

具有高集聚系数的能量均衡加权网络模型^{*}

刘 彬^{1,2}, 邓玉静^{1,2}, 王倩悦^{2,3}, 韩 丽^{1,2}, 尹荣荣^{1,2}

(1. 燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004; 2. 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室 秦皇岛 066004;
3. 燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

摘 要:针对现实中许多网络具有大聚类的特点和无线传感器网络具有节点能量有限的问题,提出一种具有高集聚系数的能量均衡的加权无标度网络模型。该模型建立了节点能量与点权之间的关系,在模型演化机制中,新边的建立以概率 p 进行权重优先连接,以概率 $1-p$ 在旧节点中进行三角连接。择优概率中能量因子的引入均衡了网络能耗;三角连接增大了网络集聚系数。理论推出网络节点度和点权的幂律分布规律,仿真分析表明,所提出模型具有较高的集聚系数、好的容错性及均衡的网络能耗,最终实验验证了模型的能耗均衡性。

关键词: 无线传感器网络;加权;集聚系数;能耗均衡

中图分类号: TP393 TH165^{+.3} 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.50

Weighted network model with high clustering and balancing energy consumption characteristics

Liu Bin^{1,2}, Deng Yujing^{1,2}, Wang Qianyue^{2,3}, Han Li^{1,2}, Yin Rongrong^{1,2}

(1. Institute of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 3. Institute of Electronical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In view of the phenomenon of clustering effect and energy constraints, a weighted scale-free network model is proposed with high clustering and balanced energy consumption characteristics, in which the relationship between node energy and node weights is modeled. In the evolution process, a new edge weight is established with the probability according to the triad formation mechanism and with the probability according to weight priority connection mechanism. Therefore, the energy factor balances the network energy consumption, and the triad formation improves the clustering coefficient of the network, and then improves the fault-tolerance of the network. Theoretical proof shows that the distribution of the node weight and the node degree of the network all obey the power-law distribution. Simulation results indicate that the proposed model has a high clustering coefficient and great fault tolerance performance, and balanced network energy consumption. Moreover, the energy balance of the model is verified by the real test experiments.

Keywords: wireless sensor network (WSNs); weighting; clustering coefficient; balanced energy consumption

1 引 言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)具有工作环境恶劣及能量受限^[1,2]的特点,节点很容易因能量耗尽和环境破坏引起失效。基于 WSNs 的这些特点,许多研究者开始用复杂网络的理论来提升 WSNs 的性

能。复杂网络中最知名的是 ER(Erdős Rényi)随机图^[3]、WS(Watts Strogatz)小世界^[4]和 BA(Barabási Albert)无标度模型^[5]。WS 小世界具有大集聚系数的特性,网络的容错性和抗毁性较好;BA 无标度网络中节点度具有幂律分布的特性,对节点的随机失效有较强的容忍能力。而现实网络几乎同时具有这两种特性^[6]。因此,怎样在无标度的基础上构建具有高集聚系数且能量均衡的 WSNs

成为目前研究的重要问题。

近年来,对 WSNs 无标度拓扑结构的研究有很多。如文献[7-9]分别对优化网络的容错能力、均衡网络能耗能力以及延长网络生命期能力等进行研究。但这些文献大多是基于无权网络领域进行的研究,即网络的节点间仅用有无连接来表示,而不考虑这些连接的强弱程度^[10]。然而,生活中的实际网络普遍是加权网络。文献[11]构建了一个加权的无标度拓扑模型,即 BBV (Barrat Barthelemy Vespignani) 模型,该模型兼顾了节点权重和网络整体结构特征来探讨网络的动态演变过程;文献[12]在 BBV 模型的基础上,综合探究节点能量和距离等因素对边权重的影响,演化出的拓扑均衡了网络能耗,同时提高了网络容错性。但文献[11-12]都忽略了多数现实网络,尤其是社会网络,存在的一个特点,即大集聚系数的性质。文献[9]在 BBV 模型的基础上引入一个新的参数,构建了一个扩展的 BBV 模型 (generalized BBV, GBBV), GBBV 模型既保持了原来 BBV 模型的特性,又使网络的集聚系数大范围可调;文献[13]综合考虑了优先连接、随机连接、三角结构^[14]和社团结构 4 种择优规则,最终使拓扑模型不仅具有较高的集聚系数,同时还具有多种结构特性来作用于网络的同步性能。但是以上文献都没有综合考虑网络的能耗均衡性、容错性和高集聚系数问题,在优化网络性能的问题上仍具有局限性。

针对上述问题,本文提出一个局域范围内具有高集聚系数的能量均衡的加权无标度拓扑 (weighted scale-free topology with high clustered and energy balanced, HCEB), 主要通过旧边中产生三角形来提升网络的集聚系数,同时建立节点能量与点权值之间的关系,进而建立拓扑模型,最终实现网络能量均衡和进一步提升网络容错性的目标。

