

具有路径能耗优化特性的 WSN 无标度容错拓扑控制算法

刘浩然¹, 韩涛², 李雅倩², 尹荣荣²

(1. 燕山大学 信息科学与工程学院 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 针对数据传输型的大规模无线传感网络中路径能量损耗问题, 建立在多跳模式下的网络路径能耗优化模型, 得出可以使网络通信能耗最小的节点度取值规律。依据节点度的最优取值, 通过控制网络平均节点度的适应度模型来构建网络拓扑, 提出一种具有路径能耗优化特性的无标度容错拓扑控制算法 EETA(energy efficiency topology algorithm)。动态性能分析表明, 由该算法生成的网络拓扑, 其节点的度分布服从幂律, 具有无标度拓扑的强容错能力。仿真实验结果显示, 该算法同时也降低了网络路径能量消耗, 具有路径节能性。

关键词: 无线传感器网络; 拓扑控制; 容错; 无标度结构; 路径能量消耗

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)06-0064-09

Scale-free fault-tolerant topology control algorithm in wireless sensor network with optimization of path energy consumption

LIU Hao-ran¹, HAN Tao², LI Ya-qian², YIN Rong-rong²

(1. Hebei Province KeyLaboratory of Special Optical Fiber and Optical Fiber Sensing,

College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Institute of Information Science Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: For the issue of path energy consumption produced in the process of transmitting data in large-scale sensor network, an optimization model of network path energy consumption based on the mode of multi-hop was established, and then the law of obtaining the value of the node degree that could minimize the energy consumption of network was deduced. According to the optimal value of nodes, the network topology was built based on a fitness model which could control the network average node degree, and a scale-free fault-tolerant topology control algorithm EETA(energy efficiency topology algorithm) having the characteristics that could minimize the path energy consumption was put forward. The dynamic performance analysis indicates the network topology which was generated based on this algorithm had the strong fault tolerant ability, because the node degree distribution follows the power-law. The simulation results show that the algorithm also reduces the path energy consumption in the network and then make the network energy-efficient.

Key words: wireless sensor network; topology control; fault-tolerant; scale-free structure; path energy consumption

1 引言

作为通信和计算机领域新兴的研究热点, 具有感知和计算能力的无线传感器网络(WSN, wireless sensor network)引起了人们的极大关注^[1]。WSN 经常部署在恶劣的环境中, 具有能量受限、电源不易更换、节点能量耗尽而造成的节点失效频繁等特

点^[2,3]。由于这些特点, 要求 WSN 能够应对可能出现的节点失效情况, 即网络应具有一定的容错能力和良好的节能特性。因此, 如何构造容错拓扑控制算法兼顾网络节能特性^[4]成为学者们的研究热点。

针对 WSN 节能容错拓扑控制问题, 早在 1999 年, Barabasi 和 Albert 在《Science》杂志上提出了一种度分布遵循幂律分布特性的无标度网络模型^[5]

收稿日期: 2013-04-15; 修回日期: 2013-07-22

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(F2012203179)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of Hebei Province(F2012203179)

(BA 模型, barabasi-albert model), 所构建的无标度拓扑对节点的随机故障具有较强的容错能力, 为复杂网络容错拓扑研究提供新的思路。基于此, 文献[6]提出了一种基于随机行走的 WSN 簇间拓扑演化模型, 通过改善拓扑均匀性, 生成了具有无标度特征的 WSN 簇间拓扑结构。文献[7]构建一种具有重构机制的加速演化无标度网络模型, 充分考虑随机加点、加边, 随机去点、去边的特点通过重构机制增强网络的容错性。文献[8]从网络演化角度来分析 WSN 的拓扑控制, 为了防止节点在数据传输时能量损耗过快, 提出 2 个 WSN 的自组织节能模式, EAEM(energy-aware evolution model)算法构建的网络根据连通性和每个传感器节点的剩余能量。因此, 产生的网络具有高性能的随机误差的容错能力, 另一算法——EBEM(energy-balanced evolution model), 在 EAEM 的基础上约束每一个节点, 可以使能源消耗在整个网络更加平衡; 文献[9]提出了一种新的局域世界网络, 网络中有 2 种不同节点: 传感器节点和汇聚节点, 通过限制汇聚节点的节点度, 平衡网络能量消耗, 延长网络寿命。以上文献推进了 WSN 容错拓扑控制的研究, 但在节能方面仅考虑了节点剩余能量的消耗, 没有考虑到 WSN 中路径能量损耗对网络的影响, 导致可能造成 WSN 中通信能量损耗过大, 缩短网络生命期。

基于上述分析, 为了同时提升 WSN 的容错性和节能性, 在无标度拓扑强容错性的基础上, 考虑到网络中的路径能量消耗与单跳路径能量损耗和节点跳数的密切关系, 通过求解节点度与单跳路径能量损耗及平均跳数的关系表达式, 建立路径能耗模型, 得出满足网络路径通信能耗最小的节点度最优取值。进而以节点的适应度函数来控制网络平均节点度, 构建无标度拓扑优化结构, 提出具有路径能耗优化特性的无标度容错拓扑控制算法, 在维持网络强容错性的基础上延长了网络生命期。

2 路径能耗模型

为了提高无标度拓扑结构的容错能力, 同时兼顾到网络能量消耗, 本文从构建网络能效优化模型入手, 该模型融合了节点单跳路径能耗和网络平均跳数信息, 分析得出了满足网络路径通信能耗最小的节点度取值规律, 判断最优节点度的取值, 为构建高效的无标度拓扑演化算法 EETA 提供了理论基础。

