

无线传感器网络拓扑的容错度与容侵度

王良民, 马建峰, 王 超

(西安电子科技大学计算机网络与信息安全教育部重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 研究传感器网络拓扑对节点失败的容忍能力, 必须解决三个基本问题, 容忍节点失败的定义是什么, 如何评价拓扑的这种容忍能力, 什么样的拓扑具有较高的容忍能力. 当前有关无线网络容错拓扑的研究均将图的多连通性看成拓扑的容错性, 以图形多连通度的大小来衡量拓扑容错性的高低. 本文通过实例分析指出图的多连通性与容错性是不同的, 并结合网络的可用性, 给出拓扑对失败节点容忍的定义, 在此基础上, 根据随机故障和恶意入侵两类节点失败形成原因, 给出了拓扑容错度和容侵度作为拓扑对节点失败容忍能力高低的评价标准, 并利用这两个标准分析了传感器网络分层拓扑, 得出其拓扑容错度随簇头节点比例提高递减、而容侵度随之递增的理论结果.

关键词: 无线传感器网络; 容错; 容侵; 连通图; 伯努利节点

中图分类号: TP393.02 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2006)08-1446-06

Degree of Fault-Tolerance and Intrusion-Tolerance for Topologies of Wireless Sensor Networks

WANG Liang-min, MA Jian-feng, WANG Chao

(Key Laboratory of Computer Network and Information Security of Education Ministry, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract To develop new topology with more powerful ability to tolerate node-failure in wireless sensor network, the existing research regards fault-tolerance topology as the multiply connected graph, and use the connectivity of the graph as standard to evaluate the tolerance ability. In this paper, we argue that fault tolerance of topologies is not equivalent to connectivity of the multiply connected graph by illustrating some practical examples and point out the following three questions should be answered. First, what is node-failure tolerance of topology? Second, how to evaluate this tolerance ability? Third, which type of topologies is more tolerant in node-failure? Then we define the concepts of node-failure tolerance and the degree of fault-tolerance and intrusion-tolerance. Then these concepts are used to evaluate the tolerance performance of hierarchy structure of wireless sensor network, and the conclusion is achieved that intrusion tolerance degree is increasing with the ratio of cluster head increasing in hierarchy structure, but fault-tolerance degree decreasing.

Key words wireless sensor network; fault tolerance; intrusion tolerance; connected graph; Bernoulli node

1 引言

布置在恶意环境中的传感器网络, 常会因为电力耗尽、硬件故障或者遭遇入侵等形成节点失败. 失败节点会使得原本连通的网络拓扑分割, 从而大大降低网络的覆盖度, 甚至导致网络失败 (Network failure), 即整个网络无法正常工作. 考虑到在 k -连通图中, $k-1$ 个节点的失败, 不会改变图的连通性, 近期出现了一些关于容错拓扑的研

究^[1-5], 通过功率控制生成能量最小的 k -连通的无线传感器网络拓扑, 来容忍 $k-1$ 个节点的失败. 这些工作把容错拓扑控制问题等价于寻找多连通图, 并把所找到的图的连通度当成衡量拓扑容错能力高低的标准. 然而, 此类拓扑控制算法存在三个方面的问题, 一、寻找这种多连通图是困难的, 即使是在平面图中, 求能量最优的多连通图问题都被证明为 NP 难的^[6]. 已有寻找 k -点连通^[1-4], k -边连通^[5] 的功率控制算法都是近似算法; 二、获得多连通图的算法

收稿日期: 2005-10-18 修回日期: 2006-02-06

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划 (No. 9020401); 国家自然科学基金面上项目 (No. 60573035, 60573036, 6050301); 教育部优秀青年教师资助计划

必然形成过于密集的网络,导致整个网络的能耗成倍数增长^[7],同时节点间的通信干扰大大增加;三、由于上述两个问题的存在,使得此类算法所能提供的 k 连通图的 k 值非常小,通常介于 2 到 5 之间,仅能容忍少量 (1~4 个) 失败节点,这对大规模网络中常出现多个故障节点的情形是不够的,对于恶意的攻击形成的大量的有选择的入侵节点,这种 k 值非常小的 k 连通图更是无能为力。

