

基于进化优化的移动感知节点部署算法

南国芳,陈忠楠

(天津大学系统工程研究所,天津 300072)

摘 要: 移动传感器网络中节点部署优化直接影响到网络的能量消耗、对目标区域监控的性能及整个网络的生命周期.本文从网络覆盖和能量消耗两个方面,采用多目标优化对节点部署问题建模,并从集中式角度给出了节点部署问题的遗传算法求解过程.针对一类初始中心部署模型进行实验验证,并和基于向量的算法(VEC)、基于维诺图的算法(VOR)及基于边界扩张虚拟力算法(BEVF)进行性能对比,证明了该算法在大多数情况下可使传感器网络对目标区域的覆盖率最大化,同时保证了网络的连通和网络能耗最小,进而延长了网络的生命周期.

关键词: 节点部署;网络覆盖;多目标优化;遗传算法

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 05-1017-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.05.025

Deployment Algorithm of Mobile Sensing Nodes Based on Evolutionary Optimization

NAN Guo-fang, CHEN Zhong-nan

(Institute of Systems Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Optimal deployment of sensor nodes in mobile sensor networks directly influences energy consumption of the network, surveillance ability of the monitoring area and network lifetime. The deployment problem is modeled as a multi-objective optimization model in terms of network coverage and energy consumption, a genetic algorithm based solution for sensor deployment is then proposed in a centralized manner. We evaluate our approach by applying it to a certain kind of initially central deployment model, and compare its performance with that of Vector based algorithm, Voronoi based algorithm and Boundary expansion with virtual force algorithm, and the simulation results show that the proposed algorithm achieves the maximum coverage, while guarantees network connectivity and the minimum energy consumption, which thereby prolongs the network lifetime.

Key words: sensor deployment; network coverage; multi-objective optimization; genetic algorithm

1 引言

移动无线传感器网络是由一系列移动感知节点组成.这些节点具有一定的感知、计算和通信能力^[1~3],并可通过集中式或分布式部署方法自组织形成网络,进而对目标区域进行监控.由于节点具有可移动性,可方便的按照部署需求移动到指定位置,进而显著地降低传统网络部署问题的复杂性.近几年,移动无线传感器网络在医疗救助、灾难搜救及军事领域得到了广泛应用^[4].

移动无线传感器网络部署协议一般分为集中式和分布式.目前的研究大多为分布式部署,以网络连通性和覆盖性为主要指标,由各个移动感知节点根据其邻居节点的位置自主的调整自身位置,直至满足监控性能要

求为止.受部署方式和监控环境的影响,这种模式往往需要很长时间才能达到网络稳定状态,且由于节点的频繁移动需要消耗很多能量.集中式部署则需要一个功能强大的服务器节点来收集初始部署的各类信息并计算各节点的最终位置,其他节点在部署阶段则不需要维护邻居节点的信息,并且能够实现精确部署,因此适合于对部署质量要求高的应用场合.

本文旨在探索一种集中式的部署策略,该部署策略适用于一类初始集中部署模式,如空中抛洒节点到一个较小的小区域内,再通过部署算法将节点扩散至更大的监控区域.一旦有效的获得初始部署中各个节点的位置,由服务器节点计算出各节点的最终位置.各节点则通过一次运动达到其目标位置,从而实现了网络再部

署.为此,考虑传感器部署问题中一类通用数学模型,给出了基于进化计算方法的网络再部署方案.主要贡献是采用遗传算法对初始中心部署情况^[5]下的无线传感器网络进行节点位置优化,构建了以覆盖率最大化和节点移动距离最小化为目标的多目标优化数学模型.

2 相关工作

Howard 等提出用人工势场进行移动传感器网络的自部署^[6],每个节点都受到环境障碍物及其他节点的斥力,迫使网络节点从密集部署状态扩散至整个监控区域.Zou 等^[7]提出了一种基于虚拟力的节点部署算法(VFA),将整个网络的传感器节点分为若干簇,由每个簇的簇头节点收集簇内各节点的信息并计算它们的最终位置,从而指导簇内节点移动.Tan 等^[8]将虚拟力算法进行了改进,保证了整个网络的连通性,同时进行了避障算法研究.