随机选取节点 i 到任意目的节点的节点的能量消耗值不仅与距离有关, 而且与跳数有密切联系, 也就是说网络单跳路径能耗 E_{cost} 越高, 平均跳数 $\langle h \rangle$ 越大, 路径能量消耗值 E 增加, 路径能量消耗值 E 可由 E_{cost} 和 $\langle h \rangle$ 相乘求得。

$$E = E_{\text{cost}} \langle h \rangle \quad (1)$$

分别从单跳路径能耗和平均跳数 2 个方面进行推理, 并通过推理得出的结果, 建立网络能效优化模型, 得到 E 关于节点度 k 的表达式, 并且节点度的取值不同对 E 的影响进行仿真分析, 求解使路径通信能耗达到最小的最优节点度, 为下一节的设计算法奠定基础。

2.1 单跳路径能耗 E_{cost}

根据简单的无线传播能耗模型^[10], 在相距为 d 的两节点之间传输 n bit 数据, 发送端能耗为 E_{tx} , 接收端能耗为 E_{rx} , 则发射和接受的总能耗为

$$\begin{aligned} E_{\text{cost}} &= E_{\text{tx}} + E_{\text{rx}} \\ &= (E_{\text{elec}}n + \epsilon_{\text{amp}}nd^{\alpha}) + (E_{\text{elec}}n) \\ &= 2E_{\text{elec}}n + \epsilon_{\text{amp}}nd^{\alpha} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, E_{elec} 表示发射装置和接收电路每发送单位或接收单位比特的能耗; ϵ_{amp} 表示发射放大电路将每比特传送单位平方米所耗的能量; α 为传播衰减指数, $2 \leq \alpha \leq 5$, 取值范围由周围环境决定, 当网络环境平坦无障碍时, α 取值为 2。

为方便分析, 令 $l = nE_{\text{elec}}$, $\mu = n\epsilon_{\text{amp}}$, 将式(2)改写成

$$E_{\text{cost}} = 2l + \mu d^2 \quad (3)$$

由于 N 个节点随机部署在监测区域 G (面积为 A)上, 则节点在监测范围内服从均匀分布

$$f(x, y) = \begin{cases} 1/A, & (x, y) \in G \\ 0, & (x, y) \notin G \end{cases} \quad (4)$$

节点落在以通信距离 d 为半径的圆域 D 内的概率为

$$P\{(X, Y) \in G\} = \iint_D f(x, y) dx dy = \pi d^2 / A \quad (5)$$

令 k 为 D 内所覆盖的节点数(即节点度), 在网络中任意节点的通信圆域 D 内, 存在如下关系

$$d = \sqrt{Ak/N\pi} \quad (6)$$

那么, 将式(6)代入到式(3), 可得节点 i 在监测区域内单跳路径能量消耗值为

$$E_{\text{cost}} = 2l + \mu \frac{Ak}{N\pi} \quad (7)$$

2.2 平均跳数 $\langle h \rangle$

跳数即信息从数据源节点到基站的转发次数, 能够体现出通信传播的时延问题, 文献[11]研究不同的转发策略对平均跳数有不同的影响, 现有的转发策略有: 固定传输范围的最短前进距离转发、固定传输范围的最大前进距离转发、固定传输范围的贪婪转发 (GFF, greedy forward with fixed radius), 通过不同转发策略的性能对比, 可以知道 GFF 具有计算量小、容易实现以及所得平均跳数较小的性能, 其策略是在所有邻近节点中找一个距离目的节点最近的节点进行转发。

设随机变量 Z 表示从 X 到 Y 传输在目的节点上前进的距离, 也就是向量 \overline{XY} 在 \overline{XD} 方向上的投影 (如图 1 所示)。 ρ 为传感器节点监测范围内的密度, 也就是 N/A , 其中, N 为网络节点个数, A 为监测区域面积, 由几何定理, 得出式(8)。

$$\begin{cases} A_1 = d^2 (\theta_1 - \sin(2\theta_1))/2 \\ A_2 = y^2 (\theta_2 - \sin(2\theta_2))/2 \\ \theta_1 = \arccos(d^2 + a^2 - y^2)/2ad \\ \theta_2 = \arccos(y^2 + a^2 - d^2)/2ay \end{cases} \quad (8)$$

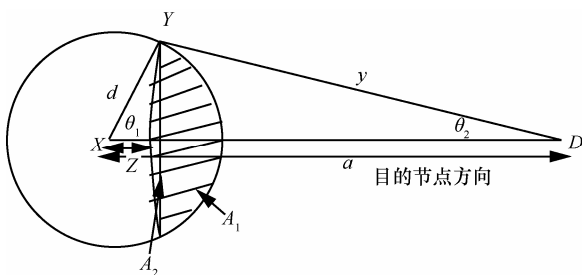


图 1 GFF 转发

如图 1 所示, 式(8)中 A_1 为阴影区的较大部分的面积, A_2 为阴影区的较小部分的面积, d 表示网络中节点的通信半径, a 表示网络发送节点到目的节点传输距离。可以看出 Z 越大, 两点间距离一定时, 到达目的节点的跳数就越少。

令 $t = \cos \theta_1$, 由连续性随机变量数学期望推导, 计算求得的理论期望值 \bar{Z} , 推得^[12]

$$\bar{Z} = d \left[1 + e^{-k} - \int_{-1}^1 e^{-\frac{k}{\pi}(\cos^{-1}(t) - t\sqrt{1-t^2})} dt \right] \quad (9)$$

由式(9)看出, 理论期望值 \bar{Z} 主要受到节点度和传输范围的影响, 网络中传感器节点之间的平均路径长度 L 为唯一定值^[12], 由式(6)和式(9)可计算求出平均跳数 $\langle h \rangle$ 为

$$\langle h \rangle = \frac{L}{\bar{Z}} = \frac{L}{\sqrt{Ak/N\pi}} \left[1 + e^{-k} - \int_{-1}^1 e^{-\frac{k}{\pi}(\cos^{-1}(t) - t\sqrt{1-t^2})} dt \right]^{-1} \quad (10)$$

