

# 基于协同进化粒子群算法的无线 传感器网络节能优化覆盖算法

王长清, 黄 静

(河南师范大学 物理与电子工程学院, 河南 新乡 453007)

**摘 要:**针对当前无线传感器网络覆盖算法存在能耗较高、节点大量冗余的缺陷,提出一种基于协同进化粒子群算法的WSN节能优化覆盖算法.以WSN的网络覆盖率、剩余能量和冗余程度为优化目标,建立粒子群优化模型.采用遗传算法的交叉变异算子,加强算法寻优能力.仿真结果表明,新的算法在提高能量利用效率的同时维护了良好的网络覆盖率,有效延长了网络生命周期,达到了节能优化覆盖的目标.

**关键词:**无线传感器网络; 粒子群算法; 优化覆盖; 遗传算法; 节能

**中图分类号:**TP393

**文献标志码:**A

无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)的节点优化覆盖问题关系到整个网络的传感质量和使用寿命.网络覆盖率和节点能耗的均衡是WSN的热点研究问题.目前使用的节能覆盖策略大致分为以下4类<sup>[1-5]</sup>:冗余节点睡眠调度、调整感应半径、选择最佳路由和高效数据融合.其中,WSN冗余节点睡眠调度机制因具有容量好、低功耗、易实现的优势被广泛采用.

Ye等人提出了通过对周围环境变化的探测来调整节点状态的调度方法(PEAS)<sup>[1]</sup>,通过调整执行探测的频率来满足节能要求,但是该方法没有考虑连通性和能耗均衡对网络的影响.Wang等人<sup>[2]</sup>提出了一种兼顾网络覆盖和连通性的高性能覆盖控制协议CCP,当节点感知范围内存在一个没有被充分覆盖的点时该节点被唤醒,否则进入休眠状态,以便达到节能目的.Tian等<sup>[3]</sup>提出了一种周期轮换的节点覆盖控制协议,但是存在盲区.随着人工智能算法的不断应用,基于智能优化算法的覆盖问题成为研究的热点.文献<sup>[4]</sup>利用多目标遗传算法实现节点感应半径的覆盖控制,减小了算法复杂性并提高了扩展性.文献<sup>[5]</sup>提出了基于粒子群优化算法的睡眠调度机制,对粒子更新过程中惯性权重进行了改进,优化了网络覆盖性能.但是以上算法都没有达到覆盖率、能量利用效率和节点生存率的均衡.

考虑到WSN在能量供应、数据处理和存储能力上的限制,为了延长无线传感器网络的寿命、提高节点能量利用效率,本文提出基于冗余节点睡眠调度机制的无线传感器网络节点节能优化覆盖算法.新算法通过对节点及邻居区域覆盖率的计算找出冗余节点,对多目标粒子群算法<sup>[6-7]</sup>进行改进.算法的适应度函数由剩余能量、覆盖率和冗余程度3个函数组成,并引入遗传算法的变异和交叉算子,用于改进粒子位置和速度的更新公式,增强粒子的全局搜索能力,进而得到遗传变异性和适应性更强的粒子.实现对网络能耗、覆盖率和冗余节点数量的多重优化.

## 1 节能优化覆盖策略

### 1.1 网络覆盖率

假定区域为二维平面,拟在区域上投放 $N$ 个传感器节点.传感器节点 $s_i(x_i, y_i)$ 检测到任意点 $p_j(x_j, y_j)$

收稿日期:2015-06-08;修回日期:2015-07-30.

基金项目:河南省重点科技攻关项目(122102310483)

第1作者简介:王长清(1973—),男,河南安阳人,河南师范大学副教授,博士,主要研究方向为物联网技术、嵌入式系统设计.

通信作者:黄 静(1989—),女,河南信阳人,河南师范大学硕士研究生,主要研究方向为物联网安全和隐私保护, E-mail:

wlky@htu.cn.

处目标的概率<sup>[8]</sup>

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & d(s_i, p_j) < R_e, \\ e^{-\alpha d(s_i, p_j)}, & e^{-\alpha d(s_i, p_j)} > b, \\ 0, & e^{-\alpha d(s_i, p_j)} < b, \end{cases}$$

其中,  $d(s_i, p_j)$  为节点  $s$  和  $p$  的欧氏距离.  $R_e$  为节点测量的可靠性参数,  $b$  为节点的感知概率阈值,  $\alpha$  为像素点被传感器监测到的概率随距离增大而减小的速率. 则目标监测点  $P_j$  被节点集覆盖的联合测量概率

$$P(N, p_j) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_{ij}).$$

对该区域进行离散化, 包括  $p \times q$  个像素. 则节点集综合检测概率

$$C(N) = \frac{\sum_{j=1}^{p \times q} P(N, p_j)}{p \times q}.$$

上式的最大值就是网络的最大覆盖率. 当节点  $s_i$  进入休眠状态后, 覆盖率为  $C(N)^*$ , 若如果  $C(N)^* \geq C(N)$ , 说明节点  $s_i$  进入休眠后不影响整个网络的覆盖率, 该节点为冗余节点; 反之, 该节点不冗余.

