

无线传感器网络中无标度拓扑的动态容错性分析*

尹荣荣¹⁾ 刘彬^{1)†} 刘浩然²⁾ 李雅倩¹⁾

1)(燕山大学电气工程学院, 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1月21日收到; 2014年2月27日收到修改稿)

增强网络的动态容错性对于抵御级联失效具有重要的现实意义. 根据无线传感器网络无标度拓扑中节点可变负载和恒定容量的特点建立级联失效模型, 在随机节点失效下研究负载参数和拓扑参数对其级联失效容错性的影响规律, 解析推导出该网络大规模级联失效的承载极限, 同时模拟结果发现该网络的级联失效容错性与其度分布系数和幂指数正相关. 这为从参数优化角度抵御随机节点失效下无线传感器网络无标度拓扑级联失效危害提供了依据.

关键词: 无线传感器网络, 无标度拓扑, 动态容错性, 参数优化

PACS: 02.50.-r, 05.65.+b, 05.90.+m

DOI: 10.7498/aps.63.110205

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)^[1,2]对节点失效的容错性研究一直是人们关注的重点. 根据节点的失效是否引发其他节点的失效, WSNs容错性可分为静态容错性和动态容错性^[3-5]. 由于WSNs中的节点承载着负载, 一个节点的失效导致负载的重新分配, 负载的重新分配可能使得其他节点上的负载超过其负载处理能力而发生更大规模的失效, 造成节点的级联失效, 因此, 动态容错性也称为级联失效容错性.

近年来, 学者们利用无标度拓扑对随机节点失效的强容错能力, 有效提升了WSNs容错性^[6-9]. 但是无标度拓扑强容错性考虑的是静态容错性, 而考虑负载变化的级联失效容错性与仅考虑静态容错性有较大不同^[10]. 针对无标度拓扑级联失效容错性问题, Motter等提出了负载-容量级联失效模型^[11], 该模型定义网络中每一个节点都有一定的负载和容量(负载处理能力), 当某些节点失效时, 这些节点所承担的负载按照一定的规则, 转移到网

络中其他正常节点上, 而接收到额外负载的节点, 其总负载可能超过自身容量, 从而引发新一轮的负载转移, 该模型解释了级联失效产生的原因, 是无标度拓扑级联失效模型研究中占比例最大的一类, 相关的级联失效模型还有CASCADE模型^[12], OPA模型^[13]和沙堆模型^[14]等. 在级联失效模型基础上, Goh等从理论和实验两方面分析得出, 无标度拓扑的级联失效规模具有幂律特性^[15]. 随后, Bobson等推导出了无标度拓扑的级联失效规模, 并得到了产生幂律级联失效规模的临界容量值^[16]. 李勇等研究了均匀容量的无标度拓扑级联失效容错性问题, 找到了级联失效临界容量^[17]. Wang等和Dou等就线性和非线性容量的级联失效容错性问题也给出了级联失效临界容量^[18,19]. 而Liu等则通过节点容量优化方式研究了级联失效的抵御策略, 依据节点的重要性调整节点容量, 有效提升了无标度拓扑级联失效的抵抗能力^[20].

可见, 现有无标度拓扑级联失效容错性研究不仅关注拓扑级联失效模型, 更关心拓扑级联失效的承载极限和抵御策略. 但已有提升无标度拓扑级联失效容错性的研究, 都是从节点容量的分析和优化

* 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: liubin@ysu.edu.cn

角度出发, 相比传统的复杂网络, WSNs 存在有限硬件资源和恶劣部署环境的制约, WSNs 中节点容量是有限的, 且在整个网络运行期间是恒定的, 如果直接将现有无标度拓扑级联失效容错性优化方法应用于 WSNs, 无法达到提升 WSNs 无标度拓扑级联失效容错性的预期效果. 这就需要进一步从 WSNs 特点出发, 建立适合于 WSNs 无标度拓扑的级联失效模型, 研究 WSNs 无标度拓扑级联失效容错性的优化问题.

本文考虑了 WSNs 无标度拓扑中节点负载和容量分布的特点, 建立了 WSNs 无标度拓扑级联失效模型. 在级联失效模型基础上, 分析了 WSNs 无标度拓扑的负载参数、拓扑参数与其级联失效容错性之间的关联特征, 得到了随机节点失效下 WSNs 无标度拓扑大规模级联失效的承载极限, 以及级联失效容错性好的 WSNs 无标度拓扑所具有的结构要素, 这为提升现有 WSNs 无标度拓扑级联失效容错性和建立级联失效容错性好的 WSNs 无标度拓扑提供了理论参考.

