

基于综合故障的无线传感器网络无标度容错拓扑模型研究*

刘彬¹⁾ 董明如¹⁾ 刘浩然^{2)†} 尹荣荣²⁾ 韩丽²⁾

1) (燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004)

2) (燕山大学信息科学与工程学院, 秦皇岛 066004)

(2014年4月21日收到; 2014年5月13日收到修改稿)

针对无线传感器网络实际应用中遇到的环境损毁和能量耗尽的问题, 本文首先对网络综合故障进行建模, 获取满足综合故障容忍能力和网络生命期双重需求的网络节点度和节点度上限值的取值规律, 并结合由无标度特征导出的两者关系, 从而求得最优节点度上限值, 最终引入关于节点度上限值的适应度函数, 提出了容忍环境损毁和能量耗尽综合故障的无标度容错拓扑演化模型. 仿真实验结果表明, 该模型演化生成的无标度拓扑对环境损毁和能量耗尽具有较好的容错性, 并能够有效地延长网络生命期.

关键词: 无线传感器网络, 无标度拓扑, 环境损毁, 能量耗尽

PACS: 05.65.+b, 05.70.Np

DOI: 10.7498/aps.63.170506

1 引言

部署在恶劣环境中的无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)是一个能量受限的网络^[1,2], 网络中的节点经常因环境损毁和能量耗尽而频繁失效^[3,4], 从而大大降低了网络的覆盖连通度, 影响网络的性能, 甚至导致整个网络崩溃而不能继续满足应用需求^[5], 因此构建容忍综合故障的容错拓扑是WSNs的一个重要研究课题.

在WSNs容错拓扑结构中, 节点度服从幂律分布的无标度容错拓扑结构无需添加冗余链路, 无低能效限制, 更可以满足恶劣环境等对拓扑容错性的需求^[6,7], 具有其他容错拓扑结构无法比拟的优势, 因此基于无标度结构的WSNs容错拓扑成为一个研究热点, 近年来涌现了大量关于WSNs无标度容错拓扑的文献. 文献^[8]将复杂网络的择优增长连接机理引入到WSNs中, 在网络簇间构建容错拓扑, 使演化生成的WSNs容错拓扑具有

无标度特性, 但构建拓扑过程中没有考虑能量、干扰等因素对网络的影响. 文献^[9]考虑了节点的剩余能量, 借助随机行走机理, 以节点当前能量值作为行走依据, 生成了能量均衡的WSNs无标度簇间拓扑结构. 然而文献^[8]和^[9]研究的均是层次型网络的簇间无标度演化, 文献^[10]提出局域世界的概念, 将增长择优机理应用到平面WSNs中, 提出了EBEM(Energy-Balanced Evolution Model)算法, 使生成的WSNs无标度拓扑的容错性得以有效改善. 文献^[11]针对WSNs自身特性, 考虑了节点能量及发射半径受限、节点易受各种因素影响而失效等情况, 提出了一个改进的无标度演化模型, 更适用于现实的WSNs. 文献^[12]对网络节点加以限制, 建立适应度模型, 从而演化出了能耗更均衡的WSNs无标度容错拓扑. 文献^[13]在考虑节点剩余能量的同时分析了负载对网络生命期的影响, 生成了具有能耗和负载的容错拓扑(FTEL)模型, 使生成的拓扑有效地均衡拓扑能耗和节点负载, 有效延长了网络生命期. 从上述文献可以看出WSNs

* 河北省自然科学基金(批准号: F2012203179, F2014203239)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: liuhaoranyu@163.com

无标度容错拓扑的研究在逐渐深入和完善,目前所研究的WSNs无标度拓扑对随机节点失效具有强容忍能力,并且通过均衡节点能耗延缓节点能量耗尽从而延长网络生命期,但它们均没有考虑因能量耗尽造成的节点失效对拓扑结构的影响,不能容忍能量耗尽故障,故这些WSNs无标度拓扑算法在优化网络容错性上仍存在局限性,因此构建可容忍能量耗尽和环境损毁综合故障的WSNs无标度容错拓扑具有一定研究意义。

基于上述分析,本文首先对能量耗尽故障和环境损毁故障进行分析,建立综合故障模型,以综合故障容忍能力和网络生命期作为限制条件量化分析网络节点度,并依据WSNs无标度特征最终获得最优节点度上限值,构建有关最优节点度上限值的适应度函数,演化生成WSNs容忍综合故障的无标度容错拓扑TIST(Tolerant Integrated-fault Scale-free Topology)。

2 综合故障建模及最优节点度上限值获取

2.1 综合故障模型

在WSNs中,能量耗尽和恶劣环境造成的节点失效频繁出现,且两种故障往往同时存在,因此网络综合故障概率 P 可以表示为其能量耗尽故障概率 P_e 和随机失效故障概率 P_r 的乘积形式^[14]:

$$P = P_e \cdot P_r, \quad (1)$$

其中 P_e ^[15]取决于网络节点平均初始能量 $\bar{E}_0$,平均能量消耗 $\bar{E}_c$ 和网络运行时间 t ,即

$$P_e = 1 - e^{-\bar{E}_c t / \bar{E}_0}. \quad (2)$$

采用通用的一阶射频模型^[16]作为WSNs无线通信能耗模型,网络中任意节点 i 发送 l bit数据时消耗的能量 E_t 可以表示为

$$E_t = E_{\text{elec}} \cdot l + \varepsilon_{\text{amp}} \cdot l \cdot d_i^2, \quad (3)$$

