

一种优化无线传感器网络生命周期的容错拓扑研究*

刘浩然¹⁾²⁾ 尹文晓^{1)†} 韩涛¹⁾ 董明如¹⁾

1)(燕山大学信息科学与工程学院, 秦皇岛 066004)

2)(燕山大学, 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2013年10月13日收到; 2013年10月25日收到修改稿)

由于无线传感器网络的节点能量受限, 优化网络生命周期成为设计网络拓扑时首要考虑的问题. 通过分析节点的剩余能量和负载量对节点生命周期的影响, 提出了一种可延长无线传感器网络生命周期的容错拓扑演化模型, 并得出了在节点满足网络生存时间的条件下负载调节系数的取值范围. 仿真实验结果表明, 基于无标度网络的演化拓扑结构具有较好的容错性, 并能够均衡网络节点能耗和延长网络生命周期.

关键词: 无线传感器网络, 无标度, 生命周期, 剩余能量

PACS: 05.65.+b, 05.70.Np

DOI: 10.7498/aps.63.040509

1 引言

布置在恶劣环境中的无线传感器网络 (WSNs) 是一个能量受限的网络, 经常有节点失效的情况发生^[1,2]. 在传感器节点受到能量约束、恶劣环境的影响而失效时, 如何使节点仍然能够维持正常工作并保证网络的生命周期和数据传输的可靠性是 WSNs 实际应用中面临的重要问题^[3-5]. 拥有较长网络生命周期的容错拓扑对于提高 WSNs 的性能具有重要的意义.

目前对于 WSNs 容错拓扑的研究多采用冗余机制^[6,7], 但是采用冗余方式会增加不必要的通信链路, 反而降低了网络的性能并增加了网络的负荷. 文献^[8, 9]在研究万维网拓扑结构时发现其度分布服从幂律分布, 并将具有这种性质的网络称之为无标度网络. 文献^[10]将无标度特征引入到 WSNs 的容错拓扑中, 研究发现随机移除节点时, 网络连接集中在少数节点上, 这些节点的无标度拓扑具有较高的容错性. 能量感知演化模型

(EAEM)^[11]利用无标度节点适应度模型, 它将节点的剩余能量作为适应度函数, 并与经典的无标度演化机制相结合, 促使网络向节能的方向转变, 在保证拓扑容错性的同时延长了网络的生命周期. 文献^[12]在无标度特性的基础上, 在 WSNs 中引入适应度和局域世界机制, 使拓扑具有较好的容错性和能耗均衡的特点并延长了网络的生命周期. 文献^[13]在构建拓扑时考虑了节点的剩余能量和节点饱和度和等问题, 进一步提高了 WSNs 拓扑的抗毁性和延长了网络的生命周期. 文献^[14]构建了簇间优化的无标度拓扑模型, 通过节点的剩余能量限制节点度, 增强了拓扑的容错性并延长了网络生命周期. 但是, 在构建拓扑时上述这些算法并没有考虑节点的负载量, 负载量过高的节点经常由于能耗过快而造成节点失效, 从而影响拓扑的容错性, 降低网络的生命周期. 因此, 这些算法在应用到 WSNs 中时仍然存在一些问题.

针对上述问题, 通过分析节点生命周期与剩余能量和负载状况的关系, 本文提出了具有适应度机制的演化策略, 并将节点剩余能量和负载状况作为

* 河北省自然科学基金 (批准号: F2012203179) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yinwenxiao2009@163.com

构建适应度函数的影响因子, 给出具有能耗和负载的容错拓扑 (FTEL) 模型, 使得生成的拓扑有效地均衡了拓扑能耗和节点负载, 延长了网络的生命周期.

2 WSNs 生命周期建模

WSNs 生命周期通常定义为最先因为电池能量耗尽而失效的传感器节点的生命期^[15,16]. 节点的生命期通常由节点的剩余能量和负载量决定. 节点负载是指给定网络结构后单位时间内节点需要承载的数据流量之和, 通常度大的节点承载的负载量较多. 通过对 WSNs 节点生命期进行数学建模, 最终得到网络生命周期模型. 通过分析负载调节系数对网络生命周期的影响, 得到满足网络生存时间的负载调节系数的取值范围, 从而均衡拓扑能耗和延长网络生命周期.