2 HCEB 网络模型

建立节点剩余能量与点权值的关系,将能量引入点权值的演化过程,同时在演化过程中,增加三角连接的可能性,提升网络的集聚系数,增强网络的容错性。最终,构建了一个能耗均衡的加权容错拓扑。

2.1 集聚系数

集聚系数是用来描述网络中一个节点与其临接节点之间的相互连接性质,是表征网络性质的重要特征参数。假设一个节点 i 有 k_i 个邻居节点,这 k_i 个节点之间实际存在的连边数目 L_i 与最大可能的连边数目之比就定义为节点 i 的集聚系数 C_i ^[4]。

$$C_i = \frac{2L_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (1)$$

式中: L_i 表示这 k_i 个邻居节点之间的连接边数, k_i 表示

节点 i 的度, $\frac{k_i(k_i - 1)}{2}$ 表示网络中所有节点的节点度之和。

由式(1)可以看出,邻居节点之间存在的边数越多,节点 i 的度越小,节点的集聚系数越大,即其邻居节点之间相互成为邻居的可能性越大。因此,网络的平均集聚系数越大,网络中节点的可替代性就越强,节点的去除对网络的影响越小,对外界攻击的抵抗能力越强,从而提升了网络的容错性。

2.2 能量模型

WSNs 中,节点能量是有限的,当能量耗尽时节点也将失效。节点的剩余能量和节点的负载量往往决定了节点的能量消耗量。通常权重大的节点承载的负载量较多。因此,下面考虑节点的剩余能量和负载状况,对节点点权与剩余能量的关系进行数学建模。

$$E_i = As_i^\alpha \quad (2)$$

式中: E_i 为节点剩余能量, A 代表一个适应度参数,通常为常数,本文设 $A = 1$, s_i^α 为节点的结构负载, $\alpha < 0$, 即结构负载越大,节点剩余能量越小。

2.3 HCEB 建模

根据 2.2 节的能量模型,假设 WSNs 的传感器节点都是随机部署的,将节点的剩余能量和负载作为构建拓扑时的适应度参数因子引入拓扑,并且同时考虑“三角连接”、“权重优先连接”两种连接机制,构建出符合 WSNs 特征的高聚类且能量均衡的加权无标度网络模型。该网络模型的拓扑结构和节点权值均随时间变化而不断演化,演化过程如下。

1) 初始网络:网络初始状态含有 m_0 个节点两两相连。

2) 网络演化:每一个时间步增加一个节点和 m 条边。新加入的那条边的两个顶点以概率 p 按照全局择优连接机制 (preferential attachment, PA) 进行选取,其中 $p \in [0, 1]$; 以概率 $1 - p$ 按照三角连接机制 (triad formation, TF) 进行选取。

PA 规则是 BA 网络中最大度的择优机理,新节点 n 加入网络时,旧节点 i 被选择连接的概率 $\Pi_{n \rightarrow i}$ 与节点 i 的强度成正比。

$$\Pi_{n \rightarrow i} = \frac{As_i}{\sum_w As_w} = \frac{E_i s_i^{1-\alpha}}{\sum_w E_w s_w^{1-\alpha}} \quad (3)$$

TF 规则是指在 BA 无标度网络中选取一个节点,该节点的选取依据式(3),然后给它的一个没有连接的临节点之间增加连接。其中,若节点 i 没有邻居节点或邻居节点已被选完,则按照 PA 规则增加下一条边。

3) 权值演化:节点 i 的点权会受到新加入边的影响,其点权调整为:

$$s_i \rightarrow s_i + \delta_i + w_0 \quad (4)$$

式中： δ_i 为节点*i*新增一条边所带来的额外流量负担（一般情况下，设 $\delta_i = \delta = 1, w_0 = 1$ ）。

当权值更新过后，进入下一个时间轮，直到网络的规模*N*增长为期望值，最终的网络拓扑由*N*个节点和*Nm*条边组成。

以上为HCEB建模过程，在网络演化过程中，新加入的节点往往倾向于先与权重大的节点进行连接。而随着连接的增多，新节点也将认识其连接的节点的邻居，即形成三角结构连接。三角结构连接的过程中，三角型子网的数目增多，从而提高了网络的集聚系数。另外，能量因子的引入，作用于拓扑构建的始末，从而影响节点度和点权的分布规律。能量与节点度和点权强度的关系将在下面进行详细分析。

