

一种能耗均衡的无线传感器网络加权 无标度拓扑研究*

刘洲洲^{1)2)†} 王福豹¹⁾

1)(西北工业大学电子信息学院, 西安 710076)

2)(西安航空学院, 西安 710077)

(2014年5月13日收到; 2014年5月28日收到修改稿)

针对无线传感器网络节点能耗不均衡问题, 通过对节点生命期建模, 得出节点生命期受节点剩余能量和通信距离的影响, 进而将两端节点生命期作为构建拓扑时边权重的影响因子, 通过边权重控制节点权重, 最终得出了一种能耗均衡的无线传感器网络加权无标度拓扑模型, 并理论证明了该模型的点权、边权和节点度均服从幂律分布. 实验结果表明, 该模型具有无标度拓扑的强容错性, 并有效的均衡了网络中的节点能耗, 延长了网络的生命期.

关键词: 无线传感器网络, 无标度拓扑, 加权, 能耗均衡

PACS: 05.65.+b, 05.70.Np

DOI: 10.7498/aps.63.190504

1 引言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)是由大量能量有限的传感器节点组成的网络, 且经常布置在恶劣的环境中, 能量耗尽和环境影响极易导致节点失效^[1,2]. 度分布服从幂律分布的无标度拓扑对节点随机失效有较强的容错能力, 所以无标度拓扑常被用来解决WSNs节点的随机失效问题^[3,4]. 但是WSNs是一种特殊的复杂网络, 具有节点能量受限和通信半径受限等特点, 所以当无标度拓扑结构应用到WSNs中时还应考虑WSNs自身的特点, 尤其是WSNs节点能耗不均衡问题对网络的生存性产生了很大影响, 因此在无标度网络的基础上构建能耗均衡的拓扑对于WSNs实际研究具有重大的意义.

对于WSNs无标度拓扑能耗均衡问题的研究, 文献[5]将节点的剩余能量作为无标度适应度函数, 在拓扑演化过程中增加高能节点的连接概率, 构建

出了一种能量感知的无标度拓扑结构, 在保证网络容错性的同时均衡了网络能耗. 文献[6, 7]构建的无标度拓扑结构, 同时考虑了节点的剩余能量与节点饱和度等问题, 并利用节点的剩余能量限制网络中的最大节点度, 有效的均衡了网络中的节点能耗. 文献[8]基于无标度拓扑构建了一种延长网络生命期的拓扑结构, 在拓扑演化过程中考虑节点剩余能量和节点负载等因素, 进一步均衡了网络中的节点能耗. 但是这些都是在无权网络的范畴研究WSNs无标度拓扑结构, 并没有考虑边权强弱对网络的影响^[9], 应用到WSNs中时还存在很多问题. 例如, 若在WSNs中两个距离较远、剩余能量较小的节点之间建立连接, 则这条链路就比较脆弱, 链路两端的节点很容易因能量耗尽引起失效, 所以有必要给边赋予一定的权值, 并作为链路的健壮性标志, 最终通过边权重影响节点强度, 以此达到均衡网络能耗的目的. 文献[10]提出了一种加权无标度网络演化模型(barrat barthélemy vespignani, BBV), 该模型给网络中的节点和边都赋予一定的

* 国家自然科学基金(批准号: 61103242)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: nazi2005@126.com

权值, 随着网络规模的增大, BBV 模型的点权、边权和度分布均服从幂率分布, 且对节点随机失效有较强的容错能力, 所以能较好的适用 WSNs 大规模部署且无人看管的环境. 但是, 当 BBV 模型应用到 WSNs 中时, 还需要考虑 WSNs 的实际特点. 文献 [11] 在 BBV 模型基础上, 在局域世界内构建 WSNs 加权无标度演化模型, 在对边权重进行定义时, 综合考虑了节点能量、通信流量等因素, 构建出的拓扑具有强容错性, 并有效均衡了网络能耗. 文献 [12] 基于 BBV 模型提出了一种能量均衡的 WSNs 路由方法, 并将链路权重作为感知因子, 有效均衡了网络能耗. 但是文献 [11] 和文献 [12] 均没有考虑节点生命期对链路健壮性的影响, 在均衡网络能耗方面还存在局限性.

