

基于局域世界的 WSN 拓扑加权演化模型

张德干,戴文博,牛庆肖

(天津理工大学,天津市智能计算及软件新技术重点实验室;
天津理工大学计算机视觉与系统省部共建教育部重点实验室,天津 300384)

摘 要: 无标度加权网络模型,反映了现实网络的存在形式和动力学特征,是无线传感网络建模和拓扑演化的有效研究工具.本文基于局域世界理论提出一种不均匀成簇的无线传感网络拓扑动态加权演化模型,考虑节点能量,通信流量和距离等因素,对边权重和节点强度进行了定义,同时研究了拓扑生长对边权重分布的影响.实验证明演化所得网络节点度,强度和边权重均服从幂律分布,结合已有理论成果可知,该拓扑不仅继承了无权网络较高的鲁棒性和抗毁性,同时降低了节点发生相继故障的几率,增强了无线传感网络的同步能力.

关键词: 无线传感网络;加权网络;局域世界;动态演化

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 05-1000-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.05.022

Local-World Weighted Topology Evolving Model for Wireless Sensor Networks

ZHANG De-gan, DAI Wen-bo, NIU Qing-xiao

(Tianjin Key Laboratory of Intelligence Computing and Novel Software Technology, Tianjin University of Technology;
Key Laboratory of Computer Vision and System, Ministry of Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Many real networks included Wireless Sensor Networks (WSN) can be considered as scale-free weighted networks which reflect their existing forms and dynamic characteristics. Based on local-world theory, we propose an uneven clustering weighted evolving model of WSN in this paper. The definitions of edge weight and vertex strength take sensor energy, communication traffic and distance into consideration. Vertex strength drives the growth of topology and edge weight dynamically changes correspondingly. Experimental results demonstrate that WSN topology we obtain has the property of weighted networks: edge weight, vertex degree and strength follow a power law distribution. Related research work show that weighted WSN not only share the robustness and fault tolerance of weight-free networks, but also reduce the happening probability of successive node-breakdown, furthermore, enhance the synchronization of WSN.

Key words: wireless sensor networks; weighted networks; local world; dynamic evolving

1 引言

无线传感网络(WSN)是大量微传感器通过单跳和多跳通信,自组织形成的无线网络系统,它将目标区域的感知数据发送给观察者,充当了融合物理世界与信息世界的有效媒介.以延长网络寿命,保持覆盖率和连通性为主要目标^[1,2],群体智能^[3]等算法已被广泛应用于WSN的拓扑控制及路由设计中,网络成簇等关键理论已成为研究者的共识.

现实中的复杂网络,虽然功能和大小不尽相同,却

有相似的结构特征^[4],即网络包含大量关联节点,且存在社团结构,WSN具有这种共性,且全局信息受限,链路的数据流量差异很大.本文关注交叉学科进展,建立新的WSN拓扑演化模型,使其继承加权网络的优势,为相关研究提供了一个新视角.

2 研究背景

加权网络中, w_{ij} 表示节点 i 到 j 之间边 e_{ij} 的权重, i 的度 k_i 定义为连接 i 的边数,点强度 s_i 定义为这些边权重之和:

$$s_i = \sum_{j \in N(i)} w_{ij} \quad (1)$$

其中 $N(i)$ 是与 i 相连的节点集合。

BBV 模型拓扑演化分为以下四个阶段^[5]:

(1) 初始化. 初始网络有 N_0 个节点, 初始边权重为 w_0 .

(2) 节点的更新. 每个时间步 t , 都有一个新节点 n 和与之相连的 m 条权重为 w_0 新边加入。

(3) 强度驱动的优先连接. m 条新边依照概率 $\prod_{n \rightarrow i}$ 随机连接到已有节点, 其中:

$$\prod_{n \rightarrow i} = \frac{s_i}{\sum_j s_j} \quad (2)$$

(4) 节点强度及边权重的更新. 如图 1 所示。

新边 (n, i) 的加入使点 i 的强度改变, 同时 i 与原邻节点之间各边的权重也随之变化, 变化总量为 δ :

$$w_{ij} \rightarrow w_{ij} + \Delta w_{ij} \quad (3)$$

$$\Delta w_{ij} = \delta \frac{w_{ij}}{s_i} \quad (4)$$

其中 重复步骤(2)至(4), 至所有节点加入网络。

2003 年, 李翔等人建立基于局域世界(local-world)的无权网络演化模型^[6], 在初始的 N_0 个节点中随机选取 M 个节点作为 n 的局域世界, 优先连接概率 $\prod_{Local}(n \rightarrow i)$ 定义为:

$$\prod_{Local}(n \rightarrow i) = \prod'(i \in Local - world) \cdot \frac{k_i}{\sum_{j \in Local} k_j} \quad (5)$$

$$\prod'(i \in Local - world) = M / (N_0 + t) \quad (6)$$

2009 年, Ruela 等人用遗传算法构造了无标度特性的 WSN 拓扑^[7], 降低了通信延迟和能耗, 但该研究中复杂网络理论被用于网络性能分析, 而不是拓扑构造. 同年, 陈力军等人提出基于随机行走的 WSN 簇间拓扑演化机制^[8], 生成的簇首间拓扑具备无标度特性, 容错能力较好, 但该研究是基于无权网络模型, 演化机制未能应用至整网, 且成簇协议未考虑能量空洞问题。

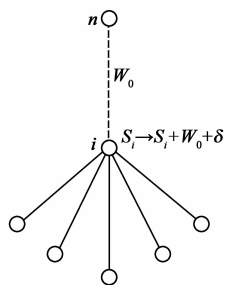


图1 BBV模型节点强度更新示意图

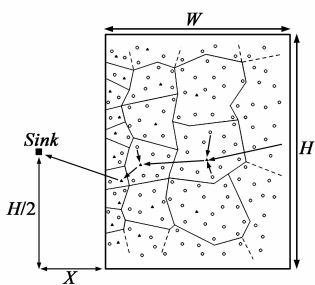


图2 无线传感网络工作场景示意图

3 基于 BBV 模型和局域世界的不均匀成簇机制

3.1 模型的建立

如图 2 所示, N 个传感器节点随机分布在矩形监测区域, 感应数据最终转发至汇聚节点(Sink)。

现有如下说明和定义:

(1) 各节点同构, N 为节点数目, $i = 1, 2, \dots, N$, i 为节点唯一标识。

(2) 节点初始能量 E_0 , 能量耗尽后死亡, Sink 能量视为无限。

(3) Sink 信号覆盖全区域, 各节点信号发送距离可控, 根据接收强度可得到与信源的距离。

(4) 本文采用自由空间能量模型, 节点通信半径上限为 d_0 . 其中:

$$d_0 = \sqrt{\epsilon_{fs}^2 / \epsilon_{mp}} \quad (7)$$

ϵ_{fs} , ϵ_{mp} 分别为自由模型和多路径衰减模型下发送放大模块消耗能量系数。

定义 1 i 到 Sink 的距离为 $d(i, Sink)$:

$$d(i, Sink) \in [X, \sqrt{(H/2)^2 + (X + W)^2}] \quad (8)$$

其中 W, H 为区域边长, X 为 Sink 到区域的垂直距离. 设 i 为簇首时, 优化簇半径为 $R_{opt}(i)$:

$$R_{opt}(i) \sim f_1[d(i, Sink)] \in (0, d_0) \quad (9)$$

为使簇规模与距 Sink 距离成反比, $f_1[d(i, Sink)]$ 应为 $d(i, Sink)$ 的增函数。

定义 2 t 时刻, 边权重 w_{ij} :

$$w_{ij}(t) = \frac{\zeta[E_i(t)E_j(t)]^\psi}{\{[d(i, j)]^2\}^\eta [T_{ij}(t)]^\xi} \quad (10)$$

其中 ζ, ψ, η, ξ 均为非负调和系数, $E_i(t)$, $E_j(t)$ 分别为 i, j 在 t 时刻的剩余能量, $d(i, j)$ 为两点间距离, $T_{ij}(t)$ 为 t 时刻时边 e_{ij} 承载的通信流量, 设 i 在 i, j 中距 Sink 较远, 则有:

$$T_{ij}(t) \sim f_2[d(i, Sink), t] \quad (11)$$

边末端节点距 Sink 越远, 接收数据量越小, 而随时间推移, 网络节点增多, 数据量将增大, 故 $f_2[d(i, Sink), t]$ 为 $d(i, Sink)$ 的减函数, t 的增函数. 该定义下, 边权重代表了链路通信能力. 式(10)分母中 $d(i, j)$ 较大时, 需避免高能耗的长距离通信, 边权重下降. 同理 $T_{ij}(t)$ 较大时, 链路负荷高, 优先选择低负荷链路, 权重降低. 分子部分, 两端节点能量充裕时, 链路较健壮, 边权重高, 更可能承担转发任务。