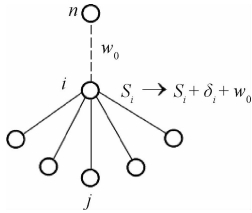


图1 权值演化规则
Fig.1 Weight evolution rule

3 HCEB 模型动态特性分析

3.1 点权特性研究

在加权网络中，新加入一个节点*n*，则对于网络中已存在的节点*i*来说，其点权 s_i 可能会受到4个方面的影响：1)节点*i*按照PA规则被选取；2)节点*i*按照TF规则被选取；3)节点*i*的邻居节点*j*按照PA规则被选取；4)节点*i*的邻居节点*j*按照TF规则被选取。依据连续场理念^[15]，节点度 s_i 被设为连续变化，因此可得 s_i 的演化过程为：

$$\begin{aligned} \frac{ds_i}{dt} &= [(m-1)p+1] \frac{As_i(t)}{\sum_w As_w(t)}(1+\delta) + \\ &(m-1)(1-p) \sum_{i \in V(i)} \frac{As_i(t)}{\sum_w As_w(t)} \frac{w_{ij}(t)}{s_i(t)}(1+\delta) + \\ &\sum_{j \in V(i)} \frac{As_j(t)}{\sum_w As_w(t)} \delta \frac{w_{ij}(t)}{s_j(t)} + (m-1) \cdot \\ &(1-p) \sum_{j \in V(i)} \left[\left(\sum_{i \in V(j)} \frac{As_i(t)}{\sum_w As_w(t)} \frac{w_{ij}(t)}{s_i(t)} \right) \delta \frac{w_{ij}(t)}{s_j(t)} \right] = \\ &m(1+2\delta) \frac{As_i(t)}{\sum_w As_w(t)} = \\ &m(1+2\delta) \frac{E_i s_i^{1-\alpha}}{\sum_w E_w s_w^{1-\alpha}} \end{aligned} \quad (5)$$

设 $h(E_i) = E_i$ ，由于 $h(E_i)$ 为闭区间 $[\min(E), \max(E)]$ 上的连续函数，所以可得：

$$\min(E) \sum_w s_w^{1-\alpha} \leq \sum_w E_w s_w^{1-\alpha} \leq \max(E) \sum_w s_w^{1-\alpha} \quad (6)$$

式中： $\min(E)$ 为 $h(E_i)$ 的最小值， $\max(E)$ 为 $h(E_i)$ 的最大值，由介值定理可知，存在 $E_\xi \in [\min(E), \max(E)]$ ，使得：

$$\sum_w E_w s_w^{1-\alpha} = E_\xi \sum_w s_w^{1-\alpha} \quad (7)$$

因而式(5)可简化为：

$$\frac{ds_i}{dt} = m(1+2\delta) \frac{E_i s_i^{1-\alpha}}{E_\xi \sum_w s_w^{1-\alpha}} \quad (8)$$

设初始网络半径为 r_0 ，新节点*i*在*t*时刻加入网络， r_t 为*t*时刻的网络半径，新节点*i*的通信半径为 r_n 。*t*时刻，新节点*i*的邻节点集的概率可由其覆盖范围与整个网络的面积之比 $\frac{1}{2}(r_n)^2/(r_t)^2$ 近似表示

$$\begin{aligned} \frac{ds_i}{dt} &= m(1+2\delta) \frac{(r_n)^2}{2(r_t)^2} \frac{E_i s_i^{1-\alpha}}{E_\xi N_t \left[\frac{1}{2}(r_n)^2/(r_t)^2 \right] (s)_i^{1-\alpha}} = \\ &m(1+2\delta) \frac{E_i s_i^{1-\alpha}}{E_\xi N_t (s)_i^{1-\alpha}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中： N_t 为*t*时刻网络节点总数， $N_t \left[\frac{1}{2}(r_n)^2/(r_t)^2 \right]$ 为*t*时刻新节点*i*的邻节点集*V*的大小， $\langle s \rangle_t$ 为*t*时刻网络中节点的平均强度。按照改进的择优步骤，网络运行到*t*时刻时，总结点数为 m_0+t ，总边数为 mt ，因此可得 $N_t = m_0+t$ 。

在每一个时间步的演化过程中，每增加一条新边会使总权值增加。则：

$$\sum_{i=1}^t s_i(t) \approx 2m(1+\delta)t \quad (10)$$

结合 $N_t = m_0+t$ ，可得：

$$\langle s \rangle_t = \frac{2m(1+\delta)t}{m_0+t} \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)中，可得：

$$\begin{aligned} \frac{ds_i}{dt} &= m(1+2\delta) \frac{E_i s_i^{1-\alpha}}{E_\xi (m_0+t) \left[\frac{2m(1+\delta)t}{m_0+t} \right]^{1-\alpha}} \approx \\ &f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha (1+\delta)^{\alpha-1} (1+2\delta) \frac{s_i^{1-\alpha}}{t} \end{aligned} \quad (12)$$

式中： $f(E_i, E_\xi) = \frac{E_i}{E_\xi}$ 。采用分离变量法解式(12)，可得：

$$\begin{aligned} s_i(t) &= \\ &\{ \alpha [f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha (1+\delta)^{\alpha-1} (1+2\delta) \ln t + C] \}^{1/\alpha} \end{aligned} \quad (13)$$