早期也有一些研究有线网络拓扑容忍性的文献,其中最有影响的是文献 [8]。该文探讨了指数网络和自由度网络这两类有线拓扑对失败节点的容忍能力,直观地以删除失败节点后网络中的可用连接数来衡量网络的错误容忍和攻击容忍能力,得出了关于连接方式与拓扑容错、容侵性能的关系,认为网络有线连接集中在少数节点上的指数网络的拓扑容错性高而容侵性低;而各节点连接趋近于相等的自由网络容错性低而容侵性高。

综上所述,关于网络拓扑对失败节点“容忍”的概念没有统一的、确切的定义,因而也没有“容忍”能力高低的评价标准,从而无法知道哪一类拓扑具有较高的容忍能力,这些都是容忍节点失败的拓扑研究中必须解决的根本性问题。为此,本文旨在回答以下三个基本问题:一、传感器网络拓扑容忍节点失败的定义是什么;二、如何评价这种容忍能力的高低;三、什么样的传感器网络拓扑具有较高的容忍能力。

2 容错度与容侵度

本节首先给出了无线网络拓扑的图形模型及相关基本概念;然后结合图形实例,阐述了拓扑对节点失败的容忍能力不同于网络图形的多连通度,并给出了拓扑对容忍 k 节点失败的定义;最后用统一的伯努利节点网络模型描述了传感网络平面结构和层次结构两种拓扑,在此模型下区分了故障和入侵两种节点失败类型,并定义了容错度和容侵度。

2.1 网络模型与基本概念

图 $G = (V, E)$ 表示传感器网络拓扑,其中 V 是节点集, E 代表节点间的无线连接, $|V|$ 表示集合 V 节点数目。本文认为节点间通信是双向的,图中的边都是无向边。如果一个子图 $G' = (V', E')$, $V' \subseteq V$, V' 中且任意两个节点间都有一条路,则称 G' 为 G 的连通子图。如果图 $G = (V, E)$ 由 l 个连通子图构成,记为 $G_1 = (V_1, E_1), G_2 = (V_2, E_2), \dots, G_l = (V_l, E_l)$, 则 G_1, G_2, \dots, G_l 称为图 G 的 l 个连通分支。若 $V' \in \{V_1, V_2, \dots, V_l\}$ 且

$$|V'| = \max\{|V_1|, |V_2|, \dots, |V_l|\} \quad (1)$$

则称 $G' = (V', E')$ 为图 G 的最大连通分支,记

$$C = \frac{|V'|}{|V|} \quad (2)$$

表示 G' 对 G 的覆盖率。在本文中,我们参照文献 [8] 对可用连接的统计方法,认为分割后的传感器网络中仅最大连

通分支是可用的,因此用最大连通分支的覆盖率来度量拓扑的可用性。

2.2 节点失败容忍

现有关于无线网络容错拓扑的研究都集中在如何通过功率控制获得能量最优的多连通图,然而我们认为,拓扑的容错性不能等同于对应图形的多连通性,以下我们将通过栅格结构中的两个例子来阐述不同情况下网络连通度与容错能力的区别。

考虑栅格图 G , 每个栅格上布置一个传感器节点,记节点总数为 $|V| = n$, 通信半径为 r , 栅格的边长为 a , 满足:

$$r\sqrt{2} \leq a \leq r \quad (3)$$

在图 1(a) 所示的栅格结构中,若两个黑色节点被删除,灰色节点成为孤立节点,图形被分割为两个连通分支,因而图的最大点连通度为 2。如果将网络的连通度等价于故障容忍能力的话,则认为该栅格图不能容忍 2 个节点的故障。事实上,对于大规模的栅格结构来说,图 1(a) 中仅 3 个节点不可用,这对网络覆盖率的影响与图 1(b) 相同,对足够大的 n 来说,该影响是微乎其微的 (当 $n \rightarrow \infty$ 时, $3/n \rightarrow 0$)。由此,可以认为图 1(a)、1(b) 中的栅格结构能容忍 3 个节点的失败,而该图的最大点连通度为 2。可见图的点连通度与拓扑能容忍的失败节点数目是不同的。