2.1 节点生命期建模

WSNs 节点负载 $L_i(t)$ 是指单位时间内节点 i 需要发送的本节点数据流量 L 与转发其他节点数据流量之和^[17]. 节点负载量的大小取决于 WSNs 的节点度.

$$L_i(t) = L + k_i^\alpha L \quad (\alpha \geq 0), \quad (1)$$

式中, k_i 为节点 i 的节点度, α 为负载调节系数. k_i^α 表示 WSNs 节点的结构负载^[18], 节点 i 需转发其他节点的数据流量为 $(k_i^\alpha L)$ bit.

假设节点 i 的通信半径为 R_i , 在单位时间内节点 i 需要接收 $(k_i^\alpha L)$ bit 数据, 转发 $L_i(t)$ bit 数据. 采用通用的一阶射频模型^[19], 在单位时间内任意节点 i 平均需要消耗的能量 $E_i(t)$ 为

$$\begin{aligned} E_i(t) &= E_{\text{elec}} k_i^\alpha L + (E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}} R_i^2) L_i(t) \\ &= (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}} R_i^2) L_i(t) - E_{\text{elec}} L \\ &= a L_i(t) + b, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, E_{elec} 为数据融合能耗, ε_{amp} 为放大器功耗能耗, $a = 2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}} R_i^2$, $b = -E_{\text{elec}} L$. 对于给定的网络模型, a 和 b 都是常数, 所以 $E_i(t)$ 与 $L_i(t)$ 成正比. 因此, 节点的负载决定了其在网络中的能量消耗. 将 (1) 式代入 (2) 式可以得出

$$E_i(t) = aL(1 + k_i^\alpha) + b. \quad (3)$$

由 (3) 式可以看出, 节点的能耗与节点度成正比, 节点度越大, 单位时间内节点消耗的能量越多, 节点

就越容易因为能量耗尽而失效. 由于 WSNs 节点能量耗尽引起节点失效对 WSNs 拓扑的容错性的影响很大, 且单个节点的生命期取决于节点的剩余能量 E_i 和单位时间内节点需要消耗的能量 $E_i(t)$, 则节点生命期 τ_{node} 为

$$\tau_{\text{node}} = \frac{E_i}{E_i(t)} = \frac{E_i}{aL(1 + k_i^\alpha) + b}. \quad (4)$$

(4) 式即为 WSNs 节点生命期模型 τ_{node} . 由 (4) 式可知, WSNs 节点生命期取决于节点的剩余能量 E_i 和负载量 k_i^α . 节点的剩余能量越大 (负载量越小), 节点生命期越长; 节点的剩余能量越小 (负载量越大), 节点的生命期越短.

2.2 WSNs 的生命周期

WSNs 的生命周期由最先能量耗尽的节点生命期决定, 因此定义最短的节点生命期为网络生命周期 τ_{net} , 即

$$\tau_{\text{net}} = \min(\tau_{\text{node}}). \quad (5)$$

假设 N 个节点均匀地部署在监测区域 G (面积为 A) 上, 由概率论可知, 节点坐标 (x, y) 具有的概率密度函数 $g(x, y)$ 为

$$g(x, y) = \begin{cases} 1/A & (x, y) \in G \\ 0 & (x, y) \notin G \end{cases}, \quad (6)$$

节点 i 的通信邻域 G_i 所覆盖的节点数 n_i 与其通信距离 R_i 间存在如下关系:

$$n_i = N \iint_{G_i} g(x, y) dx dy = N \frac{\pi R_i^2}{A}, \quad (7)$$

则最大节点度 k_{max} 与初始网络的节点最大通信距离 R_{max} 间满足以下条件:

$$k_{\text{max}} \leq \frac{N\pi R_{\text{max}}^2}{A}. \quad (8)$$

从而在 WSNs 节点中, 单个节点需要承载的最大数据量 $L_{\text{max}}(t)$ 为

$$\begin{aligned} L_{\text{max}}(t) &= L + k_{\text{max}}^\alpha L \\ &\leq L + (N\pi R_{\text{max}}^2/A)^\alpha L. \end{aligned} \quad (9)$$

