

基于感知距离调节的无线传感器网络节能区域覆盖

邓克波 刘中

(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

摘要: 传感器节点能够感知的物理世界的最远距离称为节点的感知距离。该文研究了基于节点感知距离调节的无线传感器网络节能区域覆盖方案, 该方案通过设定合理的节点感知距离, 使得传感器网络在满足区域覆盖要求的同时, 能量消耗最低。首先将区域覆盖性能和网络能量消耗模化成网络节点感知距离的函数, 然后将节能覆盖问题模化成带约束条件的优化问题, 最后给出了基于网络区域划分的优化模型求解方法。仿真结果表明, 与传统覆盖方案比较, 所提方案在满足覆盖要求的同时, 有效降低了网络能量消耗。

关键词: 无线传感器网络; 区域覆盖; 能量有效; 感知距离

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)10-2305-05

Energy-Efficient Area Coverage in Wireless Sensor Networks with Adjustable Sensing Ranges

Deng Ke-bo Liu Zhong

(Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Sensing range is the maximum range within which a sensor node can detect a target. This paper proposes an energy-efficient scheme for area coverage in wireless sensor networks with adjustable sensing ranges. The scheme assigns reasonable sensing ranges to the network of nodes to minimize the energy consumption and meanwhile meet the coverage requirement. Firstly, the coverage capability and energy consumption are formulated as functions of node sensing ranges; Then, the area coverage issue is formulated as a constrained optimal model; Finally, a area-divided-based method is developed to solve the problem. Simulated results show that, compared with traditional method, the proposed scheme can efficiently save energy with satisfactory area coverage.

Key words: Wireless sensor network; Area coverage; Energy efficiency; Sensing range

1 引言

网络覆盖反映了无线传感器网络对物理世界的感知能力。通常情况下, 网络覆盖与能量消耗是一组矛盾, 即覆盖能力越强, 能量消耗也越多。由于能量有效通常是设计无线传感器网络的首要考虑, 研究节能覆盖技术具有重要意义。目前, 传感器网络的节能覆盖方法主要是通过冗余部署节点, 根据目标实时状况决定节点是处于工作或休眠状态^[1-3]。近年来, 随着传感器技术的发展, 出现了可以调节感知距离的传感器节点^[4,5], 基于节点感知距离调节的节能覆盖方法也逐渐引起重视^[6-8]。该类方法主要是通过设定合理的节点感知距离, 使得网络在满足覆盖要求的同时, 能量消耗最低或存活寿命最长。

目前, 基于节点感知距离调节的节能覆盖方法主要是针对目标点覆盖问题^[6,7]。文献[6]利用线性规

划理论最大化满足覆盖要求的节点组合个数, 以延长网络的寿命。文献[7]在文献[6]的基础上, 研究了节点组合的工作时长, 进一步延长了网络寿命。然而, 在许多情况下目标位置是未知的, 需要研究区域覆盖问题, 使得传感器网络能够覆盖目标可能出现的整个区域。文献[8]针对区域覆盖问题, 研究了网络节点最优的感知距离和部署位置, 但是仅讨论了覆盖重数为 1 以及节点感知距离可调个数等于 2 和 3 的情况。

本文针对节点感知距离可调的随机部署传感器网络, 研究了基于节点感知距离调节的节能区域覆盖方法, 通过设定合理的节点感知距离, 使得传感器网络在满足一定区域覆盖重数的同时, 能量消耗最低, 其中提出了基于离散点的区域覆盖重数计算方法和基于网络区域划分的节点感知距离次优解法。仿真结果表明了本文方法的能量有效性。

2 节点的感知模型和能耗模型

假定无线传感器网络由 N 个随机部署在 2 维监视区域的传感器节点组成, 节点选用 0-1 感知模型,

即节点对以自身为中心、以感知距离为半径的圆盘区域内的感知质量为1,对圆盘外的感知质量为0。节点*i*的坐标记为 $\mathbf{p}_i = [p_{ix}, p_{iy}]$,感知距离记为 r_i ,观测点的坐标记为 $\mathbf{p} = [p_x, p_y]$,那么节点*i*的感知模型可以表示为

$$f(\mathbf{p}, r_i) = \begin{cases} 1, & \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_i\| \leq r_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\|\mathbf{p} - \mathbf{p}_i\| = \sqrt{(p_x - p_{ix})^2 + (p_y - p_{iy})^2}$ 。节点的感知距离越大,节点的感知范围也越大。

