

文章编号: 1001-0920(2009)08-1181-06

## 基于节点协同覆盖的传感器网络寿命最大化模型

贾杰<sup>a</sup>, 陈剑<sup>a</sup>, 常桂然<sup>b</sup>, 闻英友<sup>a</sup>, 赵林亮<sup>a</sup>  
(东北大学 a. 信息科学与工程学院, b. 计算中心, 沈阳 110004)

**摘要:** 针对保证网络连通覆盖和最小能量消耗的优化目标, 建模了基于节点协同覆盖的传感器网络寿命最大化模型. 提出一种基于多目标优化遗传算法的求解方案, 设计了基于链路状态的分簇机制以及基于 NSGA-II 的簇内覆盖控制算法. 仿真结果表明该方案能快速收敛于最优解, 在高密度和低密度布撒环境下表现出优越的性能, 且具有良好的适应性.

**关键词:** 无线传感器网络; 网络寿命; 节点协同覆盖; 遗传算法

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

## Optimal lifetime model based on multi-nodes cooperation coverage in wireless sensor networks

JIA Jie<sup>a</sup>, CHEN Jian<sup>a</sup>, CHANG Gui-ran<sup>b</sup>, WEN Ying-you<sup>a</sup>, ZHAO Lin-liang<sup>a</sup>

(a. College of Information Science and Engineering, b. Computing Center, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: JIA Jie, E-mail: jiajieneu@163.com)

**Abstract:** To the objectives of guaranteeing coverage connectivity and using the least energy consumption, an optimal lifetime model based on multi-nodes cooperation coverage is presented. A multi-objective optimization genetic algorithm is proposed to obtain the optimal solution, including the clustering scheme based on link state and the coverage control scheme based on NSGA-II inside the cluster. Outstandingly, the instances of high and low density nodes are studied to prolong the lifetime of the whole network. Numerical and simulation results are provided to validate the claims.

**Key words:** Wireless sensor network; Network lifetime; Multi-nodes cooperation coverage; Genetic algorithm

### 1 引言

由于体积和成本的限制, 传感器节点通常使用能量有限的电池. 受制于传感器网络密集部署和无人职守的应用环境, 更换电池或为节点充电都不太现实. 如何高效使用有限能量以最大化网络生存时间, 成为无线传感器网络设计面临的挑战性课题.

研究者分别从无线传感器网络的各个层面出发, 提出了降低能耗并延长网络生命周期的策略. 文献[1]通过节点任务的最优分配研究了传感器网络寿命的界限问题; [2]研究了异构传感器网络中带有寿命限制的网络最小费用问题; [3]通过数据聚合的方式节能, 以延长网络生命周期; [4]研究了发射半径的调整对传感器网络拓扑结构的影响; [5-7]研究

了节能的路由协议; [8]采用分簇机制形成处理和转发数据的骨干网, 通过节点的闲时休眠达到节能的目的.

本文则从节能覆盖的角度研究传感器网络寿命最大化问题. 网络覆盖是无线传感器网络的关键性问题, 它从根本上反映了网络对物理世界的感知能力, 是对无线传感器网络服务质量的度量. 如何利用覆盖机制降低网络节点部署的内在冗余性, 进而提高网络寿命, 成为无线传感器网络设计中的重要内容之一.

Zhang 等<sup>[9]</sup>采用图论的方法研究了连通覆盖问题, 提出一种基于节点密度控制的覆盖算法, 假设在目标区域的任何一点都能找到一个节点. 由于随机

**收稿日期:** 2008-08-24; **修回日期:** 2008-11-28.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(60602061, 60673159, 70671020); 国家高新技术研究发展计划重点项目(2007AA041201); 教育部科学技术研究重点项目(108040); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060145012, 20070145017).

**作者简介:** 贾杰(1980—), 女, 辽宁鞍山人, 副教授, 博士, 从事传感器网络、无线通信的研究; 常桂然(1946—), 男, 河北邯郸人, 教授, 博士生导师, 从事无线自组织网络等研究.

分布的不确定性,该假设条件并不一定总能成立<sup>[10]</sup>. Tiara 等<sup>[11]</sup>在文献[9]的基础上对覆盖连通性命题给出了严格证明:当节点通信半径  $R_c$  不小于 2 倍感知半径  $R_s$  时,全覆盖前提下总能保证网络的连通性.

