一种强容侵能力的无线传感器网络无标度拓扑模型研究*

刘浩然[1)2)] 尹文晓[1)†] 董明如[1)] 刘彬[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 1 月 5 日收到; 2014 年 1 月 27 日收到修改稿)

针对无线传感器网络无标度拓扑容侵能力差的问题, 本文借助节点批量到达的 Poisson 网络模型, 提出了一种具有容侵优化特性的无标度拓扑模型, 并在构建拓扑时引入剩余能量调节因子和节点度调节因子, 得到了一种幂率指数可以在 $(1, +\infty)$ 调节的无标度拓扑结构, 并通过网络结构熵优化幂率指数, 得出了具有强容侵特性的幂律指数值. 实验结果表明: 新的拓扑保持了无标度网络的强容错性, 增强了无标度网络的容侵性, 并具有较好的节能优势.

关键词: 无线传感器网络, 无标度拓扑, 容侵, 容错

PACS: 05.65.+b, 05.70.Np **DOI:** 10.7498/aps.63.090503

1 引 言

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSNs) 节点经常部署在恶劣的环境中, 常会因为能量耗尽或硬件故障引起节点失效, 从而使网络的覆盖连通度大大降低, 甚至导致整个网络无法正常工作. 因此保障拓扑在面临随机失效时的容错能力, 是 WSNs 实际应用中面临的重要问题 [1,2]. 无标度拓扑结构常被用来解决 WSNs 的容错问题, 但是无标度容侵能力差会直接影响到拓扑的寿命, 尤其是无标度拓扑在遭受蓄意攻击时, 整个网络将处于瘫痪 [3,4]. 因此拥有较强容侵能力的无标度拓扑对于提高 WSNs 的性能具有很大的意义.

目前对于 WSNs 无标度拓扑的研究, 大多是在经典 BA 模型 (Barabási-Albert model) [5] 的基础上加入更多的约束, 使得到的拓扑结构更加符合 WSNs 自身演化的特点. EAEM (energy-aware evolution model) [6] 利用无标度适应度模型, 将节点的剩余能量与经典的无标度演化机理相结合, 保证了拓扑的容错性, 同时促使网络向节能的方向转变. 文献 [7] 构建的无标度拓扑模型在连接概率上考虑节点剩余能量、节点饱和度等问题, 进一步提高了网络的鲁棒性. 但是这些构建的 WSNs 无标度模型, 虽然保证了拓扑的容错性和节能性, 并没有优化拓扑的容侵能力. 研究表明, 无标度网络具有较好的容错能力, 但是面对选择性攻击却异常脆弱 [8,9]. 对于无标度网络容侵特性的研究, 主要是对关键节点或者重要链路采用冗余备份的方式 [10,11], 然而这种方式增加了网络的复杂性. 文献 [12] 建立了一个参数可调的拓扑模型, 通过调节参数可以兼容 BA 网络模型和随机网络模型, 以此来增强拓扑的容侵性, 但是这种模型没有无标度网络的幂率特性, 因此就无法分析拓扑参数对网络容侵性的影响. 文献 [13] 构建一种具有重构机理的无标度网络模型, 考虑随机加点、加边、去点、去边的特点, 通过引入重构机理, 所构建的拓扑结构能够有效面对随机失效和蓄意攻击, 但是采用重构方式

* 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: yinwenxiao2009@163.com

增加了拓扑的复杂性. 文献[14]研究网络结构熵与拓扑均匀性的关系, 得出对于星型网络, 熵取得最小值; 对于各节点度值相同的规则网络, 熵取得最大值, 最终得出了一种度量拓扑均匀性程度的指标. 文献[15]综合考虑"点"和"边"的差异性, 提出了一种新的网络结构熵, 更有效的反应了网络结构特征对拓扑容侵性的影响. 这些"熵"在应用到无标度网络时, 均说明无标度网络是一种非均匀的网络, 正是这种非均匀性导致了其具有较差的容侵能力.

针对上述问题, 本文在构建无标度拓扑结构时, 综合考虑剩余能量和节点度两方面因素, 并借助节点批量到达的Poisson网络模型, 得出了一种WSNs无标度容侵优化拓扑SIOT (scale-free intrusion-tolerance optimization topology)模型, 并把网络结构熵作为容侵指标, 得出了容侵最优的幂律指数值.