2.3 路径能耗优化模型

2.1 节和 2.2 节分别推理得出 E_{cost} 和 $\langle h \rangle$ 与 k 的关系表达式(7)、式(10), 因此, 代入式(1)可以得出网络中平均路径能耗 E 。

$$\begin{aligned} E &= \frac{\left(2l + \mu \frac{Ak}{N\pi}\right)L}{\sqrt{Ak/N\pi}} \left[1 + e^{-k} - \int_{-1}^1 e^{-\frac{k}{\pi}(\cos^{-1}(t) - t\sqrt{1-t^2})} dt \right]^{-1} \\ &= \frac{\left(2l + \mu \frac{k}{\pi\rho}\right)L}{\sqrt{k/\pi\rho}} \left[1 + e^{-k} - \int_{-1}^1 e^{-\frac{k}{\pi}(\cos^{-1}(t) - t\sqrt{1-t^2})} dt \right]^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

推论 在 WSN 的路径能量消耗中, $E = \frac{\left(2l + \mu \frac{k}{\pi\rho}\right)L}{\sqrt{k/\pi\rho}} \left[1 + e^{-k} - \int_{-1}^1 e^{-\frac{k}{\pi}(\cos^{-1}(t) - t\sqrt{1-t^2})} dt \right]^{-1}$ 的情况下, 存在最优节点度使 E 达到最小。

为了证明在 WSN 的路径能量消耗中存在最优节点度使 E 达到最小, 首先分析式(11), 当网络已知时, 除了节点度 k 外, 其余参数均为定值, 因此 k 的取值影响到 E 的大小。

由于式(11)为超越方程, 需要通过 MATLAB 平台用图像解析方法求得, 由于式中其他参数不影响 k 的最优取值, 为方便计算给出一组参数取值, 在 $L=1$ 、 $l=1 \times 10^{-8}$ J、 $\mu=5 \times 10^{-8}$ J/m²、 $\pi=3.14$, 节点密度 ρ 为 0.003 2 的条件下, WSN 存在最优节点度约等于 10, 并且求出路径能量消耗的变化曲线。如图 2 所示, 横轴代表节点度数, 纵轴代表平均路径能量消耗, 可以看出随着网络节点度的递增, 网络节点度 1~10 内, 平均路径能量消耗急速下降, 节点度大于 10, 平均路径能量消耗缓慢上升, 可以得知存在平均路径能量消耗的极小值。同理可以证明 WSN 中在不同网络规模下均存在平均通信能耗的最小值。因此 WSN 中存在最优节点度 $\langle k \rangle$, 使 E 达到最小。

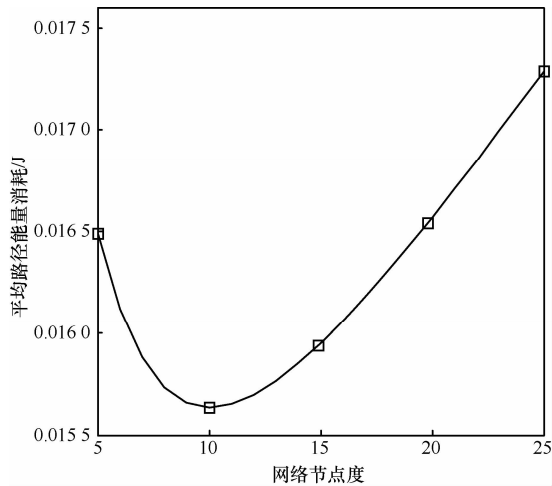


图 2 路径能量消耗随节点度变化曲线

经过统计可以得出节点密度 ρ 与最优节点度的关系，不难发现最优节点度随着节点密度增大而递增(如图 3 所示)，依据曲线图可以得知节点密度 ρ 和最优节点度 $\langle k \rangle$ 成正比关系，因此在已知网络节点密度的条件下，可以计算求得 WSN 中最优节点度，进而可以通过设计算法构建拓扑使 WSN 的路径能耗达到最小值。

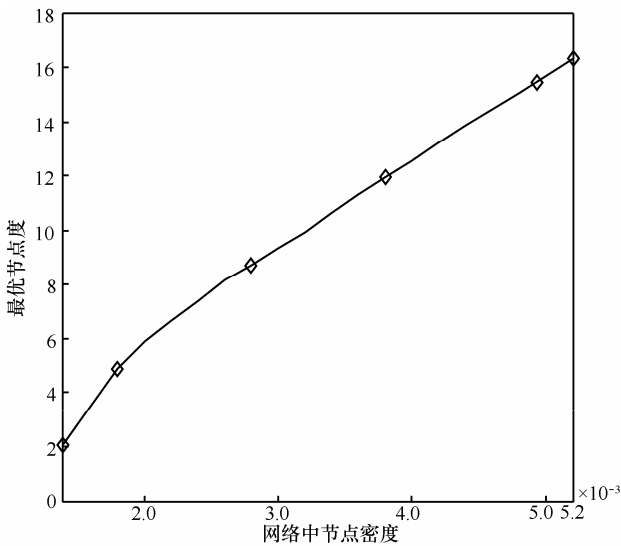


图 3 节点密度与最优节点度的关系曲线

3 WSN 无标度拓扑的构建

通过构建的网络能效优化模型，可以证明网络中存在最优节点度 $\langle k \rangle$ 使能量消耗达到最小。根据最优节点度的取值，设计一种基于无标度理论的 WSN 容错拓扑控制算法 EETA，在网络生长过程中根据节点的适应度函数 k_{\max} 来控制网络节点度的期

望值，满足在无线传感网络中的节点度期望值 $\langle k \rangle$ 无限接近于上述所求的最优节点度。通过引入适应度函数构建的模型使生成的算法不仅可以在多跳通信模式中降低网络能耗，而且具有无标度拓扑增强容错特性。