## 1.2 网络节点通信能耗

本文采用经典能量消耗模型<sup>[9]</sup> 计算在信息发送和接收过程中的能量消耗

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx\_dec}(k) + ET_{Tx\_amp}(l, d) = \begin{cases} lE_{dec} + \epsilon_{fs}d^2, & d < d_0, \\ lE_{dec} + \epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0, \end{cases}$$

其中, 接收端能量消耗  $E_{Rx}(l) = E_{Rx\_dec}(l) = lE_{dec}$ ,  $d_0$  为一阈值, 当发送节点与接收节点的距离小于  $d_0$  时, 发送数据的能量损耗与距离的平方成正比, 否则与距离的4次方成正比;  $E_{dec}$  表示发送或接收每 bit 数据时的能量消耗,  $\epsilon_{fs}d^2$  和  $\epsilon_{mp}d^4$  是采用自由空间模型和多径衰减信道模型发送每比特数据时放大器的能量消耗.

节点和其邻居节点的通信能耗可通过以下方程计算:

$$\begin{cases} \cos t(i) = \sum_{j \in \psi_i} \sqrt{\frac{E_{Tx}(i) \times E_{init}}{Q(i, j) \times E_{res}(j)}}, \\ E_{Tx}(i) = E_{dec} + \epsilon_{fs}d_i^2, \\ Q(i, j) = R_s(i, j), \end{cases}$$

其中,  $\psi_i$  是与节点  $i$  直接通信节点组成的集合,  $E_{Tx}(i)$  代表节点  $i$  传输每比特信息的能量消耗,  $Q(i, j)$  代表节点  $i, j$  之间的通信质量,  $R_s(i, j)$  是节点  $j$  接收节点  $i$  的接收信号强度. 因为链路质量指标是以接收信号强度来衡量的, 所以此处以 RSSI 表示节点通信质量.

## 2 改进的协同进化粒子群算法(ICEPSO)

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是从生物种群行为特征中得到启发并用于求解优化问题的人工智能算法. 首先在一定空间内设置多个粒子, 最佳粒子的坐标值就是算法目标函数的最优解. 粒子基于当前的坐标适应度值, 不断调整自身的速度和坐标, 从而实现在可行解空间的寻优.

协同进化算法<sup>[10]</sup> 是基于进化算法的改进, 通常基于粒子间的关系采用合适的进化函数调整粒子适应度. 在 WSN 中, 协同进化算法主要被用来进行数据融合、网络覆盖<sup>[11-14]</sup>、分布式计算<sup>[15]</sup>、多目标优化<sup>[6-7]</sup>、低功耗<sup>[16]</sup> 的计算以及其他领域, 并取得良好成果. 本文结合粒子群算法和协同进化算法的优点, 形成改进的协同进化粒子群算法(Improved Co-evolutionary Particle Swarm Optimization, ICEPSO), 兼具粒子群算法强大的全局搜索能力和协同算法的进化能力.

