

无线传感网络节点能效性测量优化方法*

王勇,王雪,孙欣尧

(清华大学 精密仪器与机械学系 精密测试技术及仪器国家重点实验室 北京 100084)

摘要:本文研究了无线传感网络节点能效性测量优化问题。给出了无线传感网络分簇式拓扑结构和节点概率检测模型,建立了网络测量覆盖率指标和通信能耗指标。遗传算法和微粒群算法在节点能效性测量优化时存在容易陷入局部最优和精度不高的缺点。将禁忌搜索算法和遗传算法结合,增强了遗传算法的全局搜索能力。仿真实验证明,采用遗传-禁忌搜索算法进行节点能效性测量优化时,网络测量覆盖率更高,通信能耗更小,优化效果更好。

关键词:无线传感网络,能效性,遗传算法,微粒群算法,遗传-禁忌搜索算法

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2009)07-0001-05

The Method of Energy Efficient Optimization for the Measurement of Wireless Sensor Node

WANG Yong, WANG Xue, SUN Xin-yao

(Department of Precision Instruments and Mechanology, State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper researches the problem of energy efficient optimization for the measurement of wireless sensor nodes. Based on the cluster-based topology and probability sensing model, the metric of network measurement coverage and communicate energy consumption are established. Genetic algorithm is easy to stuck in local optimum; particle swarm optimization can't get a high precise result. Combining genetic algorithm and tabu search algorithm can improve the performance of genetic algorithm. The simulation experiments show that comparing to genetic algorithm, the network measurement coverage is getting higher and the communicate energy consumption is getting lower when using the GA-TS algorithm.

Key words: wireless sensor networks, energy efficient, genetic algorithm, particle swarm algorithm, GA-TS algorithm

0 引言

无线传感网络(WSNs, Wireless Sensor Networks)由布置在检测区域内的大量微型无线传感节点组成。无线传感节点通常分为不同的簇,簇内节点间无线多跳通信,共同检测目标区域^[1]。无线传感网络中固定传感节点通常为随机布置,可能出现节点能量耗尽或失效,网络检测存在冗余和缺陷,无线传感节点间采用无线多跳通信,通信能耗占网络总能耗比重大,随机布置情况下网络中节点通信路由状态差,通信能耗大^[2]。

为改善无线传感网络中固定节点随机布置导致的网络检测性能低和网络能耗大等问题,引入移动传

感节点,修补网络缺陷,优化网络路由,增强网络覆盖范围和检测能力。在固定节点随机布置时,节点能效性测量优化实际上就是移动传感节点位置的优化。优化过程为:簇内节点将自身位置信息传送到簇首节点,簇首节点将信息传送到基站。基站根据收集到的信息,采用智能算法优化,得出移动传感节点位置,指导移动传感节点的布置^[3]。

本文采用遗传算法和微粒群算法优化移动传感节点布置。遗传算法(GA, Genetic Algorithm)引入生物学中的种群、基因、遗传、交叉、变异等概念,模拟自然界自然进化的过程^[3]。微粒群(PSO, Particle Swarm Optimization)算法是由James Kennedy等在1995年提出的对鸟群寻找栖息地行为进行建模与仿真的方法^[3]。采

* 国家重点基础研究发展计划 973 资助项目(2006CB303000);
国家自然科学基金资助项目(60673176, 60373014, 50175056)

用遗传算法对移动传感节点布置问题进行优化,算法容易陷入局部最优;微粒群算法搜索精度不够高,并且对参数依赖性较强。针对遗传算法的缺点,引入禁忌搜索算法(TS, Tabu Search)改进遗传算法,增强了遗传算法的全局搜索能力。下文首先介绍了无线传感网络节点能效性测量优化问题,然后分别采用遗传算法、微粒群算法和遗传-禁忌搜索算法进行了节点能效性测量优化实验。

1 无线传感网络节点能效性测量优化问题

无线传感网络节点能效性测量优化,是指在网络测量覆盖率指标和通信能耗指标下,利用智能优化算法寻找网络节点的最优布置。网络测量覆盖率与传感节点检测模型有关,网络通信能耗与网络拓扑结构密切相关。