设 t_i 为节点*i*加入网络的时刻，结合初始条件

$s_i(t_i) = m$ 得:

$$s_i(t) =$$

$$\left[f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha \alpha (1 + \delta)^{\alpha-1} (1 + 2\delta) \ln \frac{t}{t_i} + m^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad (14)$$

则 $s_i(t)$ 小于 s 的节点概率 $P(s_i(t) < s)$ 为:

$$P(s_i(t) < s) = P(t_i > te^{\frac{m^\alpha - s^\alpha}{f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha \alpha (1 + \delta)^{\alpha-1} (1 + 2\delta)}}) \quad (15)$$

在相同的时间间隔,添加节点到网络中,于是 t_i 的概率分布 $P(t_i)$ 为:

$$P(t_i) = \frac{1}{n_0 + t} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)得:

$$P(t_i > te^{\frac{m^\alpha - s^\alpha}{f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha \alpha (1 + \delta)^{\alpha-1} (1 + 2\delta)}}) =$$

$$1 - \frac{t}{n_0 + t} \times e^{\frac{m^\alpha - s^\alpha}{f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha \alpha (1 + \delta)^{\alpha-1} (1 + 2\delta)}} \quad (17)$$

于是,节点权值的概率密度分布 $P(s)$ 为:

$$P(s) = \frac{\partial P(s_i < s)}{\partial s} =$$

$$\frac{\partial (1 - P(t_i \leq te^{\frac{m^\alpha - s^\alpha}{f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha \alpha (1 + \delta)^{\alpha-1} (1 + 2\delta)}}))}{\partial s} = \frac{t}{n_0 + t} \frac{1}{f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m (1 + \delta)^{\alpha-1} (1 + 2\delta)} \left(\frac{s}{m} \right)^{-(1-\alpha)} \times e^{\frac{m^\alpha - s^\alpha}{f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha \alpha (1 + \delta)^{\alpha-1} (1 + 2\delta)}} \quad (18)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时,得到最终的权值分布 $P(s) \propto s^{-\gamma}$ 的表达式为:

$$P(s) \approx$$

$$\frac{1}{f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m (1 + \delta)^{\alpha-1} (1 + 2\delta)} \left(\frac{s}{m} \right)^{-(1-\alpha)} \times e^{\frac{m^\alpha - s^\alpha}{f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha \alpha (1 + \delta)^{\alpha-1} (1 + 2\delta)}} \quad (19)$$

点权的分布规律可从式(19)获得,分析得,式(19)为幂指函数,则本模型的点权分布也为幂律分布,且指数为 $\gamma = 1 - \alpha$ 。由于得到的结果与 p 没有关系,所以三角结构的引入并没有破坏网络的无标度特性,而三角结构增强了网络中节点的聚集程度,提升了网络抵抗外界攻击的能力。同时,从式(19)中可以看出节点剩余能量和负载调节系数两者同时影响拓扑的分布规律。因此,拓扑演化过程中,能量和负载可以通过调节参数 α 来实现均衡,从而改善节点因负载过大而能量耗尽的现象。

3.2 节点度特性研究

根据连续场理论的概念,节点度 k_i 被假定为随着时间而连续变化,因此, k_i 的动态演化过程如下:

$$\frac{dk_i}{dt} = [(m - 1)p + 1] \frac{As_i(t)}{\sum_w As_w(t)} + (m - 1)(1 - p) \sum_{l \in V(t)} \frac{As_l(t)}{\sum_w As_w(t)} \frac{w_{il}(t)}{s_l(t)} =$$

$$m \frac{As_i(t)}{\sum_w As_w(t)} = m \frac{E_i s_i^{1-\alpha}}{\sum_w E_w s_w^{1-\alpha}} \quad (20)$$

结合式(7)得:

$$\frac{dk_i}{dt} = m \frac{(r_n)^2}{2(r_i)^2} \frac{E_i s_i^{1-\alpha}}{E_\xi N_i \left[\frac{1}{2} (r_n)^2 / (r_i)^2 \right] \langle s \rangle_i^{1-\alpha}} =$$

$$m \frac{E_i s_i^{1-\alpha}}{E_\xi N_i \langle s \rangle_i^{1-\alpha}} = \frac{mf(E_i, E_\xi) s_i^{1-\alpha}}{N_i \langle s \rangle_i^{1-\alpha}} \quad (21)$$

将式(11)代入式(19)得:

$$\frac{dk_i}{dt} = f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha (1 + \delta)^{\alpha-1} \frac{s_i^{1-\alpha}(t)}{t} \quad (22)$$