定义 3 i 的强度 s_i :

$$s_i = \sum_{j \in N(i)} w_{ij} \quad (12)$$

其中 $N(i)$ 是与 i 连接节点的集合. 节点强度越大, 吸引

连接能力越强,成为簇首可能性就越大。

3.2 拓扑演化机制

(1)初始化. Sink 向区域广播,节点收到消息后得到与 Sink 间距离,将其与自己的 R_{opt} 记录于存储器.选取具有 N_0 ($N_0 < N$) 个节点, e_0 条边的子网为初始网络,按式(10)初始化边权重。

(2)局域世界的选取. 每个时间步 t 中,从已有网络中随机选取 M ($M \leq N_0$) 个节点作为新加入节点的局域世界。

(3)拓扑的生长. 加入带有 m 条边的新节点 n , 并与 m 个节点产生新连接,连接概率为:

$$\prod(n \rightarrow i) = \prod'(i \in Local - world) \cdot \prod''[i \in N_{R_{opt}}(n)] \cdot \frac{s_i}{\sum_{j \in [local - world \cap N_{R_{opt}}(n)]} s_j} \quad (13)$$

其中 $\prod'(i \in local - world)$ 是 i 在局域世界内的概率, $\prod''[i \in N_{R_{opt}}(n)]$ 是 i 在 n 的 $R_{opt}(n)$ 内的概率, $j \in [local - world \cap N_{R_{opt}}(n)]$ 表示节点 j 同时在局域世界和 n 的 $R_{opt}(n)$ 内。

(4)权重的动态变化. m 条新边的权重按式(10)赋值,变化量 δ 分以下两种情形讨论:

情形 1 $d(n, Sink) > d(i, Sink)$ 时, δ 为负增量:

$$|\delta| \sim f_3[w_{ni}(t)] \quad (14)$$

其中, $f_3[w_{ni}(t)]$ 为 $w_{ni}(t)$ 的增函数. i 与邻节点间各边权重变化:

$$w_{ij} \rightarrow w_{ij} + \Delta w_{ij} \quad (15)$$

其中

$$\Delta w_{ij} = \begin{cases} -|\delta| \frac{w_{ij}}{\sum_{j \in N(i), d(j, Sink) < d(i, Sink)} w_{ij}}, & d(j, Sink) < d(i, Sink) \\ 0, & d(j, Sink) \geq d(i, Sink) \end{cases} \quad (16)$$

i 的强度变化为:

$$s_i \rightarrow s_i + w_0 - |\delta| \quad (17)$$

如图 3 所示, n 距 Sink 比 i 远,可能会选择其为下一跳节点,给 i 带来了新增流量预期. i 的邻节点,作为 i 可能的下一跳节点,距 Sink 近于 i 的,为 i 分担新增流量,与 i 间边权重越大,链路越健壮,分流越多。

情形 2 $d(n, Sink) \leq d(i, Sink)$ 时, δ 为正增量,同理:

$$\Delta w_{ij} = \begin{cases} |\delta| \frac{w_{ij}}{\sum_{j \in N(i), d(j, Sink) > d(i, Sink)} w_{ij}}, & d(j, Sink) > d(i, Sink) \\ 0, & d(j, Sink) \leq d(i, Sink) \end{cases} \quad (18)$$

i 的强度变化为:

$$s_i \rightarrow s_i + w_0 + |\delta| \quad (19)$$

如图 4 所示, n 距 Sink 比 i 近,为 i 分流. i 的邻节点,距 Sink 远于 i 的,分享该分流效果,与 i 间边权重越大,获得分流越多.重复步骤(2)至(4),至所有节点加入网络。