针对上述问题, 本文通过构建节点生命期模型, 得出节点生命期受节点剩余能量和节点通信距离的影响, 然后将两节点生命期的乘积作为构建拓扑时的边权重, 构建了一种能耗均衡的 WSNs 加权无标度拓扑模型 (energy-consumption balanced weighted scale-free topology, EBWST), 并理论证明了该拓扑的点权、边权、度分布均服从幂律分布.

2 节点生命期建模

WSNs 节点生命期受节点剩余能量、发射半径等的限制, 节点失效后对网络的连通覆盖性产生了较大的影响. 本节将对传感器节点的生命期进行数学建模, 寻找影响节点生命期的参数. 根据一阶射频模型 [13], 节点 i 在单位时间内消耗的总能耗 $E_c(i)$ 包括发送数据消耗的能耗 E_{tx} 和接收数据消耗的能耗 E_{rx} 两部分. 其中节点 i 发送 L bit 数据到距离为 d_{ij} 的节点 j 所消耗的能量 E_{tx} 为

$$E_{tx} = E_{elec}L + \varepsilon_{amp}Ld_{ij}^2, \quad (1)$$

其中 E_{elec} 为数据融合能耗, ε_{amp} 为放大器功耗, d_{ij} 为节点间的传输距离. 节点 i 接收 L bit 数据所消耗的能量 E_{rx} 取决于接收电路消耗的能量, 即

$$E_{rx} = E_{elec}L, \quad (2)$$

那么, 节点 i 在单位时间内消耗的总能耗 $E_c(i)$ 可由 (3) 式计算得到

$$E_c(i) = E_{tx} + E_{rx} = 2E_{elec}L + \varepsilon_{amp}Ld_{ij}^2. \quad (3)$$

设 E_i 表示节点 i 的剩余能量, 那么节点 i 的生命期 $L(i)$ 可以表示为

$$L(i) = \frac{E_i}{E_c(i)} = \frac{E_i}{2E_{elec}L + \varepsilon_{amp}Ld_{ij}^2}. \quad (4)$$

由 (4) 式可知, 节点的生命期受节点剩余能量 E_i 和节点与邻节点距离 d_{ij} 的影响, 节点剩余能量越大, 节点间通信距离越短, 节点生命期越长; 节点剩余能量越小, 节点间通信距离越长, 节点生命期越短. 所以在构建拓扑时需考虑节点的剩余能量和节点间通信距离因素, 使生成的拓扑能够均衡网络能耗, 延长网络生命期.

3 EBWST 建模及动态特性分析

由第 2 节的分析可知, 节点的生命期受节点剩余能量和传输距离的影响. 假设传感器节点在分布区域内随机部署, 本节将综合考虑节点的剩余能量和节点间的传输距离两方面因素, 并将节点生命期作为构建拓扑的边权重, 构建符合 WSNs 实际特征的 EBWST 模型.

3.1 EBWST 拓扑演化机理

由于 WSNs 节点通信半径的限制, 节点仅与其通信范围内的节点进行数据交换, 所以需要利用局域世界演化模型, 并结合 BBV 模型, 可设节点点权的表达式为

$$s_i = \sum_{j \in M_i} \omega_{ij}, \quad (5)$$

其中, s_i 表示节点 i 的点权, M_i 表示节点 i 的邻居节点个数, ω_{ij} 为节点 i 和 j 之间的边权, 且 $\omega_{ij} = \omega_{ji}$, 当 i 和 j 之间无连接时 $\omega_{ij} = 0$.

定义 设 t 时刻, EBWST 的边权重由两端节点的生命期乘积决定, 两端点的生命期乘积越大, 边权重越大; 两端点生命期乘积越小, 边权重越小.

$$\begin{aligned} \omega_{ij}(t) &= L(i) \times L(j) \\ &= \frac{E_i}{2E_{elec}L + \varepsilon_{amp}Ld_{ij}^2} \\ &\quad \times \frac{E_j}{2E_{elec}L + \varepsilon_{amp}Ld_{ji}^2} \\ &= \frac{E_i E_j}{(2E_{elec}L + \varepsilon_{amp}Ld_{ij}^2)^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

在该定义下, 边权重代表了链路的通信能力, 当两端点节点的剩余能量较大, 通信距离较短, 节

点生命期较长时, 边权重较高, 链路较健壮; 当两端点节点的剩余能量较小, 通信距离较远, 节点生命期较短时, 边权重较低, 链路较脆弱. EBWST模型借助BBV模型的演化机理, 拓扑演化主要包含两个步骤: 增长和权值演化.

