元模型或随机模型。二元模型是当监测区域某一点在某一节点的感知范围内时，就一定可以被该节点检测到，而当点在节点的感知范围之外时，就一定不能被其检测到；文中采用二元模型。

无线传感器网络的节点部署分为静态传感器网络部署和移动传感器网络部署。通过静态传感器网络部署使节点根据最初覆盖要求完成对监测区域的初始部署。由于节点失效、检测区域或监测任务发生变化，使得先前的部署可能出现覆盖盲区，为了进一步加强覆盖，可以假设节点部分移动或全部移动，通过采用一定的算法自适应地调整节点部署以使所布置的节点最大可能的完全覆盖监测区域。

对于一个给定的监测区域，无线传感器网络的移动节点部署问题可以描述如下：在给定节点数目的情况下，如何充分利用节点的移动性对节点位置进行动态调整，使其对整个监测区域的覆盖率最大，此时对应的节点位置为节点的最终配置位置。

针对描述的移动节点部署问题，文中根据节点的位置信息构建以覆盖率最大为优化目标的优化模型。

1.2 模型建立

在无线传感器网络中，假设每个节点的感知范围为圆，而且各个节点的感知范围相同，这样可以将无线传感器网络的节点部署问题抽象为圆覆盖问题，即用若干数量的等半径的圆覆盖某固定区域。根据网络的实际情况，做以下理论假设：

假设 1：监测区域所有节点都在同一个平面内。每个节点都能对其周围实行全方向探测，即其覆盖范围是一个半径为 r 的圆形区域 $D = \pi r^2$。

假设 2：每个节点的感知范围（半径为 r）和通信范围（半径为 R）都被认为以节点坐标为圆心的理想圆形区域，且 $R \geqslant 2r$（保持网络连通的条件 $R_c \geqslant 2R_s$）。

假设 3：每个节点的感知模型遵循二元模型。

1.2.1 参数定义

定义一个二维连续空间表示监测区域：$Z^2 = \{(x,y), 0 \leqslant x \leqslant a, 0 \leqslant y \leqslant a\}$。

定义个体系统 Ω：表示包含所有节点的群体集合。

定义 T_k 表示具有简单智能的传感器节点，$\Omega = \{T_1, T_2, \cdots, T_k, \cdots, T_n\}$，节点 T_k 在区域的位置表示为 $P_{T_k} = \{x_k, y_k\}$。

定义覆盖集合 A：表示所有节点的覆盖面积集合。

定义 A_k 表示节点 T_k 的有效覆盖面积 $A = \{A_1, A_2, A_3, \cdots, A_n\}$。

定义节点间距 d_{kh}：表示任意两个节点 T_k 和节点 T_h 的距离，$d_{kh} = \sqrt{(x_k - x_h)^2 + (y_k - y_h)^2}$。

定义 A_{kh} 表示节点 T_k 和 T_h 相交时的覆盖重叠区域面积。A_{khg} 表示节点 T_k、T_h 和 T_g 同时相交时的覆盖重叠区域面积。

文中通过优化节点的位置来实现网络覆盖率提高的目标，所以构造优化模型的决策变量 P（表示监测区域内节点的位置集合）：

$$P = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \cdots, (x_k, y_k), \cdots, (x_n, y_n)\}$$

1.2.2 目标函数的确定

构造一个包含 Ω 中每个节点位置信息的函数 F，使得当 F 取最大值时的变量即为节点的最终放置位置。优化目标为网络的覆盖率最大，优化变量为节点的位置。假设节点数目为 n，通过公式(2) 计算 n 个节点覆盖的总面积 S。

$$S = \bigcup_{k=1}^{n} A_k = \sum_{k=1}^{n} A_k - \sum_{1 \leqslant k < h \leqslant n}^{n} A_{kh} + \sum_{1 \leqslant k < h < g \leqslant n}^{n} A_{khg} + \cdots + (-1)^{n-1} \sum_{1 \leqslant k < h < g \leqslant n}^{n} A_{1,\cdots,n} \tag{2}$$

