

能量异构的无线传感器网络加权无标度拓扑研究*

韩丽¹⁾²⁾ 刘彬^{1)2)†} 李雅倩¹⁾²⁾ 赵磊静¹⁾

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)

(2014年3月18日收到; 2014年4月10日收到修改稿)

针对无线传感器网络节点能耗不均和如何高效获得节点和边的负载问题, 提出一种局域范围内能量异构的加权无标度拓扑演化模型. 通过对节点能量与负载、能耗的关系建模, 建立节点能量与点权和边权的联系, 进而结合点权和加权模型给出网络的演化方式, 推出点权、度和边权的幂率分布规律, 最终根据网络获得的点权和边权来分析负载和能耗. 仿真结果表明, 提出的模型不仅能够准确计算点边的负载, 而且缓解了无标度网络的节点能耗不均衡问题.

关键词: 无线传感器网络, 加权, 能耗均衡, 负载

PACS: 05.65.+b, 05.70.Np, 02.50.Le

DOI: 10.7498/aps.63.150504

1 引言

能量异构的无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSNs) 是由初始能量按照特定分布规律的传感器节点构成的网络^[1,2], 它在均衡 WSNs 能耗的应用中起到重要的作用. 受恶劣环境影响, 无线传感器节点容易遭受破坏而失效^[3,4], 而无标度网络 (barabasi-albert, BA) 是一种度分布遵循幂率分布特性的网络^[5], 对节点的随机失效具有较强的容忍能力. 但是, 由于 WSNs 是一个由大量能量受限的传感器节点组成的网络, 能量耗尽和恶劣环境易导致节点失效, 此外, 节点需要经由多跳将数据信息传输到基站, 因此, 节点的负载会直接影响节点的能耗速率. 因此, 如何在无标度的基础上构建兼具能耗均衡和标示点边负载的无线传感器网络, 成为 WSNs 研究中面临的重要问题.

为了解决能耗不均衡问题, 文献[6]利用节点的剩余能量作为适应度函数, 建立能量感知的无标度模型 (energy-aware evolution model, EAEM), 增加高能节点被优先连接的概率, 在保证网络容错

的基础上, 有效均衡了节点的能耗. 文献[7—9]采用能量异构方式构建无标度拓扑, 在提升节点对随机失效容忍能力的同时, 考虑了节点的能量耗尽. 但是, 上述方法没有涉及到点边的负载问题, 负载可以衡量节点的承受能力, 保证网络的传输效率. 目前, 负载的获得多通过构建加权拓扑, 将点权或边权等价于负载进行研究. 基于此, 文献[10, 11]构建了基于点的加权模型, 文献[12]构建了基于边的加权模型, 通过权值来分析节点或边的负载, 但是这几篇文献只是单一考虑到点权或边权. 为了兼顾两者, 考虑到节点之间存在连接强度的问题, 文献[13]提出一个应用于无标度网络的加权演化模型 (barrat barthélemy vespignani, BBV), 在该模型中, 不仅节点的度满足幂率分布, 节点的权值及边的权值也同样满足幂率分布. 在BBV模型的基础上, 文献[14]将点权和边权作为参数进行模型演化, 在网络构建完成的同时即可获得节点和边的权值, 进一步可通过点边的权值研究点边的负载. 文献[15]扩展了BBV的应用范围, 提出基于局域范围的BBV模型, 使之适用于节点能量受限的无线传感器网络. 文献[16—18]研究了拓扑结构和权值

* 河北省自然科学基金 (批准号: F2014203239) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: liubin@ysu.edu.cn

不断演化的加权网络模型, 增强了网络结构的稳定性和均衡了权值的分布. 但是, 上述所有方法都没能兼顾考虑网络的容错性、能耗均衡和点边负载问题, 在最大化网络性能上仍存在局限性.

针对以上问题, 本文借助BBV模型提出了一种局域范围内能量异构的加权拓扑模型 (Energy Heterogeneous BBV, EH-BBV), 建立节点能量与点边权值的关系, 并给出EH-BBV模型的点权、度和边权的分布规律, 进而揭示点边权值对负载和能耗的影响关系, 构建EH-BBV拓扑, 达到利于网络负载分析和延长网络寿命的目的.

2 EH-BBV模型

本节利用节点的点权和边权同时结合无线传感器网络的节点能量有限的特性, 对点边权值与点边负载、节点能耗之间的关系进行数学建模, 给出衡量网络负载和能耗的标准. 进而将能量融入到点边权值的演化机理中, 构建具有能耗均衡特征的EH-BBV模型.