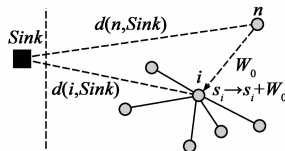


图3 n 距Sink远于 i 时 S_i 变化示意图

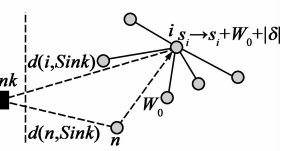


图4 n 距Sink近于 i 时 S_i 变化示意图

3.3 节点强度、节点度和边权重分布的求解

度分布 $P(k)$ 表示随机选择网络中一个节点,度为 k 的概率,强度分布 $P(s)$ 和权重分布 $P(w)$ 的定义与之类似.采用平均场法求解各分布,考虑 $m < M < N_0 + t$ 的情况,设在局域世界且在 n 的 $R_{opt}(n)$ 内的节点数目为 $N_{l \in [local - world \cap N_{R_{opt}}(n)]}$,这些节点的平均强度 $\langle s_l \rangle$ 等于 t 时刻全网节点平均强度, $\langle w_0 \rangle$ 为 t 时刻和之前所有时间步新加入边的权重 w_0 的平均值,则有:

$$\begin{aligned} \sum_{l \in [local - world \cap N_{R_{opt}}(n)]} s_l &= \langle s_l \rangle \cdot N_{l \in [local - world \cap N_{R_{opt}}(n)]} \\ &\approx \frac{2mt(\delta + \langle w_0 \rangle)}{N_0 + t} \cdot N_{l \in [local - world \cap N_{R_{opt}}(n)]} \end{aligned} \quad (20)$$

w_{ij} 随 t 变化的微分方程:

$$\begin{aligned} \frac{dw_{ij}(t)}{dt} &= \prod(n \rightarrow i) m \delta_i \frac{w_{ij}(t)}{s_i(t)} + \prod(n \rightarrow j) m \delta_j \frac{w_{ij}(t)}{s_j(t)} \\ &= \frac{(\delta_i + \delta_j) w_{ij}(t)}{t(\delta + \langle w_0 \rangle)} \\ &= \theta \frac{w_{ij}(t)}{t} \end{aligned} \quad (21)$$

其中

$$\theta = \frac{\delta_i + \delta_j}{\delta + \langle w_0 \rangle} \quad (22)$$

δ_i, δ_j 分别为 i, j 获得的增量.边 e_{ij} 创建时间为 i, j 两者中较晚加入网络的时刻:

$$t_{ij} = \max(t_i, t_j) \quad (23)$$

设初始条件:

$$w_{ij}(t_{ij}) = \frac{\zeta[E_i(t_{ij})E_j(t_{ij})]^\psi}{\{[d(i, j)]^2\}^\eta [T_{ij}(t_{ij})]^\xi} \approx \langle w_0 \rangle \quad (24)$$

式(21)可求出特解:

$$w_{ij}(t) = \langle w_0 \rangle (t/t_{ij})^\theta \quad (25)$$

s_i 随 t 变化的微分方程:

$$\begin{aligned} \frac{ds_i}{dt} &= \sum_j \frac{dw_{ij}}{dt} + m \prod(n \rightarrow i) \\ &= \frac{2(\delta_i + \delta_j) + 1}{2\delta + 2\langle w_0 \rangle} \frac{s_i(t)}{t} = \lambda \frac{s_i(t)}{t} \end{aligned} \quad (26)$$

其中

$$\lambda = \frac{2(\delta_i + \delta_j) + 1}{2\delta + 2\langle w_0 \rangle} \quad (27)$$

i 加入网络时,产生 m 条新连接,可设初始条件:

$$s_i(t=i) = \sum_{j=1}^m w_{ij} \approx m\langle w_0 \rangle \quad (28)$$

式(26)可求出特解:

$$s_i(t) = m\langle w_0 \rangle (t/i)^\lambda \quad (29)$$

k_i 随 t 变化的微分方程:

$$\frac{dk_i(t)}{dt} = m \prod (n \rightarrow i) = \frac{mt^{\lambda-1}\langle w_0 \rangle}{i^\lambda(2\delta + 2\langle w_0 \rangle)} \quad (30)$$

设初始条件:

$$k_i(t=i) = m \quad (31)$$

式(30)可求出特解:

$$k_i(t) = \frac{m\langle w_0 \rangle (t/i)^\lambda - m\langle w_0 \rangle}{2\delta + 1} + m \quad (32)$$