其中 E_{elec} 是数据融合能耗, ε_{amp} 是放大器功放能耗, d_i 是网络节点 i 的发射半径。

节点 i 接收 l bit数据时的能量消耗 E_r 为

$$E_r = E_{\text{elec}} \cdot l. \quad (4)$$

则网络中任意节点 i 的总能耗 E_{ci} 可用下式表示:

$$E_{ci} = E_t + E_r = 2E_{\text{elec}} \cdot l + \varepsilon_{\text{amp}} \cdot l \cdot d_i^2. \quad (5)$$

假设 N 个节点均匀散布在二维有界监测区域 G 内,则网络平均能量消耗 $\bar{E}_c$ 表示如下:

$$\bar{E}_c = \sum_{i=1}^N E_{ci} / N = 2E_{\text{elec}} \cdot l + \varepsilon_{\text{amp}} \cdot l \cdot \sum_{i=1}^N d_i^2 / N. \quad (6)$$

设监测区域 G 的面积为 A ,则节点落入以通信距离 d_i 为半径的圆域 D 内的概率为

$$P_i = \iint_D f(x, y) dx dy = \frac{\pi d_i^2}{A}, \quad (7)$$

则节点 i 的传输距离 d_i 与其节点度 k_i 之间存在如下关系:

$$k_i = N \cdot P_i = N \pi d_i^2 / A. \quad (8)$$

故网络节点度 $\tilde{k}$ (网络中节点的平均度)可表示为

$$\tilde{k} = \sum_{i=1}^N k_i / N = \pi \sum_{i=1}^N d_i^2 / A. \quad (9)$$

结合(6)式和(9)式可得网络平均能量消耗为 $\bar{E}_c = 2E_{\text{elec}}l + \varepsilon_{\text{amp}}lA\tilde{k}/\pi N$.设网络中节点的初始能量均为 E_0 ,则 $\bar{E}_0 = E_0$.依据(2)式可得网络能量耗尽故障概率如下:

$$P_e = 1 - e^{-(u+v\tilde{k})t}, \quad (10)$$

式中, $u = 2E_{\text{elec}}l/E_0$, $v = \varepsilon_{\text{amp}}lA/N\pi E_0$.

环境损毁故障引发的随机失效导致网络稀疏,从而使节点在网络运行环境中发生孤立丧失固定功能,此故障概率与节点度 $\tilde{k}$ 呈指数变化关系^[17]:

$$P_r = e^{-\tilde{k}}. \quad (11)$$

结合(1),(10)和(11)式,可得网络综合故障概率如下:

$$P = (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t}) e^{-\tilde{k}}. \quad (12)$$

从上述分析可知,能量耗尽和环境损毁的综合故障模型可以用(12)式表示,从式中可以看出综合故障概率 P 与网络节点度 $\tilde{k}$ 有关,下面利用所获得的网络综合故障模型对 $\tilde{k}$ 进行量化分析,获取容忍综合故障下的网络节点度 $\tilde{k}$ 与节点度上限值 k_{max} 之间的取值规律,并结合由无标度网络特性推导出的 $\tilde{k}$ 和 k_{max} 关系式,最终求得容忍综合故障的WSNs无标度网络的最优节点度上限值。

2.2 最优节点度上限值分析

在 WSNs 实际应用中, 不仅要确保网络拓扑的容错性, 同时需满足网络生命期要求, 因此以能量耗尽及环境损毁综合故障容忍能力和网络生命期双重需求作为条件来获取 $\tilde{k}$ 和 $k_{\max}$ 的关系. 下面首先通过网络分析给出综合故障容忍能力和网络生命期双重需求的定义.

对于一个网络 G , 为提高其拓扑的能量有效性, 网络 G 须保证一定的生存时间 $t_{\min}$, 即 $t \geq t_{\min}$; 同时为增强拓扑对随机失效节点的容忍能力, 网络 G 须维持一定的节点度下限 $k_{\min}$, 即 $\tilde{k} \geq k_{\min}$, 为增强拓扑对能量耗尽节点的容错性, 网络 G 须维持一定的节点度上限 $k_{\max}$, 即 $\tilde{k} \leq k_{\max}$. 则为满足网络生命期和综合故障容忍能力要求较高的应用场景, 网络生命期和能量耗尽及随机失效综合故障容忍能力的双重需求定义如下:

定义 1 对于一个网络 G , 如果其运行时间 $t \geq t_{\min}$, 且网络节点度符合 $k_{\min} \leq \tilde{k} \leq k_{\max}$, 则网络 G 满足生命期和综合故障容忍能力的双重需求. 其中 $t_{\min}$ 为网络预设运行时间, $k_{\min}$ 为网络预设最小节点度, $k_{\max}$ 为节点度上限值 (网络最大节点度).