### 2.1 适应度函数

选择活跃节点来达到能量消耗平衡和减少重叠区域时, 关键要考虑剩余能量和过载区域. 此外, 覆盖的冗余程度也被作为关键因素考虑. 因此算法采用的适应度函数

$$f(X_i^t) = \alpha f_1(X_i^t) + \beta f_2(X_i^t) + \delta f_3(X_i^t),$$

其中,  $f_1(X_i^t) = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n E_{res}(j) \times X_{ij}^t}{\sum_{j=1}^n E_{init}(j)}$ ,  $f_2(X_i^t) = \frac{1}{\sum_{j=1}^n} \sqrt{\frac{1}{j_n} \sum_{i \in \psi_j} (DS(i,j) - D_i)^2}$ ,  $f_3(X_i^t) = \frac{\sum_{j=1 \text{ 且 } X_{ij}^t = -1}^n S_j}{\bigcup_{j=1 \text{ 且 } X_{ij}^t = -1}^n S_j}$ ,  $n$  代表传感器数量,  $j_n$  是节点  $j$  的邻居节点数量,  $\alpha, \beta$  和  $\delta$  是权重系数且  $\alpha + \beta + \delta = 1$ ,  $X_i^t$  代表粒子  $i$  在时刻  $t$  的状态, 通过其传感区域的所有粒子状态体现. 整个适应度函数包括 3 个子函数,  $f_1(X_i^t)$  代表节点  $i$  传感区域内所有活跃邻居节点剩余能量与全部初始能量比率. 该值越小, 说明网络有更多的剩余能量, 即网络性能越好.  $f_2(X_i^t)$  是节点与邻居节点间距的标准差, 表示传感器节点在所检测区域的分布情况, 该值越小, 覆盖均匀性越好.  $f_3(X_i^t)$  表示活跃节点监控区域的冗余程度,  $S_j$  代表节点  $j$  的传感区域.

## 2.2 粒子位置和速度的更新公式

标准 PSO 算法容易陷入局部搜索的循环, 不适合用来解决多目标组合优化问题. 本文在离散 PSO 算法基础上, 引入遗传算法的变异算子来代替粒子更新的一般方程. 定义函数

$$A_i^t = F_1(X_i^{t-1}, w) = \begin{cases} M(X_i^{t-1}), & r_1 < w, \\ X_i^{t-1}, & r_1 \geq w, \end{cases}$$

其中,  $M$  代表变异算子,  $X_i^{t-1}$  代表第  $i$  个粒子的  $t-1$  代,  $r_1$  是 0 和 1 之间的随机数,  $w$  是惯性权重, 体现的是粒子继承先前的速度的能力, 在全局搜索的局部搜索之间维持平衡. 为了优化算法的搜索区域, 定义

$$w = \exp\left(-\left|\frac{f_i - f_{gd}}{f_i - f_{id}}\right|\right) + w_{\min}.$$

上述方程中,  $w_{\min}$  是执行时的最终值. 随着迭代的进行, 惯性权重由 0.9 递减至 0.4, 迭代初期较大的惯性权重使算法保持了较强的全局搜索能力, 而迭代后期较小的惯性权重有利于算法进行更精确的局部搜索.  $f_i$  是粒子的适应度函数值,  $f_{id}$  和  $f_{gd}$  分别为粒子的个体最优值和全局最优值.

其次, 粒子通过如下交叉算子更新其位置和速度.

$$B_i^t = F_2(A_i^t, c_1) = \begin{cases} C_p(A_i^t), & r_2 < c_1, \\ A_i^t, & r_2 \geq c_1, \end{cases}; X_i^t = F_3(B_i^t, c_2) = \begin{cases} C_g(B_i^t), & r_3 < c_2, \\ B_i^t, & r_3 \geq c_2, \end{cases}$$

其中,  $C_p$  和  $C_g$  是交叉算子函数. 前一个方程对  $A_i^t$  进行交叉操作, 并对粒子  $i$  求最优解. 后者对  $B_i^t$  进行交叉操作, 并对所有粒子进行全局优化. 此外,  $r_2$  和  $r_3$  是介于 0 和 1 之间的随机数,  $c_1$  和  $c_2$  是积累参数.

根据以上方程, 可得到粒子的更新方程

$$X_i^t = F_3(F_2(F_1(X_i^{t-1}, w), c_1), c_2).$$

在突变阶段, 随机选取的 3 个变量相互影响. 对于任意变量  $X$ , 根据适应度公式, 在每一轮都有一个新值. 交叉算子可以增加粒子多样性, 该操作与遗传算法的交叉算子类似. 为了选择高质量的变量, 算法将变异和交叉操作产生的变异算子与其他值相比较, 选取适应性更高的传递给下一代.

## 3 实验仿真

为了验证本文提出的优化覆盖算法的有效性, 设计了 MATLAB 仿真程序, 将本文算法 ICEPSO 与 ECSS<sup>[3]</sup> 和 MPSO<sup>[4]</sup> 算法的仿真结果进行对比. 各项试验参数如下: 模拟区域范围 400 m × 400 m; sink 节点的坐标 (200 m, 200 m); 传感器节点个数  $n=300$ ; 初始能量  $E_{init}$  为 2 J; 适应度函数权重  $\alpha, \beta, \delta$  分别为 0.35, 0.45, 0.2; 惯性权重  $w_{\min}$  为 0.4.