2 SIOT演化模型

为了演化出可以有效利用能量并且幂率指数可调的WSNs无标度拓扑结构, 在构建拓扑时引入剩余能量调节因子和节点度调节因子, 并借助节点批量到达的Poisson网络模型[16], 在局域世界内构建新的无标度拓扑结构, 并讨论演化拓扑的度分布特征, 为具有容侵能力的网络提供量化的拓扑结构.

2.1 网络模型

由于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局域世界演化模型. 新节点n仅在其传输范围内选择连接节点i, SIOT演化模型采用经典BA无标度网络的"增长"和"择优连接"原则, 拓扑形成分为两个部分:

1) 非线性增长: 网络以少量的m_0个节点开始, 在t时刻, 按照率为ζ的Poisson过程到达$r[N(t)]^\theta$个新节点, 且每个新节点各自独立的与网络中的m $(m \leqslant m_0)$个节点相连, 其中$\zeta > 0$, $\theta \geqslant 0$, $r > 0$, $N(t)$为t时刻节点到达的批次数.

2) 局域世界择优连接: 在择优增长时, 新节点n仅在其传输范围内选择连接节点i, 且此时的择优连接概率取决于节点当前的剩余能量E_i和节点度k_i, 表达式为

$$\prod_{n\to i} = \beta_1 \frac{E_i}{\sum\limits_{j\in A_n} E_j} + \beta_2 \frac{k_i}{\sum\limits_{j\in A_n} k_j}, \tag{1}$$

其中A_n为新节点n的邻节点集, β_1为剩余能量调节因子, β_2为节点度调节因子, 且$\beta_1 > 0$, $\beta_2 > 0$. 设新节点n的邻域A_n内共有s个节点, 所有邻域节点被连接的概率和为P, 由所有事件发生的概率和为1 可得$P = 1$, 则

$$\begin{aligned} P &= \sum_{\tau=1}^{s}\left(\prod_{n\to i_\tau}\right) \\ &= \sum_{\tau=1}^{s}\left(\beta_1 \frac{E_{i_\tau}}{\sum\limits_{j\in A_n} E_j} + \beta_2 \frac{k_{i_\tau}}{\sum\limits_{j\in A_n} k_j}\right) \\ &= \beta_1\left(\sum_{\tau=1}^{s} \frac{E_{i_\tau}}{\sum\limits_{j\in A_n} E_j}\right) + \beta_2\left(\sum_{\tau=1}^{s} \frac{k_{i_\tau}}{\sum\limits_{j\in A_n} k_j}\right) \\ &= \beta_1 + \beta_2 = 1, \end{aligned} \tag{2}$$

所以SIOT模型中$\beta_1 + \beta_2 = 1$.

2.2 SIOT的度分布属性

为了解析得到网络中节点的度随时间分布情况, 用连续域理论分析方法来分析网络拓扑的度分布. 将$N(t)$视为节点批次的到达过程, 由Poisson过程理论可知: 在$[0, t)$内到达网络的节点批次的平均数$\mu(t)$约为

$$\mu(t) = E[N(t)] = \zeta t. \tag{3}$$

设$M(t)$为t时刻网络中的节点总数, 则

$$M(t) = \int_0^t r(\zeta t)^\theta \zeta \,\mathrm{d}t = r\zeta^{\theta+1}\frac{t^{\theta+1}}{\theta+1}. \tag{4}$$

设$E_{ij}(t)$和$k_{ij}(t)$分别表示t时刻第i批节点中第j个节点的剩余能量和节点度, $\langle E\rangle_t$和$\langle k\rangle_t$分别表示t时刻新节点的邻域节点的平均剩余能量和平均节点度, 则(1)式可化简为

$$\begin{aligned} \prod(k_{ij}) &= \beta_1 \frac{E_{ij}}{\sum\limits_{j\in A_n} E_{ij}} + \beta_2 \frac{k_{ij}}{\sum\limits_{j\in A_n} k_{ij}} \\ &= \beta_1 \frac{E_{ij}}{M(t)\langle E\rangle_t} + \beta_2 \frac{k_{ij}}{M(t)\langle k\rangle_t}. \end{aligned} \tag{5}$$

根据连续域理论, 随机变量$k_{ij}(t)$是连续变化的, 由2.1节演化过程可知, $k_{ij}(t)$连续变化的速率如下:

$$\frac{\mathrm{d}k_{ij}}{\mathrm{d}t} = mr(\zeta t)^\theta \zeta \prod(k_{ij}). \tag{6}$$