2.1 点边负载建模

一个节点的负载 Loadn_i 可由两个方面来衡量: 一个是节点在局域环境内的负载, 一个是节点位置负载. 局域环境内的节点负载可等价于该节点的点权 s_i , 因为, 由BBV模型的网络演化特性可知, 节点的权值越大, 则传输量越大. 而节点位置负载则可由实际的无线传感器网络特性来确定, 由于远离基站的节点必须通过近距离的节点才能将数据传输到基站, 因此, 距离基站越近的节点负载量越大, 则节点的位置负载 s'_i 与节点到基站的距离有关, 可用如下公式表示:

$$s'_i = \frac{s_i}{d_{is}}, \quad (1)$$

其中, d_{is} 表示节点到基站的最短路径长度.

节点负载 Loadn_i 受 s_i 和 s'_i 共同作用, 可表示为

$$\text{Loadn}_i = s_i + \eta \cdot s'_i, \quad (2)$$

其中, η 为调节因子. 和基站距离越短, 负载越大. 节点负载不仅考虑了节点在局域范围内的负载, 还考虑了节点在全局范围的负载, 考虑的更加全面, 更加符合实际环境.

边负载 Loade_{ij} 同样需要考虑边自身的负载和边的位置负载, 同理, 边自身的负载可等价于边权 w_{ij} , 位置负载可用边的两个端点的负载来计算, 如下公式所示:

$$\text{Loade}_{ij} = \xi w_{ij} + \frac{\text{Loadn}_i \times \text{Loadn}_j}{\text{Loadn}_i + \text{Loadn}_j}, \quad (3)$$

其中, ξ 为调整因子, 从(3)式可以得出, 某条边的两个端点的负载和该边的边权越大, 则该边的负载越大, 边负载大意味着该边上的传输量大, 容易阻塞, 在路径选择中应该尽量避免边负载大的链路.

2.2 节点能耗建模

能量异构无线传感器网络中, 传感器节点的能量有限, 能量的耗尽成为导致节点失效的主要原因. 为此, 下面利用节点的点边权值对节点的能量消耗进行数学建模, 得到衡量网络能耗均衡的指标.

网络的能耗可由节点的能量消耗率来衡量, 传统的节点 i 的能量消耗率 EC_i 表示为

$$\text{EC}_i = \frac{e_i}{\text{Loadn}_i}, \quad (4)$$

其中, e_i 为节点的初始能量, Loadn_i 为节点 i 的负载, 结合(2)式中节点负载的计算, 可得到节点能量消耗率的最终表达式为

$$\text{EC}_i = \frac{e_i}{s_i + \eta \cdot s'_i}. \quad (5)$$

从(5)式中可以得出, 从局部来看, 节点的 EC_i 越大表示该节点的能量消耗速度越慢, 从整体来看, 网络中节点的能量消耗率越均衡, 网络的稳定性越强, 网络的生命期越长.

2.3 EH-BBV建模

BBV模型的点权、度和边权分布都服从幂率分布, 保证了对随机失效的容忍能力, 但是, 当BBV应用到无线传感器网络中, 还要考虑节点的能量有限以及局域范围的环境特征. 本节将综合考虑以上方面构建符合WSNs环境特征的能量异构BBV模型EH-BBV, 在点边权值的构建过程中加入能量因子. 在建模前, 给出文中用到的关于边来源节点的定义.

定义 边来源节点: 当一个新节点 n_{new} 加入网络后, 带来 m 条边, 则节点 n_{new} 为这 m 条边的来源节点.

借助BBV模型,给出点权的表达式为

$$s_i = \sum_{j \in N_i} w_{ij}, \quad (6)$$

其中, s_i 为节点 i 的点权, N_i 为节点 i 的邻居个数, w_{ij} 为节点 i 和 j 之间的边权, 且 $w_{ij} = w_{ji}$, 当 i 和 j 之间无连接时则 $w_{ij} = 0$, 初始 w_{ij} 与节点能量有关.

网络中节点能量 e_i 的分布服从 $\rho(e_i)$ 函数分布, 符合能量异构网络特点, 将能量与边权建立联系, 由于点权为边权和, 使得能量对点权产生影响, 进而影响网络的增长过程. EH-BBV模型借助BBV模型的演化机理, 构建局域范围内的无标度模型, 主要包含两个步骤: 增长方式和权值演化.