在图 1(a)、1(c) 中,同是有 n 个节点组成的 2 连通图,删除其中两个失败节点,网络分割为两个部分,但对网络覆盖率的影响是不同的。图 1(a) 中两个节点故障,虽然产生了不连通的网络,但是仅造成了 3 个节点不可用;而在图 1(c) 中两个失败节点,却造成了一半节点的不可用。也就是说,同样是 2 连通的拓扑,删除其中两个节点,对整个网络的覆盖率和可用性的影响是不同的。

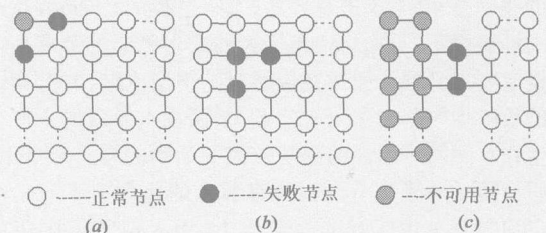


图 1 节点故障对网络连通性与可用性的影响:
(a) 两个失败节点, 导致一个节点不可用;
(b) 三个失败节点, 网络依然连通;
(c) 两个失败节点产生了网络分割, 使得一半节点不可用;

由以上分析可知,容错拓扑不能等价于多连通图,用图的点连通度来衡量拓扑的容错能力也是不合理的。研究传感器网络拓扑对节点失败的容忍能力,应该考虑失败节点数目对网络覆盖率影响,以及由此引起的网络可用性的变化。

定义 1 在图 $G = (V, E)$ 中,其节点数目 $|V| = n$, 删除 $k(n)$ 个节点, 剩余子图由 r 个连通分支组成, $G_1 = (V_1, E_1), G_2 = (V_2, E_2), \dots, G_r = (V_r, E_r), 1 \leq r \leq k(n) + 1$, 则可用节点数目为 $A_k(n) = \max\{|V_1|, |V_2|, \dots, |V_r|\}$, 若其覆

盖率 $C_k(n)$ 满足公式 (4):

$$\lim_{n \rightarrow \infty} C_k(n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{A_k(n)}{n} = 1 \quad (4)$$

则称图 $G = (V, E)$ 可容忍该 $k(n)$ 个节点的失败。

定义 1 是针对一类结构的拓扑性质而言, 可用来讨论某类结构能容忍的失败节点个数与总节点个数的函数关系。此定义表明, 对于某种结构的拓扑图 G , 当节点个数 n 足够大时, $k(n)$ 个失败节点对其可用性的影响可以忽略不计, 则认为这种拓扑结构能容忍 $k(n)$ 个节点的失败。

2.3 容错度与容侵度

传感器网络拓扑可分为两类, 一类是平面结构, 平面结构中所有节点都是对等的, 通常由功率控制算法^[9]产生。另一类是层次结构, 层次结构是通过分簇算法获取, 分簇算法在执行过程中, 通过一定的策略, 选举出部分节点作为活动节点, 称为簇头, 组成骨干网负责数据转发, 而其他节点称为普通节点, 根据自身情况, 加入不同的簇, 只负责信息的采集, 不负责消息的转发。如 LEACH^[10]、HEED^[11]、CEC^[12]等。本文采用在单位面积内均匀分布 n 个伯努利节点的网络模型来表示传感器网络结构, 所谓伯努利节点^[7], 就是在传统的网络模型中, 所有节点都在某个概率 p ($0 < p \leq 1$) 下独立活动。当 p 取值为簇头在所有节点中的比例时, 伯努利节点模型可以表示层次结构; 当 $p = 1$ 时, 所有的节点都是簇头, 可以表示平面结构。