为了确保网络满足定义 1, 下面采用不等式放缩法对满足定义 1 的综合故障概率 P 进行讨论分析.

1) 由 $t \geq t_{\min}$ 可得, 综合故障概率 P 符合

$$P \geq (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) e^{-k}. \quad (13)$$

又根据 $k_{\min} \leq \tilde{k} \leq k_{\max}$ 可得

$$\begin{aligned} (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) &\leq (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) \\ &\leq (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}), \\ e^{-k_{\max}} &\leq e^{-\tilde{k}} \leq e^{-k_{\min}}, \end{aligned} \quad (14)$$

则由不等式的基本性质可以推出

$$\begin{aligned} (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) e^{-k_{\max}} \\ &\leq (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) e^{-k} \\ &\leq (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) e^{-k_{\min}}. \end{aligned} \quad (15)$$

结合 (13) 和 (15) 式, 概率 P 可缩放为

$$P \geq (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) e^{-k_{\min}}. \quad (16)$$

2) 由 $k_{\min} \leq \tilde{k} \leq k_{\max}$ 得

$$(1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) \leq (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}})$$

$$\begin{aligned} &\leq (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}), \\ e^{-k_{\max}} &\leq e^{-\tilde{k}} \leq e^{-k_{\min}}. \end{aligned} \quad (17)$$

基于不等式的基本性质, 结合 (12) 式可得

$$\begin{aligned} (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) e^{-k_{\max}} &\leq P \\ &\leq (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) e^{-k_{\min}}. \end{aligned} \quad (18)$$

又根据 $t \geq t_{\min}$ 可得 $(1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) e^{-k_{\min}} \leq (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) e^{-k_{\min}}$, 结合 (18) 式, P 可放缩为

$$P \leq (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) e^{-k_{\min}}. \quad (19)$$

综上, 根据 (16) 和 (19) 式可得

$$P = (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) e^{-k_{\min}}. \quad (20)$$

因此, 如果网络综合故障概率满足 $P = (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) e^{-k_{\min}}$, 则网络可达到满足综合故障容忍能力及生命期双重需求的目的, 为便于后续内容描述, 将此时的网络综合故障概率记为 P_0 , 即 $P_0 = (1 - e^{-(u+v\tilde{k})t_{\min}}) e^{-k_{\min}}$.

上述分析将综合故障容忍能力和网络生命期双重需求转化成了网络故障概率的要求, 在此基础上, 下面通过对网络节点度进行量化分析, 获取在满足网络故障概率要求下的具有最大生存时间的网络节点度与节点度上限值的取值关系.

当网络故障概率满足 $P = P_0$, 记网络运行时间为 t 为 $\tilde{t}$, 令 $w = u/v$, 根据 (12) 式可得

$$\tilde{t} = -\frac{\ln(e^{-\tilde{k}} - P_0) + \tilde{k}}{v(w + \tilde{k})}. \quad (21)$$

采用一元函数极值分析法研究 $\tilde{k}$ 与 $\tilde{t}$ 之间的变化关系, 对 $\tilde{t}$ 求关于 $\tilde{k}$ 的一阶导数可得如下:

$$\tilde{t}' = \frac{\ln(e^{-\tilde{k}} - P_0) + \tilde{k} + P_0 \frac{w + \tilde{k}}{e^{-\tilde{k}} - P_0}}{v(w + \tilde{k})^2}. \quad (22)$$

$\tilde{t}$ 关于 $\tilde{k}$ 的二阶导数为

$$\begin{aligned} \tilde{t}'' &= \frac{1}{v(w + \tilde{k})^3} \left[2\ln(e^{-\tilde{k}} - P_0) + 2\tilde{k} \right. \\ &\quad \left. + P_0 \frac{w + \tilde{k}}{e^{-\tilde{k}} - P_0} \left(2 - e^{-\tilde{k}} \frac{w + \tilde{k}}{e^{-\tilde{k}} - P_0} \right) \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

由于 $u = 2E_{\text{elec}}l/E_0 > 0$, $v = \varepsilon_{\text{amp}}lA/N\pi E_0 > 0$, 则 $w = u/v > 0$, 且 $\tilde{k}$ 为正整数, 所以 $v(w + \tilde{k})^3 > 0$, 又因为 $\ln(e^{-\tilde{k}} - P_0) \leq \ln e^{-\tilde{k}}$, $-e^{-\tilde{k}} \frac{w + \tilde{k}}{e^{-\tilde{k}} - P_0} \leq$

$-e^{-\tilde{k}} \frac{w+\tilde{k}}{e^{-\tilde{k}}}$, 将其代入 (23) 式可得

$$\begin{aligned} \tilde{t}'' &\leq \frac{[2P_0 - P_0(w+\tilde{k})]/(e^{-\tilde{k}} - P_0)}{v(w+\tilde{k})^2} \\ &= \frac{2P_0 - P_0(w+\tilde{k})}{v(w+\tilde{k})^2(e^{-\tilde{k}} - P_0)}. \end{aligned}$$