1) 增长: 初始网络是包含 m_0 个节点的全连通网络, 节点之间的边权的初始值 w_{m_0} 设置为 m_0 个节点的初始能量, 每个时间间隔加入一个新节点 n_{new} , 将新节点的 M 个一跳邻节点作为新节点的局域范围 $M (M \geq m_0)$, 新节点与 M 内已经存在的 $m (\leq m_0)$ 个节点相连, M 中节点 i 被选中与 n_{new} 相连的概率与 i 的点权成正比, 择优连接概率为

$$\prod_{n_{\text{new}} \rightarrow i} = \frac{M}{N_t} \frac{s_i}{\sum_{j \in M} s_j}, \quad (7)$$

其中, N_t 表示 t 时刻网络中的节点总数, 节点 $i, j \in M$.

2) 权值演化: 新加入的边的权值初始设为 $w_{n_{\text{new}}}$, $w_{n_{\text{new}}} = e_{n_{\text{new}}}$, 新边 $e_{n_{\text{new}}}$ 的加入会导致节点 i 与其邻居节点 j 之间的边权重新分配, 调整规则如下:

$$w_{ij} \rightarrow w_{ij} + \Delta w_{ij}, \quad (8)$$

其中, Δw_{ij} 与 w_{ij} 和节点 i 的权值 s_i 相关, 设

$$\Delta w_{ij} = \delta_i \frac{w_{ij}}{s_i}, \quad (9)$$

其中, 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 $\delta_i = \delta = 1$). 进而可得 i 的点权调整为

$$s_i \rightarrow s_i + \delta_i + e_{n_{\text{new}}}. \quad (10)$$

当权值更新过后, 进入下一个时间轮, 直到网络构建结束. EH-BBV模型权值演化规则如图1所示.

以上为EH-BBV的建模过程, 从边权的初始值设置中建立了边权与能量的关系, 进一步结合(1)式建立了点权与能量的关系, 将点权作为择优连接

的主要参数, 使得能量影响到模型的演化方式, 从图1的点边权值演化规则中可得, 能量因子将贯穿网络的整个演化过程, 影响到点权和边权的分布规律, 因此可通过控制节点的能量分布, 可以控制网络的演化特性, 下面将具体分析能量与点边权值的关系.

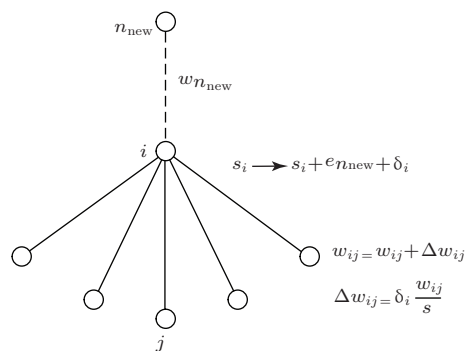


图1 EH-BBV权值演化规则图

3 EH-BBV模型演化动态特性研究

本节将对上节构建的模型的演化特性进行分析, 分别给出演化模型EH-BBV的点权、度和边权的分布函数表达式, 以量化该演化拓扑结构, 分析能量分布函数对网络能耗均衡的影响. 设新节点 n_{new} 在 t 时刻加入网络, $r_{n_{\text{new}}}$ 为新节点 n_{new} 的传输半径, r_0 为初始网络半径, r_t 为 t 时刻的网络半径.

3.1 点权特性研究

当有新的节点 n_{new} 加入网络后, 对于加权网络中的节点 i 来说, 可能会受到两方面的影响: n_{new} 根据概率选择与 i 直接相连, 则 i 的度增加1, 权值增加 $e_{n_{\text{new}}} + \delta$; n_{new} 选择与 i 的一个邻居 j 相连, w_{ij} 会根据计算公式进行调整, 同时, 节点 i 的权值 s_i 增加 $\delta w_{ij}/s_j$. 选择新节点 x 的邻节点集 $\sum_{j \in M}$ 的概率可由阴影区域与整个网络区域的面积比 $[(r_{n_{\text{new}}})^2/2]/r_t^2$ 来近似计算, 借助连续场理论, 假设节点度 s_i 是连续变化的, 则 s_i 的动态演化过程如下所示:

$$\begin{aligned} \frac{ds_i}{dt} = & m \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \frac{s_i(t)}{\sum_l s_l(t)} (e_{n_{\text{new}}} + \delta) \\ & + \sum_{j \in v(i)} m \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \frac{s_j(t)}{\sum_l s_l(t)} \delta \frac{w_{ij}(t)}{s_j(t)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= m \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \frac{s_i(t)}{N_t \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \langle s_l(t) \rangle} (e_{n_{\text{new}}} + \delta) \\
 &\quad + \sum_{j \in v(i)} m \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \\
 &\quad \times \frac{s_j(t)}{N_t \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \langle s_l(t) \rangle} \delta \frac{w_{ij}(t)}{s_j(t)} \\
 &= \frac{ms_i(t)}{N_t \langle s_l(t) \rangle} (e_{n_{\text{new}}} + \delta) + \sum_{j \in v(i)} \frac{m\delta w_{ij}(t)}{N_t \langle s_l(t) \rangle} \\
 &= \frac{ms_i(t)}{N_t \langle s_l(t) \rangle} (e_{n_{\text{new}}} + \delta) + \frac{m\delta s_i(t)}{N_t \langle s_l(t) \rangle}, \quad (11)
 \end{aligned}$$