事实上, 传感器网络中存在两种不同的节点失败 (Node failure) 类型, 一类是由错误 (Error) 导致的故障 (Fault), 另一类是由攻击 (Attack) 导致的入侵 (Intrusion)。在传感器网络中, 错误是随机发生, 图中每个节点发生故障的概率是相同; 攻击是恶意的、有选择的, 不同节点遭受攻击的概率不同, 网络中作用大的或者脆弱的节点被入侵的概率要大。因此, 假设在传感器网络层次结构中, 错误导致的故障均匀分布在所有节点上, 而攻击导致的入侵全部发生在对网络可用性的影响较大的活动的簇头节点上。本文假设活动的簇头节点占所有节点的比例为 $p(n)$, 故障节点均匀分布在所有 n 个节点上, 而入侵节点则集中在 $n \cdot p(n)$ 个簇头上。

记失败节点的个数为 $k(n)$, 则该 $k(n)$ 个失败节点可能是簇头节点, 也可能是普通节点, 可表示为:

$$k(n) = k_1(n) + k_2(n) \quad (5)$$

其中, $k_1(n)$ 表示失败的簇头节点数目, $k_2(n)$ 表示失败的普通节点数目。

记失败的簇头节点占失败节点总数的比例为 $p_1(n)$, 即:

$$p_1(n) = \frac{k_1(n)}{k(n)} \quad (6)$$

当失败由错误导致时, 所有节点产生故障的概率是相同的, 故 $p_1(n) = p(n)$; 当节点失败由攻击导致时, 入侵节点集中在活动的簇头节点上, 故 $p_1(n) = 1$ 。由此, 在定义 1 的基础上, 可区分容错和容侵。

定义 2 在伯努利节点网络模型 $G = (V, E)$ 中, 其节点数目 $|V| = n$, 活动节点的概率为 $p(n)$, 任意选择 $k(n)$ 个节点, 其中活动节点所占的比例为 $p_1(n)$, $p_1(n)$ 由公式 (5)、(6) 所确定。若图 $G = (V, E)$ 可容忍该 $k(n)$ 个节点的失败, 则当 $p_1(n) = p(n)$ 时, 称图 $G = (V, E)$ 是 $k(n)$ 容错的, 当 $p_1(n) = 1$ 时, 称图 $G = (V, E)$ 的 $k(n)$ 容侵的。

定义 3 若图 $G = (V, E)$ 是 $k(n)$ 容错的, 且存在 $m(n)$, 满足 $m(n) = \Omega(k(n))$, 使得删除这 $m(n)$ 个节点后, 所得覆盖率 $C_m(n)$ 满足公式 (7):

$$\lim_{n \rightarrow \infty} C_m(n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{A_m(n)}{n} \neq 1 \quad (7)$$

则图 $G = (V, E)$ 的容错度为 $\theta(k(n))$, 记为 $FTD = \theta(k(n))$ 。

定义 4 若图 $G = (V, E)$ 是 $k(n)$ 容侵的, 且存在 $m(n)$, 满足 $m(n) = \Omega(k(n))$, 使得删除这 $m(n)$ 个节点后, 所得覆盖率 $C_m(n)$ 满足公式 (7), 则称图 $G = (V, E)$ 的容侵度为 $\theta(k(n))$, 记为 $ITD = \theta(k(n))$ 。

定义 3 和定义 4 中, 符号 Ω 和 θ 的由公式 (8) 和 (9) 给出。

$$\begin{aligned} f(n) = \theta(g(n)) &\Leftrightarrow \text{存在常数 } c_1, c_2 \text{ 和 } n_0, \text{ 使得 } n > n_0 \text{ 时,} \\ &c_1 g(n) \leq f(n) \leq c_2 g(n) \quad (8) \\ f(n) = \Omega(g(n)) &\Leftrightarrow \text{存在常数 } c \text{ 和 } n_0, \text{ 使得 } n > n_0 \text{ 时,} \\ &f(n) \geq c g(n) \quad (9) \end{aligned}$$