一般情况下,传感器节点的能量消耗是感知距离的函数,函数形式由节点特性决定。文献[8,9]假定节点的能量消耗是感知距离的线性和2次方函数,文献[10]假定为2次方和4次方函数。本文将节点的能量消耗模型推广为节点感知距离的 α 次方函数, $\alpha > 0$,那么节点*i*的能量消耗可以表示为

$$e(r_i) = a \cdot r_i^\alpha \quad (2)$$

其中 $a > 0$ 。节点的感知距离越大,节点的能量消耗也越多。

3 节能区域覆盖的优化模型

本文选用覆盖重数作为区域覆盖的性能指标。某观测点的覆盖重数是指感知范围覆盖到该观测点的网络节点个数,某区域的覆盖重数是指该区域包含的所有观测点覆盖重数的最小值。根据上述定义,监视区域*Z*的覆盖重数可以表示成如下函数形式:

$$F(Z, r_1, \dots, r_N) = \min_{\mathbf{p} \in Z} \left\{ \sum_{i=1}^N f(\mathbf{p}, r_i) \right\} \quad (3)$$

式(2)给出了单节点的能量消耗模型,整个传感器网络的能量消耗为所有网络节点的能量消耗之和,可以表示成如下函数形式:

$$E(r_1, \dots, r_N) = \sum_{i=1}^N e(r_i) \quad (4)$$

本文节能区域覆盖的宗旨是通过设定合理的节点感知距离,使得传感器网络监视区域的覆盖重数不低于某预定值的前提下,网络能量消耗最低。根据该宗旨,节能区域覆盖可以抽象成如下带约束条件的优化模型:

$$\begin{cases} \text{Minimize} & E(r_1, \dots, r_N), r_i \in R, i = 1, \dots, N \\ \text{s.t.} & F(Z, r_1, \dots, r_N) \geq k \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, R 表示节点感知距离的可调范围,可以是某区间内的连续值,也可以是若干个离散值的集合,本文取后者,离散值个数记为 $\|R\|$; k 表示监视区域希望的最低覆盖重数,不同的应用场景对 k 的要求也不同,如简单的目标探测可以要求 $k = 1$,目标定位通常要求 $k \geq 3$,其他复杂的应用可能要求

会更高。

4 优化模型的求解

4.1 节点感知距离的最优解法

模型式(5)的最优解法是利用搜索算法寻找满足优化条件的节点感知距离组合,该方法包含以下3个步骤:

(1)遍历所有可能的节点感知距离组合;

(2)对于给定的节点感知距离组合,计算网络区域的覆盖重数;

(3)在满足覆盖要求的节点感知距离组合中确定能耗最低的一组。

当传感器网络的节点个数为 N ,节点感知距离的可调个数为 $\|R\|$ 时,由组合理论可知节点感知距离组合的总数为 $\|R\|^N$ 。可见,当网络节点比较多时,通过遍历所有可能的节点感知距离组合以确定最优的节点感知距离的计算量将非常大,甚至不可实现。

4.2 节点感知距离的次优解法

为了降低计算量,进一步研究了模型式(5)的次优解法,基本过程叙述如下:

(1)将网络区域*Z*划分成若干个互不重叠的子区域 z_u , $u = 1, 2, \dots, U$,其中 $\bigcup_{u=1,2,\dots,U} z_u = Z$, $z_u \cap z_v = \emptyset$;

(2)利用搜索算法依次确定子区域 z_u , $u = 1, 2, \dots, U$ 的节点感知距离,求解过程如4.1节所述。

需要说明的是,由于某个子区域的覆盖状况不仅由本区域内节点决定,还可能受到邻接子区域节点的影响,因此在计算子区域覆盖重数时,除了考虑本子区域内节点,还需要考虑邻接子区域内的节点。子区域 z_u 内节点感知距离的求解方法可以表示为

$$\left. \begin{cases} \{r'_i | i \in z_u\} = \arg \min_{r_i \in R, i \in z_u} E(\dots, r_i, \dots) \\ \text{s.t. } F(Z_u, \dots, r_i, \dots, r'_j, \dots | i \in z_u, j \in \bar{z}_u) \geq k \end{cases} \quad (6)$$