在 WSNs 中承载数据量多的节点最先由于能量耗尽而失效, 则结合能耗模型 (3) 式可得到单位时间内拓扑中能耗最大的节点所消耗的能量 $E_{\text{max}}(t)$ 为

$$\begin{aligned} E_{\text{max}}(t) &= aL_{\text{max}}(t) + b \\ &\leq a[L + (N\pi R_{\text{max}}^2/A)^\alpha L] + b, \end{aligned} \quad (10)$$

则因能量耗尽引起节点失效时, WSNs中节点最短生命期为

$$\begin{aligned} \tau_{\text{node}} &= E_i/E_{\text{max}}(t) \\ &= \frac{E_i}{aL_{\text{max}}(t) + b} \\ &\geq \frac{E_i}{a[L + (N\pi R_{\text{max}}^2/A)^\alpha L] + b}. \end{aligned} \quad (11)$$

结合 (5) 和 (11) 式可得网络生命周期 τ_{net} 为

$$\tau_{\text{net}} = \frac{E_i}{a[L + (N\pi R_{\text{max}}^2/A)^\alpha L] + b}. \quad (12)$$

从上述分析可知, 网络生命周期模型可以用 (12) 式表示. 由 (12) 式可知, 网络的生命周期受节点剩余能量 E_i 和负载调节系数 α 的影响. 节点剩余能量越大, 网络生命周期越长; 负载调节系数越大, 网络生命周期越短. 因此在构建拓扑时, 可以通过调节 α 构造满足网络生存时间需要的拓扑结构.

为了使在能量耗尽情况下节点可较长时间维持网络拓扑的生命期, 需要使 $\tau_{\text{net}} > \theta_{\text{net}}$ (θ_{net} 为网络生存时间), 即

$$\frac{E_i}{a[L + (N\pi R_{\text{max}}^2/A)^\alpha L] + b} \geq \theta_{\text{net}}. \quad (13)$$

由 (13) 式可得

$$\begin{aligned} \alpha &\leq \ln \left(\frac{E_i/\theta_{\text{net}} - b - aL}{aL} \right) \\ &\quad / \ln(N\pi R_{\text{max}}^2/A). \end{aligned} \quad (14)$$

由 (14) 式可知, 在网络生存时间 θ_{net} 给定的情况下, 可以得出 α 的取值范围. 在构建 WSNs 拓扑时, 为了使网络生命周期满足实际需求, 可以通过调节 α 来均衡网络的负载, 以防止节点因负载过大而引起节点能量耗尽, 从而影响拓扑的容错性和缩短网络的生命周期.

3 FTEL 演化模型及动态特性分析

根据节点生命期模型, 并假设 WSNs 的传感器节点都是随机部署的, 节点在分布区域内近似均匀分布, 考虑节点的剩余能量和负载状况, 将节点的剩余能量和负载作为构建拓扑时的适应度函数因子, 构造可延长网络生命周期的容错拓扑.

3.1 FTEL 演化模型

由于受 WSNs 节点通信半径的限制, 新加入的节点在择优连接时必须在其传输范围内进行连接,

所以需要利用 WSNs 局域世界的优先连接演化模型. 新节点 i_{new} 仅在其传输范围内选择连接节点 i , 其适应度模型如下式所示:

$$\prod_{\Lambda}(k_i) = \frac{\eta_i k_i}{\sum_{j \in \Lambda} \eta_j k_j}, \quad (15)$$

式中, Λ 为新加入的节点 i_{new} 的邻节点集, η_i 为适应度函数. 在选择适应度函数 η_i 时, 由于节点的生命期取决于节点的剩余能量和负载量, 所以在构建拓扑时 FTEL 模型需考虑节点的剩余能量 E_i 和节点的结构负载 k_i^α , 并且剩余能量越大的节点被选择连接的概率越大, 负载量越大的节点被选择连接的概率越小. 令适应度函数 η_i 为

$$\eta_i = E_i/k_i^\alpha, \quad (16)$$

则 FTEL 演化模型可表述如下: 以少量 m_0 个节点开始, 在每一时间步长向存在的网络中加入一个新节点, 同时加上从此节点出发的 m ($m \leq m_0$) 条边; 在择优连接时, 新节点 i_{new} 仅在其传输范围内进行连接, 且与网络中已经存在的节点 i 相连接的概率 $\prod_{\Lambda}(k_i)$ 取决于节点度 k_i 、节点剩余能量 E_i 和负载调节系数 α . 并且此概率服从以下规则:

$$\begin{aligned} \prod_{\Lambda}(k_i) &= \frac{\eta_i k_i}{\sum_{j \in \Lambda} \eta_j k_j} \\ &= \frac{E_i k_i^{1-\alpha}}{\sum_{j \in \Lambda} E_j k_j^{1-\alpha}}. \end{aligned} \quad (17)$$