2 级联失效模型

当网络中任意节点失效时, 将导致其负载重新分配到其他节点上, 如果邻居节点增加后的负载超过了其自身容量, 将进一步进行负载的重新分配, 导致其他正常节点也出现失效, 即引发网络节点的级联失效. 因此, WSNs 无标度拓扑的级联失效模型分为节点负载、负载重分配原则、节点容量三方面进行描述.

节点负载是指某一时刻, 节点上承载的信息量. 由于 WSNs 无标度拓扑表现出度分布的不均匀性, 基于节点负载与其节点度的相关性^[21], 采用节点度的幂函数表示 WSNs 无标度拓扑中各节点的负载

$$L_i = k_i^\alpha, \quad (1)$$

其中, L_i 表示网络中节点 v_i 的负载; k_i 表示节点 v_i 的节点度; α 为负载参数, 反映节点负载强度.

当 WSNs 无标度拓扑中某个节点 v_j 失效时, 该节点失去原本的传输功能, 这会导致原本通过它转发的信息量 L_j 需要重新路由, 从而造成失效节点的邻居节点 v_i 的负载发生变化, 依据平均分配思想, v_i 节点上负载的重新分配原则描述如下:

$$L_i(\text{new}) = L_i + \Delta_{ij} = L_i + L_j/k_j, \quad (2)$$

其中, $L_i(\text{new})$ 为节点 v_i 的新负载, 表示为节点 v_i 本身的负载加上节点 v_i 增加的额外负载 Δ_{ij} , 即失效节点 v_j 将其负载平均分配给了其邻居节点.

由于受到有限硬件资源和恶劣部署环境的限制, WSNs 无标度拓扑中, 各节点容量是有限的且是恒定的, 为此, WSNs 无标度拓扑中各节点容量可用一常数表示为

$$c_i = c_0, \quad (3)$$

其中, c_i 表示网络中节点 v_i 的容量; c_0 是一常数.

当节点 v_i 的新负载大于其容量时, 即 $L_i(\text{new}) > c_i$, 节点 v_i 失效, 这会导致其邻居节点负载进一步重新分配, 可能引发邻居节点负载大于容量而失效, 依次传递下去, 其他失效节点的数量突然从 0 迅速增长, 导致网络级联失效.

级联失效过程一直重复直至网络中剩余节点的负载均未超过其容量为止, 在级联失效过程终止后, 采用剩余网络的最大连通分支大小 S 来度量该网络级联失效规模^[22]

$$S = \frac{N'}{N}, \quad (4)$$

其中, N 为初始时刻网络的总节点数; N' 为级联失效过程终止后, 网络最大连通分支中的节点数目. 剩余网络最大连通分支大小 S 越小, 表明级联失效对网络连通和覆盖监测质量的破坏程度越大, 级联失效规模越大; 反之, S 越大, 表明级联失效对网络连通和覆盖监测质量的破坏程度越小, 级联失效规模越小.

3 级联失效下的容错性分析

针对级联失效下的无标度拓扑容错性研究, 几乎都是在节点容量优化框架下进行的, 而 WSNs 中节点容量是有限的且恒定的, 故动态优化节点容量抵御无标度拓扑级联失效的设想不符合 WSNs 的情况. 为此, 本节基于 WSNs 无标度拓扑级联失效模型, 研究随机节点失效下, WSNs 无标度拓扑的负载参数和拓扑参数对其级联失效规模的影响, 以期得到这些参数与级联失效容错性之间的关联特征.

3.1 级联失效下的负载参数分析

WSNs 无标度拓扑中, 给定节点容量 c_0 , 当负载参数 α 较小时, 由于节点需要处理相对较小的负

载变化, 网络无级联失效现象发生, 即剩余网络最大连通分支大小 S 较大. 但当负载参数 α 较大时, 由于负载变化较大, 此时节点的失效易引发其他节点负载超过容量的级联失效, 即级联失效后网络的最大连通分支大小 S 较小. 因此, 当级联失效后网络最大连通分支大小 S 降至最低应用需求 S_{th} , 此时, 临界负载参数 $\tilde{\alpha}$ 是 WSNs 无标度拓扑大规模级联失效的承载极限.

考虑到概率母函数法 [23] 能够有效利用递推情况求解出未知数列的规律, 下面采用概率母函数法求解随机节点失效下 WSNs 无标度拓扑级联失效后的网络最大连通分支大小 S , 对 WSNs 无标度拓扑的级联失效承载极限 $\tilde{\alpha}$ 进行分析, 旨在得到随机节点失效下 WSNs 无标度拓扑的级联失效承载极限 $\tilde{\alpha}$.