Wu 等人提出了基于负载均衡的部署策略^[5],将目标区域中的传感器节点分为若干个簇,并将每个簇内的节点数量作为荷载量,通过对簇内的行和列的扫描完成簇与簇间的负载均衡,实现了整个网络的均匀分布和最小化节点移动距离.文献[9]提出了将无线传感器网络优化部署分为节点部署和节点分派两个阶段.前者研究如何使目标区域达到整个区域的完全覆盖,后者研究节点的分派问题,并提出了用集中式的方法和分布式方法解决目标区域中的移动传感器网络的覆盖和连通问题.

Wang^[10]等基于 Voronoi 图,提出了可移动节点自组织再部署的思想,并提出三种分布式算法:VEC、VOR 和 Minimax. VEC 算法假设整个网络是连通的,节点之间利用虚拟力的作用使节点从分布密集的区域移动到稀疏区域,最终实现均匀分布. VOR 算法利用每个节点只需检测其自身 Voronoi 多边形覆盖盲区,使传感器节点向着其多边形最远的顶点覆盖盲区移动,从而减小覆盖盲区. Mminmax 与 VOR 基本相同, Minimax 考虑了移动后不再产生新覆盖盲区,相比 VOR 有了较大的改进. Chen^[11]等介绍了将初始节点集中抛撒在目标区域的中心位置,并利用 Voronoi 图结构,提出了基于边界扩张与虚拟力(BEVF)的分布式部署算法.该算法可以使集中部署在目标区域中心位置的传感器节点迅速向边界方向移动,最终达到受力均衡的状态,并且可以很好的完成对目标区域最大化覆盖的要求.

Ma 等^[12]提出了一种适应性三角部署方案,将节点的发射区域分为六个扇区,扇区内每个节点分别调整与一跳邻居节点的相对位置,实现最大化网络覆盖和最小化覆盖盲区的目的.

综上所述,大多数节点部署算法忽略了网络节点的均衡移动、最小化移动距离及网络的连通性.本文提出了一种基于遗传算法的移动无线传感器网络中节点再部署方法,利用多目标优化对网络的覆盖率和节点的移动距离进行优化,从而延长了网络的生命周期.

3 数学模型及假设

传感器网络拓扑结构可以表示为 $G = (V, E)$, 其中 V 表示目标区域中的传感器节点, E 表示网络中的无线连线.所有的传感器节点都有相同的通信半径 r_c 和感知半径 r_s ^[8], 两节点间的距离小于通信半径 r_c , 这两个传感器节点就可以相互通信,并且若目标区域中的任意点 p 与节点 v_i 的距离小于 r_s , 那么点 p 被节点 v_i 覆盖.

3.1 覆盖率度量

目标区域的覆盖率是传感器网络^[13,14]优化问题中的一个重要指标,覆盖率被定义为每个传感器节点所覆盖的区域的并集与整个目标区域大小的比值,且将每个传感器节点的覆盖区域定义为以半径 r_s 的圆形区域.

假设 COV_i 为传感器节点 v_i 在目标区域 A 中的覆盖范围,则目标区域中所有的传感器节点的覆盖范围可以用式(1)表示,其中, k 为节点总数.

$$COV_A = \bigcup_{i=1}^k COV_i \quad (1)$$

对目标区域的覆盖率可表示为:

$$C = COV_A / M = \bigcup_{i=1}^k COV_i / M \quad (2)$$

其中, M 为目标区域的面积,这里将目标区域分若干小的圆盘,若任一圆盘 j 的中心点至少被一个传感器节点覆盖,则我们近似认为这个小圆盘完全被覆盖^[15], S_j 即为该圆盘的面积,若该圆盘中心点不被任一节点覆盖,则 S_j 为 0, 那么根据覆盖范围的定义,可以把式(1)改写为:

$$COV_A = \sum_{j=1}^m S_j \quad (3)$$

其中 m 为目标区域中的圆盘数,因此可以计算传感器对目标区域的覆盖率:

$$C = COV_A / M = \sum_{j=1}^m S_j / M \quad (4)$$

从而覆盖率最大化的目标函数为:

$$\max f_1 = COV_A / M = \sum_{j=1}^m S_j / M \quad (5)$$

3.2 能耗度量

本文假设每个移动传感器节点是按照直线移动.因此,第二个需要优化的目标函数是最小化目标区域中传感器^[16]节点移动能耗,也就是最小化传感器节点

的移动距离之和,可以表示为:

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^k d_i \quad (6)$$

其中 d_i 表示传感器节点 v_i 从初始部署位置移动到最终位置的距离. 为了计算移动无线传感器节点的移动能耗,我们应用文献[9]提出的能量计算模型:

$$E_i = \sum_{i=1}^k \Delta e \cdot d_i \quad (7)$$

其中, Δe 为每个节点移动单位距离所消耗的能量.