1) 增长: 初始时刻 ($t = 0$) 时, 网络有 m_0 个节点、 e_0 条边组成, 初始边权重可由 (6) 式计算得到. 每一个时间间隔向网络中加入一个新节点 n , 并在其局域世界内选择 $m (m \leq m_0)$ 个节点相连, 节点 i 被选中与节点 n 相连的概率与节点 i 的点权成正比, 择优连接概率为

$$\prod_{n \rightarrow i} = \frac{M_n}{N_t} \frac{s_i}{\sum_{j \in M_n} s_j}, \quad (7)$$

其中, M_n 表示新节点 n 的局域世界范围内的节点总数, N_t 表示 t 时刻网络中的节点总数, 节点 $i, j \in M_n$.

2) 权值演化: 新加入边的初始权值设为 ω_{ni} ,

$$\omega_{ni} = \frac{E_n E_i}{(2E_{\text{elec}}L + \varepsilon_{\text{amp}}Ld_{ni}^2)^2},$$

新边 e_{ni} 的加入会导致节点 i 的点权发生变化, i 的点权调整为

$$s_i \rightarrow s_i + \delta_i + \omega_{ni}, \quad (8)$$

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 $\delta_i = \delta = 1$). 节点 i 与其邻居节点 j 之间的边权也重新分配, 调整规则如下:

$$\omega_{ij} \rightarrow \omega_{ij} + \Delta\omega_{ij}, \quad (9)$$

其中, $\Delta\omega_{ij}$ 与 ω_{ij} 和节点 i 的权值相关, 即

$$\Delta\omega_{ij} = \delta_i \frac{\omega_{ij}}{s_i}. \quad (10)$$

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

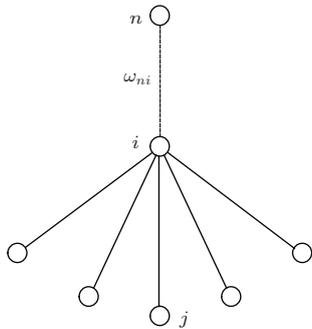


图1 EBWST 权值演化规则图

以上为EBWST的建模过程, 从边权的初始值中建立了边权与两端节点生命期的关系, 节点生命期又与节点剩余能量和通信距离有关, 然后通过边权影响点权, 进而将点权作为择优连接的依据, 使得节点生命期影响到拓扑建模的整个过程, 从图1的权值演化规则中可得, 两端节点的剩余能量和通信距离将贯穿到网络的整个演化过程, 影响到点权和边权的分布规律, 下面将具体分析点边权值的演化关系.

3.2 点权特性研究

当新节点 n 加入网络时, 节点 i 的权值受到两方面的影响: 1) 节点 n 根据择优概率选择与节点 i 直接相连, 则 i 的度增加1, 点权值增加 $\omega_{ni} + \delta$; 2) 节点 n 选择与节点 i 的一个邻居 j 相连, ω_{ij} 会根据计算公式进行调整, 同时, 节点 i 的权值 s_i 增加 $\delta\omega_{ij}/s_j$. 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:

$$\begin{aligned} \frac{ds_i}{dt} = & m \frac{M_n}{N_t} \frac{s_i(t)}{\sum_{l \in M_n} s_l(t)} (\omega_{ni} + \delta) \\ & + \sum_{j \in v(i)} \left(m \frac{M_n}{N_t} \frac{s_j(t)}{\sum_{l \in M_n} s_l(t)} \delta \frac{\omega_{ij}(t)}{s_j(t)} \right), \quad (11) \end{aligned}$$

其中 $v(i)$ 表示节点 i 的邻居节点, 设 $\langle s(t) \rangle$ 为 t 时刻网络中节点的平均权值, 则 (11) 式可化简为

$$\begin{aligned} \frac{ds_i}{dt} = & m \frac{M_n}{N_t} \frac{s_i(t)}{\frac{M_n}{N_t} N_t \langle s(t) \rangle} (\omega_{ni} + \delta) \\ & + \sum_{j \in v(i)} \left(m \frac{M_n}{N_t} \frac{s_j(t)}{\frac{M_n}{N_t} N_t \langle s(t) \rangle} \delta \frac{\omega_{ij}(t)}{s_j(t)} \right) \\ = & m \frac{s_i(t)}{N_t \langle s(t) \rangle} (\omega_{ni} + \delta) + \frac{m\delta s_i(t)}{N_t \langle s(t) \rangle}. \quad (12) \end{aligned}$$