其中 \bar{z}_u 表示子区域 z_u 的邻接子区域,若邻接子区域节点的感知距离还没有确定,可以忽略。

假设网络节点均匀分布,监视区域分割为 U 个大小相同的栅格子区域,那么每个子区域的节点个数近似为 N/U ,每个子区域的节点感知距离组合个数为 $\|R\|^{N/U}$,整个网络区域为 $U \cdot \|R\|^{N/U}$ 。可见,上述搜索算法的计算量随着子区域的个数成指数减少。但是,子区域划分的越多,产生的区域边界也越多,边界效应使得设定的节点感知距离的优化性能也变差。因此,在具体实现时,网络区域的划分需要折中考虑。

4.3 区域覆盖重数的计算

利用 4.1 节和 4.2 节所述算法确定节点感知距离时，关键是在给定节点感知距离的情况下，如何计算网络区域的覆盖重数。文献[9-11]介绍了区域覆盖重数的判定方法，其中文献[9]的方法借助于节点感知范围的弧形边界，适用于节点感知距离相同和不同的情况；文献[10]和文献[11]的方法借助于网络区域 k 阶 Voronoi 图的关键离散点，适用于 $k \geq 1$ 、节点感知距离相同和 $k = 1$ 、节点感知距离不同的情况。本文在文献[9]的基础上，给出了根据节点感知范围弧形边界上离散点求解区域覆盖重数的方法，使得问题更为简化。

如图 1 所示，相交的节点感知范围将网络区域分割成许多小的连通区域，将节点感知范围边界分割成若干小的弧段。节点某弧段边界的覆盖重数与其内侧连通区域的覆盖重数相同，比其外侧连通区域的覆盖重数大 1，因此如果所有节点的所有弧段边界达到了 $k + 1$ 覆盖，那么整个网络区域将达到 k 覆盖。另一方面，节点感知范围某弧段边界上除端点外其他所有点的覆盖重数相同，或者等于端点，或者小 1。由上述讨论，计算网络区域的覆盖重数可以转化为计算网络节点感知范围边界上离散点的覆盖重数。下文给出具体过程。

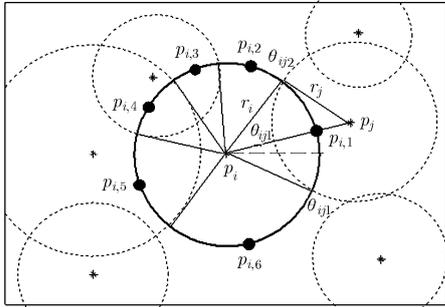


图 1 传感器节点感知范围相交

节点 i 与节点 j 的感知范围边界的交点在节点 i 感知范围边界上的弧度分别为

$$\left. \begin{aligned} \theta_{ij1}, \theta_{ij2} &= \arctan \left(\frac{p_{jy} - p_{iy}}{p_{jx} - p_{ix}} \right) \pm \arccos \left(\frac{d_{ij}^2 + r_i^2 - r_j^2}{2d_{ij}r_i} \right), \\ &\quad p_{jy} - p_{iy} \geq 0, \quad p_{jx} - p_{ix} \geq 0 \\ \theta_{ij1}, \theta_{ij2} &= \arctan \left(\frac{p_{jy} - p_{iy}}{p_{jx} - p_{ix}} \right) \pm \arccos \left(\frac{d_{ij}^2 + r_i^2 - r_j^2}{2d_{ij}r_i} \right) \\ &\quad + \pi, \quad p_{jx} - p_{ix} < 0 \\ \theta_{ij1}, \theta_{ij2} &= \arctan \left(\frac{p_{jy} - p_{iy}}{p_{jx} - p_{ix}} \right) \pm \arccos \left(\frac{d_{ij}^2 + r_i^2 - r_j^2}{2d_{ij}r_i} \right) \\ &\quad + 2\pi, \quad p_{jy} - p_{iy} < 0, \quad p_{jx} - p_{ix} \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 $d_{ij} = \|p_i - p_j\|$ 。假定与节点 i 感知范围相交的节点个数为 J_i ，那么在节点 i 的感知范围边界上共有 $2J_i$ 个交点，这些交点按照弧度从小到大重新排序为

$$[\dots, \theta_{i,q}, \dots] = \text{sort}\{\theta_{ij1}, \theta_{ij2} | j = 1, \dots, J_i\}, \quad q = 1, \dots, 2J_i \quad (8)$$