根据 WSNs 无标度拓扑的度分布表达式 $p(k) = ck^{-\lambda} (c > 0, \lambda > 0)$, 可得其概率母函数为

$$g_0(x) = \sum_{k=k_{min}}^{k_{max}} p(k)x^k, \quad (5)$$

其中, k_{min} 和 k_{max} 分别为网络中节点的最小节点度和最大节点度.

考虑到随机选择一条边连接到节点度为 k 的节点, 并且该节点失效的概率为 $q'(k)$. 那么, 沿着随机选择一条边连接到剩余度为 k (节点度为 $k+1$) 的节点, 并且该节点失效的概率的概率母函数可表示为

$$\begin{aligned} g_1(x) &= \sum_{k=k_{min}-1}^{k_{max}-1} q'(k)x^k \\ &= \frac{1}{x} \sum_{k=k_{min}}^{k_{max}} q'(k)x^k. \end{aligned} \quad (6)$$

由于在 WSNs 无标度拓扑中各节点的负载均存在差异, 为此, 失效节点对邻节点失效的影响程度也不尽相同. 那么, (6) 式中随机选择一条边连接到节点度为 k 的节点, 并且该节点失效的概率 $q'(k)$ 为

$$q'(k) = \sum_{i=k_{min}}^{k_{max}} e_{ik} = \sum_{i=k_{min}}^{k_{max}} p_1(i)p_2(k)p_3(ik), \quad (7)$$

其中, e_{ik} 为节点度为 i 的节点连接到节点度为 k 的节点, 并且导致节点度为 k 的节点失效的概率; $p_1(i)$ 为随机选择一个节点度为 i 的节点的概率

$$p_1(i) = p(i);$$

$p_2(k)$ 为随机选择一条边连接到节点度为 k 的节点的概率

$$p_2(k) = \frac{kp(k)}{\sum_{k=k_{min}}^{k_{max}} kp(k)};$$

$p_3(ik)$ 为节点度为 i 的节点导致节点度为 k 的节点失效的概率, 根据节点度为 i 的节点其负载 $L_i = i^\alpha$ 可知, 节点度为 i 的节点使其节点度为 k 的邻节点失效的概率 $p_3(ik)$, 可用节点度为 k 的节点其增加负载 i^α/i 占可用容量 $c_0 - k^\alpha$ 的比值来反映, 即

$$p_3(ik) = \frac{i^\alpha/i}{c_0 - k^\alpha}, \quad \alpha < \frac{\ln \frac{c_0}{1 + k_{max}^{-1}}}{\ln k_{max}}. \quad (8)$$

那么 $q'(k)$ 可改写为

$$\begin{aligned} q'(k) &= \sum_{i=k_{min}}^{k_{max}} c_i^{-\lambda} \frac{kcck^{-\lambda}}{\sum_{k=k_{min}}^{k_{max}} kcck^{-\lambda}} \frac{i^\alpha}{c_0 - k^\alpha} \\ &= \sum_{i=k_{min}}^{k_{max}} \frac{c(2-\lambda)i^{\alpha-\lambda-1}k^{1-\lambda}}{(k_{max}^{2-\lambda} - k_{min}^{2-\lambda})(c_0 - k^\alpha)}, \\ \alpha &< \frac{\ln \frac{c_0}{1 + k_{max}^{-1}}}{\ln k_{max}}. \end{aligned} \quad (9)$$

假设由随机选择一条边产生级联失效后, 剩余网络规模不包括最大连通分支, 则随机选择一条边产生级联失效后的网络规模, 可以按照由这条边到达节点的剩余度分为不同的情况 [24]: 当到达节点的剩余度为 0 时, 产生级联失效后网络规模为 1; 当到达节点的剩余度为 1 时, 产生级联失效后网络规模为到达节点连接的网络规模加 1; 当到达节点的剩余度为 2 时, 产生级联失效后网络规模为到达节点连接的两个网络规模之和再加 1, 依次类推, 可得出由随机选择一条边产生级联失效后网络规模的概率母函数 $h_1(x)$ 如下:

$$\begin{aligned} h_1(x) &= xq'(0) + xq'(1)h_1(x) \\ &\quad + xq'(2)[h_1(x)]^2 + \dots \\ &= xg_1(h_1(x)). \end{aligned} \quad (10)$$