则 n 个节点对应网络的覆盖率为 $\sigma = \frac{\bigcup_{k=1}^{n} A_k}{A_s} = \frac{S}{A_s}$。定义目标函数 F 如下：

$$F(P) = \max\sigma = \max\left(\frac{S}{A_s}\right) \tag{3}$$

1.3 模型实现

优化模型的优化变量为节点的位置集合 P,可以通过优化 P 使监测区域内每个圆所能覆盖的有效区域面积为最大,尽量减少覆盖圆之间的重叠面积和覆盖盲区,使网络的覆盖率最大。

结合微粒群算法在处理优化问题上的优势,用微粒群算法优化目标函数 F,求解节点部署优化模型,并对优化过程中的最优解进行动态调整,传感器网络根据动态调整后的目标结果部署每个节点的位置。

2 微粒群算法(PSO)

微粒群算法[10](简称 PSO)是由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的一种新的进化算法。微粒群算法是受鸟群觅食行为的启发而提出的,主要用于解决优化问题。算法采用速度-位置搜索模型。每个微粒代表界空间中的一个解,解的优劣程度由适应函数决定。其中,适应函数由优化目标来决定。PSO 将每个个体看作是 N 维搜索空间中的一个没有体积的微粒(点),在搜索空间中以一定的速度飞行。这个速度根据它本身的飞行经验以及同伴的飞行经验进行动态调整。PSO 随机初始化为一群粒子,每个粒子根据自己的历史最好位置 P_i 和群体历史最好位置 P_g 来更新自己的速度和位置。

设 $X_i=(X_{i1},X_{i2},\cdots,X_{iN})$ 为微粒 i 的当前位置,$V_i=(V_{i1},V_{i2},\cdots,V_{iN})$ 为微粒 i 的当前飞行速度,$P_i=(P_{i1},P_{i2},\cdots,P_{iN})$ 为微粒 i 所经历过的最好位置,每个微粒在历代搜索过程中自身所达到的最优解称为个体最优解 Pbest,整个微粒群中所有微粒在历代搜索过程中所达到的最优解称为全局最优解 gbest。则粒子根据以下公式来更新自己的速度和位置:

$$V_i(t+1)=w*V_i(t)+c_1*r_1*(P_i-X_i(t))+c_2*r_2*(P_g-X_i(t)) \tag{4}$$

$$X_i(t+1)=X_i(t)+V_i(t+1) \tag{5}$$

其中,V_i 表示该微粒 i 的飞行速度;X_i 表示某个微粒 i 的位置;P_i 表示某个微粒所经历过的最好位置,称为个体最好位置;P_g 表示该微粒在整个群体中所能获得的最好位置,称为全局最好位置;t 表示第 t 代;c_1 和 c_2 是加速常数,通常在 0 ~ 2 间取值;r_1 和 r_2 是[0,1]上的随机数;w 为惯性权重,使微粒保持运动惯性,使其有扩展搜索空间的趋势,有能力探索新的区域。式(4)中第一部分是粒子先前的速度,第二部分为"认知"部分,考虑微粒自身的经验,表示微粒自身的思考,第三部分为"社会"部分,表示微粒间的信息共享。这三部分共同决定粒子的空间搜索能力。

3 应用 PSO 算法求解节点部署优化模型

3.1 微粒的生成

文中将 PSO 算法应用于静态节点的部署优化问题,每一个微粒代表每一种传感器节点部署方案。算法的搜索空间为 N 维,如果无线传感器网络中有 n 个节点,则种群中每个微粒对应一个节点集合 $\Omega=\{T_1,T_2,\cdots,T_k,\cdots,T_n\}$,微粒的位置矢量用 Ω 中每个节点的位置信息表示。第 i 个微粒的位置矢量为 $X_i=(x_{i1},y_{i1},x_{i2},y_{i2},\cdots,x_{ik},y_{ik},\cdots,x_{in},y_{in})$,其中,$X_i$ 中各元素依次表示节点 1 到 n 的横坐标、纵坐标值。算法的搜索空间为 $N=2\times n$ 维,即每个微粒具有 $2\times n$ 个变量,每个变量的取值是[0,a]上的随机数。每个微粒根据公式(4)和公式(5)来更新自己的速度和位置,每个微粒飞行的最大速度为 V_{max}。