Slijepcevic 等<sup>[12]</sup>考虑如何选取网络节点的一个子集处于工作状态来节省能量,并提出一种集中式算法,但该算法在大规模传感器网络中并不具备可扩展性. Ye 等<sup>[13]</sup>提出一种分布式探测算法,但该算法并不能保证网络的完全覆盖. Jiang 等<sup>[14]</sup>把网络的生存时间按轮分割,提出一种分布式节点调度算法.然而,这种基于单节点感知的 0/1 监测模型忽略了传感器本身和物理环境的影响,并未考虑传感器节点协同合作给网络带来的团体力量,不能反映网络的实际感知能力.

本文主要研究传感器网络中节点高密度随机分布条件下的区域覆盖问题.有别于以往基于单个节点的二元感知模型,提出一种基于节点协同工作的概率感知模型.在此基础上,给出了考虑连通覆盖约束条件的传感器网络寿命最大化模型.

## 2 网络模型

针对传感器网络的复杂性,作出以下假设:

- 1) 所有感知节点均静止,并且各节点可通过 GPS 或某些局部定位算法精确定位;
- 2) 监测区域远大于传感器网络边界范围,从而可忽略边界效应对传感器网络的影响;
- 3)  $R_c \geq 2R_s$ , 保证在网络充分覆盖时网络总是连通的<sup>[9]</sup>, 因此覆盖连通性问题可简化为单独的覆盖控制问题.

### 2.1 节点协同的概率覆盖模型

监测区域  $A$  为二维平面,在  $A$  上随机投放  $n$  个传感器节点,节点集合  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ , 节点  $c_i$  的坐标为  $(x_i, y_i)$ , 有效监测半径为  $r_i$ . 对于任意目标点  $P(x, y)$ , 节点  $c_i$  与  $P$  的欧氏距离为

$$d(c_i, P) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}. \quad (1)$$

由于传感器节点监测的不确定性,目标区域内的像素点并不是以相同概率被覆盖. 引入节点容错感知半径  $r_e$  ( $r_e < r_i$ ), 以反映传感器节点的实际覆盖情况. 用  $C_{xy}(c_i)$  表示节点  $c_i$  对目标点  $P(x, y)$  的感知质量, 则概率感知模型为

$$C_{xy}(c_i) = \begin{cases} 0, & r_i + r_e \leq d(c_i, P); \\ e^{-\lambda d^\beta}, & r_i - r_e < d(c_i, P) < r_i + r_e; \\ 1, & r_i - r_e \geq d(c_i, P). \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $\alpha = d(c_i, P) - (r_i - r_e)$ ,  $\alpha$  和  $\beta$  是传感器节点

监测质量的衰减系数.

如果像素点  $P(x, y)$  只被单个传感器节点覆盖或距离其他节点很远,则需要在该点实施重叠覆盖策略,以降低  $P(x, y)$  成为盲区的可能性. 表示像素点  $P(x, y)$  被传感器节点  $c_i$  和  $c_j$  重叠覆盖的概率为

$$c_{xy}(c_i, c_j) = 1 - (1 - c_{xy}(c_i))(1 - c_{xy}(c_j)). \quad (3)$$

当监测区域的网格点被多个传感器节点重叠覆盖时,节点相互距离越近,目标被监测的概率越大. 用  $c_{th}$  表征像素点  $P(x, y)$  的覆盖概率门限,有

$$\min_{x, y} \{c_{xy}(c_i, c_j)\} \geq c_{th}. \quad (4)$$

点  $P(x, y)$  被节点集  $C$  交叉覆盖的概率即为  $C_{xy}(s_i)$  的并集,表示为

$$\begin{aligned} C_{xy}(C) &= P\left\{\bigcup_{i=1}^N C_{xy}(c_i)\right\} = \\ &1 - P\left\{\bigcap_{i=1}^N \bar{C}_{xy}(\bar{c}_i)\right\} = \\ &1 - \prod_{c_i \in S} (1 - c_{xy}(c_i)). \end{aligned} \quad (5)$$