1.1 分簇式无线传感网络拓扑结构

无线传感网络通常分为不同的簇,簇内传感节点通过多跳通信将检测到的数据传送到簇首节点。簇首节点对数据进行融合处理,通过其他簇首节点多跳传送到基站。簇首节点由簇内各节点的能量状态、计算能力和其信道状态决定,也可以由簇内节点轮换担任。无线传感网络的分簇结构如图1所示。

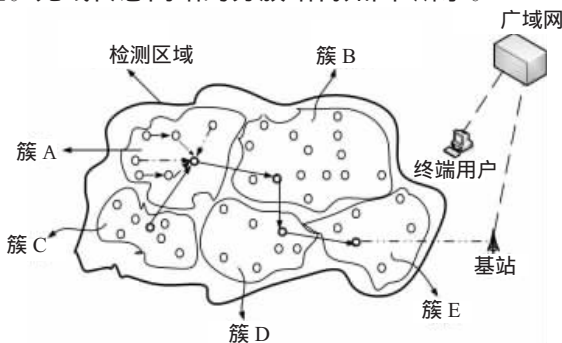


图1 分簇式无线传感网络结构

Fig.1 The structure of cluster-based WSNs

1.2 节点概率检测模型

传感节点检测目标概率随着目标距传感节点的距离变化而变化,通常采用的传感节点检测概率示意图如图2所示^[3]。

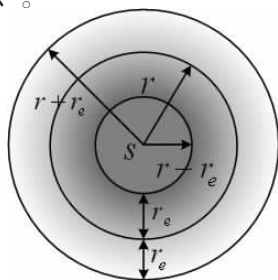


图2 节点检测概率示意图

Fig.2 The detective probability of sensor node

图2中, S 为传感节点; r 为节点检测半径; r_e 为检测概率半径, $r_e=0.5r$ 。灰度表示区域被节点检测到的概率。灰度越大,被检测概率越大。在模型中,目标 $P(x_i, y_i)$ 与节点 s_i 间距离为 $d(s_i, P)$,目标被检测概率为:

$$C_{xy}(s_i) = \begin{cases} 0 & , \text{if } r+r_e \leq d(s_i, P) \\ e^{(-\alpha_1 \lambda_1^{\beta_1} / \lambda_2^{\beta_2} + \alpha_2)} & , \text{if } r-r_e < d(s_i, P) < r+r_e \\ 1 & , \text{if } d(s_i, P) \leq r-r_e \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\lambda_1=r_e-r+d(s_i, P)$, $\lambda_2=r_e+r-d(s_i, P)$; $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 为检测概率参数。目标同时被多个节点检测,每个节点以一定的概率覆盖目标,则目标的被检测概率为所有节点同时检测的综合概率。令 $\chi=\{s_i, i=1, 2, \dots, k\}$,表示覆盖到点 $P(x_i, y_i)$ 的节点集。则点 P 的被检测概率可以表示为:

$$C_{xy}(\chi) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - c_{xy}(s_i)) \quad (2)$$

1.3 网络测量覆盖率指标和网络通信能耗指标

网络测量覆盖率指区域中被检测概率达到阈值概率的面积占区域总面积的比例。把区域划分成网格,网格被检测概率用网格中心点是否被检测到来表示。计算各中心点的被检测概率,用被检测概率大于阈值概率的网格中心点数与总的中心点数之比 C 来表示网络的覆盖率^[3]。

网络通信能量消耗包括运行发送器或接收器的能耗和传送能耗。根据WSNs通信模型^[5],运行发送器或接收器的无线花费为 $E_{elec}=50\text{ nJ/bit}$,发送放大器实现容许放大倍率的无线花费为 $E_{amp}=100\text{ pJ/bit/m}^2$ 。则当节点 i 向节点 j 发送长度为 k bit的数据包时,发送节点 i 能耗为:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) \\ = E_{elec} \times k + E_{amp} \times k \times d^2 \quad (3)$$

式中 d 表示坐标为 (x_i, y_i) 的传感节点 i 和坐标为 (x_j, y_j) 的传感节点 j 的距离:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

接收节点 j 接收 k bit数据包的能耗为:

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) = E_{elec} \times k \quad (5)$$