当 $\alpha = 0$ 时, (17) 式表示 EAEM, 该模型具有较好的节能优势. 当 $\alpha > 0$ 时, (17) 式表示 FTEL 模型, 此时节点度和剩余能量占有的权重可以调节. 所以, 可以通过调节 α 值以满足网络性能的需求, 从而实现拓扑性能的优化.

3.2 FTEL 度分布属性

借助连续场理论, 假设节点度 k_i 是连续变化的, 则根据以上所述的择优增长过程可知, k_i 连续变化的速率为

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m \prod_{\Lambda}(k_i) = m \frac{E_i k_i^{1-\alpha}}{\sum_{j \in \Lambda} E_j k_j^{1-\alpha}}. \quad (18)$$

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

$$\min(E) \sum_{j \in \Lambda} k_j^{1-\alpha} \leq \sum_{j \in \Lambda} E_j k_j^{1-\alpha}$$

$$\leq \max(E) \sum_{j \in A} k_j^{1-\alpha}, \quad (19)$$

其中, $\min(E)$ 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

$$\sum_{j \in A} E_j k_j^{1-\alpha} = E_\xi \sum_{j \in A} k_j^{1-\alpha}. \quad (20)$$

因而 (18) 式可简化为

$$\prod_A (k_i) = \frac{E_i k_i^{1-\alpha}}{E_\xi \sum_{j \in A} k_j^{1-\alpha}}. \quad (21)$$

假设在 t 时刻新节点 i_{new} 加入网络, R_0 为初始时刻的网络半径, R_t 为 t 时刻的网络半径, R_n 为新加入节点 i_{new} 的通信半径. 因监测区域内节点部署服从均匀分布, 新节点 i_{new} 的邻节点集的概率可由节点 i_{new} 覆盖区域的面积与 t 时刻网络区域的面积之比 $\frac{1}{2}(R_n)^2/(R_t)^2$ 近似, 则

$$\begin{aligned} \prod_A (k_i) &= \frac{E_i k_i^{1-\alpha}}{E_\xi \sum_{j \in A} k_j^{1-\alpha}} \\ &= \frac{(R_n)^2}{2(R_t)^2} \frac{E_i k_i^{1-\alpha}}{E_\xi N_t \left[\frac{1}{2}(R_n)^2/(R_t)^2 \right] \langle k \rangle_t^{1-\alpha}} \\ &= \frac{E_i k_i^{1-\alpha}}{E_\xi N_t \langle k \rangle_t^{1-\alpha}}, \end{aligned} \quad (22)$$

式中, N_t 为 t 时刻网络节点总数, $N_t \frac{1}{2} \frac{(R_n)^2}{(R_t)^2}$ 为 t 时刻新节点 i_{new} 的邻节点集 A 的大小, $\langle k \rangle_t$ 为 t 时刻网络中节点的平均度.

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 $N_t = m_0 + t$, $\langle k \rangle_t = \frac{2mt}{m_0 + t}$, 则

$$\begin{aligned} \frac{dk_i}{dt} &= m \frac{E_i k_i^{1-\alpha}}{E_\xi (m_0 + t) \left(\frac{2mt}{m_0 + t} \right)^{1-\alpha}} \\ &= f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha \frac{k_i^{1-\alpha}}{t}, \end{aligned} \quad (23)$$

式中 $f(E_i, E_\xi) = \frac{E_i}{E_\xi}$. 采用分离变量法解 (23) 式可得

$$k_i(t) = [(f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha \ln t + C)\alpha]^{1/\alpha}. \quad (24)$$

设 t_i 为节点 i 加入网络的时刻, 结合初始条件

$k_i(t_i) = m$ 得到

$$k_i(t) = \left[f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha \ln \frac{t}{t_i} + m^\alpha \right]^{1/\alpha}. \quad (25)$$

从而节点度 $k_i(t)$ 小于 k 的概率 $p(k_i(t) < k)$ 可由下式表示:

$$p(k_i(t) < k) = p\left(t_i > t e^{\frac{m^\alpha - k^\alpha}{f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha}}\right). \quad (26)$$