网络覆盖率定义为达到覆盖门限的网格区域与监测区域的像素之比,即

$$C_{AREA}(C) = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n C_{xy}(C) / (m \times n). \quad (6)$$

### 2.2 传感器网络中寿命最大化模型

本文中节点感知能量消耗模型同文献[15],主要考虑节点在完成感知任务时的能量消耗. 认为能量消耗与感知半径  $r_i^2$  存在一定的比例关系,比例因子为  $u$ , 并认为休眠状态时节点能耗为 0. 在节点最优分布模型中,所需节点数目最少<sup>[16]</sup>, 有

$$\frac{N r_i^2 \pi}{P_{AREA}} = \frac{2\pi}{\sqrt{27}}, \quad (7)$$

其中  $P_{AREA}$  为监测区域面积. 则系统最小能耗为

$$E_{U-total} = N * r_i^2 * u. \quad (8)$$

在同构传感器网络中,单位面积能量消耗为

$$E_u = \frac{N r_i^2}{P_{AREA}} u = 0.3849u. \quad (9)$$

当各工作节点具有不同感知半径时,定义感知半径节点集  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ ,  $r_i$  表示工作节点  $c_i$  的感知半径,且  $r_{\min} \leq r_i \leq r_{\max}$ . 则全网能耗总量为

$$E_{H-total} = u \sum_{i=1}^N r_i^2. \quad (10)$$

在异构传感器网络中,单位面积能量消耗为

$$E_h = E_{H-total} / P_{AREA} = u \sum_{i=1}^N r_i^2 / P_{AREA}. \quad (11)$$

**定义 1**(网络寿命) 当节点能量耗尽而导致协同感知概率低于最低监测阈值  $c_{th}(i)$  时,则称网络死亡;将网络持续工作的时间  $T$  定义为网络寿命.

在二维监测区域  $A$  上,如何求解子集  $S, S \subset C, C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ,使得传感器网络的寿命最大化,成为人们关注的重要问题. 目标函数是在满足整体覆盖率  $R_{\text{AREA}}(S)$  的同时,使得网络工作节点数目  $|S|$  以及网络能量消耗最少. 传感器网络寿命最大化模型可转换为多目标优化问题求解.

**定义 2**(多目标优化问题) 一般的 MOP 包括  $m$  个目标函数,把决策矢量  $\mathbf{x}$  映射到目标矢量  $\mathbf{y}$ . 最优化目标是  $\mathbf{y} = f(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x}))$ . 其中:  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X, X$  称为决策空间;  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in Y, Y$  称为目标空间.

**目标 1** 网络整体覆盖率定义为

$$\max f_1(\bar{x}) = C_{\text{AREA}}(S). \quad (12)$$

**目标 2** 定义  $|S|$  为工作节点总数,  $|C|$  为投放节点总数,则节点利用率为

$$\min f_2(\bar{x}) = |S| / |C|. \quad (13)$$

约束条件:用节点间距离的标准差表示传感器节点在被监测区域的分布情况,标准差值越小,覆盖均匀性越好. 即

$$\text{s. t. } U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i = \sqrt{\frac{1}{k_i} \sum_{i=1}^{k_i} (d(c_i, c_j) - D_i)^2}. \quad (14)$$

其中:  $U$  表示均匀性,  $k_i$  表示节点  $c_i$  的邻居个数,  $d(c_i, c_j)$  表示节点  $c_i$  与  $c_j$  的欧氏距离,  $D_i$  表示节点  $c_i$  与其感知半径相交的所有节点的距离平均值.