则传感节点 i 向传感节点 j 发送 k bit数据时网络的总能量消耗:

$$E_{ij}(k) = k \times (2E_{elec} + E_{amp} \times d_{ij}^2) \quad (6)$$

无线传感网络中传感节点间通信为无线多跳通信,可以利用Dijkstra算法^[7]对网络路由进行优化。无

线传感网络通信能耗指标E定义为所有节点向中心节点发送单位比特的数据时的网络总能耗。

1.4 无线传感节点能效性测量优化目标函数设计

综合考虑网络覆盖率指标和网络通信能耗指标。将两者指数加权,并采用指数乘法,设计优化目标函数为:

$$f(X) = C^{-(1-a)} \times E^a \quad (7)$$

式中 a 为调节覆盖率指标和通信能耗指标的权值, X 为节点布置情况。调节权值 a 的大小,可以调整目标函数中覆盖率和通信能耗的比重。

1.5 无线传感网络节点能效性测量优化问题

对移动无线传感节点布置优化问题建模如下。测量区域大小 $400\text{m} \times 400\text{m}$, 布置 25 个无线传感节点,其中固定传感节点 20 个,移动传感节点 5 个。将网络可以看成是一个簇。固定节点中位于区域中心的节点,作为簇首节点,其余随机布置。节点检测半径 $r=48\text{m}$, 检测概率参数 $\alpha_1=1, \alpha_2=0, \beta_1=1, \beta_2=0.5$, 检测阈值概率为 0.9。节点间无线多跳通信,利用 Dijkstra 算法优化网络路由。

如图 3 所示,黑点表示固定传感节点,小圆圈表示移动传感节点,大圆圈表示节点检测区域范围。灰度表示相应区域被覆盖的概率,颜色越深,表示区域被检测到的概率越大。

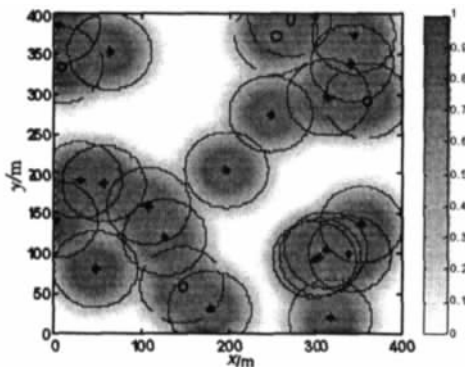


图3 无线传感节点初始布置状况

Fig.3 The initial placement of sensors

2 采用不同算法进行节点能效性测量优化

2.1 采用遗传算法优化移动传感节点布置

遗传算法具有自组织、自适应和自学习性,算法本身的并行性使其适于解决多参数优化问题,因此本文采用遗传算法研究移动传感节点布置优化问题^[6]。

将 5 个移动传感节点的位置当做大小为 10 的一维向量,问题转化为在已知约束条件和目标函数情况下的多参数优化问题。初始化遗传算法参数如下:种群大小 40,迭代次数 100,网络划分粒度 4m ,算法选择概率 0.5,变异概率 0.2。采用排序选择算子,交叉算子采用单点柔性交叉,变异算子采用随机变异。仅考虑覆盖率指标时,即取 $a=0$,优化结果如图 4~图 7 所示。