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 $N_t = m_0 + t$. 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 $2(\omega_{ni} + \delta)$, 设 $\langle \omega_0 \rangle$ 为 t 时刻和之前所有时间步内新加入边权重 ω_{ni} 的平均值, 则

$$\sum_{i=1}^t s_i(t) \approx 2m(\langle \omega_0 \rangle + \delta)t, \quad (13)$$

由于 t 时刻网络中总共有 $m_0 + t$ 个节点, 则网络中节点的平均权值 $\langle s(t) \rangle$ 为

$$\langle s(t) \rangle = \frac{2m(\langle \omega_0 \rangle + \delta)t}{m_0 + t}. \quad (14)$$

将(14)式代入(12)式可得

$$\frac{ds_i(t)}{dt} = \frac{\omega_{ni} + 2\delta}{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)} \frac{s_i(t)}{t}. \quad (15)$$

采用分离变量法,解(15)式可得

$$s_i(t) = C_1 t^{\frac{\omega_{ni} + 2\delta}{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)}}, \quad (16)$$

其中 C_1 为任意常数, 设 t_i 表示节点 i 加入网络的时刻, 当节点 i 加入网络时, 产生 m 条新链接, 则可设初始条件为

$$s_i(t = t_i) = m\langle\omega_0\rangle. \quad (17)$$

结合(17)式, 可解(16)式得

$$s_i(t) = m\langle\omega_0\rangle \left(\frac{t}{t_i}\right)^{\frac{\omega_{ni} + 2\delta}{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)}}. \quad (18)$$

则 $s_i(t)$ 小于 s 的节点概率为

$$\begin{aligned} &P(s_i(t) < s) \\ &= P\left(t_i > t \left(\frac{m\langle\omega_0\rangle}{s}\right)^{\frac{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)}{\omega_{ni} + 2\delta}}\right). \end{aligned} \quad (19)$$

由于在择优增长过程中, 在相同的时间间隔内仅有一个新节点加入到网络中, 因此 t_i 服从均匀分布, 其概率密度 $P(t_i)$ 满足如下条件:

$$P(t_i) = \frac{1}{m_0 + t}. \quad (20)$$

结合(19)式和(20)式可得

$$\begin{aligned} &P(s_i(t) < s) \\ &= 1 - \frac{t}{m_0 + t} \left(\frac{m\langle\omega_0\rangle}{s}\right)^{\frac{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)}{\omega_{ni} + 2\delta}}. \end{aligned} \quad (21)$$

于是, 节点权值的概率密度分布为

$$\begin{aligned} P(s) &= \frac{\partial P(s_i(t) < s)}{\partial s} \\ &= \frac{t}{m_0 + t} \frac{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)}{\omega_{ni} + 2\delta} (\langle\omega_0\rangle m)^{\frac{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)}{\omega_{ni} + 2\delta}} \\ &\quad \times \frac{1}{s^{\frac{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)}{\omega_{ni} + 2\delta} + 1}}. \end{aligned} \quad (22)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 得到最终的权值分布的表达式为

$$\begin{aligned} P(s) &= \frac{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)}{\omega_{ni} + 2\delta} (\langle\omega_0\rangle m)^{\frac{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)}{\omega_{ni} + 2\delta}} \\ &\quad \times \frac{1}{s^{\frac{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)}{\omega_{ni} + 2\delta} + 1}}. \end{aligned} \quad (23)$$

由(23)式可知EBWST模型的点权分布服从幂率分布, 幂指数为 $\gamma = \frac{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)}{\omega_{ni} + 2\delta} + 1$, 且EBWST模型的点权分布取决于边权重和调节因子 δ .

由于边权重是由节点的生命期决定的, 节点生命期又受到节点剩余能量和通信距离的影响, 因此EBWST模型通过调节边权重实现了调节拓扑的点权重分布, 最终实现了整个网络的能耗均衡.