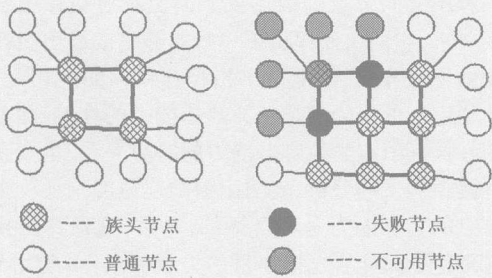
定义 2 给出了拓扑可容忍 $k(n)$ 个故障或者入侵节点, 定义 3 和定义 4 则通过拓扑所能容忍的故障或者入侵节点的最大个数, 给出基于伯努利节点网络模型的容错度与容侵度的定义。

3 伯努利节点网络模型的容错度与容侵度

本节讨论基于伯努利节点的无线传感器网络模型的容错与容侵能力, 研究簇头节点的选取概率 $p(n)$ 与拓扑容错度与容侵度的关系。考察 n 个节点的传感器网络层次结构, 各个节点当选为簇头的概率为 $p(n)$, 则簇头节点数目为 $n \cdot p(n)$, 簇头组成数据转发的骨干网, 其他节点根据自身情况加入不同的簇, 成为某个活动节点的一跳邻居, 如图 2(a) 所示, 此时与簇头节点直接相邻的普通节点数的平均值为 $(1/p(n) - 1)$ 。

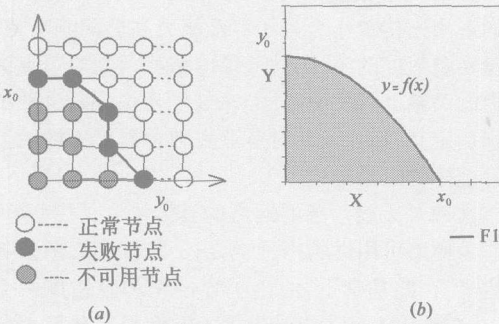
失败的节点是簇头还是普通节点对网络可用性的影响是不同的。普通节点发生故障, 除自身不可用外, 不会对整个网络拓扑产生其他影响; 而簇头节点失败时, 可能产生两个方面的影响, 一方面是失败簇头及簇内的所有普通节点都不可用, 另一方面由此被隔离的簇头节点及其所在簇都不可用, 如图 2(b) 所示。

由公式 (4), 骨干网中有 $k_1(n)$ 个失败节点, 设 $k_1(n)$ 个节点最多能导致 $F_f(n)$ 个簇头不可用。此时, 如图 3(a) 所示, $k_1(n)$ 个黑色失败节点必须形成一条连续的曲线, 将网络隔离为断裂的两部分, 使得灰色节点不可用, 才能影响整个拓扑。 $k_1(n)$ 个失败节点最多能导致多少节点不可



(a) 基于簇的层次结构; (b) 簇头节点失败所产生的影响

图 2 簇结构



(a)

(b)

图 3 删除节点与网络分裂图

用的问题,可以转化为图 3(b)的数学问题,函数 $f(x)$ 在第一象限内曲线的长度为 $k_1(n)$,使得该曲线所分割出的面积 $F_f(n)$ 最大.即在约束条件 (11) 下,式 (10) 取得最大值.

$$F_f(n) = \int_{x=0}^{x_0} f(x) dx \quad (10)$$

$$k_1(n) = \oint ds \quad (11)$$

求得:
$$F_f(n) = \frac{k_1^2(n)}{\pi} \quad (12)$$

则剩余可用节点数目为:

$$A_k(n) = n - \left[\left(F_f(n) \cdot \left(\frac{1}{p_1(n)} - 1 \right) \right) + k_2(n) \right] \quad (13)$$

要使拓扑能容忍 $k(n)$ 节点失败,须式(6)成立,有:

$$k(n) = \begin{cases} c_2 \cdot n^{1-\varepsilon_1}, & p_1(n) = 0 \\ \min\left(c_1 \cdot \frac{p^{1/2}(n)}{p_1(n)} \cdot n^{1/2-\varepsilon_1}, c_2 \cdot \frac{1}{1-p_1(n)} \cdot n^{1-\varepsilon_1}\right), & p_1(n) \in (0, 1) \\ c_1 \cdot p^{1/2}(n) \cdot n^{1/2-\varepsilon_1}, & p_1(n) = 1 \end{cases} \quad (14)$$

其中 $p_1(n)$ 由式(5)给出, c, ε_1 和 ε_2 是常数,且 $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \in (0, \frac{1}{2}]$.