由初始条件 $k_i(t_i) = m$,并结合式(14),可得:

$$k_i(t) = \frac{s_i(t) + 2m\delta}{1 + 2\delta} \quad (23)$$

即:

$$s_i = (1 + 2\delta) k_i - 2m\delta \quad (24)$$

由式(24)可以看出 k_i 与 s_i 呈正比例函数关系,即 k_i 的度分布 $P(k) \propto k^{-\gamma}$ 与 s_i 的权值分布 $P(s) \propto s^{-\gamma}$ 趋势相同,由此可知度分布的幂率指数与点权分布的幂率指数相等,即 $\gamma = 1 - \alpha$ 。最终,节点度的分布规律也可获得。

4 实验分析

4.1 仿真分析

本节利用 MATLAB 对网络的集聚系数以及度分布、权值分布进行仿真,此外,还对 BBV、GBBV 和 HCEB 模型进行仿真实验,最终对 3 个模型的能耗均衡和容错性能进行对比分析。为了实验结果的准确性,采用相同规模的初始网络,均由 m_0 ($m_0 = 3$) 个全连通的节点组成。并且取 100 次实验结果的平均值作为最终值,试验中,设 $\delta = 1$ 。实验中使用的参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	取值
节点数 N /个	100
节点分布区域 A/m^2	200 × 200
节点最大传输半径 d_{max}/m	50
初始能量 E_0/J	1
数据融合能耗 $E_{elec}/(J \cdot bit^{-1})$	50 × 10 ⁻⁹
放大器功耗 $\epsilon_{amp}/(J \cdot bit^{-1} \cdot m^{-2})$	100 × 10 ⁻¹²
节点产生的数据包 L/bit	100

4.1.1 概率 p 与网络平均集聚系数的关系

图 2 所示为概率 p 取不同值时,平均集聚系数 $C(k)$ 与度 k 的相关性曲线。

从图 2 可以看出平均集聚系数 $C(k)$ 服从网络节点

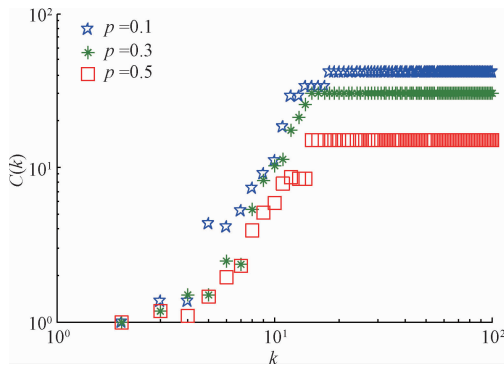


图2 参数 p 不同时 $C(k)$ 与 k 的关系曲线
Fig. 2 The relationship curve between $C(k)$ and k under different p

度的幂律分布,即 $C(k) \propto k^{\gamma_c}$ 。集聚系数随节点度的增大呈上升趋势。即随着参数 p 的减小 ($1-p$ 的增大),网络中三角结构的比例增大,进而影响网络平均集聚系数增大。当网络的集聚系数过大时,网络拓扑过于均匀,网络的容错性较差;当网络的集聚系数过小时,网络相当不均匀,面对蓄意攻击时,网络的抗攻击能力较弱。因此,本文采取 $p = 0.3$ ($1-p = 0.7$)。

4.1.2 模型的节点度分布和点权分布分析

图3所示为 $p = 0.3$ 时 HCEB 演化的拓扑结构。首先 100 个节点被随机布撒在 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的区域内,初始网络由 3 个两两相连的节点组成,每当有新节点加入,则该新节点分别与网络中已存在的两个不同的节点相连接,即 $m = 2$ 。图3节点旁边的数字代表节点当前的编号。

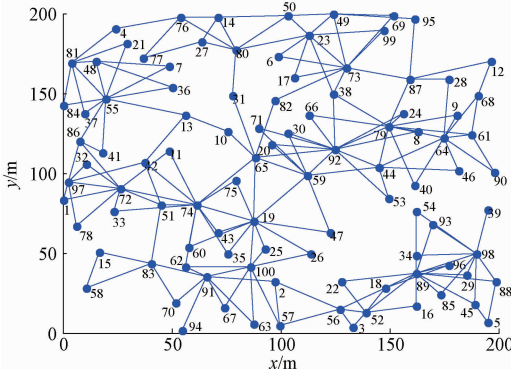


图3 HCEB 拓扑图
Fig. 3 HCEB topology

分析图3可得,整个拓扑由少量高节点度的重要节点和大量低节点度的普通节点组成,这一现象说明本文拓扑符合无标度特性。同时,可以看出拓扑中多数节点都能组成三角结构,提升了网络的集聚系数。