结合 (4) 式, (5) 式和 (6) 式可得

$$\frac{\mathrm{d}k_{ij}}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{t}m\bigg[\beta_1(\theta+1)\frac{E_{ij}}{\langle E\rangle_t}+\beta_2(\theta+1)\frac{k_{ij}}{\langle k\rangle_t}\bigg]. \tag{7}$$

由于 t 时刻网络中的平均节点度 $\langle k\rangle_t=2m$, 令 $f(E)=\dfrac{E_{ij}}{\langle E\rangle_t}$, (7) 式可化简为

$$\frac{\mathrm{d}k_{ij}}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{t}\Big[m\beta_1(\theta+1)f(E)+\beta_2(\theta+1)\frac{k_{ij}}{2}\Big]. \tag{8}$$

采用分离变量法解 (8) 式可得

$$k_{ij}(t)=C_1\frac{2}{\beta_2(\theta+1)}t^{\frac{\beta_2(\theta+1)}{2}}-2mf(E)\frac{\beta_1}{\beta_2}, \tag{9}$$

其中 C_1 为调节系数. 设 t_i 为节点 i 加入网络的时刻, 进而, 结合初始条件 $k_{ij}(t_i)=m$ 可得

$$k_{ij}(t)=\bigg[m+\frac{2\beta_1 f(E)}{\beta_2}\bigg]\Big(\frac{t}{t_i}\Big)^{\frac{\beta_2(\theta+1)}{2}}-2mf(E)\frac{\beta_1}{\beta_2}, \tag{10}$$

因此, $p(k_{ij}(t)\geqslant k)$ 可由下式来表示:

$$p(k_{ij}(t)\geqslant k)=p\left(t_i\leqslant\bigg[\frac{m+2f(E)\beta_1/\beta_2}{k+2mf(E)\beta_1/\beta_2}\bigg]^{\frac{2}{\beta_2(\theta+1)}}\cdot t\right). \tag{11}$$

令 $h=f(E)\beta_1/\beta_2$, (11) 式可化简为

$$p(k_{ij}(t)\geqslant k)=p\left(t_i\leqslant\Big(\frac{m+2h}{k+2mh}\Big)^{\frac{2}{\beta_2(\theta+1)}}\cdot t\right). \tag{12}$$

根据 Poisson 理论, 随机变量 t_i 服从 $\varGamma$ 分布, 对于任意的 $i'>1$, 存在

$$p(t_i\leqslant x)=1-\mathrm{e}^{-\zeta x}\sum_{l=0}^{i'-1}\frac{(\zeta x)^l}{l!}. \tag{13}$$

结合 (12) 式和 (13) 式可知, 对于任意 $k>m$ 存在下式:

$$p(k_{ij}(t)\geqslant k)=1-\mathrm{e}^{-\zeta\cdot\left(\frac{m+2h}{k+2mh}\right)^{\frac{2}{\beta_2(\theta+1)}}\cdot t}\times\sum_{l=0}^{i'-1}\frac{\bigg[\zeta\left(\frac{m+2h}{k+2mh}\right)^{\frac{2}{\beta_2(\theta+1)}}t\bigg]^l}{l!}. \tag{14}$$

则第 i 批节点中的第 j 个节点的瞬态度分布可有下式计算得:

$$\begin{aligned}p(k_{ij}(t)=k)&=\frac{\partial p(k_{ij}(t)<k)}{\partial k}\\&=\frac{2}{\beta_2(\theta+1)}\frac{\zeta t(m+2h)^{\frac{2}{\beta_2(\theta+1)}}}{(k+2mh)^{\frac{2}{\beta_2(\theta+1)}+1}}\times\mathrm{e}^{-\zeta\cdot\left[\frac{m+2h}{k+2mh}\right]^{\frac{2}{\beta_2(\theta+1)}}\cdot t}\\&\quad\times\frac{\bigg[\zeta\left[\frac{m+2h}{k+2mh}\right]^{\frac{2}{\beta_2(\theta+1)}}t\bigg]^{i'-1}}{(i'-1)!}.\end{aligned} \tag{15}$$