考虑到在改进的择优增长过程中, 每一个时间步长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:

$$p(t_i) = \frac{1}{m_0 + t}.$$

经改进的择优增长过程演化出的容错拓扑的度分布表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial p(k_i(t) < k)}{\partial k} &= \frac{\partial \left(1 - p\left(t_i \leq t e^{\frac{m^\alpha - k^\alpha}{f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha}}\right) \right)}{\partial k} \\ &= \frac{1}{f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m} \left(\frac{k}{m} \right)^{-(1-\alpha)} \\ &\quad \times e^{\frac{m^\alpha - k^\alpha}{f(E_i, E_\xi) 2^{\alpha-1} m^\alpha}}. \end{aligned} \quad (27)$$

由 (27) 式可知, 在给定网络增长规模 m 后, 演化拓扑的度分布取决于节点剩余能量和负载调节系数. 在构建拓扑时, 可以通过调节参数 α 实现拓扑的能量和负载的均衡, 从而避免节点由于负载过大而造成能量耗尽, 进而引起节点失效.

4 仿真与性能分析

本文针对具有节能代表性的 EAEM、基于适应度和局域世界的无线传感器网络拓扑演化 (EBFL) 模型和容错性较好的 Barabási-Albert (BA) 模型进行 Matlab 仿真实验对比. 在仿真实验中, 为了更好地体现节点剩余能量和负载调节系数对最终网络性能的影响, 在 EBFL, BA, FTTEL 模型和 EAEM 中均采用了相同的初始网络规模 m_0 , 并假设节点拥有相同的初始能量, 仿真实验参数列于表 1. 假设网络中的每个节点至少能够完成 4000 轮的数据传输, 即由表 1 的实验环境参数和 (14) 式可知 $\alpha \leq 0.87$, 其中每一个实验结果都是取 50 次实验的平均值.

4.1 FTEL模型与EAEM的度分布对比

图1给出了当 $\alpha = 0.87$ 时FTEL模型和EAEM的度分布. 从图1可以看出, FTEL模型和EAEM都具有度大的节点分布概率小和度小的节点分布概率大的特点. 但是FTEL模型度大的节点占有的概率远小于EAEM度大的节点占有的概率, FTEL模型使得拓扑的度分布更加均衡, 节点的负载也更加均衡, 从而平衡了节点的能耗.

表1 仿真实验环境参数

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

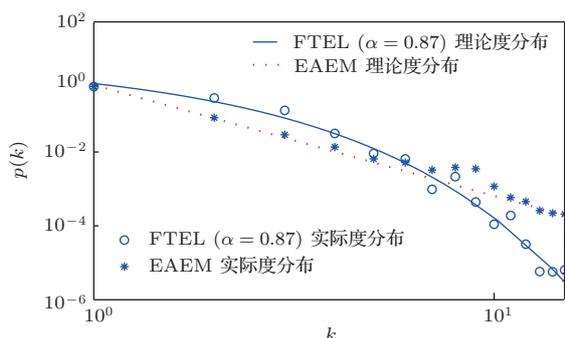


图1 FTEL模型与EAEM的度分布对比

4.2 节点度和节点剩余能量的关系

拓扑在运行100轮后进行重构, 图2给出了此时EAEM, BA和FTEL模型($\alpha = 0.87$)所构建的拓扑中节点度 k 和节点剩余能量 E_i 的关系, 其中节点剩余能量是度为 k 的节点的平均剩余能量.

从图2可以看出, EAEM和FTEL模型($\alpha = 0.87$)都具有度越大的节点剩余能量越高的特点, 这有利于WSNs能耗均衡, 而BA模型却没有这个特点. 这是由于在构建拓扑时EAEM和FTEL模型($\alpha = 0.87$)均考虑了节点的剩余能量, 并使剩余能量很大的节点具有较大的连接概率. 同时在能耗均衡方面FTEL模型($\alpha = 0.87$)优于EAEM, 这是由于在择优连接时, FTEL模型考虑了节点的剩

余能量和负载的相互作用, 所以构建出的拓扑具有更好的节能性. 综合上述分析可知, FTEL模型比EAEM和BA模型更适合WSNs拓扑结构实际的演化特点.