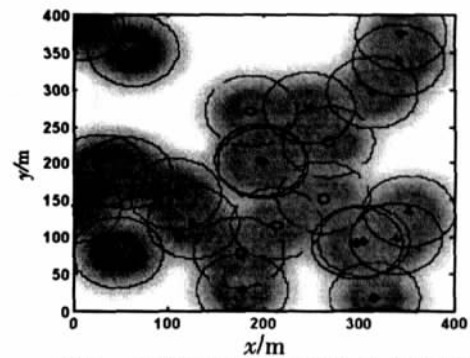


图4 $a=0$ 时GA优化后覆盖率灰度图

Fig.4 The coverage gray after GA optimization

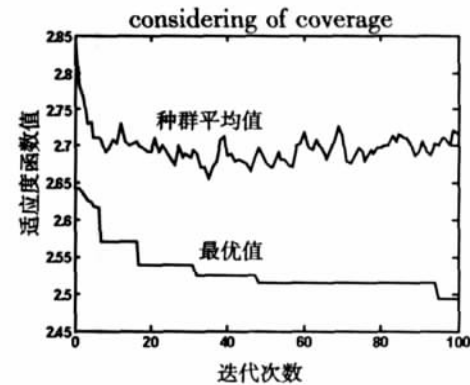


图5 $a=0$ 时GA优化过程适应度变化

Fig.5 The change of fitness during the GA

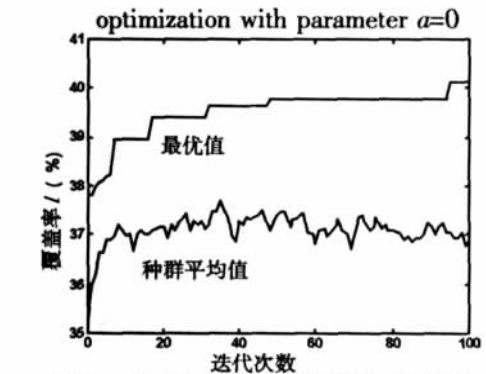


图6 $a=0$ 时GA优化过程覆盖率变化

Fig.6 The change of coverage during the GA

optimization with parameter $a=0$

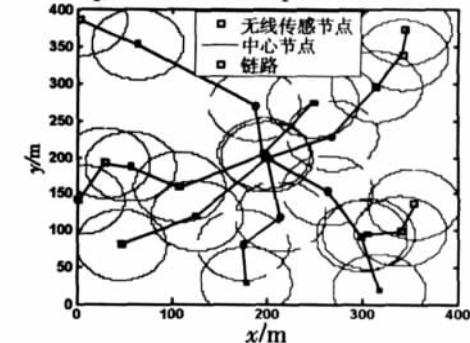


图7 $a=0$ 时GA优化后网络通讯状态

Fig.7 The communication of the network after GA optimization with parameter $a=0$

图4表示GA优化后的移动传感节点布置灰度图；图5表示优化过程中适应度函数值随迭代次数的变化，图6表示优化过程中覆盖率随迭代次数的变化，图7表示优化后的网络通讯状态，三角形表示中心节点位置，小正方形表示固定传感节点位置，小圆圈表示移动传感节点中心位置，虚线表示通信路径。

从图5和图6可看出，GA优化时初期优化效果较好，适应度函数值下降较快，网络覆盖率指标上升较快，但进化到一定代数后，进化速度减慢，搜索陷入局部最优。

综合考虑网络覆盖率指标和网络通信能耗指标，即改变a的大小，调整式(7)中适应度函数，并分别计算十次取平均值，得不同权值a时的优化结果如表1所示。

表1 GA多参数优化结果
Tab.1 The optimal result of GA with different parameter a

	覆盖率/ (%)	通信能耗/nJ/bit
a=0	39.96	3.9154e+004
a=0.5	37.55	3.0563e+004
a=1	35.96	3.0306e+004

表1显示，随着权值a的增加，覆盖率下降，通信能耗减小，即覆盖率指标与通信能耗指标是一对互相限制的指标，需要根据实际应用权衡选取a。

2.2 采用微粒群算法优化移动传感节点布置

微粒群优化算法在多维空间多峰寻优、动态寻优等方面具有速度快、原理简单、鲁棒性好的优点，可以采用微粒群算法优化移动传感节点布置^[6]。其基本原理是：假设在n=2q维搜索空间中，有m个微粒组成一个微粒群，其中第i个微粒的空间位置为 $X_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ ， $i=1, 2, \dots, m$ 。每个微粒的当前飞行速度为 $V_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ ， $P_i=(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$ 为微粒i所经历的最佳位置，群体中所有微粒所经历的最好位置为全局最优位置为。每一代微粒的当前最佳位置确定为：

$$P_i(t+1) = \begin{cases} P_i(t) & f(x_i(t+1)) \geq f(P_i(t)) \\ X_i(t+1) & f(x_i(t+1)) < f(P_i(t)) \end{cases} \quad (8)$$

群体中所有微粒经历过的最佳位置由下式确定：
 $P_g(t) = \min\{f(P_0(t)), f(P_1(t)), \dots, f(P_m(t))\}$ (9)

每代微粒依照如下方程进化：

$$v_{ij}(t+1) = \omega(t) \times v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + \quad (10)$$

$$c_2 r_{2j}(t)(p_{gj}(t) - x_{ij}(t))$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (11)$$