相应地, 由一个随机失效节点产生级联失效后网络规模 (不包括最大连通分支), 可以按照这个节点的节点度分为不同情况, 其概率母函数 $h_0(x)$ 为

$$h_0(x) = xg_0(h_1(x)). \quad (11)$$

那么, 结合 (6) 式和 (9) 式可得

$$g_1(h_1(x))$$

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{k=k_{\min}}^{k_{\max}} q'(k) [h_1(x)]^{k-1} \\
 &= \sum_{k=k_{\min}}^{k_{\max}} \sum_{i=k_{\min}}^{k_{\max}} \frac{c(2-\lambda) i^{\alpha-\lambda-1} k^{1-\lambda}}{(k_{\max}^{2-\lambda} - k_{\min}^{2-\lambda})(c_0 - k^\alpha)} [h_1(x)]^{k-1}, \\
 \alpha &< \frac{\ln \frac{c_0}{1+k_{\max}^{-1}}}{\ln k_{\max}}. \tag{12}
 \end{aligned}$$

又由(10)式可知

$$\begin{aligned}
 h_1(1) &= g_1(h_1(1)) \\
 &= \sum_{k=k_{\min}}^{k_{\max}} \sum_{i=k_{\min}}^{k_{\max}} \frac{c(2-\lambda) i^{\alpha-\lambda-1} k^{1-\lambda}}{(k_{\max}^{2-\lambda} - k_{\min}^{2-\lambda})(c_0 - k^\alpha)} \\
 &\quad \times [h_1(1)]^{k-1}, \alpha < \frac{\ln \frac{c_0}{1+k_{\max}^{-1}}}{\ln k_{\max}}. \tag{13}
 \end{aligned}$$

解上式得 $h_1(1) = u$, 将其代入(11)式有

$$h_0(1) = g_0(u). \tag{14}$$

再结合(5)式可得出, 由一个随机失效节点产生级联失效后网络规模如下:

$$h_0(1) = \sum_{k=k_{\min}}^{k_{\max}} p(k) [u]^k. \tag{15}$$

因此, 由一个随机失效节点产生网络级联失效后网络最大连通分支大小 S 为

$$S = 1 - h_0(1) = 1 - \sum_{k=k_{\min}}^{k_{\max}} p(k) [u]^k, \tag{16}$$

其中, u 为方程

$$\begin{aligned}
 u &= \sum_{k=k_{\min}}^{k_{\max}} \sum_{i=k_{\min}}^{k_{\max}} \frac{c(2-\lambda) i^{\alpha-\lambda-1} k^{1-\lambda}}{(k_{\max}^{2-\lambda} - k_{\min}^{2-\lambda})(c_0 - k^\alpha)} [u]^{k-1}, \\
 \alpha &< \frac{\ln \frac{c_0}{1+k_{\max}^{-1}}}{\ln k_{\max}} \tag{17}
 \end{aligned}$$

的最小非负实数解.

综上, (16)式和(17)式给出了, 在随机节点失效下 WSNs 无标度拓扑级联失效后网络最大连通分支大小 S 的量化形式. 那么, 在节点容量 c_0 和 WSNs 无标度拓扑度分布 $p(k) = ck^{-\lambda}$ (系数 c , 幂指数 λ , 节点最小度 $k_{\min} = k_{\max}(N+1)^{\frac{1}{1-\lambda}}$ 和最大度 $k_{\max} = \left[\frac{\lambda-1}{cN}\right]^{\frac{1}{1-\lambda}}$ [25]) 已知的情况下, 随机节点失效下 WSNs 无标度拓扑级联失效后网络最大连通分支大小 S 仅是负载参数 α 的函数, 且由(17)式可见, α 越大, u 越大, 进而由(16)式可得, u 越大, S 越小. 即随机节点失效下 WSNs 无标度拓

扑级联失效后的网络最大连通分支大小 S 与负载参数 α 成反比关系.

由于网络服务质量与网络最大连通分支大小 S 直接关联 [26], 可以设定不同的网络最大连通分支大小临界值 S_{th} 来满足不同应用下的网络服务需求. 若在随机节点失效下, WSNs 无标度拓扑级联失效后的网络最大连通分支大小存在 $S < S_{th}$, 则说明该 WSNs 无标度拓扑, 在随机节点失效下出现了大规模级联失效, 此时无法保证满足最低应用需求的网络服务质量. 为此, 在给定满足最低应用需求的网络最大连通分支大小阈值 S_{th} 后, 由(16)式和(17)式可得, WSNs 无标度拓扑大规模级联失效的承载极限 $\tilde{\alpha}$, 满足下式的要求:

$$\begin{aligned}
 S_{th} &= 1 - \sum_{k=k_{\min}}^{k_{\max}} p(k) [\tilde{u}]^k, \\
 \tilde{u} &= \sum_{k=k_{\min}}^{k_{\max}} \sum_{i=k_{\min}}^{k_{\max}} \frac{c(2-\lambda) i^{\tilde{\alpha}-\lambda-1} k^{1-\lambda}}{(k_{\max}^{2-\lambda} - k_{\min}^{2-\lambda})(c_0 - k^{\tilde{\alpha}})} [\tilde{u}]^{k-1}, \\
 \tilde{\alpha} &< \frac{\ln \frac{c_0}{1+k_{\max}^{-1}}}{\ln k_{\max}}. \tag{18}
 \end{aligned}$$