3.1 算法 EETA 描述

BA 模型首次成功地提出了可以解释实际网络无标度的形成机理，该模型指出增长和择优连接是形成无标度网络的 2 个必不可少的机制。但是，BA 无标度网络模型和现实网络对比存在一点局限性，仅从时间变化长短考虑节点的连接增长，而在现实网络在演化过程中，会受到竞争因素的影响，因而本文设计的 EETA 算法所构建的网络模型相对于 BA 模型的优先连接概率过于简化的不足作了以下两点改进。

第一，择优连接增长概率不仅取决于节点度，还依赖于其竞争能力^[13]，本文中用节点的适应度函数来表示，既具有无标度特性，又增强网络的容错能力。

第二，网络中节点的度数不能无限增长，引入关于 k_{\max} 的节点适应度模型，这里又有两点好处，其一可以限制某些高节点度节点的增长，从而防止节点过度使用，导致节点能量消耗过快，引起节点失效，可以使能源消耗在整个网路更加平衡；其二通过调整 k_{\max} 控制网络节点度期望值 $\langle k \rangle$ ，使其达到最优节点度，从而在多跳通信模式中降低网络通信路径能耗。

在网络生长过程中，无标度容错拓扑的度分布服从幂律 $\rho(k) = Ck^{-\tau} (C > 0, \tau > 2)$ ，记节点的最小度为 $k_{\min} (k_{\min} \leq k_{\max})$ ，则由式(12)可计算出无标度容错拓扑中节点的邻居节点数期望 $\langle k \rangle$ 。

$$\begin{aligned} \langle k \rangle &= \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} k \rho(k) dk \\ &= \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} k C k^{-\tau} dk = C \left(k_{\max}^{2-\tau} - k_{\min}^{2-\tau} \right) / (2-\tau) \end{aligned} \quad (12)$$

依据 $\rho(k) = Ck^{-\tau}$ 是连续变化的，进而由概率密度性质 $\int_{k_{\min}}^{k_{\max}} \rho(k) dk = 1$ 得到系数 C 的取值

$$C = (1-\tau) / \left(k_{\max}^{1-\tau} - k_{\min}^{1-\tau} \right) \quad (13)$$

WSN 中每个时间步增长的边数 $m=1$ ，此时最小节点度 k_{\min} 为 1，由式(12)和式(13)，在 $k_{\min}=1$ 的条件下可得出节点度期望值 $\langle k \rangle$ 和最大度 k_{\max} 关系。

$$\begin{aligned} \langle k \rangle &= \left[(1-\tau) / (k_{\max}^{1-\tau} - k_{\min}^{1-\tau}) \right] \left[(k_{\max}^{2-\tau} - k_{\min}^{2-\tau}) / (2-\tau) \right] \\ &= \left(\frac{1-\tau}{2-\tau} \right) \left(\frac{k_{\max}^{2-\tau} - 1}{k_{\max}^{1-\tau} - 1} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14)可以看出, 节点度期望值 $\langle k \rangle$ 可以由 τ 和 k_{\max} 决定, 因此可以反推, 得出当 $\langle k \rangle$, τ 已知时, 存在一个关于 $\langle k \rangle$, τ 的函数 $k_{\max} = f(\langle k \rangle, \tau)$, 可以计算求得 k_{\max} 为设计 EETA 算法奠定基础。

为了构建满足路径能量消耗优化需求的无标度拓扑, 本文对于每一个新加入网络的节点, 构建其局域世界, 利用拥有的局域信息进行优先连接^[14], 提出一种满足节能特性的 WSN 无标度拓扑演化机制 EETA, 详细描述如下。

步骤 1 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)。在每个时间步长内, 一个新节点 new 加入到网络中, 并与已有网络中的 m 个节点相连, 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 new 加入网络。

步骤 2 新节点 new 的 M_{new} 个一跳邻居组成了它的局域世界, 用 LW_{new} 表示。新节点 new 与节点 $i (i \in LW_{\text{new}})$ 相连的概率 $\Pi(k_i)$ 取决于节点 i 的节点度上限值 k_{\max} 和节点度 k_i 。 $\Pi(k_i)$ 服从以下规则

$$\Pi_{\text{local}}(k_i) = (M_{\text{new}} / (m_0 + t)) \frac{(1 - k_i / k_{\max}) k_i}{\sum_{j \in LW_{\text{new}}} k_j} \quad (15)$$

其中, $1 - k_i / k_{\max}$ 表明 k_i 越接近其上限值 k_{\max} , 节点 new 选择与 i 相连的概率越小, 当 k_i 达到其上限值 k_{\max} 时, 接下来的时间内新加入节点再也不会选择 i 作为连接节点。在经过 t 时间后, 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。

定理 EETA 算法的时间复杂度和信息复杂度均为 $O(N)$ 。

证明 根据 EETA 算法的自组网过程中, 待加入的节点按依次进入网络, 最后一个待加入节点需要等待之前 $N - m_0$ 个节点加入后再加入网络, 组成网络节点数为 N 的拓扑结构, 可以得出 EETA 算法所需时间为 $O(N - m_0)$, 因此 EETA 算法的时间复杂度为 $O(N)$ 。

在 EETA 算法中, 一个新节点 new 加入网络, 首先需要以最大发射功率广播 Hello 消息寻找邻居节点, 其中包含节点 new 的 ID 与自身坐标, 节点

new 收集邻居节点回复的 answer 消息, 其中 answer 消息包含择优概率所需信息, 依据择优连接概率, 确立所需连接的 m 个邻居节点, 并且发送连接请求 add 消息, 完成 new 节点与 m 个节点连接。节点 new 加入网络后, 接收来自新加入邻居节点的 Hello 消息, 需要回复 answer 消息应答新节点, 因为网络节点邻居数最多为 k_{\max} 个, 因此网络中一个节点的信息复杂度为 $O(2 + k_{\max})$ 。网络中有 $N - m_0$ 个节点加入, EETA 算法所需信息量为 $O((2 + k_{\max})(N - m_0))$ 。因此 EETA 算法的信息复杂度为 $O(N)$ 。