令 $f(\tilde{k}) = \frac{2P_0 - P_0(w+\tilde{k})}{v(w+\tilde{k})^2(e^{-\tilde{k}} - P_0)}$, 则有

$$\begin{aligned} f(\tilde{k})' &= P_0\{[(w+k)-2][(w+\tilde{k})e^{-\tilde{k}} - (e^{-\tilde{k}} - P_0)] \\ &\quad + 2(e^{-\tilde{k}} - P_0)\} / v(w+\tilde{k})^3(e^{-\tilde{k}} - P_0)^2. \quad (24) \end{aligned}$$

由前面分析出 $v(w+\tilde{k})^3 > 0$, 则分母 $v(w+\tilde{k})^3(e^{-\tilde{k}} - P_0)^2 > 0$. 为保证大规模 WSNs 连通性, 须有 $k_{\min} \geq 2$, 本文取 $k_{\min} = 2$ 来分析节点度 $\tilde{k}$ 和节点度上限值 $k_{\max}$ 的关系, 因此由 $k \geq k_{\min} = 2$ 可得 $(w+k)-2 > 0$; 因 $-(e^{-\tilde{k}} - P_0) > -e^{-\tilde{k}}$, 则有 $(w+\tilde{k})e^{-\tilde{k}} - (e^{-\tilde{k}} - P_0) > 0$; 又由 (21) 式知, 须有 $e^{-\tilde{k}} - P_0 > 0$; 因此分子 $P_0\{[(w+k)-2][(w+\tilde{k})e^{-\tilde{k}} - (e^{-\tilde{k}} - P_0)] + 2(e^{-\tilde{k}} - P_0)\} > 0$. 综合可得 $f(\tilde{k})' > 0$.

由 $f(\tilde{k})' > 0$ 可知 $f(\tilde{k})$ 在 $k \in [k_{\min}, +\infty)$ 是增函数, 又根据洛比达法则得 $\lim_{\tilde{k} \rightarrow +\infty} f(\tilde{k}) = 0$, 则 $f(\tilde{k}) \leq 0$, 因此 $\tilde{t}'' \leq 0$, 那么根据函数凹凸定理得到, $\tilde{t}$ 在 $k \in [k_{\min}, +\infty)$ 内是凸函数, 存在极大值.

进而, 根据 (22) 式可得, 在 $k \in [k_{\min}, +\infty)$ 内 $\tilde{t}' > 0$, 即 $\tilde{t}$ 是增函数, 从而, 在 $e^{-\tilde{k}} - P_0 > 0$ 的条件下, 得 $\tilde{k} = |-\ln P_0|$ 时 $\tilde{t}$ 最大. 也就是说, 存在惟一极值点 $\tilde{k}_0 = |-\ln P_0|$, 可使网络满足故障率要求下实现其生命期最大化.

因此, 在网络生命期和容忍综合故障双重要求下, 可获得网络节点度 $\tilde{k}$ 和节点度上限值 $k_{\max}$ 的关系如下:

$$\begin{aligned} \tilde{k} &= |-\ln P_0| \\ &= |-\ln(1 - e^{-(u+v k_{\max}) t_{\min}}) e^{-k_{\min}}|. \quad (25) \end{aligned}$$

(25) 式表示出了满足综合故障容忍能力和网络生命期双重需求时 $\tilde{k}$ 和 $k_{\max}$ 之间的关系, 下面根据无标度网络自身特性获取 $\tilde{k}$ 和 $k_{\max}$ 的取值规律.

无标度网络生长过程中, 无标度容错拓扑的度分布服从幂率 $p(k) = Ck^{-\lambda} (C > 0, \lambda > 2)$, 从而网

络节点度又可以表示为

$$\begin{aligned} \tilde{k} &= \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} kp(k)dk \\ &= \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} k \cdot Ck^{-\lambda} dk \\ &= C(k_{\max}^{2-\lambda} - k_{\min}^{2-\lambda}) / (2 - \lambda). \quad (26) \end{aligned}$$

由于 $p(k) = Ck^{-\lambda}$ 是连续变化的, 因此由概率密度性质 $\int_{k_{\min}}^{k_{\max}} p(k)dk = 1$ 可以求得系数 $C = (1 - \lambda) / (k_{\max}^{1-\lambda} - k_{\min}^{1-\lambda})$, 又 $k_{\min} = 2$, 则可得网络节点度 $\tilde{k}$ 和最大节点度 $k_{\max}$ 的关系如下:

$$\begin{aligned} \tilde{k} &= [(1 - \lambda) / (k_{\max}^{1-\lambda} - k_{\min}^{1-\lambda})] [(k_{\max}^{2-\lambda} - k_{\min}^{2-\lambda}) / (2 - \lambda)] \\ &= \left(\frac{1 - \lambda}{2 - \lambda} \right) \left(\frac{k_{\max}^{2-\lambda} - 2^{2-\lambda}}{k_{\max}^{1-\lambda} - 2^{1-\lambda}} \right). \quad (27) \end{aligned}$$

若 λ 已知, 结合 (25) 和 (27) 式, 可以计算求得最优节点度上限值 $k_{\max}$, 从而为容忍综合故障的 WSNs 无标度容错拓扑演化奠定基础.