$2J_i$ 个交点将节点 i 感知范围的圆形边界分割成 $2J_i$ 段独立的弧段边界，分别记为 $(\theta_{i,q}, \theta_{i,q+1})$ ， $q = 1, \dots, 2J_i$ ，其中 $\theta_{i,2J_i+1} = \theta_{i,1} + 2\pi$ 。弧段边界 $(\theta_{i,q}, \theta_{i,q+1})$ 的中心点记为 $p_{i,q}$ 。

$$\left. \begin{aligned} p_{i,q}(x) &= p_i(x) + r_i \cdot \cos \left(\frac{\theta_{i,q} + \theta_{i,q+1}}{2} \right) \\ p_{i,q}(y) &= p_i(y) + r_i \cdot \sin \left(\frac{\theta_{i,q} + \theta_{i,q+1}}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由上述讨论可知，网络区域 Z 的覆盖重数等于节点 i ， $i = 1, \dots, N$ ，感知范围边界覆盖重数的最小值；节点 i 感知范围边界的覆盖重数等于弧段边界 $(\theta_{i,q}, \theta_{i,q+1})$ ， $q = 1, \dots, 2J_i$ ，覆盖重数的最小值；弧段边界 $(\theta_{i,q}, \theta_{i,q+1})$ 的覆盖重数等于点 $p_{i,q}$ 的覆盖重数。因此，只需要确定离散点集合 $P = \{p_{i,q} | i = 1, \dots, N, q = 1, \dots, 2J_i\}$ 的覆盖重数，就可以确定监视区域 Z 的覆盖重数，而离散点的覆盖重数的计算比较简单。这样，监视区域 Z 的覆盖重数可以由下面公式计算

$$F(Z, r_1, \dots, r_N) = \min_{p \in P} \left\{ \sum_{i=1}^N f(p, r_i) \right\} \quad (10)$$

5 仿真分析

为了说明本文方法的有效性，做了以下几组仿真：(1)研究了节点能量消耗模型对感知距离设定的影响；(2)研究了感知距离的可调范围对网络能量消耗的影响；(3)研究了求解节点感知距离次优解时，区域划分对网络能量消耗和计算量的影响；(4)比较了传统方法和本文方法在不同参数设置下的网络能量消耗。

5.1 节点能耗模型对感知距离设定的影响

9 个传感器节点规则地分布在一个正方形区域内，如图 2 所示。仿真参数设置如下： $a = 1$ ， $k = 1$ 和 $R = \{0 \text{ m}, 10 \text{ m}, 20 \text{ m}, 30 \text{ m}\}$ 。在 $\alpha = 1$ 和 $\alpha = 3$ 分别对本文方法进行仿真，仿真结果如图 2 所示，其中三角形表示感知距离设为 0 的节点。由图 2 可见，当 $\alpha = 1$ 时，只有一个中心节点处于感知状态，设定的感知距离为 30 m；当 $\alpha = 3$ 时，所有节点处于感知状态，设定的感知距离为 10 m。分析原因如下： $\alpha = 1$ 表示节点能量消耗随感知距离增加的比较慢，这时希望利用较少的节点实现较大的感知距离；

