

# 计算机应用研究 优先出版

原创性 时效性 就是科研成果的生命力  
《计算机应用研究》编辑部致力于高效的编排  
为的就是将您的成果以最快的速度  
呈现于世

\* 数字优先出版可将您的文章提前 8~10 个月发布于中国知网和万方数据等在线平台

## 无线传感器网络的生存性评估

作者	李化邓, 李雷, 施化吉, 周从华, 王润宇
机构	江苏大学 计算机科学与通信工程学院; 无锡恒创医信科技发展有限公司
发表期刊	《计算机应用研究》
预排期卷	2018 年第 35 卷第 8 期
访问地址	<a href="http://www.arocmag.com/article/02-2018-08-055.html">http://www.arocmag.com/article/02-2018-08-055.html</a>
发布日期	2017-07-21 11:45:36
引用格式	李化邓, 李雷, 施化吉, 周从华, 王润宇. 无线传感器网络的生存性评估[J/OL]. [2017-07-21]. <a href="http://www.arocmag.com/article/02-2018-08-055.html">http://www.arocmag.com/article/02-2018-08-055.html</a> .
摘要	当前无线传感器网络的生存性评估模型均假设网络的节点分布符合某种规律且在长期的运行中规律保持不变, 但该种模型未考虑节点的移动性。针对以上问题进行了研究, 通过引入节点的移动速率建立连续时间马尔可夫链表示的评估模型。该模型不依赖于网络的拓扑, 能准确反映出节点的实际分布情况; 其次研究不同攻击和故障对节点隔离的影响; 稳态连通概率是刻画可生存性最为重要的指标, 最后提出该指标的计算方法。仿真实验结果表明, 提出的生存性评估模型能够对无线传感器网络的生存性进行有效的评估。
关键词	无线传感器网络, 生存性, 节点隔离, 连续时间马尔可夫链, 连通概率, 生存性评估
中图分类号	TP393.07
基金项目	江苏省六大人才高峰项目 (2014-wlw-012); 国家自然科学基金资助项目 (61300288); 无锡市科技型中小企业创新基金资助项目 (WX0301-B010508-160104-PB); 江苏省重点研发计划 (社会发展) 项目 (BE2015617); 无锡市卫计委重点项目 (Z201603)

# 无线传感器网络的生存性评估<sup>\*</sup>

李化邓<sup>1</sup>, 李雷<sup>1</sup>, 施化吉<sup>1</sup>, 周从华<sup>1</sup>, 王润宇<sup>2</sup>

(1. 江苏大学 计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 无锡恒创医信科技发展有限公司, 江苏无锡 214000)

**摘要:** 当前无线传感器网络的生存性评估模型均假设网络的节点分布符合某种规律且在长期的运行中规律保持不变, 但该种模型未考虑节点的移动性。针对以上问题进行了研究, 通过引入节点的移动速率建立连续时间马尔可夫链表示的评估模型。该模型不依赖于网络的拓扑, 能准确反映出节点的实际分布情况; 其次研究不同攻击和故障对节点隔离的影响; 稳态连通概率是刻画可生存性最为重要的指标, 最后提出该指标的计算方法。仿真实验结果表明, 提出的生存性评估模型能够对无线传感器网络的生存性进行有效的评估。

**关键词:** 无线传感器网络; 生存性; 节点隔离; 连续时间马尔可夫链; 连通概率; 生存性评估

**中图分类号:** TP393.07

## Survivability evaluation in wireless sensor networks

Li Huadeng<sup>1</sup>, Li Lei<sup>1</sup>, Shi Huaji<sup>1</sup>, Zhou Conghua<sup>1</sup>, Wang Runyu<sup>2</sup>

(1. Computer Science & Telecommunication Engineering Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Wuxi Hengchuang Medical Information Science & Technology Co., Ltd, Wuxi 214000, China)

**Abstract** Currently, the survivability evaluation model of wireless sensor networks assumes that the distribution of nodes in the network conforms to some regularity and the regularity remains unchanged in the long run, but the model does not consider the mobility of nodes. Firstly, this paper established an evaluation model based on continuous-time Markov chain by introducing the moving rate of nodes. This model does not depend on the topology of the network and can accurately reflect the actual distribution of the nodes. Secondly, this paper studied the effects of different attacks and failures on node isolation. Steady-state connectivity probability is the most important index to describe survivability, so this paper proposed the calculation method of this index. The simulation results show that the survivability evaluation model proposed in this paper is effective for evaluating the survivability of wireless sensor networks.