3 TIST 演化模型及动态特性分析

为演化生成可容忍综合故障的 WSNs 无标度容错拓扑, 构建拓扑时引入有关最优节点度上限值 $k_{\max}$ 的适应度函数, 并分析演化所得拓扑的度分布属性, 最终获取 λ 值, 进而依据上节理论研究, 确定最优 $k_{\max}$ 值, 从而按照提出的 TIST 演化模型生成目标容错拓扑.

3.1 TIST 演化模型

考虑到 WSNs 节点通信半径有限, 从而对每一个新加入网络的节点构建其局域世界, 只利用其拥有的局部信息进行择优连接. 又根据 WSNs 网络的实际特点, 本文考虑 sink 节点存在, 并按照距离 sink 节点距离由近及远的顺序添加新节点 (假设传感器节点均匀分布在监测区域内, sink 节点位于监测区域的中心位置). 同时为了演化生成目标容错拓扑结构, 引入有关最优 $k_{\max}$ 的适应度函数, 依据经典的择优连接机理, 构建 TIST 演化模型描述如下:

1) 增长: 初始网络是由 sink 节点的 m_0 个一跳邻居组成的小型网络 (其中有 m_0 个节点, e_0 条边), 在每一个时间步长内, 一个新节点 Q 加入到网络中, 并与已有网络中的 m 个节点, 形成新的网络.

按照节点离 sink 节点的距离, 由近及远地选择新节点加入网络.

2) 局域世界择优连接: 新节点 Q 的 M_Q 个一跳邻居组成了它的局域世界, 用 A 表示. 新节点 Q 与节点 $i (i \in A)$ 相连的概率 $\prod_A(k_i)$ 取决于节点 i 的节点度 k_i 和节点度上限值 $k_{\max}$, 连接概率 $\prod_A(k_i)$ 服从以下规则:

$$\prod_A(k_i) = (M_Q/(m_0 + t)) \times \frac{(1 - k_i/k_{\max}) \cdot k_i}{\sum_{j \in A} k_j}, \quad (28)$$

其中, $1 - k_i/k_{\max}$ 为节点 i 的适应度函数, 表明 k_i 越接近节点度上限值 $k_{\max}$, 节点 Q 选择与节点 i 相连的概率越小, 当 k_i 达到上限值 $k_{\max}$ 时, 接下来的时间内新加入的节点再也不会选择 i 作为连接节点. 在经过 t 时间步长后, 将形成一个具有 $N = m_0 + t$ 个节点, $mt + e_0$ 条边的无标度网络.

从 TIST 演化模型中可以看出, 节点度上限值决定了新节点与其相连的概率, 而由第二节可知, 幂指数 λ 已知时, 可求得 WSN 无标度网络容忍综合故障条件下的最优节点度上限值 $k_{\max}$, 把获得的最优 $k_{\max}$ 值代入到 TIST 演化模型的择优连接概率中, 最终演化生成容忍能量耗尽和环境损毁综合故障的 WSNs 无标度容错拓扑. 下面通过对 TIST 演化模型的动态特性进行分析, 得到拓扑的度分布表达式, 从而确定幂指数 λ 值.

3.2 TIST 度分布属性分析

借助连续域理论分析方法来分析网络拓扑的度分布, 解析得到网络中的节点的度随时间的分布情况. 假设新节点 Q 在 t 时刻加入网络, R_0 为初始时刻的网络半径, R_t 为 t 时刻的网络半径, R_Q 为新加入节点 Q 的通信半径, 由于监测区域内节点均匀分布, 则可得

$$M_Q/(m_0 + t) \approx \frac{1}{2} R_Q/R_t^2. \quad (29)$$

将 (29) 式代入 (28) 式可得

$$\prod_A(k_i) = \frac{1}{2} \frac{R_Q^2}{R_t^2} \cdot \frac{(1 - k_i/k_{\max}) k_i}{\sum_{j \in A} k_j}. \quad (30)$$

由于节点均匀分布, 则有

$$\sum_{j \in A} k_j = \frac{1}{2} \frac{R_Q^2}{R_t^2} \cdot N(t) \cdot \langle k_t \rangle, \quad (31)$$

其中, $N(t)$ 是 t 时刻网络中的总节点数, $\langle k_t \rangle = 2mt/N(t)$ 是此时网络中节点的平均节点度.

将 (31) 式代入 (30) 式得

$$\prod_A(k_i) = \frac{(1 - k_i/k_{\max}) \cdot k_i}{2mt}. \quad (32)$$

借助连续场理论, 假设节点度 k_i 是连续变化的, 则 k_i 的连续变化速率为

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m \prod_A(k_i) = \frac{(1 - k_i/k_{\max}) \cdot k_i}{2t}. \quad (33)$$

设 $k_i(t)$ 为 t 时刻节点 i 的度, 求解上述微分方程, 并结合初始条件 $k_i(t) = m$, 得到 i 的节点度随时间的变化规律为

$$k_i(t) = \frac{m \cdot k_{\max}}{k_{\max} - m + m(t/t_i)^{1/2}} \cdot \left(\frac{t}{t_i}\right)^{1/2}, \quad (34)$$

式中 t_i 为节点 i 进入网络的时刻.