其中, l 为局域世界 M 内的节点, $v(i)$ 为节点 i 的邻居集, N_t 为 t 时刻网络中的节点总数, $N_t \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2}$ 为 t 时刻新节点 n_{new} 的邻节点集 $\sum_{j \in M}$ 大小, $\langle s_l(t) \rangle$ 为 t 时刻网络中节点的平均权值. 根据改进的择优增长过程, t 时刻演化出一个具有 $m_0 + t$ 个节点, mt 条边的网络拓扑, 故 $N_t = m_0 + t$. 公式的前一部分表示新节点 n_{new} 直接与 i 节点相连的点权动态变化, 第二部分表示 n_{new} 与 i 的一个邻居 j 相连的点权动态变化.

在每一个时间步的演化过程中, 每增加一个新边会使总权值增加 $2(e_{n_{\text{new}}} + \delta)$. 则可得

$$\sum_{i=1}^t s_i(t) \approx 2m(e' + \delta)t, \quad (12)$$

其中, e' 为节点能量分布的期望值, 假设 $e_{n_{\text{new}}} \approx e'$, 并结合 $N_t = m_0 + t$, 可得

$$\langle s_i(t) \rangle = \frac{2m(e' + \delta)t}{m_0 + t}. \quad (13)$$

将 (12), (13) 式代入 (11) 式中, 可得

$$\frac{ds_i}{dt} = \frac{e' + 2\delta}{2(e' + \delta)} \frac{s_i(t)}{t}. \quad (14)$$

由初始条件 $s_i(t=i) = e'm$ 可得

$$s_i(t) = e'm \left(\frac{t}{i} \right)^{\frac{e' + 2\delta}{2(e' + \delta)}}. \quad (15)$$

则 $s_i(t)$ 小于 s ($s \leq S$) 的节点概率 $P(s_i(t) < s)$ 为

$$\begin{aligned}
 &P(s_i(t) < s) \\
 &= P \left(t_i > t \left(\frac{e'm}{s} \right)^{\frac{2(e' + \delta)}{e' + 2\delta}} \right). \quad (16)
 \end{aligned}$$

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

$$P(t_i) = \frac{1}{n_0 + t}. \quad (17)$$

代入上式可得

$$\begin{aligned}
 &P \left(t_i > t \left(\frac{e'm}{s} \right)^{\frac{2(e' + \delta)}{e' + 2\delta}} \right) \\
 &= 1 - \frac{t}{t + n_0} \left(\frac{e'm}{s} \right)^{\frac{2(e' + \delta)}{e' + 2\delta}}. \quad (18)
 \end{aligned}$$

于是, 节点权值的概率密度分布 $P(s)$ 为

$$\begin{aligned}
 P(s) &= \frac{\partial P(s_i < s)}{\partial s} \\
 &= \frac{t}{t + n_0} (e'm)^{\frac{2(e' + \delta)}{e' + 2\delta}} \frac{1}{s^{\frac{2(e' + \delta)}{e' + 2\delta} + 1}}. \quad (19)
 \end{aligned}$$

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

$$P(s) \approx (e'm)^{\frac{2(e' + \delta)}{e' + 2\delta}} \frac{1}{s^{\frac{2(e' + \delta)}{e' + 2\delta} + 1}}. \quad (20)$$

上式给出了点权的分布规律, 当 t 足够大时, 该网络模型的点权分布为幂率分布, 分布指数为 $\gamma = 1 + \frac{2(e' + \delta)}{e' + 2\delta} = 2 + \frac{e'}{e' + 2\delta}$. 当 $\delta = 1$ 时, $\gamma = 2 + \frac{e'}{e' + 2}$, 幂率指数在 (1, 3) 之间. 由 (20) 式可得, EH-BBV 拓扑的度分布取决于节点初始能量和调节因子 δ . 在拓扑构建时, 可通过设置节点初始能量分布函数和参数 δ 来实现拓扑的能耗均衡.