图4所示为当 $p = 0.3, \alpha = 0.6$ 时的度分布和点权

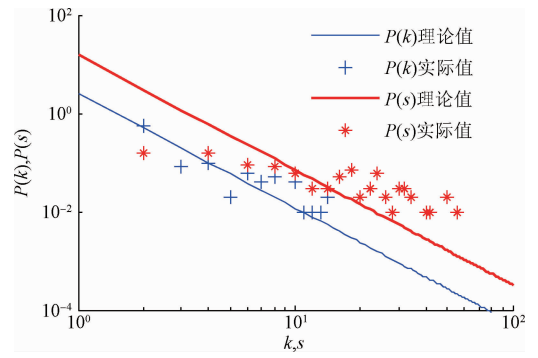


图4 度分布和点权分布
Fig. 4 Distributions of degree and strength

分布。仿真显示,HCEB 模型的度分布和点权分布均服从幂律分布,同时,可以看出度分布和点权分布十分相似,验证了上文理论推导出的点权和度分布函数呈线性关系。

4.1.3 容错性分析

为了衡量本文模型的容错能力,采用随机移除法将 HCEB 模型与 BBV 和 GBBV 进行对比。对比结果如图5所示。

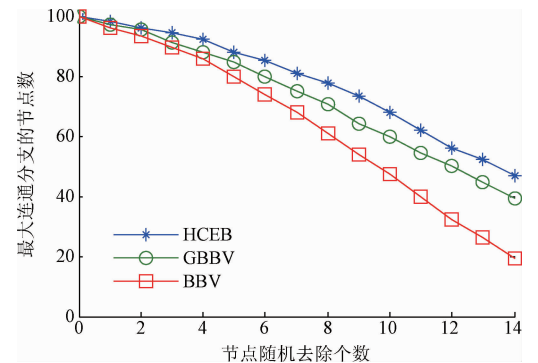


图5 容错性能对比
Fig. 5 Comparison offault tolerance performance

由图5可知,HCEB 较 BBV 及 GBBV 表现出最强的容错性。还可以看出,网络中 14 个节点随机移除时,仍然有多于 1/3 的节点处于活跃状态,这也就从另一个角度表明本文模型的强容错特性。这是由于 HCEB 在择优连接时考虑了能量和负载的因素,更好地均衡了网络的能量和负载。

4.1.4 能耗均衡性分析

本节利用节点能量消耗率来衡量节点的能耗,即网络中全部节点的率值分布越平均,说明模型的能耗越均衡。其中,本文以节点能量与点权值之比作为能量消耗率的值。BBV、GBBV 和 HCEB 的能耗对比如图6所示。

由图6可知,3种拓扑运行 100 轮后,HCEB 的能量消耗率最平稳,BBV 的节点能量消耗率波动最大,GBBV

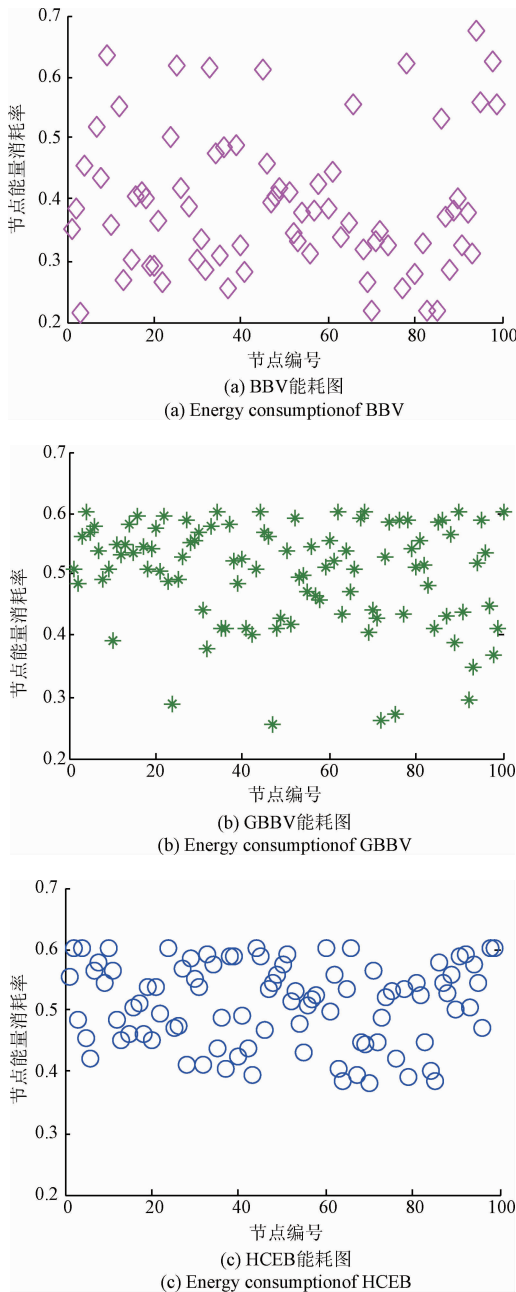


图6 节点能量消耗率对比图

Fig. 6 Comparison of node energy consumption rate

次之。这是由于,当 $\delta = 1$ 时, BBV 和 GBBV 的幂率指数为 2.33, 网络均没有 HCEB 均匀, 因此能量消耗率波动较大。HCEB 的节点能量消耗率值基本维持在 0.35 ~ 0.61, 性能表现最好。这是因为 HCEB 拓扑引入了三角结构同时在择优连接时考虑了节点剩余能量, 均衡了节点的能量消耗, 最终更好地均衡了整个网络的能耗。