4.3 网络生命周期对比

分别对EAEM, EBFL模型和 $\alpha = 0.5, 0.87, 1$ 的FTEL模型的网络生命周期进行仿真对比, 每一轮实验均按照所建立的能耗模型进行数据传输, 直到可用节点数(最大连通分支中的节点总数)占网络原有节点数的50%时停止, 此时网络生命周期也终止. 图3显示了三种算法在出现首节点能量耗尽的时间和在网络失效50%的节点时网络的运行时间.

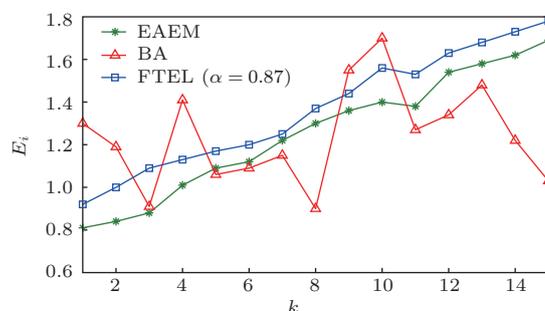


图2 运行100轮后所重新构建的拓扑中节点度 k 与节点剩余能量 E_i 的关系

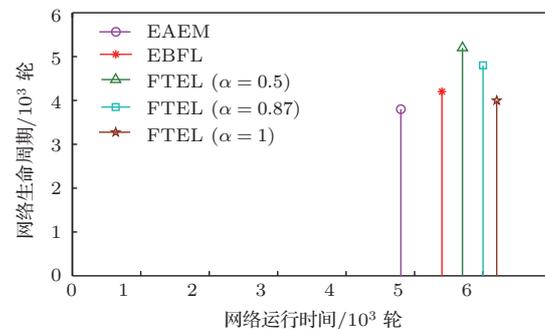


图3 EAEM, EBFL模型和 $\alpha = 0.5, 0.87, 1$ 的FTEL模型的网络生命周期对比

从图3可以看出: $\alpha = 0.5, 0.87, 1$ 的FTEL模型均比EAEM和EBFL模型拥有更长的网络运行时间; 在首节点失效时, FTEL模型能完成4000轮数据的交换传输, 并且 $\alpha = 0.5, 0.87$ 的FTEL模型比EAEM和EBFL模型出现首节点能量耗尽的时间晚, 因此FTEL模型的网络生命周期比EAEM和EBFL模型的网络生命周期有更大的提升空间. 对于不同的 α 值, FTEL模型的网络运行时间随着 α 的增大而提高, 但是出现首节点失效的时间降低,

这是由于在择优连接时, 节点优先与那些负载量小和剩余能量大的节点进行连接, 使拓扑的能耗更加均匀, 从而延长了网络的运行时间, 但是随着 α 的增大节点负载增加, 这导致出现首节点失效的时间越早. 因此, 可以通过设置不同的 α 值来满足网络的需求.

4.4 容错能力对比

为了衡量FTEL模型的容错能力, 将FTEL模型($\alpha = 0.5, 0.87$)、EAEM和EBFL模型进行仿真实验对比, 在每轮中各个节点都与其相邻节点进行数据交换, 并随机移除一个节点和移除能量耗尽的节点, 然后分别统计网络中最大连通片分支上的节点数, 结果如图4所示.

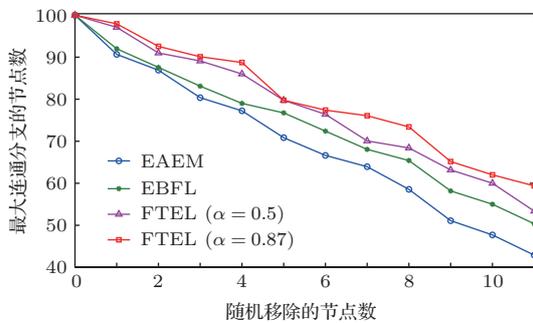


图4 FTEL ($\alpha = 0.5, 0.87$), EBFL 模型和 EAEM 的容错能力对比

由图4可以看出, FTEL模型($\alpha = 0.5, 0.87$)、EAEM和EBFL模型对随机失效均表现出较强的抗毁性. 这是由于基于无标度网络的拓扑演化模型在择优连接时, 度大的节点所占比例很小, 度小的节点所占比例很大. 当拓扑中的节点面临随机失效时, 度小的节点失效的概率较大, 因此这对网络的连通性造成的影响很小. FTEL模型($\alpha = 0.5, 0.87$)比EAEM和EBFL模型具有更好的容错性. 这是因为WSNs节点随机失效在很大程度上是由于能量耗尽引起的, 而FTEL模型在择优连接时考虑了能量和负载因素, 更好地均衡了节点的能量负载, 因此FTEL模型使拓扑拥有更好的容错性.