3.3 节点度分布特性研究

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

$$\begin{aligned} \frac{dk_i(t)}{dt} &= m \frac{M_n}{N_t} \frac{s_i(t)}{\sum_{l \in M_n} s_l(t)} \\ &= m \frac{M_n}{N_t} \frac{s_i(t)}{\frac{M_n}{N_t} N_t \langle s(t) \rangle}. \end{aligned} \quad (24)$$

将(14)式代入(24)式可得

$$\frac{dk_i(t)}{dt} = \frac{s_i(t)}{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)t}. \quad (25)$$

由点权分布的推导过程(15)式可得

$$\frac{s_i(t)}{t} = \frac{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)}{\omega_{ni} + 2\delta} \frac{ds_i(t)}{dt}. \quad (26)$$

将(26)式代入(25)式可得

$$\frac{dk_i(t)}{dt} = \frac{1}{\omega_{ni} + 2\delta} \frac{ds_i(t)}{dt}. \quad (27)$$

进而由初始条件 $k_i(t = t_i) = m$, $s_i(t = t_i) = m\langle\omega_0\rangle$, 解(27)式可得

$$k_i(t) = \frac{s_i(t)}{\langle\omega_0\rangle}, \quad (28)$$

即

$$s_i(t) = \langle\omega_0\rangle k_i(t). \quad (29)$$

由(29)式可以得出 $k_i(t)$ 与 $s_i(t)$ 呈线性关系, 因此EBWST模型度分布的幂指数等于点权分布的幂指数, 即 $\gamma = \frac{2(\langle\omega_0\rangle + \delta)}{\omega_{ni} + 2\delta} + 1$, 所以EBWST模型的度分布也服从幂律分布, 且幂指数与边权重和调节因子 δ 有关.

3.4 边权特性研究

EBWST模型边权的演化机理与点权和度分布相似, 同样采用连续场理论, 可得出边权 ω_{ij} 随时间的演化速率为

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_{ij}(t)}{dt} &= m \frac{M_n}{N_t} \frac{s_i}{\sum_{l \in M_n} s_l(t)} \delta^{\omega_{ij}} \\ &\quad + m \frac{M_n}{N_t} \frac{s_j}{\sum_{l \in M_n} s_l(t)} \delta^{\omega_{ij}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= m \frac{s_i}{N_t \langle s(t) \rangle} \delta \frac{\omega_{ij}}{s_i} + m \frac{s_j}{N_t \langle s(t) \rangle} \delta \frac{\omega_{ij}}{s_j} \\
 &= \frac{\delta}{\langle \omega_0 \rangle + \delta} \frac{\omega_{ij}}{t}. \tag{30}
 \end{aligned}$$

结合初始情况 $\omega_{ij}(t_i) = \langle \omega_0 \rangle$, 解 (30) 式可得

$$\omega_{ij}(t) = \langle \omega_0 \rangle \left(\frac{t}{t_i} \right)^{\frac{\delta}{\langle \omega_0 \rangle + \delta}}, \tag{31}$$

则 $\omega_{ij}(t)$ 小于 ω_{ij} 的概率为

$$P(\omega_{ij}(t) < \omega_{ij}) = P\left(t_i > \left(\frac{\langle \omega_0 \rangle}{\omega_{ij}}\right)^{\frac{\langle \omega_0 \rangle + \delta}{\delta}}\right). \tag{32}$$

由概率密度函数 $P(t_i) = \frac{1}{m_0 + t}$ 进一步可得边权分布函数的表达式为

$$P(\omega_{ij}) = (\langle \omega_0 \rangle)^{\frac{\langle \omega_0 \rangle + \delta}{\delta}} \frac{1}{\omega_{ij}^{\frac{\langle \omega_0 \rangle + \delta}{\delta} + 1}}. \tag{33}$$

从 (33) 式可以得出 EBWST 模型边权的分布规律, 其中, 设节点的幂率指数为 α , 则 $\alpha = \frac{\langle \omega_0 \rangle + \delta}{\delta} + 1 = 2 + \frac{\langle \omega_0 \rangle}{\delta}$, 可得边权的幂率指数与边权重和调节因子 δ 相关, 在构建拓扑过程中, 边权重是由两端节点生命期决定的, 节点生命期又受到节点剩余能量和通信距离的影响, 因此通过调节边权重实现了边负载的均衡, 从而增加了链路的健壮性.

4 仿真分析

本文针对具有节能代表性的 FTEL 模型、容错性较好的 BA 和 BBV 模型以及 EBWST 模型进行 MATLAB 仿真实验对比. 在仿真实验中, 四中模型均采用相同的初始网络规模, 并假设节点拥有相同的初始能量. 设 EBWST 模型中 $\delta = 1, m = 2$, 仿真实验参数见表 1. 其中, 每一个实验结果都是 100 次实验的平均值.