**目标 3** 能量消耗仅与工作节点集的感知半径有关,定义为

$$\min f_3(\bar{x}) = u \sum_{i=1}^N r_i^2 / P_{\text{AREA}}. \quad (15)$$

进一步分析采用多感知半径对网络寿命的改善情况. 在区域  $A$  中投放 4 个节点  $S_1, S_2, S_3$  和  $S_4$ , 节点具有可调节的感知半径  $r_1$  和  $r_2$ , 且  $r_1 = 1.5r_2$ . 图 1(a) 和图 1(b) 示出了采用感知半径  $r_1$  和  $r_2$  对网络的覆盖情况. 每个节点初始能量相等,均为  $E$ . 在工作周期  $T$  内,节点以  $r_1$  进行感知时消耗能量为  $E_1 = \omega r_1^2$ ,以  $r_2$  进行感知时消耗能量为  $E_2 = \omega r_2^2$ .

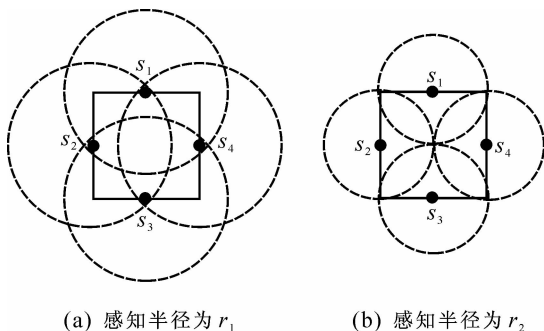


图 1 不同感知半径下的网络覆盖情况

令节点初始能量  $E = E_1$ ,则网络总能量为  $4E_1$ . 在图 1(a) 中,网络存在较大覆盖冗余,通过覆盖控制算法可将全网节点分成两个独立的覆盖集,表示为  $C_1 = \{(s_1, r_1), (s_3, r_1)\}, C_2 = \{(s_2, r_1), (s_4, r_1)\}$ . 根据式(10)可得每个工作节点集覆盖总能耗为  $\bar{E}_a = 2E_1$ . 则图 1(a) 所能获得的网络总寿命为

$$T_{\text{total}}^a = E_{\text{total}} / 2E_1 = 2T. \quad (16)$$

在图 1(b) 中,全网节点构成唯一的覆盖集,表示为  $C_3 = \{(s_1, r_2), (s_2, r_2), (s_3, r_2), (s_4, r_2)\}$ ,且该覆盖集总能耗  $\bar{E}_b = 4E_2$ . 此时网络所能获得的总寿命为

$$T_{\text{total}}^b = E_{\text{total}} / 4E_2. \quad (17)$$

因为  $E_2 = r_2^2 / r_1^2 = \frac{4}{9}E_1$ ,所以  $T_{\text{total}}^b / T_{\text{total}}^a = 1.125$ .

可见,通过对网络感知半径进行调整,能有效减少网络感知能耗,从而进一步提高网络寿命.

### 3 基于 NSGA-II 的网络寿命最大化模型求解

#### 3.1 基于链路状态的分簇机制

簇首节点选择与两个主要因素有关:1) 节点自身能量,能量较强的节点能在较长时间内保持簇结构的稳定性,执行覆盖控制算法并完成节点状态选取;2) 网络节点分布情况,簇首节点周围应有较高的节点密度,即有较多的邻居节点,以保证簇划分的高效性,并有利于簇间拓扑消息收集的可靠性<sup>[17]</sup>.

$E_{\text{con}}$  表示节点  $c_i$  的能量与全网总能量的比值,有

$$E_{\text{con}} = E_i / E_{\text{total}} = E_i / \sum_{i=1}^N E_i. \quad (18)$$

设节点  $c_i$  具有  $n$  个邻节点  $k_1, k_2, \dots, k_j, \dots, k_n$ ,  $\text{Num}(k_j)$  表示  $c_i$  的第  $k_j$  个邻节点所具有的邻居个数,则有

$$g_c = E_{\text{con}} \left[ n + \sum_{j=1}^n \text{Num}(k_j) \right]. \quad (19)$$

各节点向其邻居节点广播簇生成通告,通告中含有竞争指数  $g_c$ ,节点  $i_d$ ,通告序号及通告生存跳数.