由 (15) 式可以得到网络的稳态度分布为

$$\begin{aligned}p(k)&=\lim_{t\to\infty}\frac{1}{E[N(t)]}\sum_{i'=1}^{\infty}\frac{1}{r[N(t)]^{\theta}}\times\sum_{j'=1}^{r[N(t)]^{\theta}}p(k_{ij}(t)=k)\\&=\frac{2}{\beta_2(\theta+1)}\frac{(m+2h)^{\frac{2}{\beta_2(\theta+1)}}}{(k+2mh)^{\frac{2}{\beta_2(\theta+1)}+1}}.\end{aligned} \tag{16}$$

由 (16) 式可知, SIOT 演化模型的度分布服从幂率分布, 幂率指数为 $1+\dfrac{2}{\beta_2(\theta+1)}$. 由于 $\theta>0$, $0<\beta_2<1$, 所以可以通过调节参数 θ 和 β_2 使幂律指数在 $(1,+\infty)$ 内变化. 当 β_2 趋近于 1, θ 趋近于 0 时, 网络拓扑度分布与 BA 模型的度分布一样, 对随机节点移除有较强的容错性; 当 β_2 趋近于 0 时, SIOT 近似为随机分布, 可有效抵御选择性节点移除现象. 通过调整参数 θ 和 β_2, 可以实现较好的容忍随机节点与选择性节点不同移除模式的节点失效现象.

3 无标度容侵数学建模

无标度网络的非均匀性导致了当网络遭受蓄意攻击时, 整个网络将处于瘫痪. 拓扑越均匀, 关键节点越不明显, 网络容侵性越强. Wu 等 [14] 提出的网络结构熵可以有效度量拓扑的异构性, 对于星型网络, 网络结构熵取得最小值; 对于各节点度值相同的规则网络, 网络结构熵取得最大值. 本节利用网络结构熵来度量网络的容侵性, 通过构建容侵数学模型, 寻找容侵性与拓扑参数的关系.

3.1 网络结构熵

为了能够定量测度无标度网络的非均匀性, 首先令节点 i 的节点重要程度 I_i 表示为

$$I_i=k_i\Big/\sum_{i=1}^{N}k_i, \tag{17}$$

其中k_i为节点i的节点度, N为网络中的节点个数. 如果网络是均匀网络, 节点的重要程度差异较小, 认为网络是"无序"的, 此时网络具有较好的容侵能力; 而无标度网络的异质性表明节点的重要程度是存在差异的, 所以认为无标度网络是"有序"的, 因此可以利用网络结构熵来度量网络的这种"序".

由文献[14]可知, 网络结构熵F的数学定义为

$$F = -\sum_{i=1}^{N} I_i \ln I_i = -\frac{\sum_{i=1}^{N} k_i \ln k_i}{\sum_{i=1}^{N} k_i} + \ln \sum_{i=1}^{N} k_i. \tag{18}$$

当网络完全均匀, 此时容侵性最强, 即$I_i = \dfrac{1}{N}$, F取得最大值, 此时

$$F_{\max} = -\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{N} \ln \frac{1}{N} = \ln N. \tag{19}$$

当网络为星型网络, 即网络中所有节点都与某一个中心节点相连时, 即$k_1 = N-1$, $k_{j'} = 1 (j' \neq 1)$, 网络最不均匀, 此时容侵性最差, 且可得

$$I_1 = \frac{1}{2}, \quad I_{j'} = \frac{1}{2(N-1)} \quad (j' \neq 1),$$

F取得最小值, 计算如下式:

$$\begin{aligned} F_{\min} &= -\sum_{j=2}^{N} \frac{1}{2(N-1)} \ln \frac{1}{2(N-1)} - \frac{1}{2} \ln \frac{1}{2} \\ &= \frac{\ln 4(N-1)}{2}. \end{aligned} \tag{20}$$

所以可以用网络结构熵F来度量拓扑的容侵性, F越大, 拓扑容侵性越强, 如均匀网络; F越小, 拓扑容侵性越差, 如星型网络. 为了构造强容侵能力的无标度网络, 就要使网络结构熵达到最大, 所以可得如下推论.

推论: 对于度分布服从幂律分布的无标度网络, 可以用网络结构熵F来度量拓扑的容侵性, F越大, 拓扑容侵性越强; F越小, 拓扑容侵性越差.