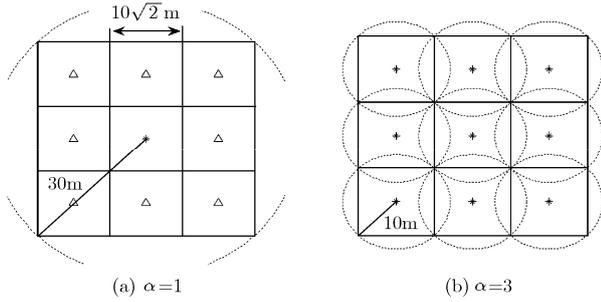


图2 α 取不同值的节点感知距离设定

$\alpha = 3$ 表示节点能量消耗随感知距离增加的比较快, 这时希望利用较多的节点实现较小的感知距离。

5.2 感知距离调节范围对网络能量消耗的影响

30 个节点随机分布在一个 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的 2 维平面, 中间 $80\text{ m} \times 80\text{ m}$ 为监视区域, 划分成 2×2 个栅格子区域, $\alpha = 3$, $R = \{0, \Delta r, \dots, (\|R\| - 1) \times \Delta r\}$, 其中 $\Delta r = 20 / (\|R\| - 1)\text{ m}$, 其他参数与上述仿真相同。显然, $\|R\|$ 越大表示节点感知距离的可调个数越多, 调节精度也越高。首先, 在 $\|R\| = 6$ 时, 图 3 给出了一次仿真实现, 其中有 11 个节点的感知距离设为 0, 即处于休眠状态; 其他 19 个节点处于感知状态, 实现了不同的节点感知距离。由图 3 发现, 在节点分布密集的地方, 设定的节点感知距离相对较小, 甚至为 0; 在节点分布稀疏的地方, 设定的节点感知距离较大。然后, 在 $\|R\|$ 取不同值时重新进行仿真, 仿真结果如图 4 所示。由图 4 可见, 随着 $\|R\|$ 的增大, 网络的能量消耗逐渐降低, 最终趋

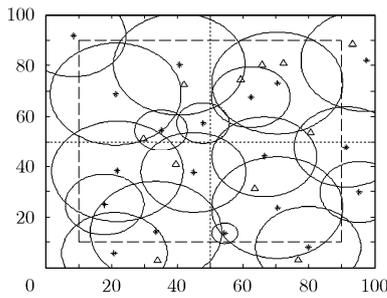


图3 网络区域覆盖的一次仿真实现

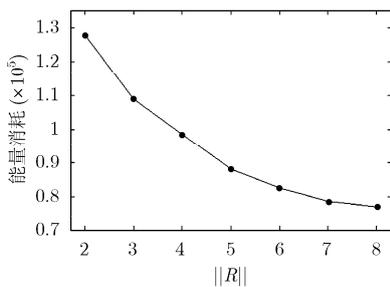


图4 网络能量消耗随感知距离可调范围的变化

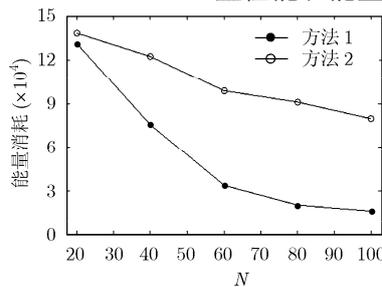


图5 网络能量消耗随节点个数的变化

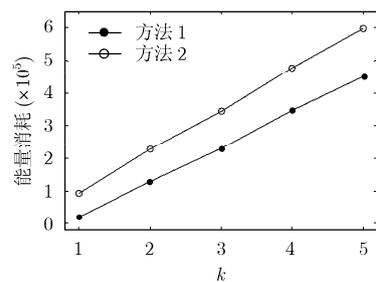


图6 网络能量消耗随区域覆盖重数的变化

于一个稳定值, 这是因为随着 $\|R\|$ 的增大, 节点感知范围重叠覆盖的程度逐渐变低。传统基于节点状态切换的区域覆盖方法^[1]可以视为 $\|R\| = 2$ 的特例, 因此此次仿真也表明了本文方法的能量有效性。

5.3 区域划分对网络能量消耗和计算量的影响

15 个节点均匀分布在一个 $80\text{ m} \times 25\text{ m}$ 的区域, 从横轴上均匀划分成 U 个子区域, $\|R\| = 3$, 其他参数与上述仿真相同。在 U 取不同值的进行仿真, 所有节点的能量消耗与计算量随 U 的变化情况如表 1 所示, 其中完成一次搜索的计算量记为 1 个单位。由表 1 可见, 随着子区域划分的增多, 设定节点感知距离的计算量逐渐降低, 但是网络的能量消耗逐渐增加, 即设定的感知距离的能量有效性逐渐变差。可见, 计算量与网络能量消耗在此是一组矛盾, 在划分子区域时需要折中考虑。