节点 i 的度小于 k 的概率 $P(k_i(t) < k)$ 可由下式求得:

$$\begin{aligned} P(k_i(t) < k) &= P\left(\frac{k_{\max} \cdot m}{k_{\max} - m + m \cdot (t/t_i)^{1/2}} \cdot \left(\frac{t}{t_i}\right)^{1/2} < k\right) \\ &= P\left(t_i > \frac{m^2 t \cdot (k_{\max} - k)^2}{k^2 \cdot (m - k_{\max})^2}\right) \\ &= 1 - P\left(t_i \leq \frac{m^2 t \cdot (k_{\max} - k)^2}{k^2 \cdot (m - k_{\max})^2}\right). \end{aligned} \quad (35)$$

每个时间步长内有且仅有一个节点加入到原网络中, t_i 服从均匀分布, 其概率密度 $P(t_i) = 1/(m_0 + t)$, 则有

$$\begin{aligned} P(k_i(t) < k) &= 1 - \frac{m^2 \cdot (k_{\max} - k)^2}{k^2 \cdot (m - k_{\max})^2} \cdot \frac{t}{m_0 + t}. \end{aligned} \quad (36)$$

依据文献 [18] 可知, 一般认为在大规模实际网络中节点度 k 远远小于节点度上限值 $k_{\max}$, 故 $k_{\max} - k \approx k_{\max}$, 则依据 TIST 模型演化出的容错拓扑的度分布表达式为

$$\begin{aligned} P(k) &= \frac{\partial P(k_i(t) < k)}{\partial k} \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t}{m_0 + t} \cdot \frac{2m^2(k_{\max})^2}{(m - k_{\max})^2} \cdot k^{-3} \\ &= 2 \left[\frac{m \cdot k_{\max}}{m - k_{\max}} \right]^2 \cdot k^{-3}. \end{aligned} \quad (37)$$

由 (37) 式可知演化生成的无标度容错拓扑的度分布的幂率指数 $\lambda = 3$, 结合 (25) 和 (27) 式, 根据具体实验环境便可获得 $k_{\max}$ 值, 将其代入 TIST 演化

模型, 从而演化获得可容忍综合故障的 WSNs 无标度容错拓扑结构.

4 仿真分析

本文使用 MATLAB 仿真工具实现具有容错代表性的 EBEM 和生命期性能较好的 FTEL 算法和本文研究的 TIST 算法, 并对其性能进行对比, 在仿真实验中, 为更好地体现实验演化拓扑结构的性能, 在 EBEM, FTEL 和 TIST 模型中采用了相同的初始网络规模, 并假设节点拥有相同的初始能量, 仿真实验参数如表 1 所示, 各项仿真结果均为 50 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	1000
节点分布区域 A/m^2	1000×1000
初始能量 E_0/J	10
数据包长 L/bit	400
数据融合能耗 $E_{\text{elec}}/(\text{nJ/bit})$	50
放大器功放能耗 $\epsilon_{\text{amp}}(\text{pJ/bit}\cdot\text{m}^{-2})$	100
最小节点度 $k_{\min}$ /个	2
最小运行时间 $t_{\min}$ /轮	1000

4.1 最优节点度上限值

依据表一给出的实验参数, 借助 matlab 仿真工具分别画出了 (25) 式和 (29) 式的曲线图, 如图 1 所示. 同时根据上文的理论分析, 计算求得 $k_{\max} = 17.408$, 因实际中 $k_{\max}$ 均为整数, 故取 $k_{\max} = 17$ 来实现 TIST 算法, 从而研究其网络拓扑性能.

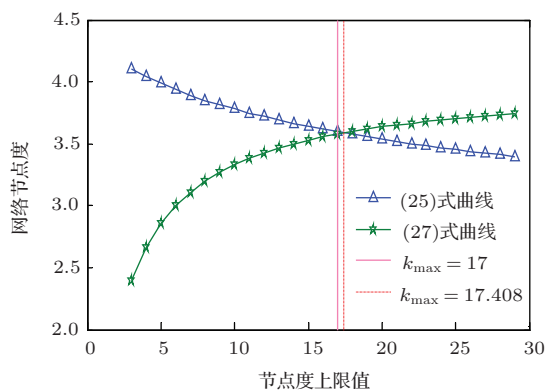


图 1 最优节点度上限值

4.2 容错能力对比

4.2.1 随机失效和能量耗尽容错性对比

实验中, 每轮各个节点均与其邻居节点进行数据交换, 分别在每一轮中随机移除一个节点和移除能量耗尽的节点, 统计网络中最大连通分支上的节点数目, 来分析拓扑对随机失效和能量耗尽的容忍能力, 图 2 和图 3 分别给出了三种算法对随机失效和能量耗尽的容错能力对比情况.