由(18)式可知, 由于 $0 < S_{th} < 1$, $p(k) = ck^{-\lambda}$ ($c > 0, \lambda > 0$), 故(18)式中等式 $S_{th} = 1 - \sum_{k=k_{\min}}^{k_{\max}} p(k) [\tilde{u}]^k$ 的解 $\tilde{u} > 0$, 又由

$$\frac{c(2-\lambda) i^{\tilde{\alpha}-\lambda-1} k^{1-\lambda}}{(k_{\max}^{2-\lambda} - k_{\min}^{2-\lambda})(c_0 - k^{\tilde{\alpha}})} [\tilde{u}]^{k-1}$$

在 $\tilde{\alpha} \in \left(-\infty, \frac{\ln \frac{c_0}{1+k_{\max}^{-1}}}{\ln k_{\max}}\right)$ 内单调递增, 且

$$\begin{aligned}
 \alpha &\rightarrow -\infty, \\
 \frac{c(2-\lambda) i^{\tilde{\alpha}-\lambda-1} k^{1-\lambda}}{(k_{\max}^{2-\lambda} - k_{\min}^{2-\lambda})(c_0 - k^{\tilde{\alpha}})} [\tilde{u}]^{k-1} &\rightarrow 0
 \end{aligned}$$

可得, (18)式中等式

$$\begin{aligned}
 \tilde{u} &= \sum_{k=k_{\min}}^{k_{\max}} \sum_{i=k_{\min}}^{k_{\max}} \frac{c(2-\lambda) i^{\tilde{\alpha}-\lambda-1} k^{1-\lambda}}{(k_{\max}^{2-\lambda} - k_{\min}^{2-\lambda})(c_0 - k^{\tilde{\alpha}})} [\tilde{u}]^{k-1} \\
 \text{在 } \tilde{\alpha} &\in \left(-\infty, \frac{\ln \frac{c_0}{1+k_{\max}^{-1}}}{\ln k_{\max}}\right) \text{ 内存在惟一的解 } \tilde{\alpha} \text{ 值,}
 \end{aligned}$$

使该等式成立, 且 $\tilde{\alpha}$ 值随着 c_0 的增大而增大. 当 $\tilde{\alpha} \rightarrow \frac{\ln \frac{c_0}{1+k_{\max}^{-1}}}{\ln k_{\max}}$ 达到最大时, 如果 c_0 继续增大,

则

$$\tilde{u} = \sum_{k=k_{\min}}^{k_{\max}} \sum_{i=k_{\min}}^{k_{\max}} \frac{c(2-\lambda) i^{\tilde{\alpha}-\lambda-1} k^{1-\lambda}}{(k_{\max}^{2-\lambda} - k_{\min}^{2-\lambda})(c_0 - k^{\tilde{\alpha}})} [\tilde{u}]^{k-1}$$

在 $\tilde{\alpha} \in \left(-\infty, \frac{\ln \frac{c_0}{1+k_{\max}^{-1}}}{\ln k_{\max}} \right)$ 内不存在使其成立的解。

至此, (18) 式给出了, 在节点容量 c_0 和 WSNs 无标度拓扑度分布 $p(k) = ck^{-\lambda}$ 已知时, 随机节点失效下 WSNs 无标度拓扑大规模级联失效 (无法提供满足最低应用需求网络服务) 的承载极限 $\tilde{\alpha}$ 。那么, 通过控制节点 $v_i, i = 1, 2, \dots, N$ 的负载量 k_i^α 小于其承载极限 $k_i^{\tilde{\alpha}}$, 就可以避免 WSNs 无标度拓扑出现因随机节点失效而引发的大规模级联失效现象, 从而达到提升 WSNs 无标度拓扑动态容错性的目的。

3.2 级联失效下的拓扑参数分析

对于已有的 WSNs 无标度拓扑, 可以利用承载极限来提高其抵御随机节点失效的动态容错性, 与此同时, 建立随机节点失效下动态容错性好的 WSNs 无标度拓扑, 对抵御随机节点失效引发的大规模级联失效现象同样具有重要的现实意义。本节通过分析随机节点失效下 WSNs 无标度拓扑的度分布参数与其级联失效规模的变化关系, 旨在揭示随机节点失效下度分布参数对 WSNs 无标度拓扑级联失效容错性的影响规律。