表 1 实验环境参数

参数	取值
节点个数 N /个	100
节点分布区域 A/m^2	400×400
初始能量 E/J	1
节点最大通信半径 d_{max}/m	100
节点产生数据包 L/bit	100
数据融合能耗 $E_{elec}/(nJ/bit)$	50
放大器功放能耗 $\epsilon_{amp}/(pJ/bit \cdot m^{-2})$	100

4.1 EBWST 模型节点度、点权和边权特性分析

图 2、图 3 分别给出了双对数坐标下 EBWST 模型节点度、点权和边权实际分布与理论分布的对比情况. 由于无线传感器网络节点通信半径和节点能量的限制, 使得在局域世界内构建的无标度拓扑的节点度、点权和边权分布没有严格服从理论中的幂率分布, 但是仍然从图中看出 EBWST 模型节点度、点权和边权基本服从幂律分布. 由图 2 可知, EBWST 模型节点度和点权呈线性关系, 且实际分布存在拖尾现象, 这符合无标度幂律分布的基本特征, 与第 2 节的理论证明相符合. 由图 3 可知边权分布也服从幂律分布, 存在明显的拖尾现象, 从而验证了 EBWST 模型生成的 WSNs 拓扑具有无标度加权网络的基本特征.

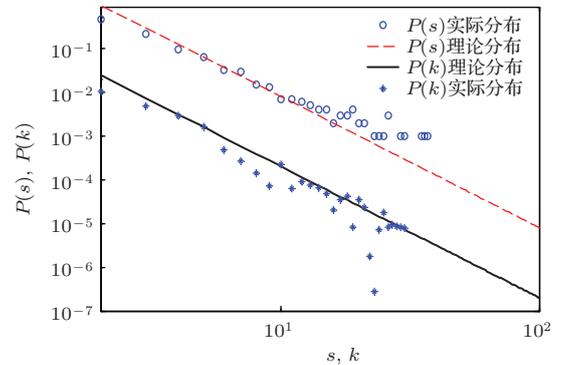


图 2 点权和度分布分布图

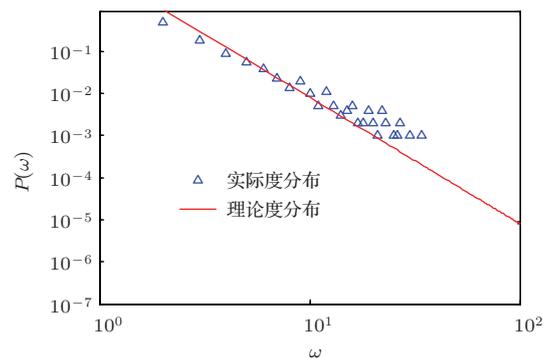


图 3 边权分布图

4.2 容错性分析

图 4 给出了四种模型的容错对比图, 在每轮试验中, 随机移除一个节点, 然后统计网络中最大连通分支上的节点数量, 由图 4 可知, EBWST 模型继

承了无标度网络的强容错性, 并且相比BA模型、BBV模型和FTEL模型具有更好的容错性, 在随机移除17个节点时, 网络中仍然有1/3的存活节点, 这是由于EBWST模型构建的加权无标度拓扑结构, 节点度、点权和边权均服从幂律分布, 容错性将比无权网络具有更好的优势。