4.2 实验验证

采用 GAINZ 实验开发平台对 HCEB 的能耗性能进行试验测试。GAINZ 测试平台(见图 7)包括 7 个 IOT-

NODE2530 节点、sink 节点和一台 PC 机三部分。实验测试中, sink 节点的 ID 标记为 0, 6 个 IOT-NODE2530 节点的 ID 分别标记为 1、2、3、4、5、6。其中, 假设 sink 节点由通过直流设备供电。6 个普通节点使用 2 节长效锂电池 (4 000 mAh) 供电。

HCEB 拓扑的组网流程为先打开 3 个 IOT-NODE2530 节点进行网络初始化, 构建初始拓扑, 随后每打开一个节点, 该节点和网络中已存在节点按照 HCEB 机制的偏好依附原则进行有选择的连接, 最终由 7 个节点所构建的 HCEB 拓扑结构经 SNAMP 显示, 如图 8 所示。其中, 网络中其他节点的数据最终都汇聚到 0 号节点(即 sink 节点)。

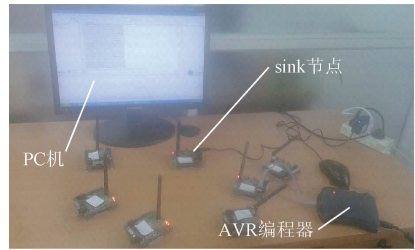


图7 实测系统

Fig. 7 Measurementsystemis

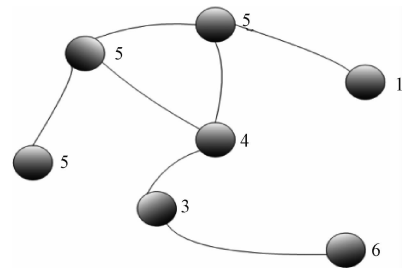


图8 HCEB 拓扑图

Fig. 8 HCEB topology

在图 8 形成的网络模型中, 节点间通过多跳方式进行通信, 数据最终转发到 sink 节点。PC 机运行监控软件, 接收并显示数据。通过使用 PowerTOSSIM 工具得出网络节点的能量消耗情况。一般情况下, 数据采集所消耗的功率不进行计算。实验场景中, 节点的微控制单元不设计休眠模式, 不添加外部设备, 不使用 EEPROM 以及 ADC 等设备, 仅进行微控制单元活动和射频收发活动。网络运行 1 d 后各节点的能量消耗如表 2 所示。

表 2 中, RF 为射频收发消耗的电量, LEDs 为 LED 灯循环发光消耗的电量。从表 2 中可以看出, 2 号和 4 号节点的 RF 值最大, 为 185.4。由于 2 号和 4 号节点的节点度较大, 所承担的负载也较大, 导致能量消耗总值 TOTAL 最高。但是从整体角度分析, 表中 TOTAL 的最大差值仅为 83.48, 因此可以得出网络中节点的能耗分布均匀。

表2 网络运行1 d后节点的能量消耗情况

Table 2 The energy consumption of nodes after network operates 1 d

ID	CPU	RF	ADC	LEDs	SENSOR	EEPROM	TOTAL
1	184.8	74.92	0	64.8	0	0	324.52
2	184.8	185.4	0	64.8	0	0	408
3	184.8	112.64	0	64.8	0	0	362.24
4	184.8	185.4	0	64.8	0	0	408
5	184.8	74.92	0	64.8	0	0	324.52
6	184.8	74.92	0	64.8	0	0	324.52

表3所示为网络运行5、10、15 d后,各个节点的剩余电量情况。由表3可知,网络所有节点的剩余电量随着时间的增长而呈递减趋势。由于2号节点和4号节点的度数大,15 d后的剩余电量略低于其他节点,但整体的能量消耗率均在4%~5%,上下幅度不超过1%。因此,可以得出网络中各节点之间的能量消耗相对均匀,避免了单个节点能量消耗过快而导致网络瘫痪的情况。

表3 网络运行相应阶段后的节点剩余电量

Table 3 The residual capacity of nodes in the corresponding stage of network operation

ID	能量			
	5 d后	10 d后	15 d后	日消耗率/%
1	6 377.4	4 791	3 126.2	4.06
2	5 960	4 195.2	2 024	4.98
3	6 188.8	4 605.2	2 598.6	4.50
4	5 960	4 195.2	2 024	4.06
5	6 377.4	4 791	3 126.2	4.06
6	6 377.4	4 791	3 126.2	4.06

5 结 论

本文基于BBV模型构造了一种局域范围内的HCEB,该模型采用三角连接和随机连接两种形式更新边权,建立了节点能量与点权的关系。仿真结果显示,网络保持了无标度网络随机失效良好的容忍能力,同时,剩余能量和负载调节系数的引入使高能量节点和负载量小的节点拥有更大的连接概率,解决了网络的能耗不均的问题,延长了网络的生命周期。

参考文献

- [1] 刘洲洲,张雷雷. 混合型无线传感器网络覆盖空洞修复算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7): 1090-1097.
LIU ZH ZH, ZHANG L L. WSN network coverage

scheme based on SA-PSO algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(7): 1090-1097.