根据 (16) 式和 (17) 式, 在随机节点失效下, 如果 WSNs 无标度拓扑 (度分布 $p(k) = ck^{-\lambda}$) 在级联失效后仍具有较大的网络最大连通分支大小 S , 那么, 它必然具有较好的动态容错性。但由于很难解析求解出 WSNs 无标度拓扑的度分布参数 c, λ 与随机节点失效下 WSNs 无标度拓扑级联失效后网络最大连通分支大小 S 的变化关系, 这里采用仿真分析的方法研究随机节点失效下 WSNs 无标度拓扑度分布参数 c, λ 对其级联失效后网络最大连通分支大小 S 的影响。

3.2.1 参数 c 对级联失效规模的影响

为探讨度分布参数 c 对网络级联失效规模的影响, 采用度分布可调的 WSNs 无标度拓扑生成算法 ADD (Adjusted Degree Distribution) [27], 生成节点数 $N = 200$, 度分布 $p(k) = ck^{-3}, c = 2, 8, 18$ 的 WSNs 无标度拓扑, 相应 $c = 2, c = 8, c = 18$

的 WSNs 无标度拓扑度分布的对数坐标曲线如图 1 所示。

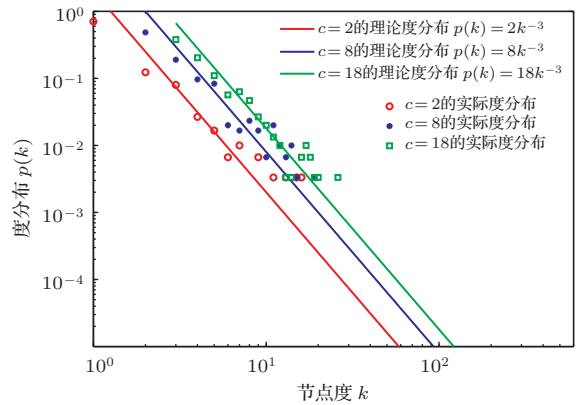


图 1 (网刊彩色) $c = 2, c = 8, c = 18$ 的 WSNs 无标度拓扑度分布曲线

由图 1 可见, 根据度分布可调的 WSNs 无标度拓扑生成算法 ADD, 生成的 WSNs 无标度拓扑度分布服从幂律分布 $p(k) = ck^{-3}, c = 2, 8, 18$, 且随着度分布参数 c 的增大, 拓扑中节点的最小度越来越大: 当 $c = 2$ 时, 节点最小度为 1; 当 $c = 8$ 时, 节点最小度为 2; 当 $c = 18$ 时, 节点最小度为 3。这表明对于规模 N 一定的 WSNs 无标度拓扑, 其度分布参数 c 越大, 拓扑中节点所连接的边越多, 拓扑越密集。

当节点容量 $c_0 = 15$, 负载参数 α 以 0.1 为步长从 -5 增至最大值 $\frac{\ln \frac{c_0}{1+k_{\max}^{-1}}}{\ln k_{\max}}$ 时, 取 200 次随机节点失效的仿真平均值, WSNs 无标度拓扑 (度分布 $p(k) = ck^{-3}, c = 2, 8, 18$) 级联失效后网络最大连通分支大小 S 随负载参数 α 的变化趋势如图 2 所示。

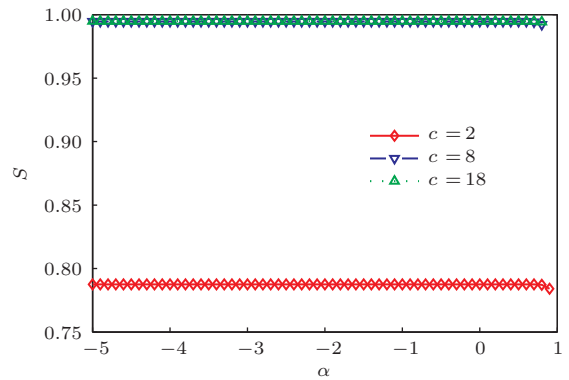


图 2 (网刊彩色) c 取不同值时的 $S-\alpha$ 曲线

从图 2 可见, 无论负载参数 α 如何变化, WSNs

无标度拓扑度分布参数 c 越大, 则相应拓扑级联失效后网络最大连通分支大小 S 就越大, 拓扑级联失效规模就越小, 拓扑动态容错性就越好. 又根据图 1 的分析, 参数 c 与拓扑密集程度相关联, c 越大, 拓扑越密集. 因此, 拓扑越密集, 其抵御因随机节点失效而引发的大规模级联失效的能力越强, 动态容错性越好.