3.2 节点度特性研究

借助连续场理论, 假设节点度 k_i 是随时间连续变化的, 则可得 k_i 的动态演化过程为

$$\begin{aligned}
 \frac{dk_i}{dt} &= m \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \frac{s_i(t)}{\sum_{\text{local}} s_l(t)} \\
 &= m \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \frac{s_i(t)}{N_t \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \langle s_l(t) \rangle} \\
 &= \frac{ms_i(t)}{N_t \langle s_l(t) \rangle}. \quad (21)
 \end{aligned}$$

结合 (13) 式, 可得

$$\frac{dk_i}{dt} = \frac{s_i(t)}{2(e' + \delta)t}. \quad (22)$$

由初始条件 $k_i(t=i) = m$, 并结合 (15) 式, 可得

$$k_i(t) = \frac{s_i(t) + 2m\delta}{e' + 2\delta}. \quad (23)$$

即

$$s_i = (e' + 2\delta)k_i - 2m\delta. \quad (24)$$

由(24)式可得 k_i 与 s_i 为线性关系,因此, k_i 的度分布 $P(k) \propto k^{-\gamma}$ 与 $P(s) \propto s^{-\gamma}$ 是平行关系,则度分布的幂率指数等于点权分布的幂率指数,即 $\gamma = 2 + \frac{e'}{e' + 2\delta}$,因此,得出了节点度的分布规律.

3.3 边权特性研究

w_{ij} 的演化机理与 $s_i(t)$ 和 $k_i(t)$ 相似,同样采用连续场理论,可得出边权 w_{ij} 随时间的演化速率为

$$\begin{aligned} \frac{dw_{ij}}{dt} &= m \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \frac{s_i}{\sum_l s_l} \delta \frac{w_{ij}}{s_i} \\ &\quad + m \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \frac{s_j}{\sum_l s_l} \delta \frac{w_{ij}}{s_j} \\ &= m \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \frac{s_i}{N_t \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \langle s_l \rangle} \delta \frac{w_{ij}}{s_i} \\ &\quad + m \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \frac{s_j}{N_t \frac{(r_{n_{\text{new}}})^2/2}{r_t^2} \langle s_l \rangle} \delta \frac{w_{ij}}{s_j} \\ &= \frac{\delta}{e' + \delta} \frac{w_{ij}}{t}. \end{aligned} \quad (25)$$

结合初始情况 $w_{ij}(t_{ij}) = e'$,可得边权重分布的幂率指数为

$$w_{ij}(t) = e' \left(\frac{t}{t_{ij}} \right)^{\frac{\delta}{e' + \delta}}. \quad (26)$$

进一步可得边权分布函数 $P(w)$ 的表达式为

$$P(w) \approx (e')^{\frac{e' + \delta}{\delta}} \frac{1}{w^{\frac{e' + \delta}{\delta} + 1}}. \quad (27)$$

从(27)式中可以得出边权的分布规律,其中,设边权的幂率指数为 α ,则 $\alpha = (e' + \delta)/\delta + 1 = 2 + e'/\delta$,可得边权的幂率指数与能量分布函数和调节因子 δ 相关,在构建拓扑过程中,可以通过调节能量分布函数和参数 δ 实现边负载的均衡,从而避免链路拥塞.

4 实验分析

为了更好的反映EH-BBV模型对点边重要性的判断以及均衡节点能耗的特点,本节对网络中度、点权、边权的分布规律进行仿真模拟,此外,还将使用MATLAB工具实现无标度网络BA、动态

加权BBV、具有能耗均衡特点的EAEM以及EH-BBV拓扑,并比较所得拓扑的能耗均衡和容错能力.在仿真实验中,为了更好地体现演化参数 e' 和 δ 对网络性能的影响,模型中采用了相同的初始网络规模 m_0 ,其中,为了实验结果的准确性,分别取100次实验的平均值作为实验结果.实验中使用的参数见表1.

表1 实验参数

参数名	取值
发射/接收电路损耗 $E_{\text{elec}}/(\text{J/bit})$	50×10^{-9}
放大电路损耗 $E_{\text{amp}}/(\text{J/bit} \cdot \text{m}^2)$	100×10^{-12}
数据包长 L/bits	100
数据传输平均速率 V/kbps	150
节点最大传输半径 d_{max}/m	50
监测圆域半径 R/m^2	400×400
节点数 $N/\text{个}$	200
节点初始能量 E_0/J	λ 为 1 的泊松分布

4.1 EH-BBV 基本特性分析

EH-BBV模型生成的拓扑如图2所示,在监测区域内随机布撒了200个节点,初始网络包含3个全连通节点,新加入的节点连接到网络中两个不同节点,即 $m = 2$.图中不同粗细和形状的边表示边权所在的阈值范围不同,粗线表示边权大于2的边,虚线表示边权属于1—2之间的边,细线表示边权小于1的边.其中,粗线的边数所占的比重约为10%,中等和低等边数占得比重比较接近,表明边权分布满足幂率分布特点,同时也均衡了中等和低等的边权个数,实现边负载分布趋于均衡.