**Key Words:** wireless sensor network; survivability; node isolation; continuous time Markov chain; connectivity probability; survivability evaluation

## 0 引言

无线传感器网络 WSNs (Wireless Sensor Networks)<sup>[1]</sup>是由大量微小的、自治的终端构成的, 这些终端设备称之为传感节点。这些传感器节点通常无人维护, 一般不回收, 从而决定了传感器节点是资源受限的无线通信设备。这种资源受限包括计算能力的受限和节点能量的受限等等。传感器节点由于长时间的使用导致节点能量耗尽, 节点移动以及节点之间的通信由于外界的干扰而导致的通信中断等等, 这些因素都会造成网络拓扑结构的变化。同时由于无线传感器网络易受攻击的特性, 给无线传感器网络的生存性带来了大量挑战, 值得进一步的研究。

如何有效量化评估 WSN 可生存性已备受业界关注, 无线传感器网生存性评估模型就是为方便分析 WSN 的生存能力而建立的一种数学模型, 是分析和评价 WSN 可生存性的主要途径, 亦为增强 WSN 可生存性提供重要依据<sup>[2]</sup>。

网络生存性是可靠性通信服务的一个重要的方面。在文献[3~7]中, 从不同的方面对网络的生存性进行了定义。这些网络生存性定义适用于传统的电信网络, 这些网络主要关心通信能力以及服务恢复能力。然而, 它们并没有利用数学的精确度进行定量的分析和理解无线传感器网络生存性的重要方面。与传统网络相比, 无线传感器网络更容易遭受恶意攻击和出现故障, 由于其受限的节点能量、容易出错的通信媒介和动态的网

**基金项目:** 江苏省六大人才高峰项目 (2014-wlw-012); 国家自然科学基金资助项目 (61300288); 无锡市科技型中小企业创新基金资助项目 (WX0301-B010508-160104-PB); 江苏省重点研发计划 (社会发展) 项目 (BE2015617); 无锡市卫计委重点项目 (Z201603)

**作者简介:** 李化邓 (1994-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为物联网安全 (1091475785@qq.com); 李雷 (1976-) 男, 河南南阳人, 讲师, 主要研究方向为数据挖掘; 施化吉 (1964-), 男, 浙江台州人, 教授, 主要研究方向为数据挖掘与信息检索、数据库应用技术、信息系统、电子商务; 周从华 (1978-), 男, 江苏盐城人, 教授, 主要研究方向为大数据分析技术、数据与系统安全等; 王润宇 (1992-), 男, 江苏无锡人, 本科, 主要研究方向为物联网。

络拓扑。因此对于可生存的无线传感网络来说,维持拓扑的连通性是十分重要的。基于这种观察,可以发现拓扑连通性是无线传感器网络生存性的一个重要指数。本文注意到很多研究以网络连通性为指标评估无线传感器网络的生存性。在这些研究中,一个重要的前提是节点的分布只考虑泊松分布和二项分布,这只是近似来描述节点的分布情况,从而导致最后的生存性评估出现较大的误差。这方便本文对网络生存性进行实时评估。为此,本文提出了一种基于连续时间马尔可夫链单节点行为转移模型以及一个节点分布模型。节点分布模型以节点的移动为状态转移条件建立的,该模型能够有效的描述节点的分布情况。然后把两种模型进行组合定量地评估 WSN 的生存能力。文章第二部分给出了背景及相关工作,第三部分介绍了建模的准备工作。第四部分具体描述了提出的生存性模型及其评估工作,第五部分对全文作出总结。

## 1 相关工作

生存性的研究不是毫无根据与基础的,生存性是在安全性的基础上提出的。安全性一般研究一个系统的容侵能力等,其侧重点在于系统未遭受破坏。而生存性则不同,生存性研究的是当一个系统遭受破坏后,能够继续提供某项服务的能力。其侧重点在于系统已经遭受到了破坏。所以说生存性是安全性的延续,安全性是生存性研究的基础。