3.3 约束条件

若传感器网络中任意两个节点间都至少有一条路径^[17],则这个网络图 $G = (V, E)$ 是连通的. 因此,定义 P_{ij} 表示任意两节点 v_i 和 v_j 之间的通路数量,可根据各节点的位置求得,连通性的约束可表示为:

$$P_{ij} \geq 1 \quad (8)$$

此外,这些节点在移动后的位置应该在目标区域内,此约束可表示为:

$$L(v_i) \in A \quad (9)$$

3.4 问题描述

该传感器网络部署问题可以转化为一个非线性约束条件的多目标优化问题,可以用公式表示为:

$$\begin{cases} \max f_1 = \sum_{j=1}^m S_j / M \\ \min f_2 = \sum_{i=1}^k d_i \\ \text{s.t.} \quad P_{ij} \geq 1 \\ L(v_i) \in A \end{cases} \quad (10)$$

4 部署算法

4.1 编码与解码

由于每个节点在目标区域中的候选位置是根据其横纵坐标确定的,所以种群中每个个体元素为抛撒在目标区域中传感器节点数量的 2 倍,即包含横坐标和纵坐标. 因此,若目标区域中传感器节点数量为 N ,则编码时种群中每个个体的元素数量为 $2N$. 编码中每个个体位置为奇数的元素作为节点的横坐标,位置为偶数的元素作为节点的纵坐标. 每个元素利用二进制编码方法,位数为 10.

解码是将得到的二进制编码,根据规定的取值范围,将其解码成相应的实值的过程,遗传算法解码公式可以表示为:

$$X = U_1 + \left(\sum_{i=1}^k b_i \cdot 2^{i-1} \right) \cdot \frac{U_2 - U_1}{2^k - 1} \quad (11)$$

其中, U_1 和 U_2 分别为区间下限和区间上限, b_i 为编码第 i 位的数字, k 为编码位数. 例如,横纵坐标区间均为 $[15, 35]$,有一个五位串为 01110 00110,经过遗传算法工

具箱在区间上解码,可以得到该节点的实数值^[24, 18.87].

4.2 适应度函数和遗传操作

对于每一组候选解 $\{x_i\}$, 个体 x_i 适应度函数为 $Fit(x_i) = w_1 \cdot f_1(x_i) + w_2 \cdot f_2(x_i)$, w_1 和 w_2 分别表示权重,且有 $w_1 + w_2 = 1$,其值取决于设计者对该传感器网络性能的综合要求. f_1 和 f_2 分别为式(10)中的感知覆盖与移动距离. 遗传算法中的交叉概率 P_c 与变异概率 P_m 的确定是影响遗传算法性能的关键, P_c 越大则产生的新种群的速度越快,较好解被破坏的可能性也越大,如果 P_c 太小,则会使遗传算法停滞不前,使算法的寻优性能下降. 如果 P_m 太大则遗传算法会因为变异的概率太大而近似为随机搜索,如果太小则容易陷入局部最优,选择操作则采取正比例选择的方式.

4.3 求解流程

图 1 为利用遗传算法解决无线传感器网络部署问题的算法流程. 首先,要初始化种群 POP_0;再利用适应函数对种群中的个体进行评价,计算个体适应度值;并采用随机方法在父代种群中选出个体进行选择、交叉和变异操作,生成种群. 重复进行上面的操作进行迭代,直到满足终止条件.

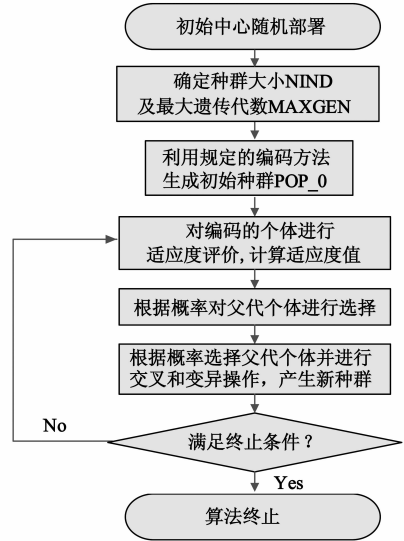


图1 算法流程图

4.4 算法实现

由于节点都集中在目标区域的中间区域,所以初始覆盖率为 29%. 遗传算法迭代 500 次后,覆盖率约为 98%. 可以看出,经过遗传算法的不断优化,目标区域中的节点能够达到均匀分布且达到了较高的覆盖率. 图 2 为遗传算法在每次迭代后,对目标区域覆盖率的变化曲线图. 可以看出遗传算法能够快速的扩大对目标区域的覆盖,并且能达到比较高的覆盖率.

