

Multi-Objective Coverage Control Strategy for Wireless Sensor Networks*

LIANG Tian, ZHOU Hui*, XIE Jing, WANG Kunchi

(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong Jiangsu 226019, China)

Abstract: A multi-objective optimization coverage control strategy is proposed for solving the contradictory problem of energy consumption, equilibrium of energy and coverage in wireless sensor networks. Network coverage, energy consumption and network energy equilibrium are the optimization goals, then the fitness functions and coding schemes are designed for free search based on established network model. Simulation shows that the strategy can reduce and balance the energy consumption effectively while ensuring the high network coverage.

Key words: wireless sensor networks; coverage control; multi-objective coverage; free search

EEACC: 6150P

无线传感器网络的多目标覆盖控制策略*

梁 天, 周 晖*, 谢 静, 王坤赤

(南通大学电子信息学院, 江苏 南通 226019)

摘 要: 针对无线传感器网络中能耗、能耗均衡和覆盖率互相矛盾的问题, 提出了一种多目标优化覆盖控制策略。在构建网络模型的基础上, 以覆盖率、能耗和网络能耗均衡为优化目标, 设计针对自由搜索算法的适应值函数和编码方案。仿真结果表明, 该覆盖控制策略在保证高覆盖率的同时, 能有效地降低能耗和保持网络能量均衡。

关键词: 无线传感器网络; 覆盖控制; 多目标覆盖; 自由搜索算法

中图分类号: TP393; TP18

文献标识码: A

文章编号: 1004 - 1699 (2010) 07 - 0994 - 06

覆盖控制是无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 保障 QoS 要求的重要问题之一。在无线传感器网络中, 节点一般采用电池作为能源, 更换节点电池难以实现。因此在运行过程中降低能耗、延长网络寿命成为 WSN 应用的关键^[1]。

无线传感器网络的覆盖控制是在其节点能量、网络通信带宽、网络计算处理能力等资源普遍受限情况下, 通过各个传感器节点协作而达到对监视区域的不同管理或感知效果。对于随机性布设的 WSN 网络, 覆盖控制属于 NP 难问题^[2], 而启发式算法是解决该问题的有效办法之一。文献[3]提出了 PEAS 协议, 但该方法不能保证冗余节点的感知区域被其他节点完全覆盖。文献[4]在随机算法的基础上提出集中式和分布式的贪婪算法, 让节点集尽可能多的覆盖目标区域。上述覆盖控制算法都试图在保证 QoS 的条件下, 尽可能地减少工作节点的数量。但是, 针对随机布设的网络拓扑环境, 节点使用数最少并不一定就是网络性能最好, 网络能耗的均

衡性同样是决定整个网络运行寿命和网络运行稳定性的关键因素。

智能计算凭借其良好的适应能力和寻优能力, 在无线传感器网络覆盖控制领域得到应用。文献[5]将目标区域网格化, 使用遗传算法寻求满足总价格一定时的覆盖率最大化。文献[6]针对采用 MEC 机制分簇的传感器网络使用微粒群算法, 布置移动节点完成覆盖。文献[7]中使用 $(\mu + \lambda)$ 进化策略找出最小的活动节点集, 完成监视任务。上述方法都是以覆盖率为目标进行优化, 没有考虑网络能耗均衡, 且都没有采用完全随机性布设网络模型。文献[8]采用 NSGA - II 对网络覆盖和节点利用率两个目标同时优化, 实现 WSN 网络的覆盖控制。

本文提出一种无线传感器网络多目标优化覆盖控制策略, 在 WSN 的覆盖控制中以网络覆盖率和网络均衡能耗最小为优化目标, 采用自由搜索算法^[9-11]进行优化。与之前的研究不同的是, 该策略在保证节点使用率最小的同时, 考虑了整个网络能

项目来源: 国家自然科学基金资助 (60901041); 江苏省高校自然科学基金重点研究项目资助 (07KJA51007); 南通大学科技项目资助 (09ZW001, YKC09014); 南通市科技项目资助 (K2007008)