图 1 和图 2 分别为运用 ICEPSO, MPSO 和 ECSS 算法对节点生存率和平均能耗(已消耗能量和初始能量的百分比)随节点数量变化的仿真结果对比图. 由图 1 可知, 当 MPSO 和 ECSS 算法还有 5%~10% 的活跃节点时, ICEPSO 的活跃节点还有 10%~15%, 说明 ICEPSO 比其他算法有更高的节点生存率, 因而, 有更长的网络生存周期. 无线传感器网络中, 节点生存率过低, 则工作节点较少, 将直接影响到网络覆盖率并造成覆盖空洞, 影响监测活动; 生存率过高, 活动节点数目太多, 就会产生数据冗余, 相应的网络能耗也会增加, 影响网络寿命. 因而, 需要工作节点数量和网络能耗的均衡. 由图 2 可知, ICEPSO 比其他算法具有更低的能耗, 主要在于基于粒子群算法的协作休眠机制, 该方法比 MPSO 节能算法的执行效率更高, 能够找到剩余能

量和连通度更高的粒子. MPSO算法主要针对节点感应半径的研究,算法计算量小,但是容易造成活跃节点过多的问题. ECSS采用周期轮换机制,在能耗上有所降低,但存在监控盲区. 由图1和图2可知,ICEPSO算法有更高的执行效率,在平衡网络生存时间和能耗方面表现良好.

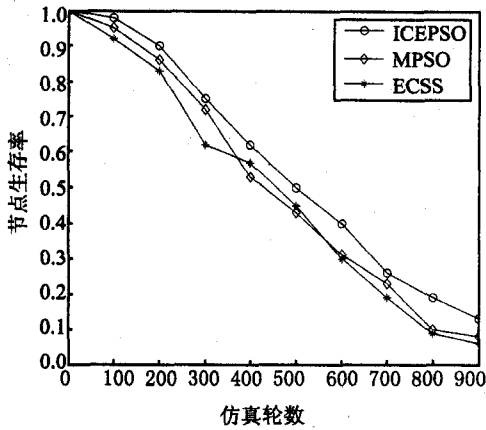


图1 节点生存率随仿真轮数变化

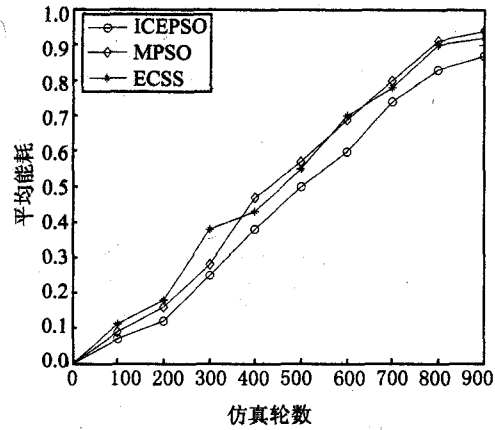


图2 网络平均能耗随仿真轮数变化

图3和图4分别为ICEPSO、MPSO和ECSS算法的休眠率和覆盖率与节点数目的关系. ECSS算法在休眠率上表现良好,其覆盖率比其他两种算法更弱,原因是缺少精细的覆盖控制算法,存在监控盲区. MPSO的覆盖性能更好,在休眠率上表现较差,因为其工作的节点较多,能耗较高,会缩短网络生命周期. ICEPSO算法可以在维持较高覆盖率的前提下得到较高的节点休眠率,因为ICEPSO的节能休眠算法使数据传输的每跳节点之间有更平衡的能量消耗,能耗平衡可以有效延长网络的生命周期,同时维持较高的网络覆盖率.