3.2 容侵指标数学建模

利用网络结构熵可以定量的分析网络的容侵能力, 下面利用度秩函数对网络结构熵进行数学建模. 设a表示节点序号, 由文献[14]可知, 对于度分布服从$p(k) = Ck^{-\lambda}$的无标度网络的度秩函数$f(a)$为

$$f(a) = \left(\frac{\lambda-1}{NC}\right)^{-\frac{1}{\lambda-1}} \times \left[a + \frac{(N^{-\lambda+2}C)}{\lambda-1}\right]^{-\frac{1}{\lambda-1}}, \tag{21}$$

其中λ为幂律指数, C为标度系数, N为网络节点总数, a为节点序号. 设$k_{\min}$为最小节点度, 由概率密度性质, 系数C可归一化如下:

$$\int_{k_{\min}}^{+\infty} p(k)\,\mathrm{d}k = \int_{k_{\min}}^{+\infty} Ck^{-\lambda}\,\mathrm{d}k = 1. \tag{22}$$

故由(22)式可得

$$C = (\lambda-1)k_{\min}^{\lambda-1}. \tag{23}$$

将(23)式代入(21)式化简可得

$$\begin{aligned} f(a) &= \left(\frac{\lambda-1}{NC}\right)^{-\frac{1}{\lambda-1}} \left[a + \frac{(N^{-\lambda+2}C)}{\lambda-1}\right]^{-\frac{1}{\lambda-1}} \\ &= k_{\min} N^{\frac{1}{\lambda-1}} \cdot \left(a + N^{-\lambda+2} k_{\min}^{\lambda-1}\right)^{-\frac{1}{\lambda-1}}. \end{aligned} \tag{24}$$

由于无标度幂率指数在$\lambda \leqslant 2$时, 为亚无标度网络[17], 此时拓扑结构极不均匀, 容侵能力很差, 为了寻找容侵能力较强的拓扑, 仅考虑$\lambda > 2$时网络结构熵与拓扑参数的关系. 因此, 在$\lambda > 2$, $N \gg 1$时, $N^{-\lambda+2}k_{\min}^{\lambda-1} \approx 0$, 所以(24)式可化简为

$$f(a) = k_{\min}(N/a)^{\frac{1}{\lambda-1}}. \tag{25}$$

利用连续估计理论, 网络结构熵F可以转化为

$$F = -\frac{\int_1^N f(a) \ln f(a)\,\mathrm{d}a}{\int_1^N f(a)\,\mathrm{d}a} + \ln\left(\int_1^N f(a)\,\mathrm{d}a\right). \tag{26}$$

将(25)式代入(26)式可得

$$\begin{aligned} F &= \frac{\sigma N^{1-\sigma} \ln N}{N^{1-\sigma}-1} + \ln \frac{N^{1-\sigma}-1}{1-\sigma} - \frac{1}{1-\sigma}, \\ \sigma &= \frac{1}{\lambda-1}. \end{aligned} \tag{27}$$

(27)式为网络结构熵F与幂率指数λ和网络中节点个数N的关系式, 当λ和N给定时, 可以用F来度量拓扑容侵性的强弱. 其中网络结构熵F越大, 拓扑越均匀, 容侵性就越好; F越小, 拓扑越不均匀, 容侵性就越差, 所以要构造强容侵性的拓扑就要最大化F. 分别画出$N = 400$, $N = 800$和

$N = 1500$ 时网络结构熵与幂率指数的关系图, 如图1所示.

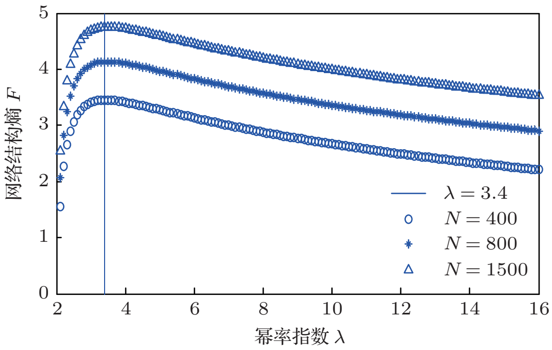

图1　网络结构熵与幂率指数关系图

由图1可知, 网络结构熵的变化趋势与幂率指数和节点个数有关, 但对于不同的 N 的取值, 网络结构熵 F 均在 $\lambda = 3.4$ 时取得最大值, 此时网络具有最好的容侵能力. 当 $\lambda > 3.4$ 和 $\lambda < 3.4$ 时, 拓扑的容侵能力均弱于 $\lambda = 3.4$ 时的拓扑, 所以可以通过优化幂率指数来提高拓扑的容侵能力