收稿日期: 2009 - 12 - 24 **修改日期:** 2010 - 04 - 01

量消耗的均衡性。仿真结果表明,新的覆盖控制策略能够显著提高网络覆盖率、减少网络能耗、保证网络能量的能耗均衡性。

1 WSN 覆盖的多目标自由搜索算法

1.1 问题描述

为了保证随机布设 WSN 的覆盖率,通常加大节点的布设密度。这虽然减少了感知盲点出现的几率。但是,大量冗余节点造成网络数据传输冲突,导致能量过分消耗,造成网络过早失效。若某节点的感知区域能被其它节点完全覆盖,则此节点为冗余节点,可以进入休眠状态。判断网络中的冗余节点,在保证网络覆盖率最大化的同时使用尽可能少的工作节点,是一种满足网络覆盖要求并减小能耗的有效方法。因此在网络初始阶段,工作节点的合理选取对网络性能和运行成本有重要意义。同时,网络能量的均衡消耗对于网络的稳定运行和网络寿命的延长至关重要。因而,无线传感器网络覆盖是一个典型的多目标优化问题。

1.2 网络模型

设目标区域为二维矩形区域,在该区域内随机布设传感器节点。节点的感知区域为圆形,采用布尔模型,如式(1),(2)所示。

$$p(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{if } d_{ij} < r_s \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2)$$

其中 $p(i, j)$ 代表节点 i 感知到目标点 j 的概率, (x_i, y_i) 为节点 i 的位置, (x_j, y_j) 为目标点 j 的位置, r_s 为节点的感知半径。 d_{ij} 为 i, j 之间的欧氏距离。

工作节点集中只要有一个节点覆盖了目标点 k (x, y) , 就认为该点被传感器网络覆盖。因此,目标点 k 被传感器网络感知的概率 P_k 如式(3)所示。

$$P_k = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p(i, k)) \quad (3)$$

1.3 多目标覆盖模型

设目标区域的总面积为 A 。 $\{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_N\}$ 为工作节点集 S 中各个节点感知范围的集合, $0 \leq i \leq N$, 其中 1 为工作节点的个数, N 为目标区域内总节点数, 目标区域内目标点的感知概率如式(3)所示。则工作节点集 S 所覆盖目标区域的面积 A_s 为

$$A_s = \bigcup_{i=1}^1 s_i \quad (4)$$

WSN 网络节点利用率 ρ 为:

$$\rho = \frac{1}{N} \quad (5)$$

定义 1 区域能量 EQ_k 将监测区域均匀分为

K 个网格, $k \in [1, K]$ 。则第 k 个网格的区域能量等于该网格中所有节点的剩余能量之和与该网格中节点个数的比值, 即

$$EQ_k = \frac{\sum_{i=1}^{m_k} E_{ki}}{m_k} \quad (6)$$

其中 m_k 为第 k 个网格中的节点个数, E_{ki} 为第 k 个网格中节点 i 的剩余能量。

定义 2 能量跨度 Es 区域能量的最大值与最小值之间的差值除以区域能量的最大值, 代表当前网络的能量跨度, 如式(7)所示。

$$Es = \frac{\text{Max}(EQ_k) - \text{Min}(EQ_k)}{\text{Max}(EQ_k)} \quad (7)$$

Es 反映了网络整体能量消耗的均衡程度, 越大网络能量消耗越不均匀。因此 Es 越小, 网络性能越好。

覆盖控制的结果与算法运行时间是一对矛盾, 需要平衡考虑。将能量跨度和节点利用率分别作为优化目标, 将使算法的计算复杂度成倍增加; 同时网络能耗的均衡性与当前的节点使用数密切相关。因此本文采用线性加权和法, 引入能耗权重和能量均衡权重, 折衷考虑节点利用率和能量跨度, 在能耗均衡的基础上, 让冗余节点进入休眠状态, 以节省能量消耗。由此, 工作节点集寻优可以定义为下面的多目标优化问题:

(1) 网络覆盖率 保证目标区域中的目标事件能以最大可能性被感知到,

$$\text{Max } f_A(x) = \frac{A_s}{A} \quad (8)$$

(2) 网络均衡能耗 在考虑能量均衡消耗的同时, 使节点利用率最小。

$$\text{Min } f_2(x) = \omega_1 \rho + \omega_2 Es \quad (9)$$

其中 ω_1 表示能耗权重, ω_2 表示能量均衡权重。特殊情况, 当 $\omega_1 = 1, \omega_2 = 0$ 时, 即代表只考虑最小的节点利用率, 而不考虑网络能耗的均衡性。

为了使两个目标都为最小化求解, 本文使用未覆盖率作为目标函数之一, 即

$$\text{Min } f_1(x) = 1 - f_A(x) \quad (10)$$

综上所述, 无线传感器网络多目标覆盖控制模型如式(11)所示。

$$\begin{cases} \text{Min}[f_1(x), f_2(x)] \\ s. t. 0 \leq l \leq N \\ x_i \in \{0, 1\} \\ 0 < k \leq K \end{cases} \quad (11)$$

1.4 多目标自由搜索算法

文献[10-11]研究了自由搜索算法在单目标优化领域中的应用。本文针对 WSN 网络覆盖控制

的多目标优化问题,设计了多目标自由搜索算法 (Multi-objective Free Search, MOFS),其编码规则和适应值函数如下:

针对 WSN 网络模型的特点,多目标自由搜索算法将采用二进制编码。对网络中的传感器节点进行编号,用长度为 N 的二进制串表示。每个节点对应二进制串中的一位,每个二进制串代表一个工作节点集选择方案。在进化过程中,若该节点被选中,则对应基因座的基因值为 1;反之,为 0。其基因形式为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N)$,其中

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个节点被选中} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (12)$$

图 1 为两个工作节点集选择方案示例。以网络中随机布设 8 个节点为例,二进制串的长度为 8。图 1(a) 表示网络中第 (1,3,4,8) 节点处于激活状态,其余节点为冗余节点,进入休眠状态;图 1(b) 表示所有节点都被选择作为工作节点,处于激活状态。

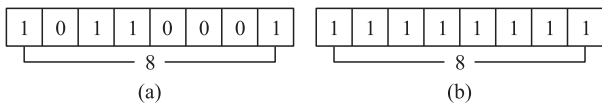


图 1 无线传感器网络节点二进制编码结构

在编码方案的基础上,将无线传感器网络多目标覆盖控制模型作为自由搜索算法的适应值函数,即式(11)所示。

MOFS 可以采用的终止策略有 3 种:

- (1) 目标函数达到目前函数的全局最优解;
- (2) 搜索代数 g 达到终止代数 $G: g \geq G$;
- (3) 上述两者居其一。

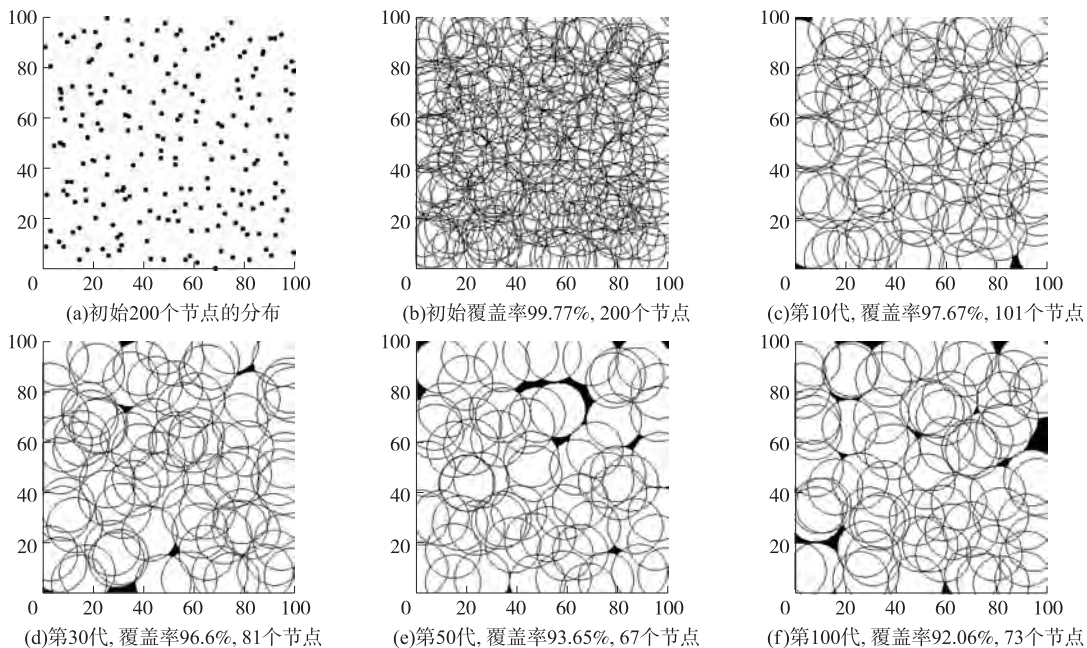


图 3 不同优化代数时的节点覆盖情况

多目标自由搜索算法的实现框图如图 2 所示。限于篇幅所限,算法的具体实现详见文献[11]。

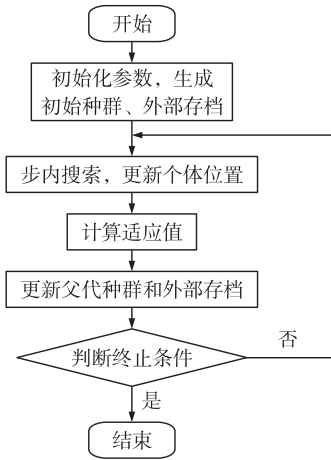


图 2 多目标自由搜索算法流程图

2 仿真实验与性能分析

设目标区域为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的矩形区域,200 个传感器节点随机布设于该区域,均匀分布。采用同类型节点,每个节点的感知半径 $r_s = 10\text{ m}$ 。假设节点能够通过某种定位技术确定自己在网络中的具体位置^[12-13];且每个节点的通信半径 r_c 为感知半径的 2 倍,即 $r_c = 2r_s$,以保证网络的连通性^[14]。

实验 1 MOFS 的初始搜索半径 R 设为 10,算法运行代数数为 100,能耗权重 $\omega_1 = 0.7$,能量均衡权重 $\omega_2 = 0.3$ 。

图 3 为不同优化代数时的覆盖控制实验结果,在 Pareto 解集中选取非劣解,画图观察覆盖率和节

点使用数。图 3(a)为初始 200 个节点的分布情况。由图 3(b)可知初始随机布设网络存在大量的冗余节点,初始 200 个节点的网络覆盖率为 99.77%。图 3(c)为算法运行到第 10 代时,使用 101 个节点完成了 97.67% 的网络覆盖(阴影部分代表未覆盖区域)。图 3(d)为算法运行到第 30 代时,使用 81 个节点完成了 96.6% 的网络覆盖。图 3(e)中,算法在第 50 代时,使用 67 个节点即完成了 93.65% 的网络覆盖。由于本策略同时考虑网络能耗的均衡性,因此不是活动节点数越少越好。图 3(f)为算法运行到 100 代时,使用了 73 个节点,保证 92.06% 的网络覆盖率,且节点分布更均匀。

不同搜索代数情况下的 Pareto 前沿如图 4 所示。由图可知,算法在运行 10 代后已经寻找到部分非劣解,但分布不均匀;在运行 100 代后,存档中个体分布更加均匀,且收敛效果更好。通过实验发现,随着搜索代数增多,算法收敛速度逐渐减缓。第 10 代与第 50 代结果相比较,Pareto 前沿有明显改善;第 50 代与第 100 代结果相比较,收敛情况虽有改善,但改善效果明显减弱。由此说明算法收敛速度很快,在运行 50 代后已经较接近最终结果。因此,实验中所设搜索代数并非越大越好,过大的代数将导致计算复杂度的增加,延长计算时间,且结果并未有明显优势。