式中 c_1, c_2 为加速常数， r_1, r_2 为两个相互独立的随机数， ω 为惯性因子，能使微粒具有扩展搜索空间的趋势。取微粒种群规模为40，迭代次数为100，网格划分粒度为4， $c_1=1, c_2=3$ ，初始速度在零到区域大小二十分之一范围内随机产生。 ω 为：

$$\omega = \frac{\max(it) - iter}{\max(it)} \quad (12)$$

式中 $\max(it)$ 表示最大迭代次数， $iter$ 为当前迭代次数。采用PSO多参数优化结果如表2所示。

比较表1和表2，可以看出微粒群算法优化结果与遗传算法优化结果相差不大。

表2 PSO多参数优化结果

Tab.2 The optimal result of PSO with different parameter a

	覆盖率/ (%)	通信能耗/nJ/bit
a=0	40.03	3.8886e+004
a=0.5	38.17	3.0156e+004
a=1	37.04	2.9184e+004

2.3 采用遗传-禁忌搜索算法优化移动传感节点布置

遗传算法在在搜索时容易陷入局部最优，微粒群算法参数对优化影响较大，参数不具普适性，算法不易改进。禁忌搜索算法能增强遗传算法的全局搜索能力。禁忌搜索算法是一种全局性邻域搜索算法，模拟人类具有记忆功能的寻优特性^[7]。

采用禁忌搜索算法改进遗传算法。具体方法是在遗传算法运算过程中加入搜索过程，即在遗传运算结束后，加入禁忌搜索过程。同时在遗传算法运行中，观察种群适应度函数值的变化，当其种群适应度函数值超过一定代数保持不变时，加入搜索过程。搜索方式为随机选取一节点，搜索其领域，并选取具有最低适应度的解作为子代。禁忌搜索过程为采用遗传算法得到的解作为初始解，使用一定规模的禁忌表记录搜索过的解，同时把群体适应度函数值的平均值作为破禁水平。首先把领域搜索结果与破禁水平进行比较，如果比破禁水平好，则破禁，若搜索结果比破禁水平差，但不属于禁忌，则接受结果。若属于禁忌，则不接受^[7]。

在通常的禁忌搜索算法中，由解到解的邻域通常由邻域移动决定，例如二进制编码中，邻域为某个基因变异后的新解。针对移动传感节点布置优化问题，设计一种新的领域移动机制，如图8所示。

假设移动传感节点初始位置为X点，其邻域设定为以步长为a的正方形的8个顶点，然后对初始点和8

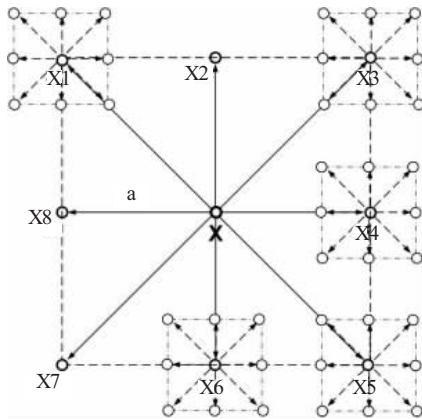


图8 禁忌搜索算法邻域移动

Fig.8 The nearby movement of TS

个顶点一起作适应度评价,将适应度函数值最小的点保留作为新的解,并加入禁忌搜索算法中的禁忌表。在禁忌表满禁忌表长度后,这些点又重新以新的步长,如 $a/4$ 开始新的搜索,如此循环迭代。

在进行禁忌搜索时,同时优化5个点难度较大,分别对5个移动节点的位置进行禁忌搜索。利用遗传-禁忌搜索算法对移动节点位置优化问题进行优化。多参数优化结果如表3所示,其中计算结果均为计算十次取平均值得到。

表3 GA-TS多参数优化结果

Tab.3 The optimal result of GA-TS with different parameter a

parameter a	覆盖率/(%)	通信能耗(nJ/bit)
a=0	40.92	3.8791e+004
a=0.5	37.51	2.9382e+004
a=1	36.96	2.8999e+004

2.4 不同算法优化结果比较

比较GA、PSO和GA-TS在节点能效性测量优化中的性能。取 $a=0$,即仅考虑覆盖率指标,随迭代次数的变化,GA、PSO和GATS的覆盖率变化如图9所示。取 $a=1$,即仅考虑通信能耗指标,GA、PSO和GATS的能耗指标变化如图10所示。

从图9可看出,GA迭代到50代之后,迭代基本停滞,算法陷入局部最优,PSO前期收敛速度较慢,后期覆盖率增加较快,但精度仍然有限,GAT-S的搜索速度比GA和PSO快,精度高。