当一个节点收到比自身  $g_c$  大的通告时,则记录通告的上游节点、源节点及通告跳数,并设定超时. 同时将通告中  $g_c$  值减 1,若此值大于自身  $g_c$ ,则继续转发此通告,并停止自身通告发送;若通告中  $g_c$  减 1 后小于或等于自身  $g_c$ ,则停止转发此通告. 当节点收到比自身  $g_c$  小的通告时,执行丢弃操作. 当一个节点同时收到两个以上不同源节点的通告,且通告中  $g_c$  均大于自身  $g_c$  时,不再转发通告,以此为簇的划分确定边界. 各边界节点向相应的簇首节点发送

边界确认消息后,由簇首广播拓扑发现分组,收到此分组的节点记录簇首地址及通告来源地址,并设定超时,以此在拓扑树上确定自身逻辑位置,进而转发此广播通告.若一个节点接到不同节点转发的通告,则根据通告跳数及簇首坐标,调整自身上游的节点记录,并选择加入相应的簇.叶节点向其上游节点通告自身节点标识,各节点在收集所有下游节点的拓扑信息后,向各自上游节点传递.这样簇首节点便获得了簇内最小跨度的拓扑树,如图2所示.

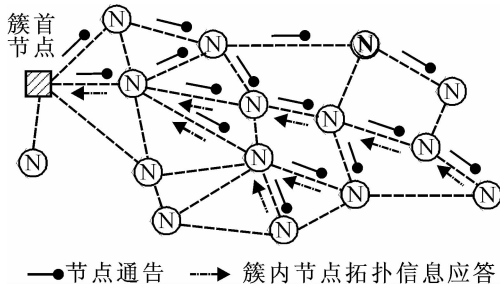


图2 无线传感器网络中簇的形成

### 3.2 基于NSGA-II的簇内覆盖控制机制

无线传感器网络寿命最大化问题属于典型的MOP问题.它既要提高网络覆盖率,又要减少工作节点和网络覆盖能耗.传统的解决方法包括加权法、约束条件法、目标编程法、最小最大法等.应用上述方法解决MOP问题时,很难直接收敛于Pareto最优支配线,并且需要运行多次才能求解一个不同的Pareto最优解.

与传统算法相比,精锐非支配遗传算法(NSGA-II)<sup>[18]</sup>具有多点搜索以及优化过程中始终保持一个最优解群体的特性,使其在解决MOP问题时具有独特的优势.NSGA-II采用快速非支配排序和拥挤比较算子,前者驱使搜索过程收敛到Pareto最优前沿,后者则保证了Pareto最优解的多样性.设MOP有 $m$ 个优化目标,种群有 $N$ 个个体,采用常规的非支配排序方法,算法的计算复杂度为 $O(mN^3)$ ;采用NSGA-II的快速非支配排序方法,算法的计算复杂度可降为 $O(mN^2)$ .

针对无线传感器网络寿命最大化问题,本文采用实数编码方案,用一组连续的实数向量代替二进制编码,估计的解更精确,编码空间更小,运算速度更快.设节点集 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ,感知半径集 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ ,则实数向量串 $\text{ind}_i = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , $r_{\min} \leq a_i \leq r_{\max}$ , $a_i$ 表示工作节点 $c_i$ 的感知半径大小.当 $a_i = 0$ 时,认为 $c_i$ 处于休眠状态.

选用分布特性优良的模拟二进制交叉作为重组因子.个体距离父代越近,越容易被挑选,且后代长度与父代长度成正比.从父代 $a_1$ 和 $a_2$ 中产生两个子

代 $\bar{c}_1$ 和 $\bar{c}_2$ ,子代基因 $c_i \in \{a_{1i}, a_{2i}\}$ ,概率分布函数为

$$P(\rho) = \begin{cases} 0.5(1+\eta)r^\eta, & r \leq 1; \\ 0.5(1+\eta)/r^{2+\eta}, & r > 1. \end{cases} \quad (20)$$

其中:比例因子 $\rho = |(c_{1,i} - c_{2,i}) / (a_{1,i} - a_{2,i})|$ , $\eta$ 是非负实数.