计算 $k_i(t)$ 的分布时, i 看作服从均匀分布的随机变量,即:

$$\rho(i) = \frac{1}{N_0 + t} \quad (33)$$

度分布求解:

$$P\{k_i(t) < k\} = 1 - \frac{t}{N_0 + t} \left(\frac{2\delta + 1}{m\langle w_0 \rangle} \right)^{-\frac{1}{\lambda}} \cdot \left[k - \left(m - \frac{m\langle w_0 \rangle}{2\delta + 1} \right) \right]^{-\frac{1}{\lambda}} \quad (34)$$

$$P(k, t) = \frac{\partial P\{k_i(t) < k\}}{\partial k} = \frac{1}{\lambda} \frac{t}{(N_0 + t)} \left(\frac{2\delta + 1}{m\langle w_0 \rangle} \right)^{-\frac{1}{\lambda}} \cdot \left[k - \left(m - \frac{m\langle w_0 \rangle}{2\delta + 1} \right) \right]^{-(1+\frac{1}{\lambda})} \quad (35)$$

令 $t \rightarrow \infty$, 度分布为:

$$P(k) \sim \frac{1}{\lambda} \left(\frac{2\delta + 1}{m\langle w_0 \rangle} \right)^{-\frac{1}{\lambda}} \cdot \left[k - \left(m - \frac{m\langle w_0 \rangle}{2\delta + 1} \right) \right]^{-(1+\frac{1}{\lambda})} \quad (36)$$

强度分布求解:

$$P\{s_i(t) < s\} = 1 - \frac{t}{N_0 + t} (m\langle w_0 \rangle)^{\frac{1}{\lambda}s - \frac{1}{\lambda}} \quad (37)$$

$$P(s, t) = \frac{\partial P\{s_i(t) < s\}}{\partial s} = \frac{1}{\lambda} \frac{t}{N_0 + t} (m\langle w_0 \rangle)^{\frac{1}{\lambda}s - (1+\frac{1}{\lambda})} \quad (38)$$

令 $t \rightarrow \infty$, 强度分布为:

$$P(s) \sim \frac{1}{\lambda} (m\langle w_0 \rangle)^{\frac{1}{\lambda}s - (1+\frac{1}{\lambda})} \quad (39)$$

边权重分布求解:

$$P\{w_{ij}(t) < w\} = 1 - \frac{t}{N_0 + t} \langle w_0 \rangle^{\frac{1}{\theta}w - \frac{1}{\theta}} \quad (40)$$

$$P(w, t) = \frac{\partial P\{w_{ij}(t) < w\}}{\partial w} = \frac{1}{\theta} \cdot \frac{t}{N_0 + t} \langle w_0 \rangle^{\frac{1}{\theta}w - (1+\frac{1}{\theta})} \quad (41)$$

令 $t \rightarrow \infty$, 边权重分布为:

$$P(w) \sim \frac{1}{\theta} \langle w_0 \rangle^{\frac{1}{\theta}w - (1+\frac{1}{\theta})} \quad (42)$$

4 仿真实验及分析

实验前,对式(9)、(11)、(14)进行量化:

$$w_{ij}(t) = \frac{E_i(t)E_j(t)}{[d(i, j)]^2 T_{ij}(t)} \quad (43)$$

其中 $T_{ij}(t)$ 为:

$$T_{ij}(t) = \frac{t}{\langle d(i, Sink) \rangle^2} \quad (44)$$

传感器初始能量 $E_0 = 0.5J$, $|\delta|$ 为:

$$|\delta| = \frac{1}{10} w_{ni}(t) \quad (45)$$

优化簇半径 $R_{opt}(i)$ 参照文献[2]:

$$R_{opt}(i) = \left[1 - c \frac{d(i, Sink) - X}{\sqrt{(H/2)^2 + (X + W)^2 - X}} \right] d_0 \quad (46)$$

令 $N = 400$, $c = 0.5$, $d_0 = 87m$, $X = 50m$, $W = H = 200m$, $N_0 = 50$, $M = 30$, $m = 3$.

实验所得节点度,强度和边权重分布和理论数据对比如图 5,6,7 所示(log10 刻度),可以看出两者基本吻合,均符合幂律分布,且有拖尾现象存在,验证了该机制生成的 WSN 具有无标度加权网络的基本特征.图 5 中,度为 1 的概率为 0.5,说明约半数节点处于网络末端,仅拥有一条链路.度在 100 以上的节点存在概率很小,说明簇首节点占少数,且能承载的链路数量有限.