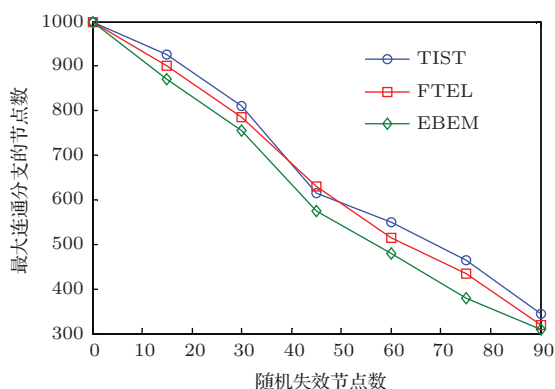


图 2 随机失效容忍能力对比图

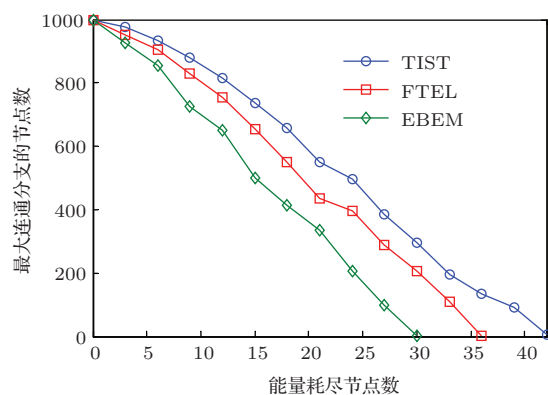


图 3 能量耗尽容忍能力对比图

从图 2 可以看出, EBEM, FTEL 和 TIST 对随机失效都有较强的容忍能力, 这是因为这三种拓扑均是基于无标度模型演化生成的, 网络中度较小的节点所占比例较大, 当网络拓扑面临随机失效时, 这些度小的节点失效概率较大, 对网络连通性能影响较小, 因此对随机失效具有较好的容错性. 由图 3 可知, 当能量耗尽节点数相同时, TIST 拓扑网络的最大连通分支明显大于 EBEM 和 FTEL, 而且到网络彻底崩溃, 不能进行任何数据传输时, TIST 网络拓扑可容忍 42 个节点能量耗尽, 均多于

EBEM和FTEL拓扑网络,从而验证了在综合故障条件下演化得到的TIST拓扑对能量耗尽故障有很好的容错能力.

4.2.2 综合故障容错性对比

为了衡量TIST拓扑对综合故障的容忍能力,在实验中分别运行三种模型算法,然后以Poisson规则随机地失效节点,并在网络运行的每一轮中移除能量耗尽的节点,观察网络运行时间与网络最大连通分支的关系,如图4所示.从图中可以看出,在网络运行的每一时刻,TIST拓扑的最大连通分支均大于EBEM和FTEL说明其在发生综合故障情况下能更好地确保网络连通性,保证网络任务的完成,对综合故障具有较强的容忍能力.这是由于其考虑了综合故障对网络容错性的影响,从而使所得的拓扑结构在提升网络综合故障容忍能力方面体现出了较佳的效果,对网络能量耗尽故障和随机失效故障的综合容错能力增强.

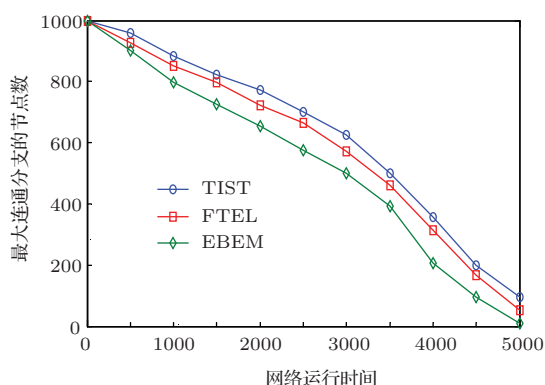


图4 综合故障容忍能力对比图

4.3 网络生命期和能效性对比

本实验中WSNs网络生命期为网络中首节点能量耗尽的时间,下面就三种模型演化生成拓扑的网络生命期进行对比.实验中分别运行三种模型算法并均移除一定比例的节点,观察剩余网络的生命期,如图5所示.图中显示了不同失效节点百分比(首节点, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%)下三种模型演化生成拓扑的生命期变化情况.

从图中可以看出,三种拓扑在出现首节点失效时的生存时间相差不大,但在失效节点比例将近20%时,TIST和生命期性能较好的FTEL拓扑相对于EBEM拓扑延长网络生命期的优势有明显的提升,在根据实际应用规定的网络崩溃时刻(如有

的应用环境规定网络失效节点达到50%时为网络崩溃时刻)内,随着节点失效比例的增加,其剩余网络拓扑的生命期提升也逐渐增大.这是因为TIST在满足网络综合故障容错性的同时考虑了生命期因素,依据满足网络生命期条件的适应度函数因子进行拓扑演化的,从而可确保有效地延长网络生命期.