5 结 论

本文根据WSNs节点生命期与节点能耗和负载的关系提出了FTEL模型, 在构建拓扑时此模型

将节点的剩余能量和负载作为节点适应度函数, 使高能节点和负载量小的节点拥有更大的连接概率, 这更有利于WSNs能耗的均衡, 负载调节系数的引入, 使得拓扑中每个节点都能满足网络生存时间的需求, 从而延长了网络生命周期. 由仿真分析可知, 采用FTEL模型演化出的容错拓扑使网络拥有更长的生存时间, 具有更好的容错性.

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] 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]
- [3] Wang Y Q, Yang X Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 040206
- [4] Li Q, Zhang B H, Cui L G, Fan Z, Vasilakos A 2012 *Chin. Phys. B* **21** 050205
- [5] Wang Y Q, Yang X Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 010509
- [6] Wang Z, Wang Q, Wei D B, Wang L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 120505 (in Chinese)[王翥, 王祁, 魏德宝, 王玲 2012 物理学报 **61** 120505]
- [7] Kashyap A, Khuller S, Shayman M 2006 *IEEE Infocom.* **7** 1
- [8] Albert R, Barabási A L 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 47
- [9] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [10] Chen L J, Liu M, Chen D X, Xie L 2009 *Chin. J. Comput.* **32** 69 (in Chinese) [陈力军, 刘明, 陈道蕃, 谢立 2009 计算机学报 **32** 69]
- [11] Zhu H L, Luo H, Peng H P, Li L X, Luo Q 2009 *Chaos Solitons Fract.* **41** 1828
- [12] Qi X Q, Ma S, Zheng G Z 2011 *J. Inform. Comput. Sci.* **8** 467
- [13] Zheng G Z, Liu Q M 2013 *Comput. Electr. Eng.* **39** 1779
- [14] 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]
- [15] Chen Y, Zhao Q 2005 *IEEE Commun. Lett.* **9** 976
- [16] Tang W, Guo W 2010 *J. Software* **21** 1646 (in Chinese) [唐伟, 郭伟 2010 软件学报 **21** 1646]
- [17] Liu H R, Zhao L J, Yin R R, Hao X C, Li Y Q, Liu B 2011 *J. Inform. Comput. Sci.* **8** 3227
- [18] Wang J W, Rong L L, Zhang L, Zhang Z Z 2008 *Physica A* **387** 6671
- [19] Xie W B, Xian M, Chen Y G 2010 *J. Electron. Inform. Technol.* **32** 1205 (in Chinese) [解文斌, 鲜明, 陈永光 2010 电子与信息学报 **32** 1205]

Wireless sensor network fault tolerant topology for lifetime optimization*

Liu Hao-Ran¹⁾²⁾ Yin Wen-Xiao^{1)†} Han Tao¹⁾ Dong Ming-Ru¹⁾

1) (*Institute of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

2) (*Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

(Received 13 October 2013; revised manuscript received 25 October 2013)

Abstract

Because of the limited energy of wireless sensor network, the optimization of network lifetime becomes a primary problem in the design of the network. Through analyzing the node residual energy and the load effect on the node lifetime, the fault tolerant topology evolution model in wireless sensor networks is put forward for extending lifetime. And the scope of load adjustment coefficient is obtained under the condition of network survival time. The simulation results show that the topological structure based on the evolution of the scale free network has the good fault tolerance characteristics. And it can also balance the network node energy consumption and the lifetime extension of the network.

Keywords: wireless sensor networks, scale-free, lifetime, residual energy

PACS: 05.65.+b, 05.70.Np

DOI: [10.7498/aps.63.040509](https://doi.org/10.7498/aps.63.040509)

* Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. F2012203179).

† Corresponding author. E-mail: yinwenxiao2009@163.com