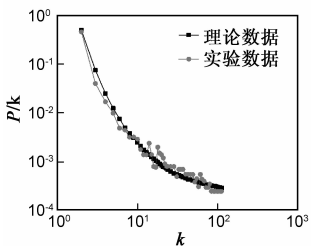


图5 节点度分布的理论和实验数据对比图

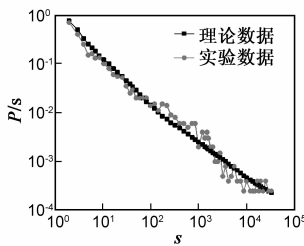


图6 节点强度分布的理论和实验数据对比图

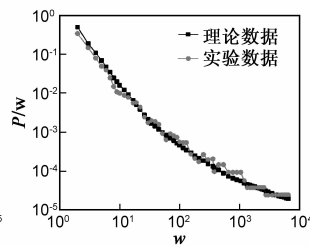


图7 边权重分布的理论和实验数据对比图

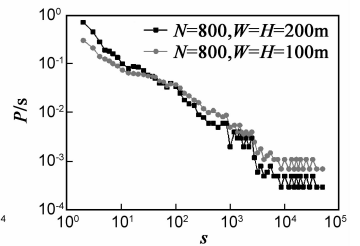


图8 点强度分布在不同场景下的对比图

图 6 中,小强度节点出现概率很大,说明大部分节点转发能力较弱.图 7 中高边权小概率出现,即强转发能力的链路数量有限,证明了设计路由算法来搜索最优路径的必要性.

令监测区域内节点数增大一倍,即 $N = 800$,得到新的点强度分布,在此基础上再令监测区域边长各缩小一半,得到另一点强度分布,如图 8 所示.监测面积不变,节点数量加倍,对比图 6,高强度节点出现概率增大,低强度节点出现概率减小,将监测面积缩小之后,这种现象更加明显,这说明传感器密度增大时,各节点负担减小,全网转发数据能力得到增强.同时图 8 两组新参数下的实验结果进一步验证了拓扑的幂律特性.

5 结束语

本文基于复杂网络理论,提出一种 WSN 拓扑加权演化模型.模型中定义了通信链路权重和传感器节点强度,在局域世界内改进 BBV 网络模型,并实现了全网的不均匀成簇.实验结果表明该机制生成的拓扑符合无标度加权网络的基本特征,从而使 WSN 具备了加权网络较强的同步和相继故障容纳能力.

参考文献

- [1] 王绍青,聂景楠.一种无线传感网络性能评估及优化方法[J].电子学报,2010,38(4):882-886.
Wang Shao-qing, Nie Jing-nan. An approach of performance analysis and optimization for wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 882-886. (in Chinese)
- [2] Li C F, Ye M, Chen G H, Wu J. An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor System[C]. Washington DC: IEEE Press, 2005. 597-604.
- [3] 王小明,安小明.具有能量和位置意识基于 ACO 的 WSN 路由算法[J].电子学报,2010,38(8):1763-1769.
Wang Xiao-ming, An Xiao-ming. An energy and location aware ACO based routing algorithm for wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1763-1769. (in Chinese)
- [4] Barabási A L. Scale-free networks: a decade and beyond[J]. Science, 2009, 325(5939): 412-413.

- [5] Barrat A, Barthélemy M, Vespignani A. Modeling the evolution of weighted networks[J]. Physical Review E, 2004, 70(6): 1-13.
- [6] Li X, Chen G R. A local-world evolving network model[J]. Physica A, 2003, 328(1-2): 274-286.
- [7] Ruela A S, Cabral R S, Aquino A L L, Guimaraes F G. Evolutionary design of wireless sensor networks based on complex networks[A]. Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing[C]. Melbourne: IEEE Press, 2009. 237-242.
- [8] 陈力军,刘明,陈道蓄,谢立.基于随机行走的无线传感网络簇间拓扑演化[J].计算机学报,2009,32(1):69-76.
Chen Li-jun, Liu Ming, Chen Dao-xu, Xie Li. Topology evolution of wireless sensor networks among cluster heads by random walks[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(1): 69-76. (in Chinese)

作者简介



张德干 男,1969 年生于湖北黄冈.博士,教授,天津市智能计算及软件新技术重点实验室主任.主要研究方向为移动计算,智能控制,网络通信.

E-mail: zhangdeqian@tsinghua.org.cn



戴文博 男,1987 年生于湖北天门.南开大学电子信息科学与技术学士,天津理工大学计算机应用技术硕士.主要研究方向为无线传感网络.

E-mail: daiwenbo@126.com



牛庆肖 女,1986 年生于河北石家庄.天津理工大学计算机应用技术硕士.主要研究方向为图像处理,模式识别.

E-mail: niuqingxiao@gmail.com