4　仿真分析

本文针对WSNs代表性的EAEM、容错性较好的BA算法进行MATLAB仿真实验对比, 在仿真实验中, 为了更好地体现拓扑参数对最终网络性能的影响, 在EAEM, BA和SIOT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, 仿真实验参数见表1, 其中每一次实验结果都是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	400
节点分布区域 A/m^2	500 × 500
初始能量 E/ J	2
节点产生数据包 L/ bit	100
数据融合能耗 $E_{\mathrm{elec}}/(\mathrm{nJ/bit})$	50
放大器功放能耗 $\varepsilon_{\mathrm{amp}}/(\mathrm{pJ/bit{\cdot}m^{-2}})$	100

由第3节的分析可知, 网络结构熵在 $\lambda = 3.4$ 时取得最大值, 由于SIOT模型的幂率指数为

$$\lambda = 1 + \frac{2}{\beta_2(\theta + 1)},$$

所以存在多组的拓扑参数值, 可使网络结构熵取得最大值, 下面选取任意两组进行对比分析, 拓扑参数如表2所示.

表2　拓扑参数

幂率指数 λ	θ	β_1	β_2
3.4	0.5	0.44	0.56
3.4	2	0.72	0.28

4.1　SIOT与EAEM度分布对比

图2给出了SIOT ($\theta = 0.5$) 与EAEM的度分布对比图, 从图中可以看出, SIOT和EAEM的度分布均服从幂率分布, 都具有度大的节点概率小和度小的节点概率大的特点, 但是SIOT度大的节点占有的概率远小于EAEM度大的节点占有的概率, 从而使拓扑的度分布更加均衡, 减弱了网络的非均匀性, 从而提升了拓扑的容侵能力.

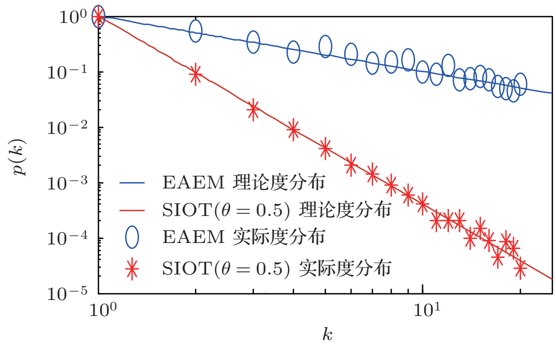

图2　(网刊彩色) 度分布对比图

4.2　容错性对比

为了衡量SIOT拓扑的容错能力, 将EAEM, BA, SIOT ($\theta = 0.5$) 和SIOT ($\theta = 2$) 进行仿真实验对比, 在每轮中各个节点与其邻居节点进行数据交换, 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目, 得到的容错对比图如图3所示.

由图3可以看出, EAEM, BA, SIOT ($\theta = 0.5$) 和SIOT ($\theta = 2$) 对随机失效均表现出较强的抗毁性, 这是由于基于无标度的拓扑演化模型在择优连接时, 度大的节点占了很小的比例, 度小的节点占了很大的比例, 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, 因此对网络的连通性造成的影响很小, 具有较强的容错性.

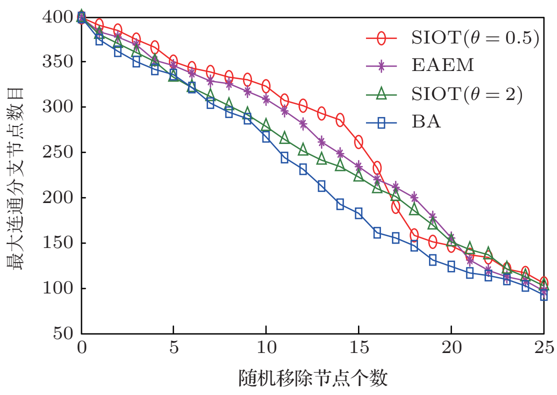

图3 容错对比图

4.3 容侵性对比

为了衡量SIOT拓扑的容侵能力, 将EAEM, BA, SIOT ($\theta=0.5$)和SIOT ($\theta=2$)进行对比, 在进行容侵对比时, 采用按节点度从大到小的顺序删除节点, 然后分别统计网络中最大连通片分支上的节点数目, 并假设最大连通分支的节点数目小于网络规模的1/4网络崩溃, 得到的容侵对比图如图4所示.