表1 网络能量消耗与计算量随子区域划分个数的变化情况

U	1	2	3	4
能量消耗	17000	20000	22000	25000
计算量	1.4×10^7	8.7×10^3	7.3×10^2	2.7×10^2

5.4 网络能量消耗比较

首先, 在 $\|R\| = 6$, $k = 1$ 和节点个数 N 取不同值时, 比较了传统方法^[1](方法 1)和本文方法(方法 2)的网络能量消耗, 其他参数与 5.2 节中相同。由图 5 可见, 两种方法的能量消耗都随着 N 的增加而降低, 因为对于方法 1, 节点个数越多, 可以选择位置越合理的节点进入感知状态, 降低了工作节点的数目; 对于方法 2, 随着节点个数的增多, 不仅可以选择位置合理的节点进入感知状态, 还可以缩短节点的感知距离。此外, 由图 5 可见, 本文方法始终比传统方法能量有效, 特别是节点个数较多时。然后, 在 $N = 80$ 、区域覆盖重数 k 取不同值时重新仿真。由图 6 可见, 两种方法的网络能量消耗都随着区域覆盖重数 k 的增加近似成线性增长, 说明了网络覆盖性能和能量消耗的矛盾关系, 即覆盖性能越优,

网络消耗的能量也越多。此外, 由图 6 可见, 本文方法仍然始终比传统方法能量有效。

6 结束语

本文节能覆盖方法是基于传感器节点的感知距离可以调节, 通过设定合理的节点感知距离, 使得监视区域的覆盖重数不低于某期望值的前提下, 网络的能量消耗最低。仿真结果验证了本文方法的能量有效性。后续工作的重点是求解节点感知距离次优解时, 如何合理划分子区域, 包括子区域的形状与大小等。

参 考 文 献

- [1] Carle J and Simplot D. Energy-efficient area monitoring by sensor networks[J]. *IEEE Computer Magazine*, 2004, 37(2): 40-46.
- [2] Wu K. Lightweight deployment aware scheduling for wireless sensor networks[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2005, 10(6): 837-852.
- [3] 马震, 刘云, 沈波. 一种无线传感器网络的能耗平衡覆盖模型[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(9): 2250-2253.
Ma Zhen, Liu Yun, and Shen Bo. An energy balanced coverage model for wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(9): 2250-2253.
- [4] <http://www.migatron.com/products/rps-400-6/rps-400-6.htm>.
- [5] <http://www.schneider-electric.ca/www/en/products/sensors/2000/html/osiris.htm>.
- [6] Cardei M, Wu J, and Lu M. Improving network lifetime using sensors with adjustable sensing ranges[J]. *International Journal of Sensor Networks*, 2006, 1(1/2): 41-49.
- [7] Dhawan A, Vu C T, and Zelikovsky A. Maximum lifetime of sensor networks with adjustable sensing range[C]. 2nd ACIS International Workshop on Self-assembling Wireless Networks, Las Vegas, NV, June 2006: 285-289.
- [8] Wu J and Yang S. Coverage issue in sensor networks with adjustable ranges[C]. International Conferences on Parallel Processing Workshops, Montreal, Quebec, August 2004: 61-68.
- [9] Huang Y and Tseng Y. The coverage problem in a wireless sensor network[C]. Proc. ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications, San Diego, CA, September 2003: 115-121.
- [10] So A and Ye Y. On solving coverage problems in a wireless sensor network using voronoi diagrams[C]. Proc. of Workshop on Internet and Network Economics, Hong Kong, December 2005: 584-593.
- [11] 王雷, 沈昊为, 林亚平. 传感器网络中基于 Voronoi 网格的快速覆盖判定算法[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(14): 3858-3863.
Wang Lei, Shen Hao-wei, and Lin Ya-ping. Voronoi tessellation-based rapid coverage decision algorithm for wireless sensor networks[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(14): 3858-3863.

邓克波: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为传感器网络及其信号处理等。

刘 中: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代信号处理、传感器网络、混沌与信息动力学等。