至此,可得定理 1.

定理 1 对 n 个伯努利节点的无线传感器网络层次模型中,如果簇头节点比例为 $p(n)$,簇头节点失败的概率为 $p_1(n)$,则该拓扑可容忍失败节点个数为 $\theta(k(n))$,其中

$k(n)$ 由公式 (14) 给出.

4 分析与讨论

本节根据定理 1 分析不同取值的簇头节点比例 $p(n)$ 对层次结构的容错度与容侵度的影响,藉此获取可用于指导拓扑设计的传感器网络拓扑容错与容侵性能与具体结构的映射关系,并阐述了本文与相关工作之间的区别与联系.

4.1 传感器网络层次结构容忍能力分析

首先考虑平面结构,此时 $p(n) = 1$,所有节点都是簇头,显然有 $p_1(n) = 1$.根据定理 1 由于 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 取值可无穷小,推论 1 给出了平面结构的容错度与容侵度.

推论 1 n 个节点组成的均匀分布的平面网络模型,其容错度和容侵度相等,满足:

$$IPD = FTD = \theta(n^{1/2-\varepsilon}) \quad (15)$$

其中 ε 是常数,且 $\varepsilon \in \left[0, \frac{1}{2}\right]$.

平面结构的容错度与容侵度相等,如图 4 表示平面结构容错度和容侵度黑色实线融合在一起.

考虑当簇头节点数目固定为 m (m 为常数, $m < n$) 时层次结构的容错度与容侵度,可得推论 2 如图 4(b) 所示,此时容错度远远高于平面结构,而容侵度远远低于平面结构.

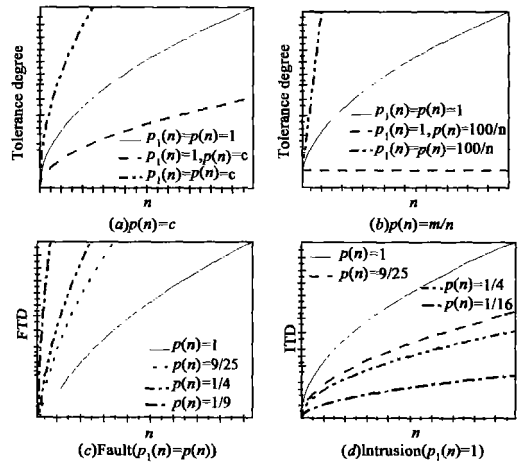


图 4 (a) $p(n) = c$ 时, $p_1(n) = c$ 和 $p_1(n) = 1$ 时拓扑结构所对应的故障容忍度; (b) 簇头节点数目固定为 100 时,拓扑结构所对应的容错度和容侵度; (c) $p_1(n) = p(n)$ 时,即故障由错误导致时,不同 $p(n)$ 所对应的容错度; (d) $p_1(n) = p(n)$ 时,即故障由入侵导致时,不同 $p(n)$ 所对应的容侵度

推论 2 对 n 个伯努利节点的网络模型,如果节点概率为 $p(n)$,当 $p(n) = m/n$ (m 为常数, $m < n$) 即不论节点个数如何变化,簇头的个数固定为 m ,此时,拓扑的容错度和容侵度为:

$$FTD = \theta(m^{-1} \cdot n^{1-\varepsilon}) \quad (16)$$

$$IPD = \theta(m^{1/2-\varepsilon}) \quad (17)$$

式 (16) 和 (17) 中的 $\varepsilon \in \left[0, \frac{1}{2}\right]$, 是无穷小量.

考虑当簇头节点占全部节点的比例为常数时,即 $p(n)$

$= c$ (c 为常数, 且 $0 < c < 1$) 时层次结构的容错度与容侵度, 可得推论 3

推论 3 对 n 个伯努利节点的网络模型, 如果节点概率为 $p(n)$, 当 $p(n) = c$ (c 为常数, 且 $0 < c < 1$) 时, 该拓扑的容错度 FTD 为:

$$FTD = \theta(c^{-1/2} \cdot n^{1/2-\varepsilon}) \quad (18)$$

其容侵度 IID 为:

$$IID = \theta(c \cdot n)^{1/2-\varepsilon} \quad (19)$$

式 (18) 和 (19) 中的 $\varepsilon \in \left[0, \frac{1}{2}\right]$, 是无穷小量.