3.2 节点的位置调节机制

每个节点根据 *PSO* 优化的目标结果计算下一步的移动位置,由于不同节点之间的距离 d 直接影响到节点的有效覆盖面积和网络的覆盖率,为了有效地控制每个微粒中各个节点的移动距离,提出了一种有效改进节点间距 d 的方法,首先建立传感器节点间的距离矩阵 $\boldsymbol{D}$:

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1h} & \cdots & d_{1n} \\ d_{k1} & \cdots & d_{kh} & \cdots & d_{kn} \\ d_{n1} & \cdots & d_{nh} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{D}$ 中第 k 行代表 $\Omega=\{T_1,T_2,\cdots,T_k,\cdots,T_n\}$ 中任一节点与节点 T_k 的距离,找出与节点 T_k 距离最近的节点 T_h,假设节点 T_k 的期望位置 P_{g_k} 和节点的实际位置 P_{T_k} 之差为误差信号 e_k,即 $e_k=(P_{g_k}-P_{T_k})$。节点 T_h 的期望位置 P_{g_h} 和节点的实际位置 P_{T_h} 之差为误差信号 e_h,即 $e_h=(P_{g_h}-P_{T_h})$。为了减小误差,通过将节点的运行速度 V 设定为该误差信号的函数,可以驱动节点移动到正确的位置。现设 $V_k=\lambda e_k$,$V_h=\lambda e_h$,则节点 T_k 和节点 T_h 的位置和速度的迭代公式为:

$$V_k(t+1)=\lambda*(P_{g_k}-P_{T_k}) \tag{6}$$

$$X_k(t+1)=X_k(t)+V_k(t+1) \tag{7}$$

$$V_h(t+1)=\lambda*(P_{g_h}-P_{T_h}) \tag{8}$$

$$X_h(t+1)=X_h(t)+V_h(t+1) \tag{9}$$

3.3 适应值函数

在微粒群系统中,适应值函数直接影响到 PSO 算法的收敛速度以及能否找到最优解,适应函数由优化目标来决定。由优化模型的目标函数可知,覆盖率最大,配置越优,故适应度函数定义如下:

$$f(X_i)=\frac{S_i}{A_s} \tag{10}$$

所有的微粒都有一个由被优化的、适应值函数所决定的适应值。文中微粒的适应值则用每个微粒的位置矢量对应的覆盖率表示。对于每个微粒每到达一个新的位置，即可通过适应度函数计算该微粒在该位置上的适应值。

3.4 算法流程

输入：群体规模 m，节点数目 n，加速常数，最大迭代次数 G_{max} 等。

输出：最大覆盖率，节点的最优位置。

Step1：随机初始化各个节点的初始位置。

Step2：根据公式(10)计算每个微粒的适应值。

Step3：寻找每一个微粒当前的最好位置 P_i 和当前群体的最好位置 P_g。

Step4：根据公式(6)和(7)对每个微粒的速度和位置进行进化。

Step5：根据公式(8)～(10)对每个微粒中节点的速度和位置进行动态调整。

Step6：如果未满足结束条件 G_{max}，则返回 Step2；否则，取当前 P_g 作为最优解。结束条件定为最大迭代次数超过某一给定的最大迭代次数 G_{max}。

4 仿真实验结果

本实验采用 matlab 进行仿真。设监测区域为 100m * 100m，节点感知半径 R_s 是 12m。在监测区域随机部署32个节点，静态节点部署后32个节点的最优分布如图 1(a) 所示，此时对应的网络覆盖率达到 97.98% 。假设 32 个节点中有一个节点失效，如图 1(a) 阴影部分所示，使得先前的部署出现覆盖空洞(如图 1(b) 所示)。为了进一步加强覆盖，可以假设剩余的 31 个节点全部可以移动，通过采用微粒群算法和节点位置动态调整策略自适应地调整节点部署。微粒个数为 30，w 为 0.9，c_1 和 c_2 均为 2。

不同代数下的 31 个节点的节点分布如图 1 所示：其中(b)表示监测区域 31 个节点的初始节点分布情况。(c)和(d)分别表示 31 个节点在 60 代和 120 代时的节点分布情况。观察 0～120 代的整个过程可以清晰地看到，搜索向着全局的最优解方向进行。算法运行到 120 代时网络的覆盖率达到 97.87%，此时所布置的节点已经最大可能的覆盖监测区域出现的覆盖空洞，覆盖率达到最大，对应的节点最优分布如图 1(d) 所示。