针对不同的业务应用需求,WSN 网络需要达到的监测覆盖率也不尽相同。部分覆盖问题就是用户根据实际业务要求,预先指定期望覆盖阈值。大多

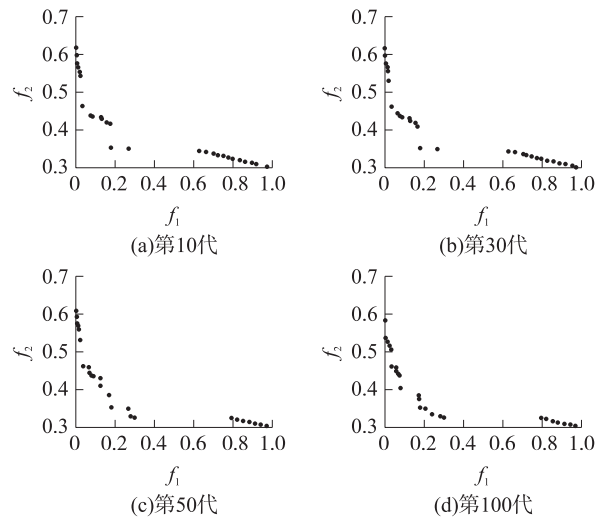


图 4 不同代数下的 Pareto 前沿

数情况,部分覆盖即可满足业务要求,且需要的工作节点数更少,网络能耗更小,从而延长网络寿命。本覆盖控制策略寻优得到的 Pareto 解集是多个非劣解的集合,这使决策者可以根据实际问题的需要灵活选择。图 5(a)为初始随机布设 200 个节点的分布情况;图 5(b)(c)(d)(e)(f) 依次表示预设覆盖阈值为 80%、85%、90%、95%、100% 时,算法得到的网络覆盖情况。每个选择方案为 Pareto 解集中覆盖率最接近预设覆盖阈值的非劣解。

算法运行过程中,各代针对不同预设覆盖阈值得到的非劣解,如表 1 所示。 f_1, f_2 为第 2.3.1 节介绍的适应值函数。由表可得,随着迭代次数的增加,Pareto 解集的收敛性越来越好,且网络覆盖率与预设覆盖阈