综上, EETA 算法的时间复杂度和信息复杂度均为 $O(N)$ 。 证毕

3.2 EETA 算法的动态特性分析

EETA 算法性能主要受到度分布属性的影响, 因此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。假设新节点 new 在 t 时刻加入网络, R_0 为初始时刻的网络半径, $R_0 + t$ 为 t 时刻的网络半径, R_{new} 为新加入节点 new 的通信半径。由于监测区域内节点均匀分布, 由此

$$M_{\text{new}} / (m_0 + t) \approx \frac{1}{2} R_{\text{new}} / (R_0 + t)^2 \quad (16)$$

将式(16)代入式(15), 并且由于得到网络中节点的度 k_i 一般都远远小于其上限值 k_{\max}

$$\Pi_{\text{local}}(k_i) = \frac{\frac{1}{2} R_{\text{new}}^2 (1 - k_i / k_{\max}) k_i}{(R_0 + t)^2 \sum_{j \in LW_{\text{new}}} k_j} \quad (17)$$

由节点均匀分布可得

$$\sum_{j \in LW_{\text{new}}} k_j = \frac{1}{2} \frac{R_{\text{new}}^2}{(R_0 + t)^2} N(t) \langle k_t \rangle \quad (18)$$

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

$$\langle k_t \rangle = 2mt / N(t) \quad (19)$$

将式(18)和式(19)代入式(17)得

$$\Pi_{\text{local}}(k_i) = \frac{(1 - k_i / k_{\max}) k_i}{2mt} \quad (20)$$

随机变量 k_i 是连续变化的, 那么概率可表示为 k_i 连续变化的速率, 即

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m \Pi_{\text{local}}(k_i) = \frac{(1 - k_i / k_{\max}) k_i}{2t} \quad (21)$$

求解上述微分方程得到, 由初始条件 $k_i(t) = m$ 可得

$$k_i(t) = \frac{mk_{\max}}{k_{\max} - m + m(t/t_i)^{1/2}} \left(\frac{t}{t_i}\right)^{1/2} \quad (22)$$

节点 i 度小于 k 的概率 $P(k_i(t) < k)$ 可由式(23)求得

$$\begin{aligned} P(k_i(t) < k) &= P\left(\frac{k_{\max}m}{k_{\max} - m + m(t/t_i)^{1/2}} \left(\frac{t}{t_i}\right)^{1/2} < k\right) \\ &= P\left(t_i > \frac{m^2 t (k_{\max} - k)^2}{k^2 (m - k_{\max})^2}\right) \\ &= 1 - P\left(t_i \leq \frac{m^2 t (k_{\max} - k)^2}{k^2 (m - k_{\max})^2}\right) \end{aligned} \quad (23)$$

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 $P(t_i) = 1/(m_0 + t)$, 可得

$$P(k_i(t) < k) = 1 - \frac{m^2 (k_{\max} - k)^2}{k^2 (m - k_{\max})^2} \frac{t}{m_0 + t} \quad (24)$$

当 $k_{\max} \gg k$ 时, 则 $k_{\max} - k \approx k_{\max}$ 节点度分布 $P(k)$ 可由式(25)得到。

$$\begin{aligned} P(k) &= \frac{\partial P(k_i(t) < k)}{\partial k} \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t}{m_0 + t} \frac{2m^2 (k_{\max})^2}{(m - k_{\max})^2} k^{-3} \\ &= 2 \left[\frac{mk_{\max}}{m - k_{\max}} \right]^2 k^{-3} \end{aligned} \quad (25)$$

经过动态分析可以理论上证明了 EETA 算法所构建的拓扑节点度分布服从幂指数为 3 的幂律分布, 具有无标度特性。

4 实验分析

基于第 3 节通过对算法 EETA 的动态特性分析, 理论上证明了网络拓扑的度分布具有幂律特性。本文选择具有代表性的 WSN 无标度节能容错拓扑算法 EAEM 和 EBEM 进行实验比较, 在 MATLAB 平台上进行仿真实验, 比较算法所获得拓扑的网络综合性能, 如容错性能、网络节能性和生命期。实验环境参数如表 1 所示, 其中每一类实验结果都是 50 次实验的平均值。

表 1 实验环境参数

参数	取值
发射/接收电路损耗 E_{elec}	50×10^{-9} J/bit
放大电路损耗 ϵ_{amp}	100×10^{-12} J/bit/m ²
数据分组长 n	100 bit
节点最大通信范围 d_{max}	150 m
监测区域面积 A	500 m × 500 m
节点数 N	200、300、400
节点初始能量 E_0	1 J

4.1 无标度特性分析

EETA 算法生成的拓扑结构如图 4 所示, 300 个传感器节点生成的网络拓扑存在少数高节点度的关键节点和大多数低节点度的末梢节点, 由此可以证明 EETA 算法构建了异质拓扑——无标度结构。

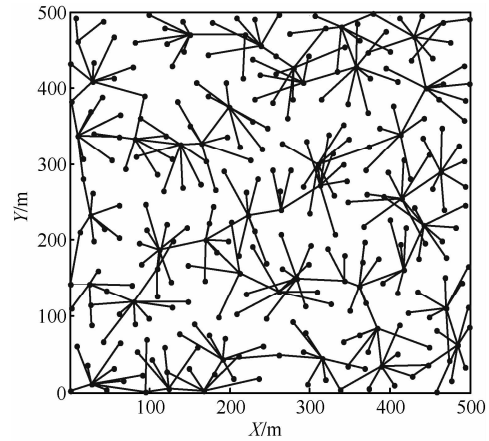


图 4 网络拓扑结构

网络拓扑的节点度分布如图 5 所示, 图中的直线是度分布的理论值, 幂指数为 3。从图 5 中可以看出, 由于度数有上限值的限制, 所以度数的增长速度逐渐趋于缓慢, 度分布在双对数坐标下近似服从幂指数为 3 的幂律分布, 同样可以得出生成的拓扑具有无标度网络的性质。