可生存性一般定义为当前系统遭受攻击、故障时能够继续完成规定任务的能力。文献[8]提出了一种可生存系统的形式化定义,满足可生存规约四元组 $\{E, R, P, M\}$ 的系统即可认为是可生存的系统。对无线传感器网络而言,生存性也就是整个网络在面临节点失效、入侵的情况下能够持续不断工作的能力。国内不少学者进行了无线传感器网络生存性评估方面的研究。比如文献[9]提出一种基于半马尔可夫过程(SMP)的分簇 WSN 生存性评估模型,该模型在考虑应急通信中簇头生存状态的基础上建立了基于 SMP 的簇头生存状态转移图对采用 SRPC 协议和 RLEACH 协议的 WSN 生存能力进行了量化评估和比较分析。文献[10]利用 SMP 的内嵌 DTMC 解决无线传感器网络中的拓扑可用性、稳定性和服务率指标,提出了贝叶斯网络指标推理方法,提高了系统容侵能力评估的准确性。但是 SMP 评估模型指标计算复杂性太高,为降低计算复杂性,半马尔科夫过程中在某个状态处的逗留时间均采用平均时间,这种方法降低了计算稳态概率的复杂性,但是损失了计算结果的精度。文献[11]针对常见的基于簇的网络拓扑,选择了 DoS 攻击作为研究对象,考虑了簇在遭受 DoS 攻击时仍能继续提供服务的能力、并同时考虑了节点隔离度的问题,作者假定簇头节点的行为等同于簇内传感节点的行为,减少了生存性指标的计算量。文献[12]提出了一种基于能量场模型的无线传感器网络节点性能评估的方法。基于无线传感器网络中网络层的数据交换,该方法用能量场和图论分析节点属性和节点之间的相关性,显示了无线传感器网络中关键节点的影响结果。同时在国外也有不少学者对无线传感器网络的生存性做了大量的研究,Newport<sup>[13]</sup>以节点度和

链路连通度为指标对无线传感器网络进行了生存性评估。而 Moitra<sup>[14]</sup>用泊松过程来抽象节点的分布,进而进行了生存性评估。本文在上述研究的基础上依据节点的移动速率建立一个基于 CTMC 的节点的分布模型,结合单节点的状态转移模型。以网络的稳态  $k$  连通概率为指标进行了生存性的评估。通过数值分析和模拟仿真验证了该模型的可行性。

## 2 生存性评估模型

### 2.1 网络模型

在本文中,考虑的网络传感器节点随机分布,节点分为普通节点和重要节点。普通节点只负责感知数据和上传数据。重要节点即感知数据又充当路由。本文只关注这些重要节点发生故障或者遭遇攻击时对系统可生存性的影响。本文假设网络中有  $N$  个重要节点,这些节点是可以移动的。一个节点移入另一个节点通信范围的速率用  $MC$  表示,移出通信范围的速率用  $MG$  表示。以上这些符号会在后续的分析中使用。

### 2.2 单节点状态转移模型

#### 2.2.1 节点行为分类

本文中,假设无线传感器网络节点随机分布在一个二维或者三维空间上。在无线传感器网络中,每一个节点是一个自治系统。但是自治特性决定了每一个传感器节点会按照自己的方式执行其功能。在节点遭遇不同的故障和攻击后,其行为状态可以分为以下五种情况。

a)合作状态(C Cooperative State):在该状态下节点完全遵守路由发现规则和数据包转发规则,即能够正确地参与路由发现过程,并尽自己最大的努力转发控制包和数据包。

b)自私状态(S Selfish State):在该状态下,节点为了达到节省能量的目的,既不转发数据包,也不转发控制包。

c)水母状态(J Jellyfish State):在该状态下,节点积极参与路由发现过程,但是对于数据包却没有按照数据转发规则进行,比如丢弃一些数据包,延迟数据包的转发等。