由推论 3 可得

$$FTD'(c) = \theta\left(-\frac{1}{2}c^{-3/2} \cdot n^{1/2-\varepsilon}\right) < 0 \quad (20)$$

即拓扑容错度 FTD (c) 随簇头选取比例 c 的增大而单调递减, 如图 4(c) 所示, c 值较小时对应的曲线位于最上层, 也就是说, 要使得拓扑具有较好的容错度, 需要减少簇头节点在总节点中的比例.

由式 (19):

$$IID'(c) = \theta(c^{-1/2+\varepsilon}) > 0 \quad (21)$$

可知拓扑容侵度 IID (c) 和 c 呈单调递增关系, 如图 4(d) 所示, c 值较大时对应的曲线位于最上层, 也就是说, 要使得拓扑具有较好的容侵度, 需要提高簇头节点在总节点中的比例. 为此, 可得推论 4

推论 4 传感器网络层次结构中, 拓扑容错度随着簇头占总节点数目比例的提高而递减, 拓扑容侵度随着簇头占总节点数目比例的提高而递增.

4.2 相关工作比较

文献 [1~5] 旨在通过理论推导提出无线网中能生成最小能耗的 k 连通图的拓扑控制算法, 未能区分错误与入侵这两种不同的节点失败形成原因及其对拓扑容忍性能

的不同要求, 它们仅仅提供了一些能够生成最小能耗的 k -连通图的近似算法, 未能给出拓扑容错性的确切定义, 把图的连通度高低作为衡量拓扑容错能力的标准, 却也未给出拓扑及其节点失败容忍能力的对应关系. 本文在第二节通过两个例子的分析, 表明用图的连通度来评价拓扑对失败节点的容忍能力是不合适的, 并且, 这种算法找到的拓扑在理论上只能容忍极少量的失败节点, 而且大大增加了节点的能耗和通信干扰.

文献 [8] 旨在研究有线复杂网络中, 不同的连接方式对拓扑容错性和容侵性的影响, 它以删除节点后, 网络中剩余的可用连接数作为拓扑容忍能力高低的判断依据, 通过大量实验数据的统计分析, 得出拓扑及其对节点失败容忍能力的关系, 但是, 文献 [8] 未能给出拓扑对失败节点容忍的确切定义, 拓扑及其对节点失败容忍能力的关系也是对统计规律的定性描述.

本文针对无线传感器网络的具体情形, 以剩余可用节点数作为网络可用性的指标, 给出了拓扑容忍节点失败的确切定义, 在此基础上, 给出了容侵度和容错度两个度量指标, 并在推论 1 2 3 中给出了不同情形下传感器网络层次结构与其对应的容错度和容侵度之间的函数关系. 文献 [8] 的结论认为节点连接数趋向于均匀的具有较好的容侵性, 但容错性较差; 连接越是集中在少数节点上的网络结构具有较高的容错但容侵性较低. 由该结论可知, 在簇结构中, 簇头的比例越低, 则簇头的一跳邻居数越多, 大量的连接都集中在少量的簇头上, 从而容错度就越高而容侵度越低, 这与本文推论 4 的结论相吻合, 从一个侧面说明了本文定义与定理的有效性. 表 1 给出了这些工作与已有工作的异同点.