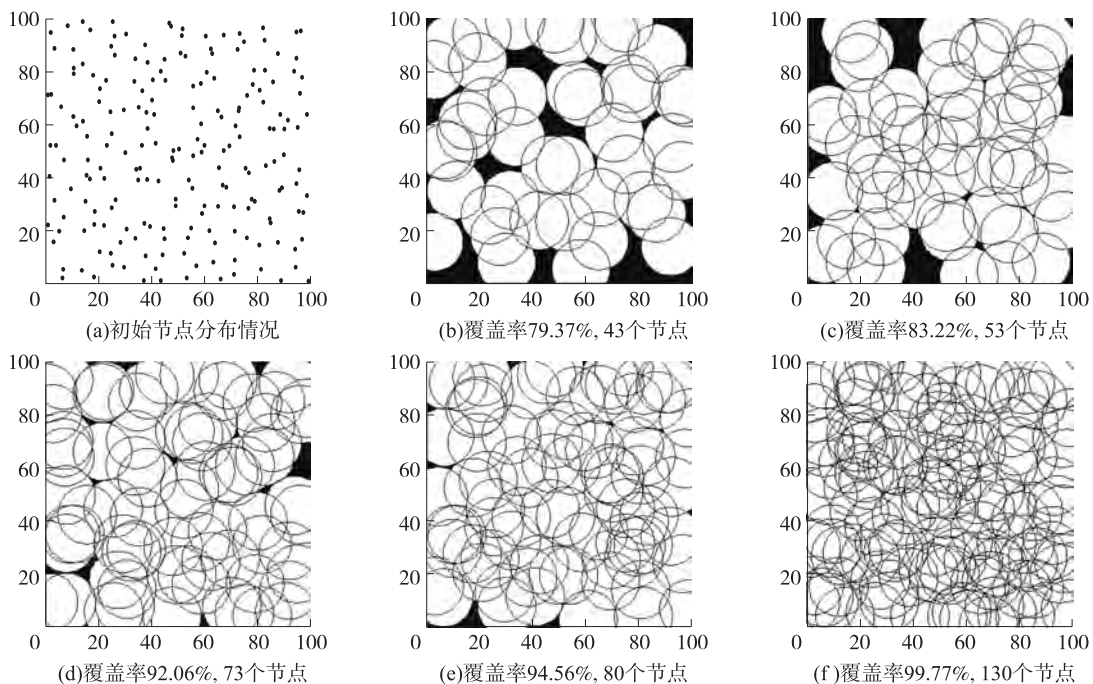


图 5 预设不同的覆盖阈值对应的节点覆盖情况

值间差值也越来越小,即提供的非劣解更加符合业务要求。算法运行 50 代后,网络覆盖率与预设覆盖阈值之间的均方差为 2.263%;运行 100 代后,网络覆盖率与预设覆盖阈值之间的均方差降为 1.611%。

以上实验结果表明,该覆盖控制策略可以在保证能量均衡消耗的基础上,有效的减少冗余节点的使用,降低网络整体能耗。

实验 2 上述实验只针对一种权重选择方案,对于实际问题,权重的合理选择与否,同样影响到覆盖控制策略的性能。下文将针对不同的权重选择方案,进行实验对比。

MOFS 的初始搜索半径 R 设为 10,算法运行代数为 100。为了考察网络能耗和能耗均衡的关系,

表 2 不同权重时网络覆盖率和在工作节点数目(F_1/F_2)

ω_1 能耗权重 ω_2 能量均衡权重		覆盖阈值				
		80.00%	85.00%	90.00%	95.00%	100.00%
$\omega_1 = 0.5, \omega_2 = 0.5$	F_1	85.49%	85.49%	90.25%	94.56%	99.77%
	F_2	63	63	70	76	150
$\omega_1 = 0.7, \omega_2 = 0.3$	F_1	79.37%	83.22%	92.06%	94.56%	99.77%
	F_2	43	53	73	80	130
$\omega_1 = 1, \omega_2 = 0$	F_1	79.59%	83.90%	90.48%	94.78%	99.77%
	F_2	42	48	62	73	119

表 2 为各权重选择方案对应不同预设覆盖阈值时,算法得到的网络覆盖率(F_1)和工作节点数目(F_2)。不同的权重比例表示网络对工作节点数目和网络能耗均衡的折衷程度。 $\omega_1 = 1, \omega_2 = 0$ 代表不考虑网络能耗的均衡性,只以节点利用率为目标函数,以寻求网络能耗最小。因此如表中所示,在该参数下,网络的工作节点使用数最少。实验结果表明,如果 ω_2 过大,即过分注重能耗均衡,而忽视节点利用率的重要程度,将使工作节点数量增多,从而降低覆盖控制策略的性能。作者根据大量实验,建议采用 $\omega_1 = 0.7, \omega_2 = 0.3$ 作为设置参数,以取得较好的覆盖控制效果。

3 结束语

低能耗、能耗均衡和高覆盖率是无线传感器网络覆盖控制中相互冲突的目标。前者决定了 WSN 网络运行的网络寿命,后者决定了无线传感器网络对物理世界的监测能力。因而,开展无线传感器网络的高覆盖、低能耗问题研究具有十分重要的意义。本文从多目标优化的角度出发,提出能耗均衡覆盖控制策略,应用多目标自由搜索算法,对覆盖率、能量及其均衡度进行优化,进而确定传感器节点的工

作状态。同时,该覆盖控制策略还可根据不同应用需求,通过调整权值和覆盖阈值,得到不同的优化配置方案,提高了 WSN 网络对不同使用场合的适用性。可见该覆盖控制策略是一种普适性策略,仿真实验结果验证了该策略的有效性。