4.2 容错性分析

在 WSN 中由错误导致的故障是随机的, 网络中每个节点发生故障的概率是相同的^[15], 失效节点会使原本连通的网络拓扑分割, 从而降低网络的覆盖度, 甚至导致网络无法正常工作。在传感器节点为 300 的网络环境中随机移除节点, 观察 3 种算法所获拓扑的最大连通分支规模的变化情况, 如图 6 所示, 它反映了算法的容错能力, 横轴是失效节点数目, 纵轴是节点失效后网络中最大连通片分支上的节点数目。不难发现, 随机

移除节点方式对 3 种算法所获拓扑影响均较小，在移除节点数达到 10% 时，网络依然有近 2/3 的节点可用，网络覆盖状况几乎不受影响，具有强容错性。这主要是因为，3 种算法都构建了无标度拓扑结构，因结构的不均匀性使随机移除节点更多的是那些具有少量连接的不重要节点，而它们的移除不会对网络拓扑产生较大影响，故呈现出了较好的容错性。

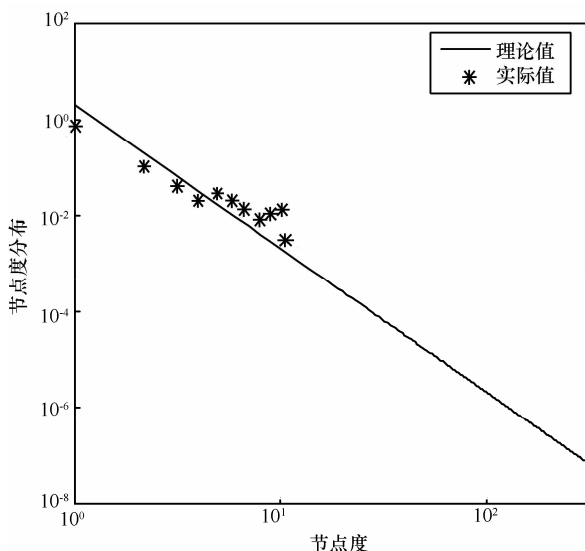


图 5 拓扑度分布

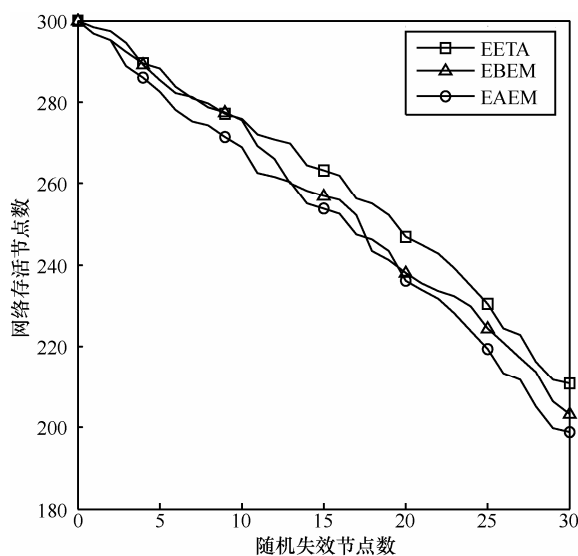


图 6 拓扑最大连通分支规模变化比较

此外，从图 6 中还可以看到，EETA 算法较 EAEM 算法和 EBEM 算法所得拓扑具有更好的容错能力，这主要是由于 EETA 算法构建度分布服从幂指数为 3 的幂律分布，而其他 2 种算法的幂指数均大于 3，根据无标度性质^[15]，幂指数越小的无标

度拓扑，拓扑不均匀程度越强，拓扑强容错特性也更为明显。因此，EETA 所构建的拓扑对随机节点失效的容错能力是 3 个拓扑中最好的。

4.3 节能性分析

为了评估 EETA 算法构建的拓扑节能性，可以通过网络中任意节点间的通信能耗体现网络整体节能性。如图 7 所示，分别在节点数为 200、300 和 400 的 3 种情况下运行 EETA、EAEM 和 EBEM 算法得到网络拓扑结构，之后任意选取 2 个节点，每一次都统计信息传输路径的跳数和通信过程中的能量消耗相关数据，统计得出网络的路径能耗，相同节点个数的场景分别重复实验 50 次，最后计算网络路径能量消耗的平均值。

EETA 算法考虑到 WSN 的平均跳数和单跳通信损耗，得到的网络拓扑结构可以减少节点之间的通信能耗，节省网络的整体能量消耗。EBEM 算法不仅考虑节点剩余能量，还考虑到了节点度的上限值，当网络中节点的度达到上限值时，将不再进行连接，使网络能耗达到均衡。但是 EBEM 算法未考虑到路径能量消耗，所以网络算法能耗略高于 EETA，而 EAEM 算法仅考虑节点的剩余能量，未考虑节点之间通信能量损耗，因此所构建的拓扑网络结构平均网络能量消耗高于 EETA 和 EBEM。同样，由图 7 可以看出 EETA 生成的网络拓扑结构，在整体网络通信能量消耗方面具有很好的优势，体现出良好的节能性。