- [2] TONG X J, WANG Z, ZUO K. A novel block encryption scheme based on chaos and an S-box for wireless sensor networks[J]. Chinese Physica B, 2012, 21(2): 020506(1)-020506(12).
- [3] ERDÖS P, RÉNYI A. On random graphs [J]. Publicationes Mathematicae, 1959, 6: 290-297.
- [4] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of "small-world" networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [5] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [6] 王丹,井元伟,郝彬彬. 扩展HK网络结构与同步能力的研究[J]. 物理学报, 2012, 61(22): 220511(1)-220511(8).
WANG D, JING Y W, HAO B B. Extended Holme-Kim network model and synchronizability [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(22): 220511(1)-220511(8).
- [7] 韩丽,刘彬,刘浩然,等. 基于圆环划分的能耗均衡WSNs拓扑控制研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1161-1168.
HAN L, LIU B, LIU H R, et al. The study of topology control with energy consumption balance in wireless sensor networks based on circular ring partition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1161-1168.
- [8] 刘洲洲,王福豹. 能量有效的无线传感器网络无标度拓扑模型[J]. 北京邮电大学学报, 2015, 38(1): 87-91.
LIU ZH ZH, WANG F B. Scale-free topology for wireless sensor networks with energy efficient characteristics [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015, 38(1): 87-91.
- [9] 刘浩然,尹文晓,韩涛,等. 一种优化无线传感器网络

- 生命周期的容错拓扑研究[J]. 物理学报, 2014, 63(4): 80-86.
- LIU H R, YIN W X, HAN T, et al. Wireless sensor network fault tolerant topology for lifetime optimization[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(4): 80-86.
- [10] 潘灶烽,汪小帆. 一种可大范围调节聚类系数的加权无标度网络模型[J]. 物理学报, 2006, 55(8): 4058-4064.
- PAN ZH F, WANG X F. A weighted scale-free network model with large-scale tunable clustering [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(8): 4058-4064.
- [11] BARRAT A, BARTHÉLEMY M, VESPIGNANI A. Modeling the evolution of weighted networks [J]. Physical Review E, 2004, 70(6): 066149(1)-066149(12).
- [12] 张德干,戴文博,牛庆肖. 基于局域世界的 WSN 拓扑加权演化模型[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1000-1004.
- ZHANG D G, DAI W B, NIU Q X. Local-world weighted topology evolving model for wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica 2012, 40(5): 1000-1004.
- [13] 王丹,郝彬彬. 一类高聚类系数的加权无标度网络及其同步能力分析[J]. 物理学报, 2013, 62(22): 69-76.
- WANG D, HAO B B. A weighted scale-free network model with high clustering and its synchronizability [J]. Acta Physica Sinica, Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 2013, 62(22): 69-76.
- [14] HOLME P, KIM B J, YOON C N, et al. Attack vulnerability of complex networks [J]. Physical Review E, 2002, 65(5): 634.
- [15] BARABÁSI ALBERT R, JEONG H. Mean-field theory for scale-free random networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 1999, 272(1-2): 173-187.

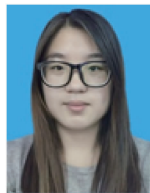
作者简介



刘彬,分别在1982年和1987年于燕山大学获得学士和硕士学位,2009年于河北工业大学获得博士学位,现为燕山大学教授、博士生导师,主要研究方向为智能传感及无线传感器网络关键技术、智能控制技术及在水泥生产中的应用。

E-mail: liubin@ysu.edu.cn

Liu Bin received his B. Sc. and M. Sc. degrees from Yanshan University in 1982 and 1987, respectively, received his Ph. D. degree from Hebei University of Technology in 2009. Now is a professor in Yanshan University. His main research interests include intelligent sensing, the key technologies of wireless sensor network, intelligent control technology and its application in cement production.



邓玉静(通讯作者),2014年于邢台学院获得学士学位,现为燕山大学博士生,主要研究方向为无线传感器网络拓扑控制。

E-mail: 15033500781@163.com

Deng Yujing (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 2014 from Xingtai University. Now she is a Ph. D candidate in Yanshan University. Her main research interests include wireless sensor network topology control.