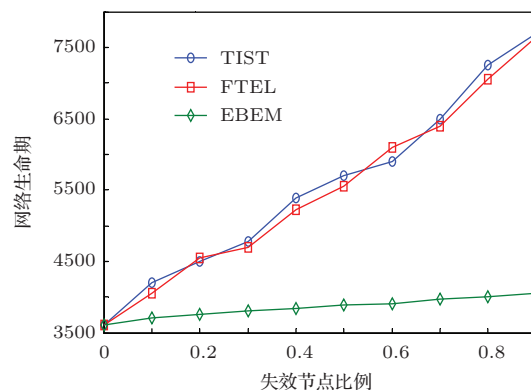


图5 网络生命期对比图

5 结 论

本文基于环境损毁和能量耗尽提出了容忍综合故障的WSNs无标度容错拓扑演化模型TIST.依据量化的综合故障模型和无标度特征获得最优节点度上限值 $k_{\max}$,在构建拓扑时引入有关 $k_{\max}$ 的适应度函数,使演化生成的网络拓扑在最大化网络生命期条件下有效容忍综合故障.由仿真分析可知,采用TIST演化生成的WSNs无标度容错拓扑不仅具有以往无标度拓扑容忍随机失效的特性,还能有效容忍能量耗尽失效,并且能够最大化的延长网络生命期.

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, Wang Z, Zuo K 2013 *Chin. Phys. B* **21** 020506
- [3] Li Q, Zhang B H, Gui L G, Fan Z, Vasilakos A 2012 *Chin. Phys. B* **21** 050205
- [4] 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]
- [5] Wang J W, Rong L L 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 3826
- [6] Zhou X, Yang F, Zhang F M, Zhou W P, Zou W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 150201 (in Chinese) [周漩, 杨帆, 张凤鸣, 周卫平, 邹伟 2013 物理学报 **62** 150201]

- [7] He M H, Zhang D M, Wang H Y, Li X G, Fang P J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5175 (in Chinese) [何敏华, 张端明, 王海艳, 李小刚, 方频捷 2010 物理学报 **59** 5175]
- [8] Chen L J, Chen D X, Xie L, Cao J N 2007 *IEEE Conference on Wireless Communications and Networking Kowloon, Hongkong, March 11–15, 2007* p3005
- [9] Chen L J, Liu M, Chen D X, Xie L 2009 *Chin. J. Comput.* **32** 69 (in Chinese) [陈力军, 刘明, 陈道蓄, 谢立 2009 计算机学报 **32** 69]
- [10] Zhu H L, Luo H, Peng H P, Li L X, Luo Q 2009 *Chaos Solitons Fract.* **41** 1828
- [11] Zhang X Y 2009 *Proceedings of the 5th International Conference on Wtreless Communications, Networking and Mobile Computing* Beijing, China, Septmeber 24–26, 2009 p1
- [12] Qi X Q, Ma S Q, Zheng G Z 2011 *JICS* **8** 467
- [13] 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]
- [14] Yin R R, Liu B, Liu H R, Hao X C 2012 *J. Electro. Infor. Techn.* **34** 2375 (in Chinese) [尹荣荣, 刘彬, 刘浩然, 郝晓辰 2012 电子与信息学报 **34** 2375]
- [15] Mizanian K, Yoursefi H, Jahangir A H 2009 *Proceedings of the 2009 IEEE Sarnoff Symposium Princeton, New Jersey, March 30–April 1, 2009* p1
- [16] Xie W B, Xian M, Chen Y G 2010 *J. Electro. Infor. Techn.* **32** 1205 (in Chinese) [解文斌, 鲜明, 陈永光 2010 电子与信息学报 **32** 1205]
- [17] Kleinrock L, Silvester J 1978 *Proceedings of the National Telecommunications Conference* Birmingham, Ala, March 27, 1978 p1
- [18] Zhao L J 2011 *M. S. Thesis* (Hebei: Yanshan University) (in Chinese) [赵磊静 2011 硕士学位论文 (河北: 燕山大学)]

A scale-free fault tolerant topology model in wireless sensor network for toleration of comprehensive fault*

Liu Bin¹⁾ Dong Ming-Ru¹⁾ Liu Hao-Ran^{2)†} Yin Rong-Rong²⁾ Han Li²⁾

1) (School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

2) (School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 21 April 2014; revised manuscript received 13 May 2014)

Abstract

A wireless sensor network in practice often suffers from environment damage and energy depletion. In order to solve the problem, this paper establishes a comprehensive fault model first. Then according to the demand for comprehensive fault tolerance ability and network lifetime, a relationship between the network node degree and the maximum node degree is obtained. And the relational expression between the two kinds of node degrees derived from the scale-free characteristics is acquired. Thus the optimal maximum node degree can be solved. Finally, based on the fitness function for the maximum node degree introduced, a scale-free fault tolerant topology evolution model is put forwarded which can effectively tolerate comprehensive fault. Simulation results show that the scale-free topology obtained has strong fault tolerance for environment damage and energy depletion. And it also can effectively prolong the network lifetime.

Keywords: wireless sensor networks, scale-free topology, environment damage, energy depletion

PACS: 05.65.+b, 05.70.Np

DOI: 10.7498/aps.63.170506

* Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. F2012203179, F2014203239).

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