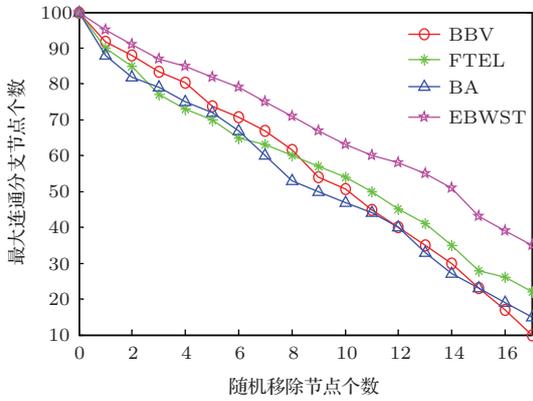


图4 容错对比图

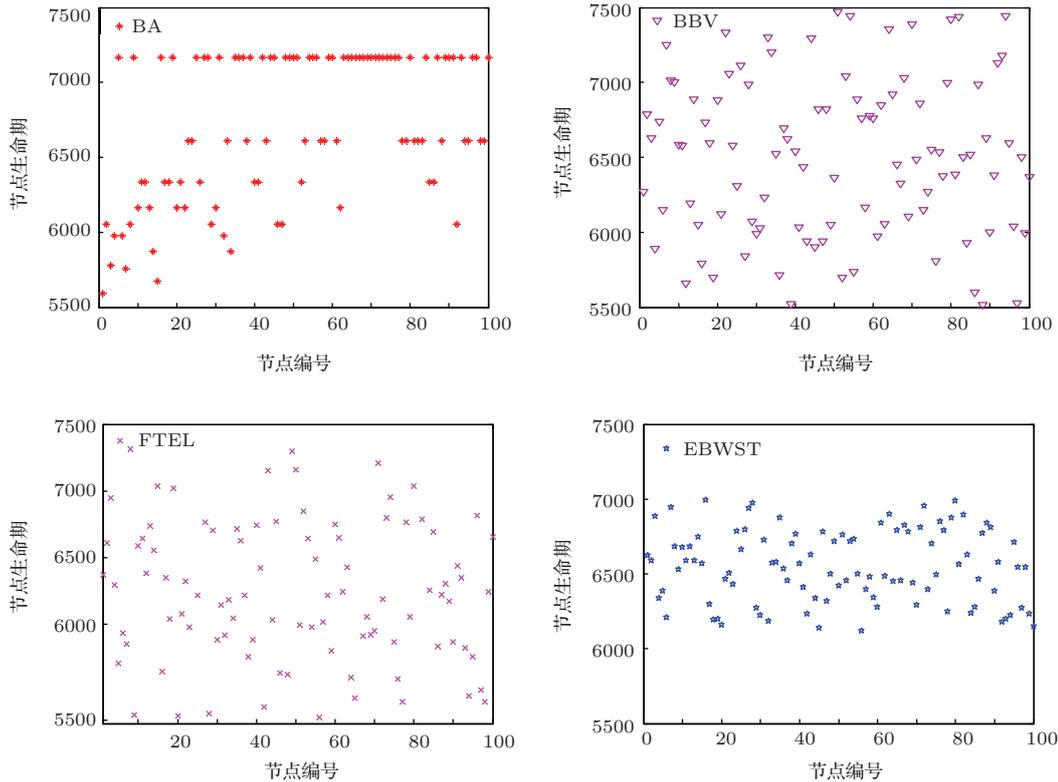


图5 节点生命期对比图

4.4 网络生命期对比

WSNs网络生命期通常定义为网络中首节点失效的时间^[14], 图6给出了四种模型的网络生命

4.3 能耗均衡性分析

在拓扑运行1500轮后, 用当前网络中所有节点的生命期情况分析网络中节点的能耗均衡性, 若网络中所有节点的生命期相近或相差较小, 说明网络能耗比较均衡; 若网络中节点的生命期相差较大, 则说明网络能耗不均衡。

图5分别给出了BA, BBV, FTEL和EBWST四种拓扑运行1500轮后节点生命期的对比情况, 由图5可知EBWST模型的节点生命期最为平稳, 其他三种模型均存在生命期较小的节点, 这些节点最容易因能量耗尽引起节点失效, EBWST模型的节点生命期基本维持在6100轮到7000轮之间, 这是由于EBWST模型在构建拓扑时, 将两端节点生命期的乘积作为边权重, 生命期小的节点边权重降低, 进而引起点权重降低, 从而使权重低的节点拥有较小的连接概率, 最终均衡了网络能耗。

期对比情况。在每一轮数据交换时, 均按照第2节建立的能耗模型进行数据传输, 由图6可知, EBWST模型拥有最长的网络生命期, 当出现首节点失效时, EBWST模型相比FTEL模型提升了9.1%,