d)黑洞状态(B Blackhole State):在该状态下,节点提供虚假的信息,表明自己有到目标节点的最短路径,从而提供错误的路由信息。

e)失效状态(F Failed State):节点不能对任何路由发现请求作出响应。

#### 2.2.2 状态转换

在无线传感器网络中节点的行为是自治的,随机的,因此不同的原因会导致节点行为可以在任何时候发生改变。例如,某个节点可能因为能量耗尽或者用户自主关闭接收器,从而导致节点变失效节点,或者节点由于受到攻击而成为黑洞节点。在本文中假设节点按照如下方式改变自己的行为:

a)能量耗尽,软件故障、硬件故障,错误配置等等可以将合作节点变为失效节点;通过改变配置,合作节点也可以变成自私节点,水母节点,黑洞节点。

b)通过合适的配置自私节点可变成合作节点。能量耗尽,软件故障、硬件故障等可将自私节点变为失效节点;攻击可将

自私节点变为水母节点和黑洞节点。

c)能量耗尽, 软件故障、硬件故障等可将水母节点变为失效节点;

d)能量耗尽, 软件故障、硬件故障等可将黑洞节点变为失效节点;

e)失效节点通过重新配置可变为协作节点。

### 2.2.3 基于 CTMC 的节点状态转移模型

基于上节描述的节点行为转移, 定义一个状态空间  $S=\{C,S,J,B,F\}$ 。把节点的行为转移描述为一个状态空间为  $S$  的随机过程。如果

$$P_r(Z_1 = x | Z_1(t_1) = x_1, \dots, Z_1(t_n) = x_n) = P_r(Z_1 = x | Z_1(t_1) = x_1) \quad (1)$$

其  $t_1 < t_2 < \dots, t_n < t, x_i \in S (i = 0, 1, 2, \dots)$  中。状态之间的转移时间服从参数为  $\{CS, CB, CF, CJ, SB, SC, SJ, SF, BF, FC, JF\}$  的指数分布, 其中  $\{CS, CB, CF, CJ, SB, SC, SJ, SF, BF, FC, JF\}$  表示状态之间的转移速率。那么这个随机过程构成了一个状态空间为  $S$  的连续时间马尔科夫链 (CTMC)。基于上述假设, 随机过程的状态转移图可以用图 1 来表示。

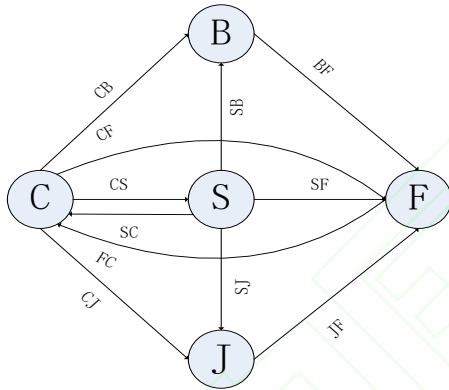


图 1 节点状态转移图

基于图 1 的状态转移, 可以获得稳态概率:

$$\text{稳态概率记为 } \Pi^c = (P_B, P_C, P_F, P_J, P_S) \quad (2)$$

对于 CTMC, 定义转移速率矩阵:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & BF & 0 & 0 \\ CB & 0 & CF & CJ & CS \\ 0 & FC & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & JF & 0 & 0 \\ SB & SC & SF & SJ & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

生成矩阵为

$$Q(s, s') = \begin{cases} R(s, s') \\ -\sum_{s'' \neq s} R(s, s'') \end{cases} \quad (4)$$

然后根据公式  $\Pi^c \cdot Q = 0, \sum \Pi^c_{(s)} = 1$  可以获得稳态概率。

### 2.3 节点分布模型

在无线传感器网络中, 节点的分布是随机的, 在文献[15]中认为节点服从泊松分布, 在文献[16]中进行生存性评估时, 认为节点服从二项分布。本文根据无线传感器网络节点的移入与

移出速率建立如图 2 的节点分布模型。其中 MC 表示节点移入速率, MG 表示节点移出速率,  $S_k$  表示一个节点连通节点个数为  $k$ , 当移入一个节点的时候, 状态从  $S_k$  变为  $S_{k+1}$ , 当移出一个节点的时候状态从  $S_k$  变为  $S_{k-1}$ 。