3.2.2 参数 λ 对级联失效规模的影响

为探讨度分布参数 λ 不同时, 相应 WSNs 无标度拓扑级联失效规模的变化, 依然采用上述 ADD 算法, 生成节点数 $N = 200$, 度分布 $p(k) = 2k^{-\lambda}$, $\lambda = 2.5, 3, 3.5$ 的 WSNs 无标度拓扑, 相应的 WSNs 无标度拓扑度分布的对数坐标曲线如图 3 所示.

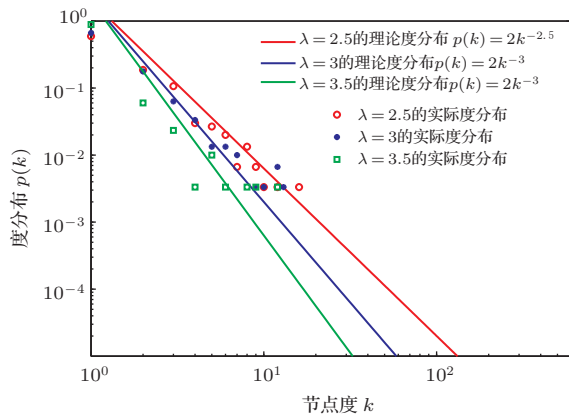


图 3 (网刊彩色) $\lambda = 2.5, \lambda = 3, \lambda = 3.5$ 的 WSNs 无标度拓扑度分布曲线

由图 3 可见, 根据 ADD 算法生成的 WSNs 无标度拓扑服从相应的幂律分布 $p(k) = 2k^{-\lambda}$, $\lambda = 2.5, 3, 3.5$, 但随着 λ 的增大, 拓扑中节点的最大度越来越小: 当 $\lambda = 2.5$ 时, 节点最大度为 16; 当 $\lambda = 3$ 时, 节点最大度为 13; 当 $\lambda = 3.5$ 时, 节点最大度为 12. 可以得出结论, 对于规模 N 一定的 WSNs 无标度拓扑, 随着度分布参数 λ 的增大, 拓扑中节点度大的节点在减少, 拓扑度分布越来越均匀.

当节点容量 $c_0 = 15$, 负载参数 α 以 0.1 为步长从 -5 增至最大值 $\frac{\ln \frac{c_0}{1+k_{\max}^{-1}}}{\ln k_{\max}}$ 时, 仍然取 200 次随机节点失效的仿真平均值, WSNs 无标度拓扑 (度分布 $p(k) = 2k^{-\lambda}$, $\lambda = 2.5, 3, 3.5$) 级联失效后网络最大连通分支大小 S 随负载参数 α 的变化趋势如图 4 所示.

从图 4 可见, 无论负载参数 α 如何变化, WSNs 无标度拓扑度分布参数 λ 越大, 相应拓扑级联失效后网络最大连通分支大小 S 就越大, 拓扑级联失效规模就越小, 拓扑动态容错性就越好. 又根据图 3 的分析, 参数 λ 与拓扑度分布的均匀性相关联, λ 越大, 拓扑度分布越均匀; 反之, 拓扑度分布越不均匀. 因此, 拓扑越均匀, 则其抵御因随机节点失效而引发的大规模级联失效的能力越强, 动态容错性越好.

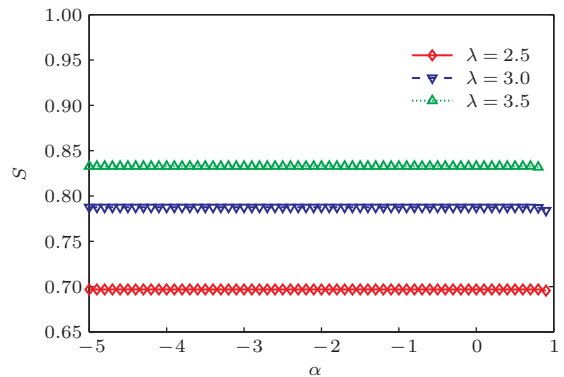


图 4 (网刊彩色) λ 取不同值时的 $S-\alpha$ 曲线

综上所述, 随机节点失效下 WSNs 无标度拓扑的动态容错性与其度分布参数 c 和 λ 正相关, 即度分布系数 c 和幂指数 λ 越大, 拓扑抵御因随机节点失效而引发的大规模级联失效的能力越强, 拓扑的动态容错性越好. 为此, 依据 WSNs 无标度拓扑度分布参数对动态容错性的影响规律, 能够建立起随机节点失效下动态容错性好的 WSNs 无标度拓扑.