图10表明,随迭代次数的变化,采用GATS得到的通信能耗比GA低,比PSO稍差,通过最后的禁忌搜索过程,其最终结果仍然比PSO要好(比较表2与表3)。

改变 a 的值,调节覆盖率指标和通信能耗指标在目标函数中的比重。图11表示了GA、PSO与GATS算法

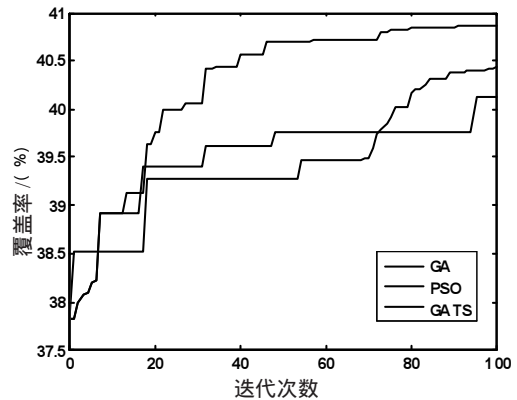


图9 覆盖率随迭代次数的变化

Fig.9 The change of coverage to the generation

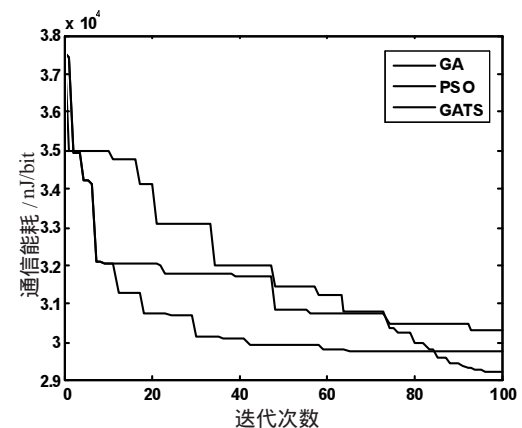


图10 通信能耗随迭代次数的变化

Fig.10 The change of the communication energy to the generation

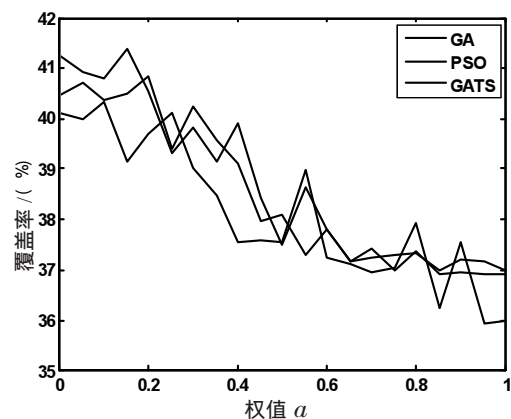


图11 采用不同权值a时覆盖率变化

Fig.11 The change of the coverage with different parameter a

在不同 a 下的覆盖率变化情况。图12表示了GA、PSO与GATS算法在不同 a 下的通信能耗变化情况。

图11表明, a 较小时,即目标函数中覆盖率指标权重较大时,GATS得到的覆盖率指标比GA或PSO都要好。图12表明,在 a 较大时,即目标函(下转第37页)

database, 2008- 10- 30.

[2] 梅永,王柏林. 电力系统信号采集与谐波测量方法[J]. 电测与仪表, 2008,45(9).

MEI Yong, WANG Bo- lin. Signal acquisition and measurement methods for harmonics in power systems [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008,45(9).

[3] 解蕾,解大,张延迟. 新型电能质量表的算法及实现[J]. 电测与仪表, 2008,45(9).

XIE Lei, XIE Da, ZHANG Yan- chi. The algorithm and realization of the new type meter measuring power quality [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008,45(9).

[4] 宋惠忠,俞建军,罗耀强. 一种基于网络化的新型电能质量综合监测系统的实现[J]. 电力设备, 2008,9(4).

SONG Hui- zhong, YU Jian- jun, LUO Yao- qiang. Realization on a kind of

New Comprehensive Inspection System of Electric Energy Quality Based on Network- Oriented[J]. Electrical Equipment, 2008,9(4).

[5] 高超然. 电能质量监测仪中基于Qt/Embedded的图形用户系统研究与实现[EB/OL]. 中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2005- 09- 27.