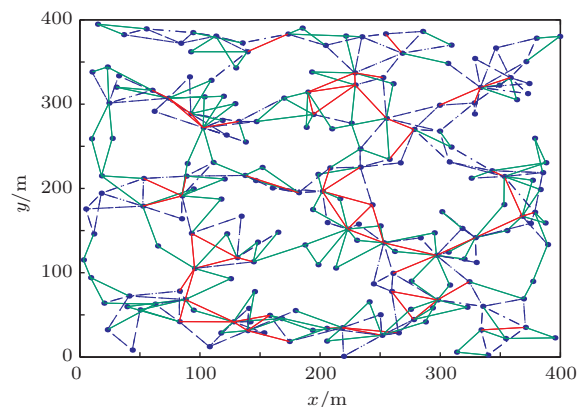


图2 EH-BBV 拓扑图

点权和节点度的分布如图3所示. 实验中, 设 $\delta = 1$. 虽然由于局域范围的限定和初始能量分布的控制, 使得点权和度的分布没有严格服从理论中的幂率分布, 但是仍然能够从图中看出网络中节点度和点权分布都具有明显的拖尾现象, 符合幂率分布的特征. 此外, 两者的分布形态十分接近, 只是度分布在点权分布的基础上出现一定程度的平移, 验证了前文中推出的点权与度分布函数具有线性关系.

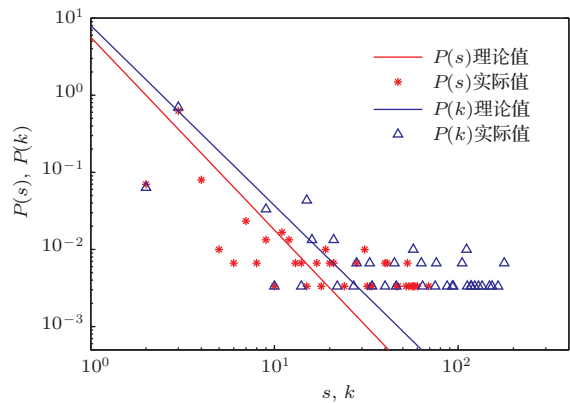


图3 (网刊彩色) 度分布和点权分布图

边权值的分布如图4所示. 在双对数坐标系下, 边权的分布服从幂率分布, 并且当 δ 增大时, 边权分布更加趋于不均匀, 与边权概率密度函数特征相符合, 即 δ 增大, 使得幂率指数 α 减小, 进而使得边权分布更加不均匀.

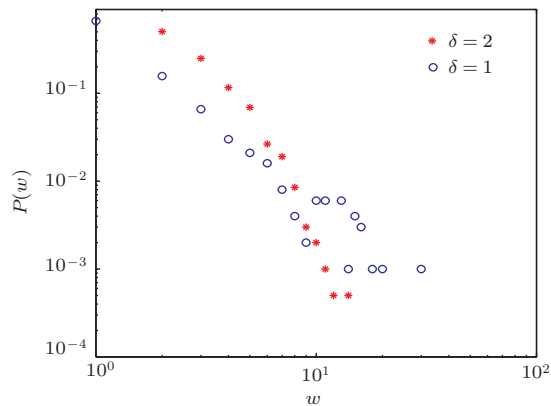


图4 边权分布图

4.2 点边负载分析

采用第2节中的点边负载模型来获得EH-BBV网络中点边的负载. 节点负载公式中的 η 值设置过大, 则突出位置的重要性, 过小则强调点

权的重要性, 边权负载中的 ξ 值目的是使得边权与点权在相同的量级, 本文经过多次实验, 得出当 $\eta = 10, \xi = 5$ 时, 实验得到最好的效果. 表2分别给出负载最高的前20个节点和20条边.