4 结 论

本文在 WSNs 节点负载、容量分布特点的基础上, 建立了 WSNs 无标度拓扑级联失效模型, 并推导了 WSNs 无标度拓扑大规模级联失效的临界负载参数, 同时发现 WSNs 无标度拓扑级联失效规模与其拓扑参数正相关, 即拓扑度分布系数和幂指数越大, 网络的级联失效容错性越强, 这对提升 WSNs 无标度拓扑级联失效容错性和建立级联失效容错性好的 WSNs 无标度拓扑提供了依据. 本文主要研究的是 WSNs 无标度拓扑负载参数和拓扑参数对其级联失效容错性的影响, 下一步将结合 WSNs 无标度拓扑生成机理提出更有针对性的 WSNs 无标度拓扑级联失效容错性优化方法, 以预防 WSNs 无标度拓扑的大规模级联失效.

参考文献

- [1] Wang Y Q, Yang X Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 040206
- [2] Tong X J, Wang Z, Zou K 2012 *Chin. Phys. B* **21** 020506
- [3] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, Chavez M, Hwang D U 2006 *Physics Reports* **424** 175
- [4] Crucitti P, Latora V, Marchiori M 2004 *Phys. Rev. E* **69** 045104
- [5] Motter A E 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 098701
- [6] 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]
- [7] Zhu H L, Luo H, Peng H P, Li L X, Luo Q 2009 *Chaos Soliton. Fract.* **41** 1828
- [8] Zheng G, Liu Q M 2013 *Comput. Electr. Eng.* **39** 1779
- [9] Wang Y Q, Wang X Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 090202
- [10] Albert R, Barabasi A L 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 47
- [11] Motter A E, Lai Y C 2002 *Phys. Rev. E* **66** 065102
- [12] Dobson I, Carreras B A, Newman D E 2005 *Probab. Eng. Inform. SC* **19** 15
- [13] Carreras B A, Lynch V E, Dobson I, Newman D E 2004 *Chaos* **14** 643
- [14] Chen Y, An J P, Liu H 2008 *WiCOM Dalian*, Oct 12–14, 2008 p1
- [15] Goh K I, Lee D S, Kahang B, Kim D 2005 *Physica A* **346** 93
- [16] Bobson L, Carreras B A, Newman D E 2003 HICSS Hawaii, Jan 6–9, 2003 p1
- [17] Li Y, Wu J, Tan Y J 2010 *J. Syst. Eng.* **25** 853 (in Chinese) [李勇, 吴俊, 谭跃进 2010 系统工程学报 **25** 853]
- [18] Wang J W, Rong L L 2009 *Physica A* **388** 1289
- [19] Dou B L, Wang X G, Zhang S Y 2010 *Physica A* **389** 2310
- [20] Liu Y N, Li X, Chen S Z, Zhen Q 2011 *Journal of China Universities* **18** 95
- [21] Cai J, Yu S Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 058901 (in Chinese) [蔡君, 余顺争 2013 物理学报 **62** 058901]
- [22] Xia Y X, Fan J, Hill D 2010 *Physica A* **389** 1281
- [23] Newman M E J, Strogatz S H, Watts D J 2001 *Phys. Rev. E* **64** 026118
- [24] Wu J, Tan Y J, Deng H Z, Zhu D Z, Li Y 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 2138
- [25] 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]
- [26] Albert R, Jeng H, Barabasi A L 2000 *Nature* **406** 378
- [27] Yin R R, Liu B, Li Y Q, Hao X C 2012 *Journal of Electronics & Information Technology* **34** 2180 (in Chinese) [尹荣荣, 刘彬, 李雅倩, 郝晓辰 2012 电子与信息学报 **34** 2180]

Dynamic fault-tolerance analysis of scale-free topology in wireless sensor networks*

Yin Rong-Rong¹⁾ Liu Bin^{1)†} Liu Hao-Ran²⁾ Li Ya-Qian¹⁾

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

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

(Received 21 January 2014; revised manuscript received 27 February 2014)

Abstract

It is very important in practice to avoid cascading failures by increasing the dynamic fault-tolerance of the network. Firstly, a cascading failure model is proposed in this paper, based on the characteristics of the variable load and the fixed capacity of the nodes in wireless sensor network scale-free topology. Then the influences of the load parameter and topology parameters on the fault tolerance are investigated in the case of cascading failure caused by random failure nodes. Finally the critical value of load for the large-scale cascading failure of network is deduced. Simulation result shows that the network's cascading failure fault-tolerance is positively related with the degree parameters, coefficient and power-law exponent. Researches provide regulation to avoid the cascading failure caused by the random failure nodes effectively from optimizing the parameters viewpoint.

Keywords: wireless sensor networks, scale-free topology, dynamic fault-tolerance, parameters optimization

PACS: 02.50.-r, 05.65.+b, 05.90.+m

DOI: [10.7498/aps.63.110205](https://doi.org/10.7498/aps.63.110205)

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

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