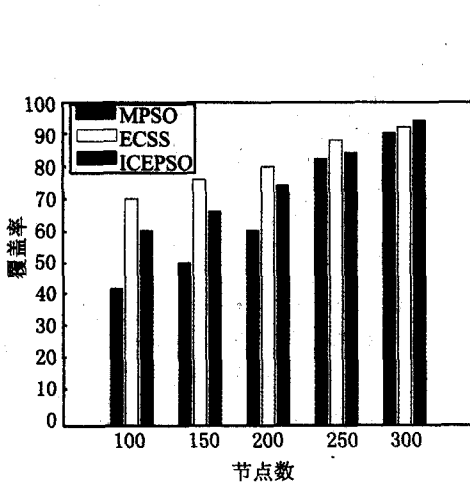


图3 节点休眠率与节点数目的关系

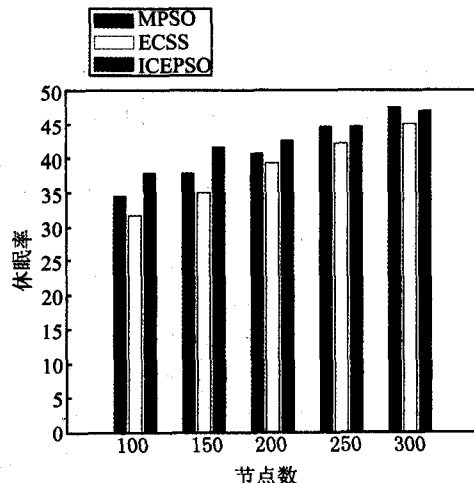


图4 网络覆盖率与节点数目的关系

### 4 结论

本文提出了一种基于冗余节点睡眠调度机制的无线传感器网络节能优化覆盖算法. 算法对标准粒子群算法的适应度函数和位置速度更新公式进行改性,使新算法有更强的全局搜索能力和遗传变异性. 实验结果表明,该算法使用较少的工作节点获得了较高的覆盖率,达到了网络能耗和覆盖率优化的双重目标.

### 参 考 文 献

[1] YE F, ZHONG G, LU S, et al. PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks[C]//Proceedings-International Conference on Distributed Computing Systems, 2002:200-201.

- [2] WANG X, XING G, ZHANG Y, et al. Integrated Coverage and Connectivity Configuration in Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of Acm Sensys, 2003; 28-39.
- [3] TIAN D, GEORGANAS N D. A node scheduling scheme for energy conservation in large wireless sensor networks[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2003, 3(2): 271-290.
- [4] JIA J, CHEN J, CHANG G, et al. Multi-objective optimization for coverage control in wireless sensor network with adjustable sensing radius[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2009, 57(11/12): 1767-1775.
- [5] YU C, GUO W, CHEN G. Energy-balanced Sleep Scheduling Based on Particle Swarm Optimization in Wireless Sensor Network[C]//2013 IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing, Workshops and Phd Forum. IEEE, 2012; 1249-1255.
- [6] 陈树, 钱成. 一种多目标的覆盖优化策略在 WSNs 中的应用[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(10): 151-154. DOI: 10.13873/J.1000-9787(2014)10-0151-04.
- [7] 张娟. 基于粒子群优化算法的无线传感器网络节能覆盖研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [8] 黄瑜岳, 李克清. 基于人工鱼群算法的无线传感器网络覆盖优化[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(2): 554-556. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.065.
- [9] ZHU R B, SHU W N, MAO T Y. Enhanced MAC Protocol to Support Multimedia Traffic in Cognitive Wireless Mess Networks[J]. Multimedia Tools and Applications, 2013, 67(1): 269-288.
- [10] WANG X, WANG S, MA J J. An Improved Co-evolutionary Particle Swarms Optimization for Wireless Sensor Networks with Dynamic Deployment[J]. Sensor, 2007, 7(7): 354-370.
- [11] 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.
- [12] 梁天, 周晖, 谢静, 等. 无线传感器网络的多目标覆盖控制策略[J]. 传感技术学报, 2010, 23(7): 994-999.
- [13] 沈海洋. 基于遗传 PSO 的无线传感器网络覆盖优化算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2013, 3: 148-151.
- [14] CHEN C, BAI G W, ZHAO L. Location-free and Energy-balanced Topology Control for Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Computer Application, 2014, 34(4): 921-925.
- [15] WANG D, XIE B, AGRAWAL D P. Coverage and Lifetime Optimization of Wireless Sensor Networks with Gaussian Distribution[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(12): 1444-1458.
- [16] ZHAO Y, WU L, LI F, et al. On Maximizing the Lifetime of Wireless Sensor Networks using Virtual Backbone Scheduling[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2011, 23(8): 1528-1535.

## Energy-saving Coverage Algorithm for Wireless Sensor Network Based on Co-evolutionary Particle Swarm Optimization

WANG Changqing, HUANG Jing

(College of Physics and Electronic Engineering, Henan Normal University, Xixiang 453007, China)

**Abstract:** To solve the problem that the most covering algorithm of wireless sensor network has the weakness of serious energy consumption and lots of redundant nodes. We proposed an energy-conservation optimization covering algorithm which based on co-evolutionary particle swarm optimization(PSO). We constructed the PSO model according to the ratio of the network coverage, residual energy and the degree of redundant. The mutation and crossover operator of genetic algorithm was adopted to enhance the searching able of the proposed algorithm. The simulation results indicate that the proposed algorithm can improve energy efficiency, maintain a good network coverage rate, effectively prolong the lifetime of network and achieves the goal of energy-saving optimization covering.

**Keywords:** Wireless Sensor Network; particle swarm optimization; optimization covering; energy-conserving