表2 点边重要性数据表

节点编号	点权	边编号	边权
135	28.2858	(185, 198)	24.6491
134	26.5295	(39, 116)	24.2456
167	26.0030	(128, 134)	22.1500
128	24.5228	(145, 147)	22.1471
48	24.4935	(48, 172)	21.2785
164	24.3298	(128, 131)	20.4615
116	24.3187	(135, 173)	20.0993
198	22.3648	(130, 135)	19.6818
39	21.5048	(9, 198)	19.4668
173	21.3065	(71, 167)	19.4286
71	20.9362	(48, 147)	19.2779
185	20.6336	(151, 173)	18.5171
21	20.5119	(116, 183)	18.0322
147	19.8293	(164, 186)	17.7026
96	19.0216	(65, 135)	17.3029
38	18.8511	(189, 199)	17.2552
79	18.5970	(21, 74)	17.1607
199	18.3737	(96, 177)	17.1044
162	17.3388	(21, 167)	17.0343
146	16.0259	(135, 151)	16.8901

从表2中可看出, 边负载大的节点之间若有边连接, 则通常该边的负载也比较大, 如边负载最大的边(185, 198), 其中185和198的点负载都排在前20名内, 其余边的两个端点也至少有一个点的负载在前20名以内, 但是, 并没有严格按照两个端点的负载越大, 则该边负载越大, 如(128, 134)的边负载小于(185, 198)的边负载, 但是128和134的点负载却都大于185和198的点负载, 这验证了边负载不仅受边的两个端点的点负载的影响, 还受到该边边权的影响. 此外, (164, 186)的边负载也在前20名内, 表明该边在网络的连通中有十分重要的作用, 一旦失效则极有可能引发网络的分割, 但是节点186的点负载排名为112, 这说明不能单一的以点负载作为整体负载进行研究, 结合点边负载的分析才能够更加准确的分析网络的性能.

4.3 能耗均衡分析

使用节点能量消耗率EC能够准确合理的分析网络中节点的能耗均衡性, EC值越大则能耗越小, 所有节点的EC越接近, 则网络的能耗越均衡. BA, EAEM, BBV和EH-BBV拓扑模型的能量消耗率如图5所示, 其中, EH-BBV和BBV模型的负载为点权, BA和EAEM模型的负载为节点度.

从图5可以看出, EH-BBV的能量消耗率EC最平稳, BBV的EC波动最大, 中间的为BA和EAEM, 这是因为, 当 $\delta = 1$ 时, BBV模型的幂率

指数为7/3, 网络比BA和EH-BBV更加不均匀, 因此能量消耗率波动最大, 而EAEM由于在构建过程中考虑了节点的剩余能量, 一定程度上平衡了网络节点能耗, 因此性能介于EH-BBV和BBV模型之间. 此外, 由于BA和EAEM不是加权网络, 因此节点的负载近似于节点度, 度都为整数, 因此EC出现层次线性现象. EH-BBV的性能最优, 原因是采用能量异构进行拓扑, 遵循能量大的处理能力强的原则平衡了节点能耗, 使得节点的能量消耗率更加均衡.