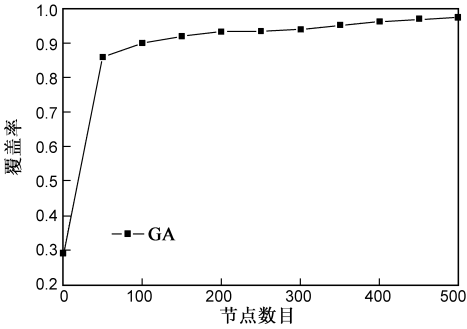


图2 迭代500次覆盖率的变化

5 性能评估

首先是评价在保证网络连通的情况下,使整个传感器网络达到高覆盖率的有效性.其次,通过仿真分析遗传算法在对目标区域的覆盖率、传感器节点的平均移动距离及节点平均能耗方面的效率.通过将 GA 与三个分布式部署算法 BEVF 算法、VEC 算法及 VOR 算法进行比较.评价 GA 从以下两个方面:(1)在不同的节点密度下,与三种分布式部署方法在覆盖率方面进行比较;(2)在不同的节点密度下,与三种分布式部署方法在节点平均移动距离和平均能耗方面进行比较.

在 50m × 50m 的无障碍目标区域中心依次随机抛撒四种密度的节点.数量从 40 到 70,增量为 10 个节点,感知半径与通信半径满足条件 $r_c \geq 2r_s$, 并且设传感器节点的感知半径 $r_s = 5\text{m}$, 则通信半径为 $r_c = 10\text{m}$, 该取值和文献[10]大致相同.种群大小为 50,最大遗传代数为 500, $P_c = 0.7$, $P_m = 0.05$.交叉概率和变异概率的选取符合传统遗传算法中的基本原则,即较大的交叉概率和较小的变异概率,保证了良好的个体能以较大的概率进入下一代. $w_1 = 0.8$, $w_2 = 0.2$, 并假设移动一个节点单位距离消耗能量为 $\Delta e = 2$.

5.1 网络覆盖

图 3 为在目标区域中采用初始中心抛撒模型将不同数量的传感器节点部署后,遗传算法与三种分布式算法终止后覆盖率的比较图.这四种算法执行后得到

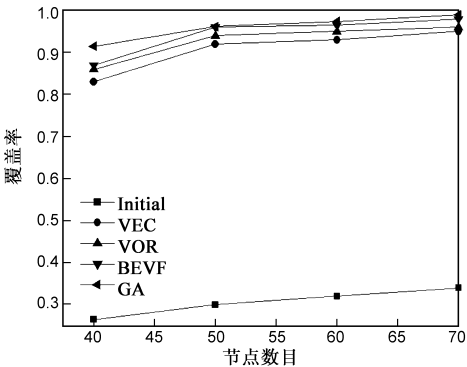


图3 覆盖率比较图

的覆盖率都远大于初始部署时的覆盖率,如部署节点数为 60 时,初始覆盖率很低,待这四种算法执行完毕后,它们对目标区域的覆盖率都达到了 95% 以上.并且当初始部署 70 个节点时,BEVF 算法和遗传算法都可以使覆盖率达到近 100%.

遗传算法和 BEVF 算法对目标区域的覆盖率都大于 VOR 算法和 VEC 算法的覆盖率,并且在初始节点数量相同的情况下,遗传算法得到的覆盖率都略大于 BEVF 算法.

5.2 移动距离和能量消耗

对遗传算法和上面提到的三种分布式部署算法做网络移动距离和能量消耗的评价.图 4 和图 5 分别为这四种算法分别在不同节点密度下达到算法终止条件时整个网络中所有节点的平均移动距离和总移动距离的对比曲线.从图 5 我们可以看到所有节点在这四种算法执行完毕后的总移动距离都随着目标区域中的节点密度的增加而增加,这表示传感器网络的总移动距离和区域中的传感器节点数量是成正比的.