GAO Chao- ran. The Research and Implementation of Graphic User System Based on Qt/Embedded in Power Quality Monitoring Instrument [EB/OL]. The full text of China outstanding master's dissertation database, 2005- 09- 27.

作者简介:

苏晓东(1965-) 男, 汉族, 哈尔滨市人, 硕士/副教授, 就职于哈尔滨商业大学, 从事信息与通信系统的研究和教学。Email: hsdxd@163.com

收稿日期 2009- 01- 10

(杨长江 编发)

(上接第 5 页)

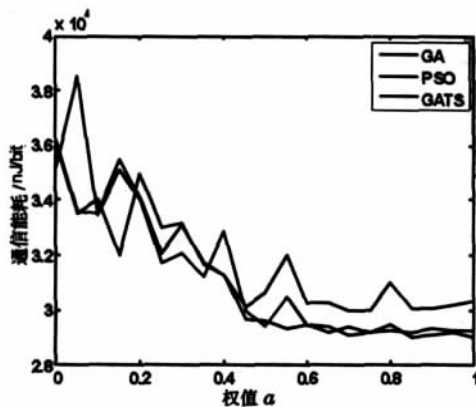


图 12 采用不同权值 α 时通信能耗变化

Fig.12 The change of communication energy with different parameter α

数中通信能耗指标权重较大时, GATS得到的通信能耗指标比GA要好, 与PSO接近。结果说明使用GATS能得到更好的优化结果, 网络覆盖率增大, 通信能耗降低。

3 结论

无线传感网络节点能效性测量优化能提高网络测量覆盖率, 降低网络通信能耗。针对节点能效性测量优化问题的特点, 本文提出一种遗传- 禁忌搜索混合算法, 利用禁忌搜索算法的“记忆性”改进遗传算法, 增强遗传算法的全局搜索能力。采用遗传- 禁忌搜索算法, 对网络测量覆盖率和网络通信能耗指标进行节点能效性测量优化。仿真实验表明, 遗传- 禁忌搜索算法能快速有效实现节点能效性测量优化, 达到全局最优。利用遗传- 禁忌搜索算法优化的网络测量覆盖率比利用遗传算法优化的网络测量覆盖率提高3.1%, 网络通信能耗降低4.0%。

参 考 文 献

[1] I.F. Akyildiz, W.Su. Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks, 2002, 38:393- 422.

[2] Nojeong Heo and Pramod K. Varshney, Energy- efficient deployment of intelligent mobile sensor networks, 2005, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics- part A: systems and humans, vol.35, NO.1.

[3] Ping Song, Jize Li, Kejie li and Li Sui. Researching on Optimal Distribution of Mobile Nodes in Wireless Sensor Networks being Deployed Randomly. International Conference on Computer Science and Information Technology, 2008: 322- 326.

[4] Srinivas, M. and Patnaik, L.M. Genetic algorithms: a survey, 1994, Computer, vol.27, issue: 6, 17- 26.

[5] ESTRIN D. Tutorial Wireless Sensor Networks Part IV: Sensor Network Protocols[R]. MobiCom, 2002.

[6] Xue Wang, Junjie Ma, Sheng Wang. Collaborative deployment optimization and dynamic power management in wireless sensor networks. In: Proceedings of International Conference on Grid and Cooperative Computing, 2006: 121- 128.

[7] ESTRIN D. Tutorial Wireless Sensor Networks Part IV: Sensor Network Protocols[R]. MobiCom, 2002.

[8] 王雪. 无线传感网络测量系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 1- 23.

[9] 王雪. 测试智能信息处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 161- 243.

[10] Glover F, Kelly J, Laguna M. Genetic algorithm and tabu search: hybrids for optimization [J]. Comput & Opsres, 1995, 22(1): 111- 134.

作者简介:

王勇(1987-) 男, 汉族, 湖南岳阳人, 硕士, 研究方向为无线传感网络能效性问题。Email: yong- wang04@mails.tsinghua.edu.cn

王雪(1963-) 男, 汉族, 哈尔滨人, 博士/教授, 博士生导师, 研究方向为智能仪器与数据融合和传感网络。Email: wangxue@mail.tsinghua.edu.cn

孙欣尧(1987-) 男, 汉族, 北京人, 本科, 研究方向为无线传感网络压缩测量问题。Email: sx05@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期 2009- 04- 09

(常会敏 编发)