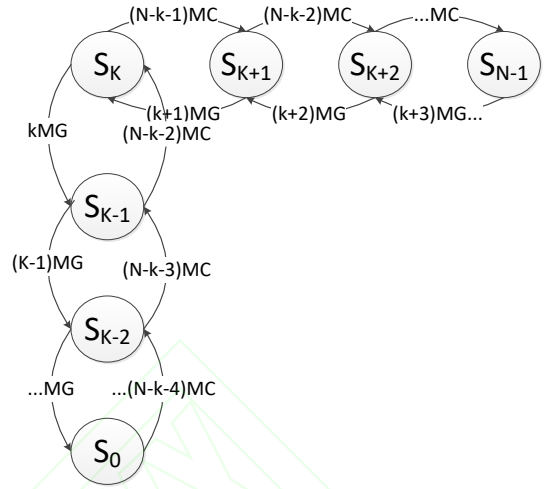


图 2 基于移动速率的节点分布图

根据图 2 定义速率转移矩阵为

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0 & (N-1)MC & \dots & 0 & 0 \\ MG & 0 & & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & & 0 & MC \\ 0 & 0 & \dots & (N-1)MG & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

根据上一节的稳态概率计算方式, 可以计算出稳态概率。

稳态概率记为

$$P = [P_0, P_1, \dots, P_{N-1}] \quad (6)$$

### 2.4 节点隔离问题

在无线传感器网络中, 节点失效或者遭受攻击等容易造成节点的隔离问题。节点隔离是网络分割的一个直接原因, 进一步影响网络的生存性。本文考虑下面四种场景来分析节点隔离问题: 邻居节点是失效节点; 邻居节点是自私节点; 邻居节点是水母节点; 邻居节点是黑洞节点。并且进一步计算节点隔离概率。

#### 2.4.1 失效邻居节点的影响

在图 3(a)中, 假设节点  $x_3$  是失效节点。当节点  $u$  发起到节点  $v$  的路由发现的时候, 失效的邻居节点  $x_3$  不能转发路由发现。当节点  $u$  的所有邻居节点都是失效节点的时候, 那么节点  $u$  不能与任何节点通信。在这种情况下, 称  $u$  被它的失效邻居节点隔离。

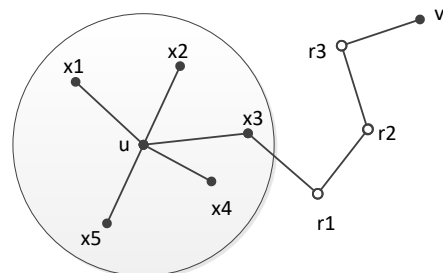


图 3(a) 自私和失效邻居节点



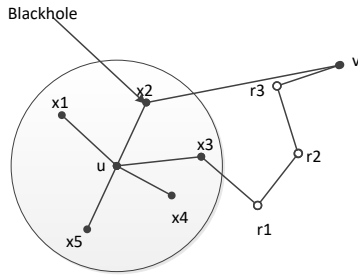


图 3(b) 黑洞和水母邻居节点

#### 2.4.2 自私邻居节点的影响

在图 3(a)中, 假设节点  $x_3$  是一个自私节点。当节点  $u$  发起到节点  $v$  的路由发现的时候, 这个自私邻居节点可能不愿转发来自  $u$  的路由请求。在这种情况下,  $x_3$  表现的像一个失效节点。 $x_3$  也可能转发控制包, 然而不过这种情况更糟糕, 因为  $u$  可能选择  $x_3$  作为下一跳并且发送数据给它。结果,  $x_3$  可能丢弃所用通过它要转发的数据, 那么  $u$  和  $v$  的之间的通信就不能进行。当  $u$  的所有邻居节点都是自私节点时,  $u$  不能与超过一跳距离远的节点通信。在这种情况下, 称节点  $u$  被它的自私邻居节点隔离。

#### 2.4.3 水母邻居节点的影响

在图 3(b)中, 假设节点  $x_2$  是水母节点, 根据[17]对水母攻击原理的分析知道, 水母节点经常选择性或者随机性的丢弃数据包, 重排数据包, 这些是非常有害的对 TCP 通信。因此, 如果  $u$  把  $x_2$  作为下一跳, 那么  $u$  将失去与它至少一跳远的节点的通信。在这种情况下, 如果  $u$  的所有邻居节点是水母节点, 称节点  $u$  被它的水母邻居节点隔离。