产生一个随机数 $u = \int_0^\beta P(r)dr, u \in (0,1)$ .可得到

$$\beta = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{1+\eta}}, & u \leq 0.5; \\ \left(\frac{1}{2(1-u)}\right)^{\frac{1}{1+\eta}}, & u > 0.5. \end{cases} \quad (21)$$

计算 $c_{1,i}$ 和 $c_{2,i}$ ,有

$$c_{1,i} = 0.5((1+\beta)a_{1,i} + (1-\beta)a_{2,i}), \quad (22)$$

$$c_{2,i} = 0.5((1+\beta)a_{1,i} + (1-\beta)a_{2,i}). \quad (23)$$

对实数向量 $\mathbf{a}$ 采用高斯变异方法,从 $a_i$ 的上界和下界 $[L_i, U_i]$ 中挑选一个随机值分配给元素,该随机值根据高斯分布的变化跳跃性进化.这是一种进化统计变异,过程如下:

$$a'_i = \begin{cases} a_i - \delta(t, a_i - L_i), & \text{随机数是 } 0; \\ a_i + \delta(t, U_i - a_i), & \text{随机数是 } 1. \end{cases} \quad (24)$$

其中: $t$ 是运行代数,指数函数 $\delta(t, x)$ 定义为

$$\delta(t, x) = xu(-t/T)^\eta, 0 \leq u \leq 1. \quad (25)$$

返回一个 $[0, x]$ 值,使得概率随着 $t$ 的增加越来越接近于0.该特性使得变异算子在 $t$ 很小时均匀地搜索解空间,在后期阶段搜索局部区域.

利用交叉和变异算子产生与亲代种群规模相等的子种群.对亲代和子代联合种群进行非劣分层,从优至劣将各占优层填充到与亲代种群相同规模的下一代种群中.若最后一组不能完全填入较占优子层,则计算其拥挤距离,选择拥挤距离大的个体填入下一代种群,剩余的不可填入的子层将被删除.非支配解的多样性由拥挤比较算子保证,不需要额外的共享参数.通过对当前解和种群中所有个体的分级存放,使得最佳个体不会丢失.

## 4 仿真及结果分析

在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 二维监测区域上,随机投放100个节点,节点通信天线为全向天线,节点感知半径 $r_i \in [0, 20]$ ,种群大小 $P = 100$ ,个体基因长度 $l = 100$ ,交叉概率 $P_c = 0.9$ ,变异概率 $P_m = 0.025$ .

图3记录了不同代数下的工作节点分布情况.图3(a)表示节点初始化分布,图3(b),3(c)和3(d)分别表示算法运行50代、100代和200代时的种群分布.算法运行50代时,使用51个节点,网络覆盖率为98.28%,单位面积能耗为1.1455u;算法运行100代时,使用27个节点,网络覆盖率为96.52%,

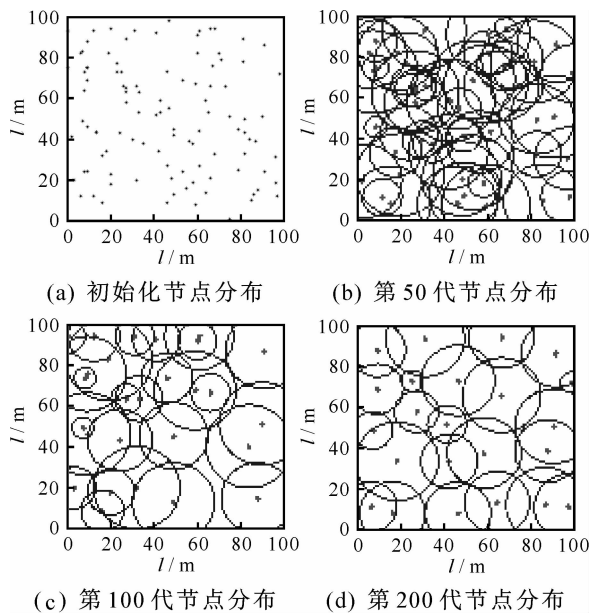


图 3 工作节点随代数增加分布

单位面积能耗为 0.5653u;算法运行 200 代时,使用 23 个节点,网络覆盖率提高至 98.6%,单位面积能耗则降至 0.4896u. 观察从 0 ~ 200 代的运算过程,本文算法能大幅度降低节点使用成本,减少网络单位面积能耗,具有较好的求解性能.