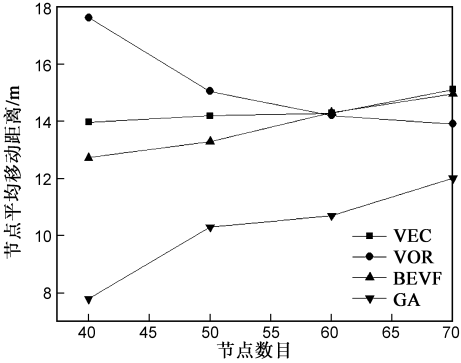


图4 节点平均移动距离对比

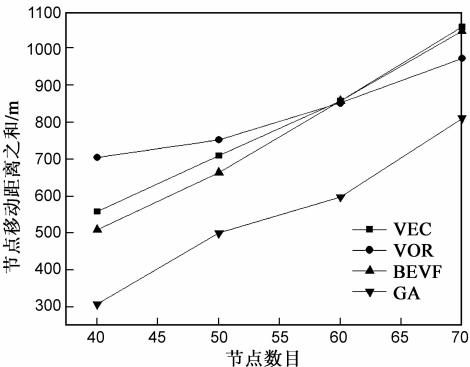


图5 节点总移动距离对比

但是,四种算法的平均移动距离却有很大差别.随着节点密度的增加,执行 VEC 算法后的平均移动距离改变很小,这表明 VEC 算法在移动距离方面对节点密度不敏感.VOR 算法在执行中每个节点会一直寻找其所在 Voronoi 多边形中是否存在覆盖盲区,因此,当目标区域节点密度低时,目标区域内的覆盖盲区很大,则节

点需要移动的距离也就随之增加.随着目标区域的节点密度增加,目标区域内的覆盖盲区逐渐减小,此时节点需要移动的距离也就减小.而 BEVF 算法随着目标区域中节点密度的增加,受边界扩张力的节点数量也随之增加,BEVF 算法在节点密度较低的情况下覆盖水平较高.遗传算法的平均移动距离与上述三种算法相比较达到最低,因为这种集中式算法是由一个或几个具有强大的通信、存储和计算能力的 SINK 节点执行算法,算法完毕时,这些 SINK 节点会向目标区域中的其他普通节点发送信息,指挥其他节点一次性移动.因为在算法计算最终节点位置之前,节点是不需要移动的,这样会减少大量的无用运动,从而节省了大量的能耗.

图 6 和图 7 表示的是遗传算法与三种分布式算法在整个网络平均能耗和总能耗方面的对比.从图中可以看出遗传算法无论在平均能耗还是在总能耗方面都优于三种分布式算法,并且随着目标区域的节点密度增加,遗传算法的平均能耗有微小的增加,这样有利于维持整个无线传感器网络的寿命.因此,遗传算法在大多数节点密度下都可以完成对目标区域的良好覆盖,并且可以保证整个网络在连通的情况下能量消耗最少.

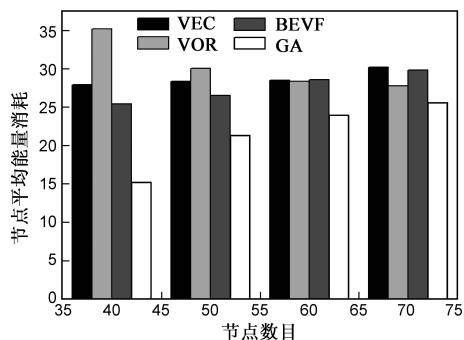


图6 节点平均能耗对比

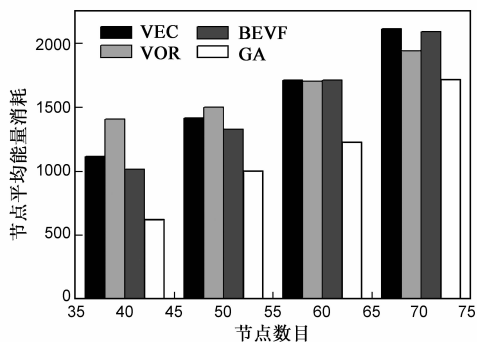


图7 节点总能耗对比

6 结论

本文描述了一种在目标区域内进行初始中心部署的集中式算法,可以实现要求的网络覆盖率以及网络能耗最小化的目的.该算法通过选择、交叉和变异算子

对种群进行操作,并根据适应度函数,使种群个体不断的优化,最终得到一个全局最优解,并实现了最佳的部署效果.实验中通过将遗传算法与已提出的三种基于 Voronoi 图的分布式算法相对比,证明了遗传算法在大多数情况下可以使传感器网络对目标区域的覆盖率达到最大值,同时保证了网络的连通和网络能耗最小.今后的工作重点主要是充分利用分布式算法的可扩展性和集中式算法的部署精确性,探索混合式部署算法.既要保证对网络的覆盖率的最大化、网络生命周期最长,又要保证应用的普遍性.