相比BBV模型提升了16.3%，相比BA模型提升了22.8%。这是由于EBWST模型通过节点生命期控制边权重，均衡了网络能耗，延长了网络生命期。

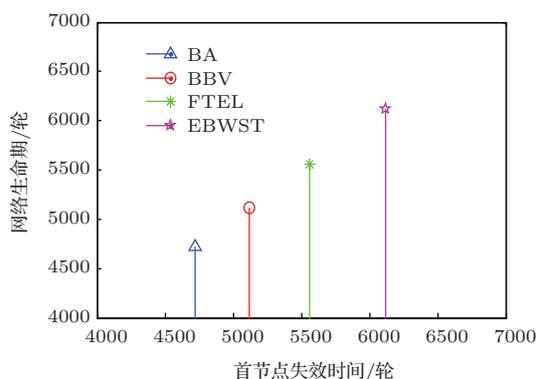


图6 网络生命期对比图

5 结 论

本文针对加权无标度网络在WSNs中的应用进行了研究，通过构建节点生命期模型，得出节点生命期与节点剩余能量和节点间传输距离的关系，进而在构建拓扑时将两端节点生命期作为边权重的影响因子，使高能节点和通信距离短的节点拥有更大的连接概率，最终达到了均衡网络能耗的目的。实验结果表明该机理生成的拓扑符合无标度加权网络的基本特征，点权、边权和节点度均服从幂律分布，从而使WSNs拥有了加权网络的强容错能力，为WSNs容错拓扑的设计奠定了良好的基础。

参考文献

- [1] 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]
- [2] Zhou J, Liu Y A, Wu F, Zhang H G, Zu Y X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 090504 (in Chinese) [周杰, 刘元安, 吴帆, 张洪光, 俎云霄 2011 物理学报 **60** 090504]
- [3] Wang Y Q, Yang X Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 040206
- [4] Tang W, Guo W 2010 *J. Software* **21** 1646 (in Chinese) [唐伟, 郭伟 2010 软件学报 **21** 1646]
- [5] Zhu H L, Luo H, Peng H P, Li L X, Luo Q 2009 *Chaos, Solitons and Fractals* **41** 1828
- [6] Zheng G Z, Liu Q M 2013 *Computers & Electrical Engineering* **39** 1779
- [7] 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]
- [8] Liu H R, Yin W X, Han T, Dong M R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 040509 (in Chinese) [刘浩然, 尹文晓, 韩涛, 董明如 2014 物理学报 **63** 040509]
- [9] Pan Z F, Wang X F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4058 (in Chinese) [潘灶烽, 汪小帆 2006 物理学报 **55** 4058]
- [10] Barrat A, Barthélemy M, Vespignani A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 066149
- [11] Zhang D G, Dai W B, Niu Q X 2012 *Acta Electronica Sinica* **40** 1000 (in Chinese) [张德干, 戴文博, 牛庆肖 2012 电子学报 **40** 1000]
- [12] Zhang D G, Li G, Zheng K, Ming X C, Pan Z H 2014 *IEEE Transactions on Industrial Informatics* **10** 766
- [13] Xie W B, Xian M, Chen Y G 2010 *J. Electron. Inform. Technol.* **32** 1205
- [14] Tang W, Guo W 2010 *J. Software* **21** 1646 (in Chinese) [唐伟, 郭伟 2010 软件学报 **21** 1646]

Research on weighted scale-free topology with balancing energy consumption characteristics in wireless sensor networks*

Liu Zhou-Zhou^{1)2)†} Wang Fu-Bao¹⁾

1) (*School of Electronics and Information, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710076, China*)

2) (*Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China*)

(Received 13 May 2014; revised manuscript received 28 May 2014)

Abstract

Due to the energy limitation in nodes in the wireless sensor networks, the problem whether the node energy consumption is balanced becomes a primary one in the design of networks. Through building the node lifetime model, we conclude that the node lifetime is affected by the node residual energy and the communication distance. Additionally, both ends of the node lifetime are introduced as the influencing factors on edge weights. And then through the edge weight the node weight is controlled, so that the weighted scale-free topology with energy consumption balanced characteristics is obtained. Finally, theoretical proof shows that the distribution of the node weight, the edge weight, and the node degree all obey the power-law distribution. Simulation results show that this model has the good fault tolerance characteristics that the scale-free topology can have. And it also has obvious advantages in balancing the network energy consumption and prolonging the network lifetime.

Keywords: wireless sensor networks, scale-free topology, weighted, balancing energy consumption

PACS: 05.65.+b, 05.70.Np

DOI: [10.7498/aps.63.190504](https://doi.org/10.7498/aps.63.190504)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61103242).

† Corresponding author. E-mail: nazi2005@126.com