算法运行 200 代后,网络覆盖率与单位面积能耗率随工作节点数的变化情况如图 4 所示. 通过对节点感知半径的调整,本文算法能较大幅度增加网络整体覆盖率,提高网络的能量有效利用率.

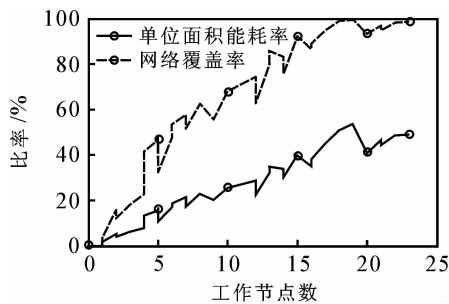


图 4 网络覆盖率和能量消耗率随工作节点数的变化

已证明 OGDC 的性能优于 PEAS, CCP 和 GAF 的性能,因此只将本文求解算法与 OGDC 进行比较. 在 50m x 50m 的监测区域上投放 0 ~ 1000 个节点,OGDC 中感知半径为 10m, NSGA-II 中感知半径  $r_i \in [0, 15]$ . 两种算法的性能对比如图 5 所示.

NSGA-II 可根据目标监测区域的情况自适应调整感知半径,在获得相同覆盖率的前提下,需要的节点个数更少,消耗的能量更少,获得了多个目标的有效折衷. 当节点分布密度较低时,由于节点的不可移动性,OGDC 在相同的感知半径下无法完成网络的完全覆盖,而 NSGA-II 通过调整节点的感知半径,可得到比 OGDC 更高的覆盖率.

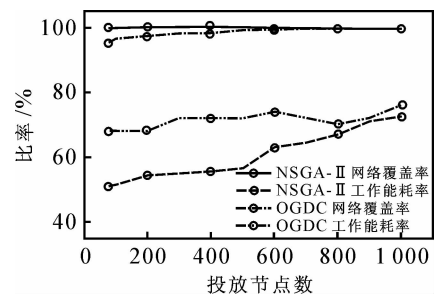


图 5 NSGA-II 和 OGDC 性能对比曲线

### 5 结 论

本文给出了基于节点协同覆盖的传感器网络概率感知模型,它能更好地反映传感器网络的实际监测能力. 建立了最大化网络覆盖率、最小化节点利用率、最小化网络工作能耗的传感器网络寿命多目标优化模型,并提出一种基于 NSGA-II 的网络覆盖解决方案,设计并实现了感知半径自动调节在遗传算法中的编码映射. 通过对基于节点链路状态的分簇机制,增强了算法的分布特性,有效地降低了算法复杂度. 仿真结果表明,本文提出的求解机制能获得更有效的网络覆盖率以及更少的网络能量消耗.

### 参考文献 (References)

- [1] Bhardwaj M, Garnett T, Chandrakasan A P. Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments[C]. Proc of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2002: 1587-1596.
- [2] Mhatre V, Rosenberg C, Kofman D, et al. A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2005, 4(1): 4-15.
- [3] Wieselther J E, Nguyen G D, Ephremides A. On the construction of energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks [C]. Proc of the IEEE INFOCOM. Tel-Aviv: IEEE Press, 2000: 585-594.
- [4] Ramanathan R, Rosales-Hain R. Topology control of multi-hop wireless network using transmit power adjustments[C]. Proc of the IEEE INFOCOM. Tel-Aviv: IEEE Press, 2000: 404-413.
- [5] Wei Y, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]. Proc of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2002: 1567-1576.
- [6] Chen B, Jamieson K, Balakrishnan H, et al. An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad-hoc wireless networks[C]. Proc of the Wireless Networks. Metherlands: Springer, 2002: 481-494.
- [7] Srinivas A, Modiano E. Minimum energy disjoint path routing in wireless ad-hoc networks [C]. The 9th

- Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2003: 122-133.
- [8] Bandyopadhyay S, Coyle E. An energy-efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks [C]. Proc of the IEEE INFOCOM. San Francisco, 2003: 1713-1723.
- [9] Zhang H, Hou J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. Ad-hoc and Sensor Wireless Networks, 2005, 1(1/2): 89-124.
- [10] Megerian S, Koushanfar F, Potkonjak M, et al. Worst and best-case coverage in sensor networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2005, 4(1): 84-92.
- [11] Tiara D, Georganas N D. Connectivity maintenance and coverage preservation in wireless sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(6): 744-761.
- [12] Slijepcevic S, Potkonjak M. Power efficient organization of wireless sensor networks [C]. IEEE Conf on Communications. Helsinki: IEEE Press, 2001: 472-476.
- [13] Ye F, Zhong G, Lu S, et al. PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks[C]. The 23rd Int Conf on Distributed Computing Systems. Providence: IEEE Press, 2003: 28-37.
- [14] Jiang J, Dou W. A coverage-preserving density control algorithm for wireless sensor networks[C]. The 3rd Int Conf on Ad-hoc Networks and Wireless. Vancouver, 2004: 42-55.
- [15] Yang S, Wu J. Coverage issue in sensor networks with adjustable ranges[C]. Int Conf on Parallel Processing Workshops. Montreal, 2004: 61-68.
- [16] Zou Y, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces[C]. Proc of IEEE INFOCOM. San Francisco: IEEE Press, 2003: 1293-1303.
- [17] Jia J, Chen J, Wen Y, et al. An extensible core-control routing protocol in large scale ad-hoc networks [C]. The 6th Int Conf on ITS Telecommunications. Chengdu: IEEE Press, 2006: 955-958.
- [18] Deb K, Pratap A, Agrawal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

~~~~~

(上接第 1180 页)

- [3] Davis G A, Nihan N L. Nonparametric regression and short-term freeway traffic forecasting [J]. J of Transportation Engineering, 1991, 117(2): 178-188.
- [4] 张晓利, 贺国光. 基于主成分分析和组合神经网络的短时交通流预测方法[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 8(2): 167-171.  
(Zhang X L, He G G. The forecasting approach for short-term traffic flow based on principal component analysis and combined NN[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2007, 8(2): 167-171. )
- [5] 冯金巧, 杨兆升, 张林. 一种自适应指数平滑动态预测模型[J]. 吉林大学学报, 2007, 37(6): 1284-1287.  
(Feng J Q, Yang Z S, Zhang L. Adaptive exponential smoothing model for dynamic[J]. J of Jilin University, 2007, 37(6): 1284-1287. )
- [6] Pavlovic V, Rehg J M, Cham T J, et al. A dynamic Bayesian network approach to figure tracking using learned dynamic models[C]. Proc of 7th IEEE Int Conf on Computer Vision. Montreal, 1999, 1: 20-27.
- [7] Yu G, Zhang C. Switching ARIMA model based forecasting for traffic flow[C]. Proc of IEEE Int Conf on Acoustics, Speech and Signal Processing. Kerkyra, 2004, 2: 429-432.
- [8] Seggern D. CRC slandard curves and surfaces[M]. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- [9] 蔡晓禹, 张脩, 杜豫川. 城市道路交叉口转弯比例反算模型的一般解法[J]. 同济大学学报, 2006, 34(12): 1616-1621.  
(Cai X Y, Zhang X, Du Y C. A general solution method for intersection turning movement proportions inversion Model[J]. J of Tongji University, 2006, 34(12): 1616-1621. )
- [10] 陆克丽霞, 杜豫川, 孙立军. 交通影响分析范围确定方法研究[J]. 交通与计算机, 2007, 25(2): 27-31.  
(Lu K L X, Du Y C, Sun L J. Determination of traffic impact analysis area[J]. Transportation and Computer, 2007, 25(2): 27-31. )