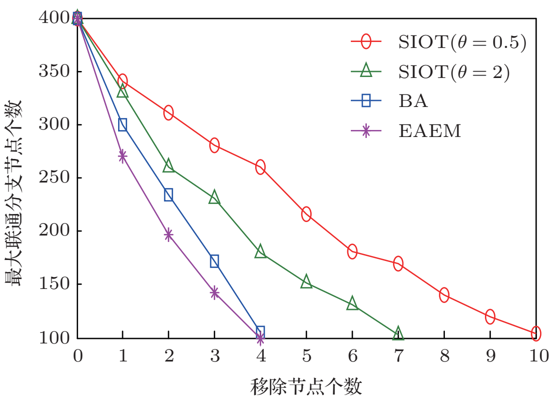

图4 容侵对比图

由图4可知, SIOT ($\theta=0.5$)拥有最好的容侵能力, 在选择性移除10个节点时, 拓扑中的最大联通分支节点数目仍然能够满足网络需求. SIOT ($\theta=2$)能够容忍7个节点的选择性移除, 这是因为在非线性增长时, 随着θ的增大, 每一时刻批量到达的节点数就越多, 网络的不均匀程度就增加的越快, 所以造成SIOT ($\theta=2$)的容侵能力弱于SIOT ($\theta=0.5$)的容侵能力. 而BA模型和EAEM仅能忍受4个节点的选择性移除, SIOT ($\theta=0.5$)相对于EAEM和BA的容侵能力提升了将近两倍, 从而验证了SIOT模型通过优化拓扑参数提升了拓扑的容侵能力.

4.4 节能性对比

由于传感器节点能量受限, 最大限度的延长网络生命期成为构造WSNs拓扑的另一目标. 采用一阶射频模型[18], 图5给出了拓扑在运行100轮后进行拓扑重构时, EAEM, BA, SIOT ($\theta=0.5$)和SIOT ($\theta=2$)模型中度为k的节点及其对应的剩余能量情况, 其中剩余能量为度为k的节点的平均剩余能量. 图6给出了四种模型的生命期仿真对比图, 每一轮试验中, 各个节点与其邻居节点进行数据交换, 依据低功耗无线通信能量消耗模型, 分别运行EAEM, BA, SIOT ($\theta=0.5$)和SIOT ($\theta=2$), 图6显示了在不同失效节点比例下(首节点, 10%, 30%, 50%, 70%, 80%)网络生命期的对比情况.