参考文献

- [1] C Song, M Guizani, H Sharif. Adaptive clustering in wireless sensor networks by mining sensor energy data[J]. Computer Communications, 2007, 30(14-15): 2968-2975.
- [2] 孙永进, 孙雨耕, 房朝晖. 无线传感器网络的连通与覆盖[J]. 天津大学学报, 2005, 38(1): 14-17.
SUN Yong-jin, SUN Yu-geng, FANG Zhao-hui. Connectivity and coverage of wireless sensor networks[J]. Transactions of Tianjin University, 2005, 38(1): 14-17. (in Chinese)
- [3] 孟凡治, 王换招, 何晖. 基于联合感知模型的无线传感器网络连通性覆盖协议[J]. 电子学报, 2011, 39(4): 772-779.
MENG Fan-zhi, WANG Huan-zhao, HE Hui. Connected coverage protocol using cooperative sensing model for wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4): 772-779. (in Chinese)
- [4] K Kalpakis, K Dasgupta, P Namjoshi. Efficient algorithms for maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks[J]. Computer Networks, 2003, 42(6): 697-716.
- [5] J Wu, S H Yang. Optimal movement-assisted sensor deployment and its extensions in wireless sensor networks[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2007, 15(4): 383-399.
- [6] A Howard, M J Mataric, G S Sukhatme. Mobile sensor network deployment using potential fields: A distributed, scalable solution to the area coverage problem[A]. Proceedings of the 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems[C]. Berlin: Springer, 2002. 299-308.
- [7] Y Zou, K Chakrabarty. Sensor deployment and target localization based on virtual forces[A]. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications[C]. Washington D C: IEEE Computer Society, 2003. 2. 1293-1303.
- [8] G Tan, S A Jaris, A M Kermarrec. Connectivity-Guaranteed and obstacle-adaptive deployment scheme for mobile sensor networks[J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2009, 8(6): 836-848.

- [9] Y C Wang, C C Hu, Y C Tseng. Efficient placement and dispatch of sensors in a wireless sensor network[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(2): 262 – 274.
- [10] G L Wang, G H Cao, T F L Porta. Movement-assisted sensor deployment[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6): 640 – 652.
- [11] Z N Chen, G F Nan. Optimization of sensor deployment for mobile wireless sensor networks[A]. International Conference on Computational Intelligence and Vehicular System[C]. Washington D C: IEEE Computer Society, 2010. 218 – 221.
- [12] M Ma, Y Y Yang. Adaptive triangular deployment algorithm for unattended mobile sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2007, 56(7): 946 – 958.
- [13] 戴世瑾, 李乐民. 高能量有效性的无线传感器网络数据收集和路由协议[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2336 – 2341.
DAI Shi-jin, LI Le-min. A high energy-efficient data collecting and routing protocol for wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2336 – 2341. (in Chinese)
- [14] 刘志华, 陈嘉兴, 陈霄凯. 无线传感器网络中序列定位新算法的研究[J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1552 – 1556.
LIU Zhi-hua, CHEN Jia-xing, CHEN Xiao-kai. A new algorithm research of sequence-based localization technology in wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1552 – 1556. (in Chinese)
- [15] Y Jin, L Wang, J Y Jo, Y Kim, M Yang, Y T Jiang. EECCR: An energy-efficient m-coverage and n-connectivity routing algorithm under border effects in heterogeneous sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(3): 1429 – 1442.
- [16] E Ferranti, N Trigoni, M Levene. Rapid exploration of unknown areas through dynamic deployment of mobile and stationary sensor nodes[J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2009, 19(2): 210 – 243.
- [17] H M Ammari, S K Das. Integrated coverage and connectivity in wireless sensor networks: A two-dimensional percolation problem[J]. IEEE Transactions on Computers, 2008, 57(10): 1423 – 1434.

作者简介



南国芳 男, 1975 年生于河北省正定县, 副教授, 硕士生导师, 研究方向包括复杂网络优化与控制, 人工智能等。
E-mail: gfnan@tju.edu.cn



陈忠楠 男, 1986 年 2 月生于黑龙江萝北县, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络。
E-mail: zhongnanchen@gmail.com