#### 2.4.4 黑洞邻居节点的影响

在图 3(b)中, 假设节点  $x_2$  是一个黑洞节点, 根据[18~20]对黑洞攻击原理的分析知道, 当  $u$  通过广播 RREQ 信息去发现到  $v$  的路由时,  $x_2$  可能用一个伪造 RREP 消息响应  $u$ , 声称它到节点  $v$  的路径最短。因此,  $u$  选择  $x_2$  作为下一跳发送数据给它, 但是  $x_2$  将会丢弃所有的数据包。所以当  $u$  有一个节点是黑洞节点的时候,  $u$  与超过一跳距离远的节点通信时, 数据总是被丢弃。在这种情况下, 称  $u$  被它的黑洞邻居节点隔离。

#### 2.4.5 节点隔离概率

定义  $D(u)$  表示节点  $u$  的邻居节点数量, 定义  $D_c(u)$  表示节点  $u$  能通过邻居节点与其他节点通信的邻居节点的数量。定义  $n_s(u)$  代表节点  $u$  邻居节点中自私节点的数量,  $n_j(u)$  代表节点  $u$  邻居节点中水母节点的数量,  $n_f(u)$  代表节点  $u$  邻居节点中失效节点的数量,  $n_b(u)$  表示节点  $u$  邻居节点中黑洞节点的数量。假设节点  $u$  的邻居节点数为  $d$ , 即  $D(u)=d$ 。根据前面 4 节的分析, 可以计算出节点  $u$  被隔离的概率。

$$P_r(D_c = 0 | D = d) = P_r(n_b \geq 1 | D = d) + P_r(n_s + n_j + n_f = d | D = d) \quad (7)$$

### 2.5 WSN 可生存性评估

无线传感器网络最重要的数据的收集与传输, 所以以连通概率作为生存性的评估指标。在本文中, 节点  $k$  连通指的是一个节点与网络是  $k$  连通的, 当且仅当该节点没有处于黑洞状态的邻居节点, 且处于合作状态的邻居节点的数目是  $k$  个。网络

$k$  连通指的是网络中所有重要节点至少是  $k$  连通。下面, 将进行网络  $k$  稳态连通概率的计算。网络  $k$  连通概率指的是在长期的网络运行中, 网络保持  $k$  连通的概率。

为了计算网络  $k$  连通概率, 首先需要计算单节点至少  $k$  连通的概率。

单节点至少  $k$  连通概率为

$$P_r(D(u) \geq k) = 1 - P_r(D(u) < k) \quad (8)$$

为了解决式(8)问题需要解决  $P_r(D(u) < k)$ 。根据概率公式可得

$$P_r(D(u) < k) = \sum_{d=0}^{N-1} P_r(D = d) P_r(D_c < k | D = d) = \sum_{d=0}^{N-1} P_r(D_c < k | D = d) \quad (9)$$

为了解决(9)问题需要计算  $P_r(D = d)$  和  $P_r(D_c < k | D = d)$ , 其中

$$P_r(D_c < k | D = d) = \sum_{m=1}^{k-1} P_r(D_c = m | D = d) + P_r(D_c = 0 | D = d) \quad (10)$$

$P_r(D = d)$  是当前节点邻居节点个数为  $d$  的概率, 是根据节点分布模型求得的。

通过单节点至少  $k$  连通概率的计算以及无线传感器网络  $k$  连通概率的定义本文可以计算出网络的稳态  $k$  连通概率。

网络稳态  $k$  连通概率为

$$SVB \approx ((1 - P_r) \cdot P_r(D(u) \geq k))^N \quad (11)$$

## 3 模型分析与验证

所谓模型验证是指在一定的实验条件下确定该模型能否提供网络的准确信息, 如各项参数对生存性指标的影响是否满足理论分析。下面将进行数值实验来分析验证建立的模型。本文采用 MATLAB 仿真的方式对提出的模型进行分析验证。