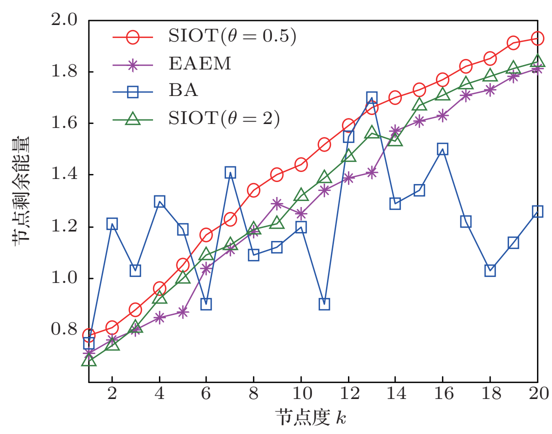

图5 节点度与能量关系图

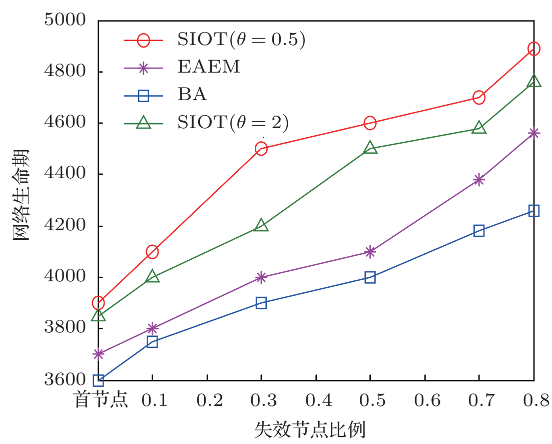

图6 网络生命期对比图

由图5中可以看出, EAEM, BA, SIOT ($\theta=0.5$)和SIOT ($\theta=2$)都具有度越大的节点平均

剩余能量越高的特点, 这有利于WSNs能耗均衡, 而BA算法却没有这个特点, 这是由于SIOT ($\theta = 0.5$), SIOT ($\theta = 2$) 和EAEM在构建拓扑时均考虑了节点的剩余能量, 并使剩余能量较大的节点具有较大的连接概率. 由图6可以看出, SIOT ($\theta = 0.5$) 和SIOT ($\theta = 2$) 的生命期也优于EAEM和BA, 在首节点失效时生命期就提升了7.8%, 随着节点失效比例的增加, 拓扑的生命期逐渐提升. 这是由于SIOT模型考虑了拓扑参数对拓扑容侵性的影响, 从而使网络能耗更加均衡. 综合上述分析, SIOT模型比EAEM和BA更适合WSNs拓扑结构实际的演化特点.

5 结　论

本文构建了一种幂率指数可以在$(1, +\infty)$调节的无标度拓扑结构, 并利用网络结构熵优化网络的幂率指数, 最终达到优化拓扑容侵的目的. 剩余能量调节因子和节点度调节因子的引入, 使拓扑的能耗更加均衡. 仿真验证了SIOT模型不仅具有强容错性还能提高网络的容侵能力, 并且能够延长网络的生命期. 利用SIOT优化算法, 仅通过改变拓扑参数值, 就可以产生容侵优化的拓扑, 为综合性能优化的WSNs容错拓扑设计奠定了良好的基础.

参考文献

[1] Wang Y Q, Yang X Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 010509

[2] 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]

[3] Wang J W, Rong L L 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 3826

[4] Song Y R, Jiang G P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 705 (in Chinese)[宋玉蓉, 蒋国平 2010 物理学报 **59** 705]

[5] Barabasi A, 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] 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] Albert R, Jeong H, Barabási A L 2000 *Nature* **406** 378

[9] Li J, Wu J, Li Y, Deng H Z, Tan Y J 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 068902

[10] 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]

[11] Kashyap, Abhishek, Samir Khuller, Mark A, Shayman 2006 *INFOCOM* **7** 1

[12] Liu Y, Li Z 2007 *Information and Control.* **4** 013

[13] Zheng G Z, Liu S Y, Qi X G 2012 *Computer & Electrical Engineering* **38** 643

[14] Wu J, Tan Y J, Deng H Z, Zhu D Z 2007 *Syst. Engin. Theo. Prac.* **27** 101 (in Chinese)[吴俊, 谭跃进, 郑宏钟, 朱大智 2007 系统工程理论与实践 **27** 101]

[15] Cai M, Du H F, Ren Y K, Marcus W F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 110513 (in Chinese)[蔡萌, 杜海峰, 任义科, 费尔德曼 2011 物理学报 **60** 110513]

[16] Guo J L, Wang L N 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5635 (in Chinese)[郭进利, 汪丽娜 2007 物理学报 **56** 5635]

[17] Wu J, Tan Y J, Deng H Z, Zhu D Z 2008 *J. Sys. Sci. & Math. Scis.* **28** 811 (in Chinese)[吴俊, 谭跃进, 郑宏钟, 朱大智 2008 系统科学与数学 **28** 811]

[18] 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]

Study on the scale-free topology model with strong intrusion-tolerance ability in wireless sensor networks*

Liu Hao-Ran[1)2)] Yin Wen-Xiao[1)†] Dong Ming-Ru[1)] Liu Bin[1)]

1) (*School 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 5 January 2014; revised manuscript received 27 January 2014)

Abstract

Considering that the scale-free topology in wireless sensor networks has poor ability of intrusion-tolerance, we use the Poisson network model with node batch arrival to construct a new scale-free topology model with intrusion-tolerance optimization. Additionally, the two adjustment factors about the residual energy and the node degree are introduced in the construction of the topology model. Then the scale-free topology whose power-law exponent can be adjusted in the range of $(1, +\infty)$ is obtained. Finally, the power-law exponent is optimized by the network structure entropy, and its optimal value is derived. Results show that the new topology has a strong fault-tolerance. And it also can enhance the network intrusion-tolerance and has good energy-saving advantages.

Keywords: wireless sensor networks, scale-free topology, intrusion-tolerance, fault-tolerance

PACS: 05.65.+b, 05.70.Np **DOI:** 10.7498/aps.63.090503

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

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