同理，当 32 个节点中有两个节点失效时，可以假设剩余的 30 个节点全部可以移动。不同代数下对应的节点分布如图 2(h)所示。

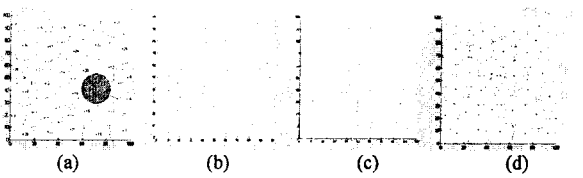

图 1 31 个节点的分布变化情况

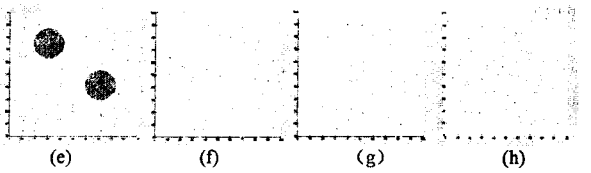

图 2 30 个节点的分布变化情况

31 个节点动态调整后达到最大覆盖率时对应的节点位置如表 1 所示。

表 1 31 个节点的最优位置

节点编号：	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
横坐标：	88	29	21	3	20	4	38	97	41	59	22	80	91	60	71
纵坐标：	8	45	56	29	93	50	25	22	91	92	25	56	43	29	9
节点编号：	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
横坐标：	30	50	40	62	81	69	29	51	50	98	80	9	91	9	1	11
纵坐标：	74	43	55	54	92	73	8	72	10	59	25	8	74	73	91	45

30 个节点动态调整后达到最大覆盖率时对应的节点位置如表 2 所示。

表 2 30 个节点的最优位置

节点编号：	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
横坐标：	39	82	71	48	76	38	92	58	88	0	68	30	16	8	29
纵坐标：	61	96	9	77	23	93	76	61	39	27	80	6	94	73	46
节点编号：	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
横坐标：	1	93	22	5	20	80	9	97	51	29	67	38	57	48	58
纵坐标：	93	10	57	47	30	61	9	54	9	77	45	24	26	44	95

5 结束语

提出了一种基于微粒群模型的无线传感器网络移动节点部署算法。仿真结果表明该算法可以很快地达到适应值，有效地提高网络的覆盖率，对于提高网络感知能力和生存能力具有重要意义。

然而，文中提出的算法仍然存在一些不足之处：例如没有考虑边界、障碍物的影响[11]等，以及针对不同感知模型的部署情况的研究。这些都需要在以后的研究中进一步改进，获得更好的网络部署效果。

参考文献：

[1] 孙利民，李建中. 无线传感器网络[M]. 北京：清华大学出版社，2006.

[2] 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.

[3] 王燕莉，安世全. 无线传感器网络的覆盖问题研究[J]. 传

(下转第 88 页)

4 Pushlet 性能分析

原型系统采用一台 Intel Core E8200,2G 内存服务器;六台 P4 2.4G,1.5G 内存的客户机,网络采用 10M 全双工模式经行互联。分别对消息完整性、响应时间、多用户大负荷情况等几个方面进行了测试。

在实验中服务器以一个 50～500 毫秒的随机时间间隔,发送一个包括自增长序列号和当前服务器时间的数据包。客户机收到消息后,首先计算出一共收到多少条消息,再与自增长序列号比较,其次用客户机当前时间与数据包中的服务器时间进行比较。

在网络轻负荷情况下,客户机接收到推送信息平均延时的分布直方图如图 4 所示。平均延时大概为 450 毫秒左右。

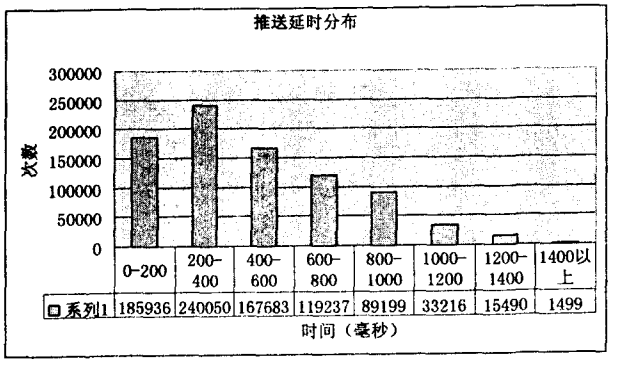

图 4 延时分布直方图

系统资源占用方面,以常见的消息方式(JMS)进行对比。因为 Tomcat 不支持 JMS,所以选用 Jboss 为 JMS 的应用服务器。同等的推送强度下,JMS 方式的 CPU 和内存占用量约为 Pushlet 方式的 2～5 倍。