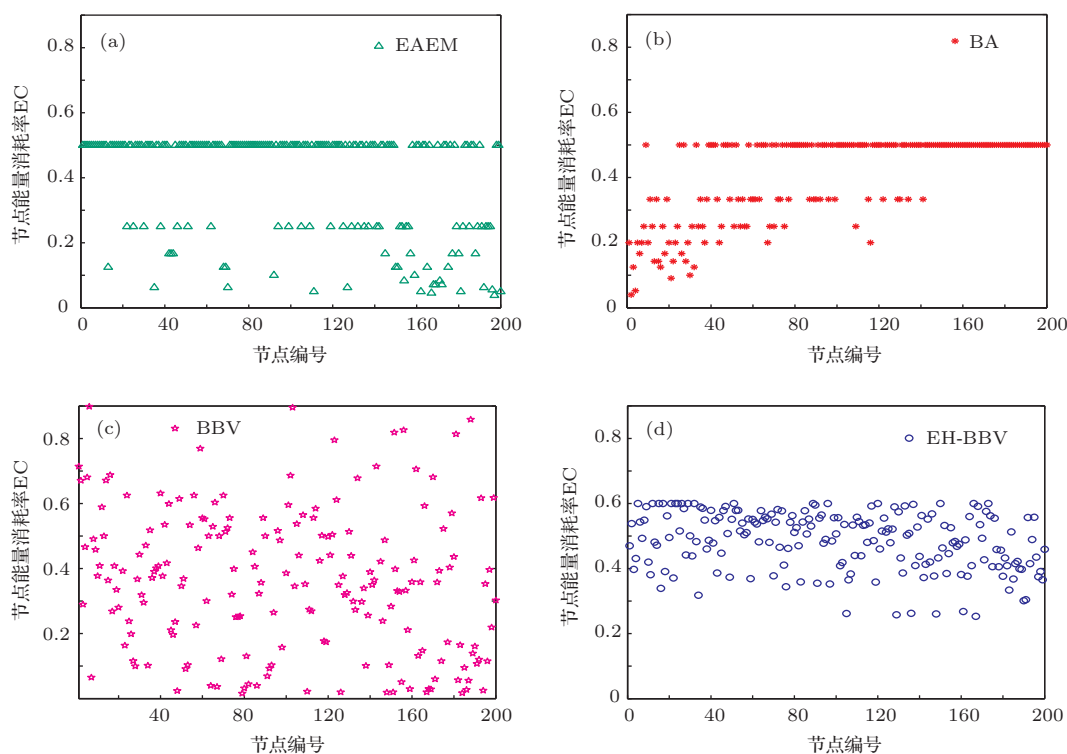


图5 节点能量消耗率对比图

5 结 论

本文在BBV模型的基础上, 提出了一种局域范围内能量异构加权拓扑EH-BBV模型, 建立了节点能量与边权和点权的关系, 推出点权、度和边权关于能量的概率分布函数表达式, 并在该模型的基础上, 给出点边负载的计算方法和能耗衡量指标. 对EH-BBV拓扑进行仿真分析, 实验表明, 网络保持了无标度网络的应对随机失效的容忍能力, 并在此基础上, 能够有效获得点边负载, 并均衡了节点间的能量消耗率, 缓解网络中由节点能耗不均导致的网络分割等问题, 延长了网络的寿命.

参考文献

- [1] Guidoni D L, Mini R A F, Loureiro A A F 2010 *Computer Networks* **54** 1266
- [2] Yin R, Liu B, Li Y Q, Hao X C 2012 *Journal of Electronics & Information Technology* **34** 2180
- [3] Qi H, Wang F B, Deng H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104301 (in Chinese) [祁浩, 王福豹, 邓宏 2013 物理学报 **62** 104301]
- [4] Tong X J, Zuo K, Wang Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 030502 (in Chinese) [佟晓筠, 左科, 王翥 2012 物理学报 **61** 030502]
- [5] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [6] Zhu H L, Luo H, Peng H P, Li L X, Luo Q 2009 *Chaos, Solitons and Fractals* **41** 1828
- [7] Zheng G Z, Liu Q M 2013 *Computers & Electrical Engineering* **39** 1779

- [8] Wang Y Q, Yang X Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 090202 (in Chinese) [王亚奇, 杨晓元 2012 物理学报 **61** 090202]
- [9] Zhu H L, Luo H, Peng H P Li LX, Luo Q 2009 *Chaos, Solitons and Fractals* **41** 1828
- [10] Wen G H, Duan Z S, Chen G R, Geng X M 2011 *Physica A* **390** 4012
- [11] Ferretti L, Cortelezzi M 2011 *Phys. Rev. E* **84** 016103
- [12] Baronchelli A, Castellano C, Pastor-Satorras R 2011 *Phys. Rev. E* **83** 066117
- [13] Barrat A, Barthélemy M, Vespignani A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 066149
- [14] Yakubo K, Korosak D 2011 *Phys. Rev. E* **83** 066111
- [15] Mirzasoleiman B, Babaei M, Jalili M, Safari M 2011 *Physics Review E* **84** 046114
- [16] Liu H, Li Z Y, Lu J A 2006 *Complex Systems and Complexity Science* **3** 36 (in Chinese) [刘慧, 李增扬, 陆君安 2006 复杂系统与复杂性科学 **3** 36]
- [17] Gao J X, Chen Z, Cai Y Z, Xu X M 2010 *Phys. Rev. E* **81** 041918
- [18] Chakraborty A, Manna S S 2010 *Phys. Rev. E* **81** 016111

Studies on weighted scale-free topology in energy heterogeneous wireless sensor network*

Han Li¹⁾²⁾ Liu Bin^{1)2)†} Li Ya-Qian¹⁾²⁾ Zhao Lei-Jing¹⁾

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)

(Received 18 March 2014; revised manuscript received 10 April 2014)

Abstract

In view of the problems about imbalance of node energy consumption and obtaining the load of node or edge efficiently in wireless sensor network, a kind of weighted scale-free topological evolution model for energy heterogeneity is put forward within the scope of local areas. By modelling the relationship among the node energy, load, energy consumption, and the weight to node and edge, we then give the evolution of the network through combining node weight and weighted model, deduce the power-law distribution of the node weight, the edge weight, and node degree, respectively, and next analyze the load and energy consumption according to the node weight and edge weight. Simulation results show that the proposed model not only can make accurate calculation for node and edge loads, but also can alleviate the node energy consumption imbalance in scale-free network.

Keywords: wireless sensor network, weight, energy consumption balance, load

PACS: 05.65.+b, 05.70.Np, 02.50.Le

DOI: 10.7498/aps.63.150504

* Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. F2014203239).

† Corresponding author. E-mail: liubin@ysu.edu.cn