由于 WSN 中节点能量受限，为了更能反映 EETA 算法在节能方面的优势，就上述 3 种算法所获拓扑的网络生命期进行对比。每一轮实验中，各个节点与其邻居节点进行数据交换，分别执行 3 种算法，图 8 显示了 3 种网络规模($N=200, 300, 400$)，在不同失效节点比例下(首节点、10%、30%、50%、70%、90%)网络生命期的变化情况，图 8 可以说明以下 2 种现象：随着失效节点比例的增加，EETA 比 EAEM 和 EBEM 网络生命期的提升幅度也越来越大，这就说明 EETA 所获得网络生命期远高于其他 2 种节能性算法，这主要是因为 EETA 算法设计是以通信路径能耗优化为目标要求，从而大幅度延长了网络生命期；不同网络传感器节点数下对比网络生命期，达到的效果也不同，在失效节点比例为 50% 时，图 8(a)所示网络节点数 200 时，EETA 算法所获拓扑可以运行 3 870 轮数据交换，相对 EAEM 算法和 EBEM 算法分别具有 52 和 70 轮提升。图 8(b)所示在网络节点数为 300 时，分别具有 64 和 98

轮提升，图 8(c)可以看出节点数为 400 时，具有 95 和 131 轮提升，不难发现网络初始规模为 400 个传

感器节点时的拓扑生命期能力对比效果最明显，这是因为随着网络规模的增加，传感器节点之间通信

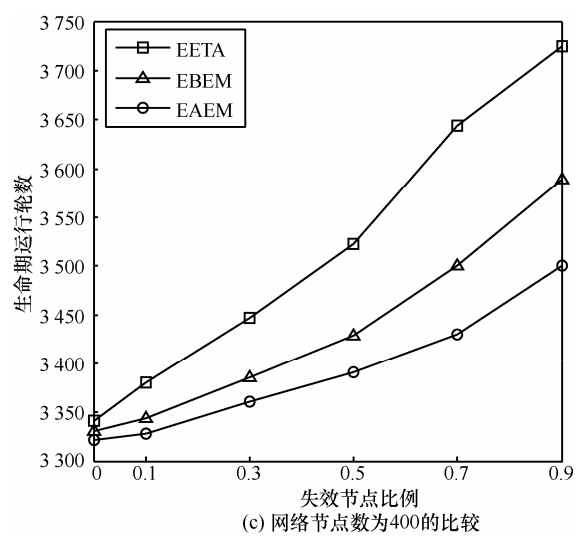
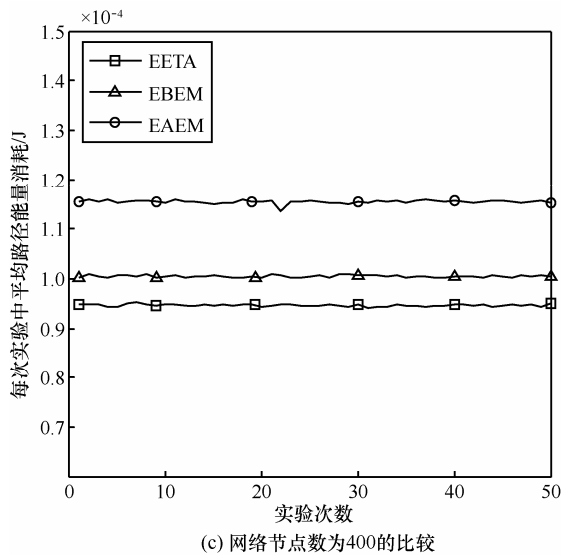
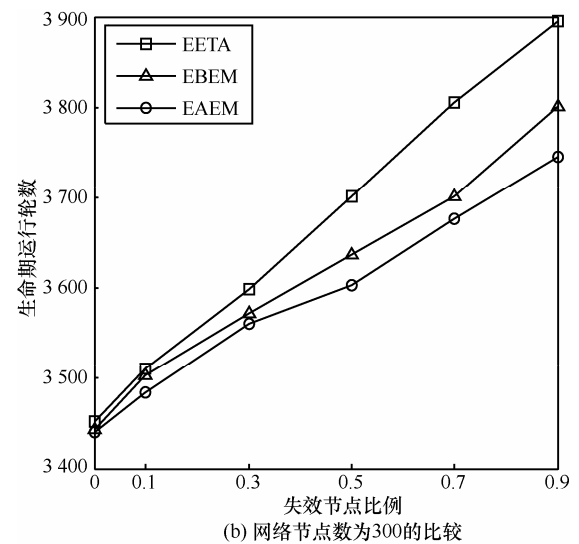
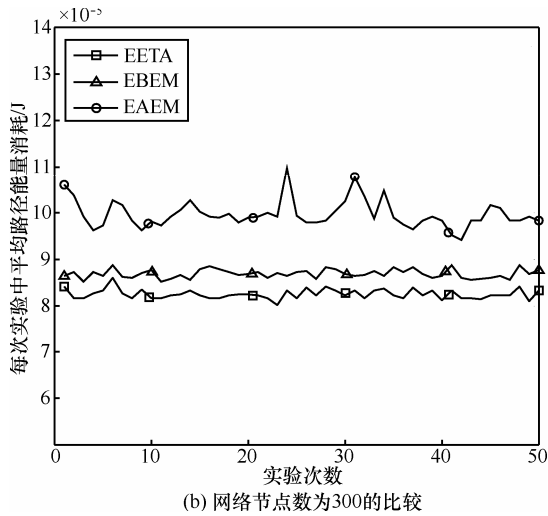
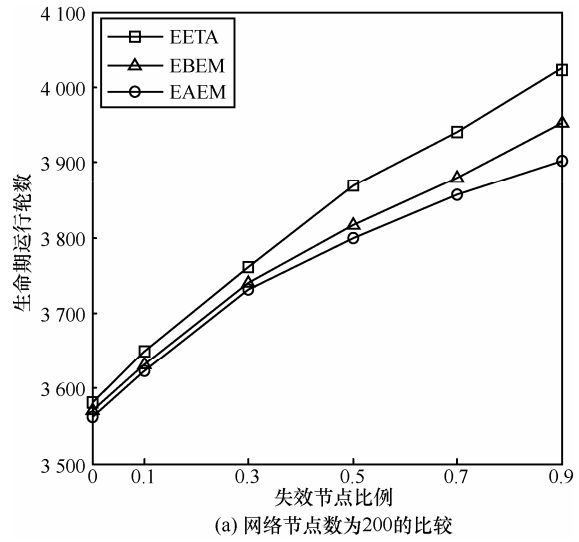
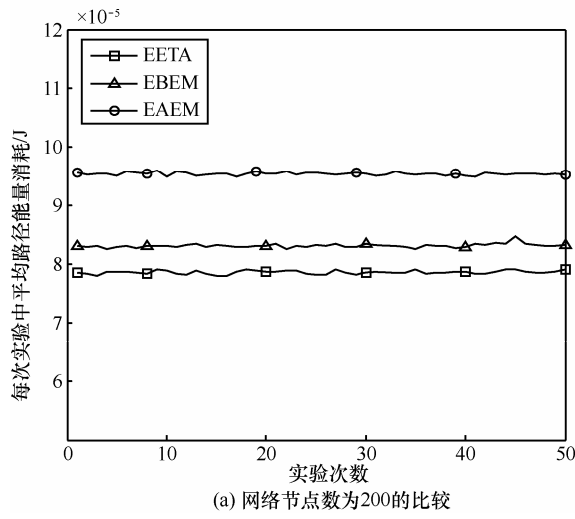