表 1 相关工作比较

相关工作	讨论网络	研究方法	容错与容侵	定义	判断依据	拓扑与容忍能力的关系
容错拓扑 [1-3]	无线网	理论推导	未区分	未给	图的连通度	没有
容错拓扑 [4-5]	WSN	理论推导	未区分	未给	图的连通度	没有
文献 [8]	有线网络	统计	区分	未给	剩余可用连接数	定性描述
本文工作	WSN	理论推导	区分	给出	剩余可用节点数	函数关系

5 结论

分析并指出了拓扑对失败节点的容忍能力不能等同于图的连通性, 结合删除失败节点后剩余网络中可用节点占总节点的比例关系给出了容忍节点失败的定义; 在表示传感器网络层次结构的伯努利节点模型中, 定义了容错度和容侵度来评价拓扑对节点失败的容忍能力, 研究了传感器网络层次结构的容错与容侵能力, 得出了簇头节点比例对层次结构中网络容错度和容侵度影响的函数关系, 在特定的容错或者容侵需求下, 该函数关系可用于指导拓扑的设计, 帮助解决的拓扑控制中的一些具体问题, 如发射半

径有限的情况下, 固定面积上最少布置多少节点可以保证这样的容错; 以及单位面积上布置了一定数量的节点, 如何进行功率控制获得满足容忍需求的拓扑结构. 这正是我们下一步的研究内容.

参考文献:

- [1] Xiaohua Jia, Dongsoo Kim, Sam Makkij et al. Power assignment for k -connectivity in wireless AdHoc networks[J]. J Comb Optim, 2005 9(2): 213-222
- [2] Ning Li, Jennifer C Hou. FLSS: a fault-tolerant topology control algorithm for wireless networks[A]. Proceedings

- of The 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 04) [C]. Philadelphia, PA, USA: ACM press, 2004. 275-286
- [3] Xiang-yang Li, Peng-jun Wan, Yu Wang, et al. Fault tolerant deployment and topology control in wireless networks [A]. Proc 4th ACM Intl Symp on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBHOC03) [C]. Annapolis MD, USA: ACM press, 2003. 275-286
- [4] Yong Chen, Sang H. Son. A fault tolerant topology control in wireless sensor networks [A]. ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications [C]. Cairo, Egypt: IEEE Computer Society, 2005. 246-253
- [5] Hwajung Lee. SEEMLESS: distributed algorithm for topology control of survivable energy efficient multihop wireless sensor networks using adjustable transmission power [A]. Proc 6th International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD 2005) [C]. Towson, Maryland, USA: IEEE Computer Society, 2005. 268-273
- [6] G. Calinescu, P.-J. Wan, et al. High connectivity with minimum total power in wireless Ad Hoc networks [A]. 3th International Conference on AD-HOC Networks & Wireless [C]. Cancun, Mexico, 2003. 117-123
- [7] Peng-jun Wan, Chh-wei Yi. Asymptotic critical transmission range for connectivity in wireless Ad Hoc networks with Bernoulli nodes [A]. Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBHOC 2004) [C]. Tokyo, Japan: ACM press, 2004. 1-8
- [8] Reka Albert, Hwajung Jeong, Albert-László Barabási. Error and attack tolerance of complex networks [J]. Nature, 2000, 406(27): 378-382
- [9] Paolo Santi. Topology control in wireless Ad Hoc and sensor networks [J]. ACM Comp Surveys, 2005, 37(2): 164-194
- [10] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan. An application-specific protocol architecture for wireless micro-sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670
- [11] Ossana Younis, Sonia Fahmy. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for Ad Hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379
- [12] Ya Xu, Solomon Bieñ, Yutaka Mori, et al. Topology Control Protocols to Conserve Energy in Wireless Ad Hoc Networks [R]. Center for Embedded Networked Computing Technical Report 0006, University of California, 2003

作者简介:



王良民 男, 1977年生于安徽潜山, 现为西安电子科技大学密码学专业博士生, 已发表录用论文 12篇, 其中 SCI/EI检索 6篇. 当前主要研究方向为容忍入侵、安全协议.

E-mail: liangminwang@hotmail.com



马建峰 男, 1963年生于陕西临潼, 教授、博士生导师, 现为西安电子科技大学计算机学院院长、计算机网络与信息安全教育部重点实验室主任, 当前主要研究方向为系统可生存性、密码学.

王超 男, 1976年生于安徽合肥, 现为西安电子科技大学计算机应用技术专业博士生, 当前主要研究方向为系统可生存系统构建及可生存性定量评估.