Pushlet 稳定性很高,在多用户多主题的情况下,服务器发送了 1000 万条测试数据后,都没有出现丢失和重复发送的现象。

在实验中,基于 Pushlet 的主动推送框架还表现出以下优点:直接与动态 HTML 集成;构建简单,只需要使用支持 Servlet 的服务器即可;使用标准 HTTP 端口进行连接,不会被防火墙拦截。

5 结束语

文中分析在网络环境下,RFID 应用系统的数据推送需求。提出了一种基于 Pushlet 的数据推送框架,并给出了系统的具体实现。最后通过原型系统验证了 Pushlet 框架的应用可行性,具有一定的推广价值。

参考文献:

[1] 邓海生.基于 RFID 的数据采集中间件[J].计算机技术与发展,2007,17(9):188－191.

[2] 邓海生.RFID 中间件研究与设计[J].计算机技术与发展,2008,18(11):55－57.

[3] JavaWorld. An in－depth look at RMI callbacks[EB/OL]. 1999－04－20. http://www.javaworld.com/javaworld/javaqa/1999－04/05－rmicallback.html.

[4] Adobe. ActionScript 2.0 语言参考[EB/OL]. 2003－04. http://livedocs.adobe.com/flash/8-cn/main/00002905.html.

[5] JMS 简介[EB/OL]. 2007－07－14. http://java.csdn.net/page/9cd3a678－9787－4ccc－92be－6fdfd23804fa.

[6] van den Broecke J. Pushlet Cookbook[EB/OL]. 2007－11－24. http://www.pushlets.com/doc/cookbook.html.

[7] Alinone A. Comet and Push Technology[EB/OL]. 2007－10－19. http://cometdaily.com/2007/10/19/comet－and－push－technology.

[8] 周 婷. Comet:基于 HTTP 长连接的"服务器推"技术[EB/OL]. 2007－08－31. http://www.ibm.com/developerworks/cn/web/wa－lo－comet.

[9] Wilkins G. Comet is Always Better Than Polling[EB/OL]. 2007－11－06. http://cometdaily.com/2007/11/06/comet－is－always－better－than－polling.

[10] Matrix. Think in Pushlet[EB/OL]. 2007－01－16. http://www.matrix.org.cn/resource/article/2007－01－16/.html.

[11] Goodman D. Dynamic HTML: The Definitive Reference[M]. 3rd edition. [s.l.]:O'Reilly,2006.

(上接第 84 页)

感技术学报,2005,18(2): 307－312.

[4] 崔 莉,鞠海玲,苗 勇,等. 无线传感器网络研究进展[J].计算机研究与发展,2005,42(1):163－174.

[5] 李 莉,刘元安,唐碧华.一种基于网格模型的传感器节点放置算法[J].武汉大学学报:理学版,2007(S):83－87.

[6] 李 冰,李 捷.一种基于 GAF 的无线传感器网络分簇算法[J].计算机技术与发展,2008,18(12):113－115.

[7] Zou Y,Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces[C]//Proc. IEEE INFOCOM Conference. USA:[s.n.],2003:1293－1303.

[8] Fonseca C M,Fleming P J. Genetic Algorithms for Multi objective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization[C]//in Genetic Algorithms. Proc. Fifth International Conference. [s.l.]:Morgan Kaufmann,1993:416－423.

[9] Zhang H, Hou J C. Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks[R]. USA: University of Illinois at Urbana－Champaign, 2003.

[10] 曾建潮,崔志华.微粒群算法[M].北京:科学出版社,2000.

[11] Chakrabarty K, Iyengar S S, Qi H, et al. Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 2002, 51: 1448－1453.