图 7 网络平均路径能量消耗

图 8 网络平均路径能量消耗

的链路增多, EETA 拓扑中路径节能优势越明显, 因此 EETA 算法延长网络寿命达到的效果就越好。

从上述网络容错能力和节能性能评估进一步验证了 EETA 算法以满足容错和节能特性的无标度容错拓扑为设计目标, 不仅保证了对随机节点失效行为的强容错能力, 而且由于所获拓扑具有路径节能优势, 延长网络生命期。

5 结束语

本文通过分析网络的平均跳数和单跳路径能耗对其网络能量消耗的影响, 得到节点度最优取值规律, 通过最优节点度控制节点度上限值的选取, 基于无标度理论构建了一种 WSN 的节能容错算法。动态性能分析该算法生成的拓扑服从幂律分布, 具有无标度特性。仿真结果表明, 面对网络中节点随机失效, 呈现出强容错性。在节能方面, 验证得出算法 EETA 构成的网络拓扑结构平均能量消耗低于 EBEM 算法和 EAEM 算法所构成的拓扑, 并且随着网络节点数的增加, EETA 通信低能耗的优势越明显, 节能性也更为突出。今后研究的重点是针对无线传感器网络蓄意攻击行为, 构建容错能力强的网络拓扑结构, 延长网络生命期。

参考文献:

- [1] CHEN X, KIM Y A, WANG B, *et al.* Fault-tolerant monitor placement for out-of-band wireless sensor network monitoring[J]. *Ad Hoc Networks*, 2012, 10(1):62-74.
- [2] WANG L M, GUO Y B, ZHAN Y Z. Security topology control method for wireless sensor networks with node-failure tolerance based on self-regeneration[J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010.1-11.
- [3] BARIA A, JAEKEL A, JIANG J, *et al.* Design of fault tolerant wireless sensor networks satisfying survivability and lifetime requirement [J]. *Computer Communications*, 2012, 35(3): 320-333.
- [4] GUI J S, LIU A F. A new distributed topology control algorithm based on optimization of delay and energy in wireless networks[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2012, 72(8):1032-1044.
- [5] BARABASI A, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(15): 509-512.
- [6] 陈力军, 刘明, 陈道蓄等. 基于随机行走的无线传感器网络簇间拓扑演化[J]. *计算机学报*, 2009, 32(1): 69-76.
CHEN L J, LIU M, CHEN D X, *et al.* Topology evolution of wireless sensor networks among cluster heads by random walkers[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2009, 32(1):69-76.

- [7] ZHENG G Z, LIU S Y, QI X G. Scale-free topology evolution for wireless sensor networks with reconstruction mechanism[J]. *Computer & Electrical Engineering*, 2012, 38(3):643-651.
- [8] ZHU H L, LUO H, PENG H P, *et al.* Complex networks-based energy-efficient evolution model for wireless sensor networks[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2009, 41(4): 1828-1835.
- [9] LI S D, LI L X, YANG Y X. A local-world heterogeneous model of wireless sensor networks with node and link diversity[J]. *Physica A*, 2011, 390(6):1182-1191.
- [10] WENDI R H, ANANTH C, HARI B. Energy-efficient communication protocols for microsensor networks[A]. *Proceeding of 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*[C]. Washington, 2000.8020-8029.
- [11] HOU T C, LI V. Transmission range control in multihop packet radio networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1986, 34(1):38-44.
- [12] KLENROCK L, SILVESTER J. Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number[A]. *Proceedings of IEEE Nat Telecommun Conference*[C]. Birmingham Ala, 1978. 431-435.
- [13] GINESTRA B, ALBERT B. Bose-einstein condensation in complex networks[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(24):5632-5635.
- [14] LI C, LIU S F, FANG Z G, *et al.* Emergence of structural properties in economic networks: a multi-local-world evolving model[J]. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2012, 21(1):91-102.
- [15] ALBERT R, JEONG H, BARABASI A L. Error and attack tolerance of complex network[J]. *Nature*, 2000, 406(6794):378-382.

作者简介:



刘浩然 (1980-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 燕山大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络拓扑控制、工业故障检测等。



韩涛 (1989-), 男, 河北邢台人, 燕山大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络容错拓扑建模及特性分析。

李雅倩 (1982-), 女, 湖南岳阳人, 博士, 燕山大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络特性分析等。

尹荣荣 (1985-), 女, 甘肃白银人, 燕山大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络拓扑容错性分析、控制。