表 1 各代针对预设覆盖阈值得到的非劣解(f_1/f_2)

代数		覆盖阈值				
		80%	85%	90%	95%	100%
10	f_1	0.1791	0.1565	0.0862	0.034	0.0023
	f_2	0.354	0.421	0.4355	0.4635	0.6186
30	f_1	0.1791	0.1565	0.0862	0.0658	0.446
	f_2	0.354	0.421	0.4355	0.0023	0.6186
50	f_1	0.1791	0.1678	0.0862	0.0635	0.0023
	f_2	0.354	0.3855	0.4355	0.4595	0.6107
100	f_1	0.2063	0.1678	0.0794	0.0544	0.0023
	f_2	0.3505	0.3855	0.4055	0.46	0.5836

作状态。同时,该覆盖控制策略还可根据不同应用需求,通过调整权值和覆盖阈值,得到不同的优化配置方案,提高了 WSN 网络对不同使用场合的适用性。可见该覆盖控制策略是一种普适性策略,仿真实验结果验证了该策略的有效性。

本文在研究过程中尚未考虑节点协作机制和休眠唤醒机制,因此如何引入这些机制进一步完善 WSN 网络性能将是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. A survey on Sensor Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 44(8): 102-114.
- [2] Cardei M, Wu J. Energy-Efficient Coverage Problems in Wireless Ad Hoc Sensor Networks[J]. IEEE Computer Communications Special Issue on Sensor, 2004, 12(2): 1234-1239.
- [3] Ye F, Zhong G, Lu S, et al. PEAS: A Robust Energy Conserving Protocol for Long-Lived Sensor Networks[C]// Proc. 23 rd Conf. Distributed Computing Systems. Los Alamitos, 2003, 28-37.
- [4] Abram Z, Goel A, Plotkin S. et al. Set K-Cover Algorithms for Energy Efficient Monitoring in Wireless Sensor Networks[C]// Third International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Berkeley, CA, United states, IPSN 2004: 424-432.

- [5] Habib S J. Modeling and Simulating Coverage in Sensor Networks [J]. Computer Communications, 2007, 30(5): 1029 - 1035.
- [6] Wang Xe, Ma J J, Wang S, et al. Parallel Energy-Efficient Coverage Optimization with Maximum Entropy Clustering in Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2009, 69(10): 838 - 847.
- [7] Youssef S M, Hamza M A, Fayed S F, et al. EQOWSN: Evolutionary-Based Query Optimization Over Self-Organized Wireless Sensor Networks [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(1): 81 - 92.
- [8] Jia J, Chen J, Chang G R, et al. Efficient Cover Set Selection in Wireless Sensor Networks [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(9): 1157 - 1162.
- [9] Penev Kalin, Littlefair Guy. Free Search-A Comparative Analysis [J]. Information Sciences, 2005, 172(1-2): 173 - 193.
- [10] 周晖,李丹美,邵世煌,等. 一种新的群集智能算法——自由搜索[J]. 东华大学学报(自科版), 2007, 33(5): 579 - 583.
- [11] 周晖,李丹美,邵世煌,等. 一种新的群集智能优化及其改进研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(2): 337 - 340.
- [12] 包志华,周晖,邵世煌,等. 基于智能估计的无线传感器网络定位算法[J]. 传感技术学报, 2008, 21(10): 1765 - 1769.
- [13] 曹磊,袁从明,徐晨,等. 基于距离的无线传感器网络自定位新算法[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2008, 7(1): 42 - 45.
- [14] Zhang H H, Hou J C. Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks [J]. Ad-Hoc and Sensor Wireless Networks, 2005, 1(1): 89 - 124.



梁天(1984 -),男,山东烟台人,硕士研究生,主要研究领域为无线传感器网络、智能计算, liangtian919@ hot-mail. com;



周晖(1963 -),男,江苏南通人,南通大学副教授,主要研究方向为 Ad - hoc 网络,传感器网络,智能计算。