表 1 转移速率值

参数	CB	CF	CS	CJ	BF	FC	JF	SC	SB	SF	SJ	MC	MG
V1	10	200	50	20	300	800	30	100	20	40	60	20	10
V2	20	250	70	30	350	850	40	150	30	50	70	30	20
V3	5	100	25	10	200	600	20	50	10	30	50	10	5

首先, 将参数设置为表 1 所示值, 同时设置  $N=10$ 。通过使用这些参数可以计算出每一个状态的稳态概率, 然后近似地获得无线网络传感器网络的生存性。在进行分析时, 以稳态 1 连通概率作为生存性度量标准。为了不失一般性, 设置三组参数值。图 4 展示了参数 CF 对网络生存性的影响, 该图有三条曲线, 每条曲线代表在一组参数值下生存性的变化情况, 从图中可以看到三条曲线呈下降趋势, 最终接近于 0。这说明随着合作状态到失效状态之间转移速率的增大, 网络的生存性逐渐下降, 最终趋向于 0。图 5 展示了参数 FC 对网络生存性的影响, 从图中可以看到三条曲线逐渐增大, 最后趋于平稳, 这说明随着失效状态到合作状态之间转移速率的增大, 网络的生存

性逐渐增加,当速率增大到一定程度时,网络的生存性将保持平稳。

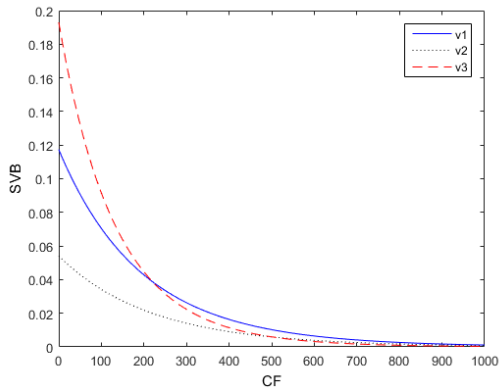


图 4 失效速率对生存性的影响

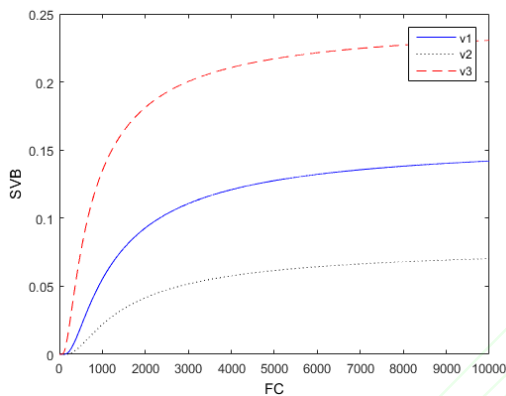


图 5 失效节点恢复速率对生存性的影响

为了研究黑洞攻击对网络生存性的影响,把参数设置为 V1 中的值,保持其他参数不变只改变 CB 和 SB。从图 6 中可以看到,随着 CB 和 SB 逐渐增大,网络的生存性逐渐下降。图 7 展示了自私状态对网络生存性的影响,可以看到随着合作状态到自私状态之间转移速率的增大,网络的生存性呈下降状态,最终生存性趋近于 0。对比图 4 和 7,可以看出两图中的曲线走势相同。根据前面本文对自私节点和失效节点导致的节点隔离问题的分析,得知自私节点和失效节点对节点隔离的影响是一样的。所以两图中曲线走势相同。

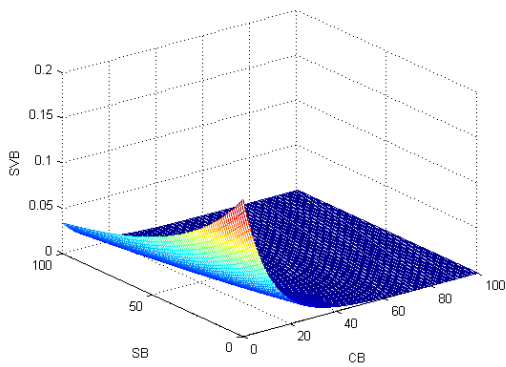


图 6 黑洞速率对生存性的影响

下面研究节点移入速率与移除速率对网络生存性的影响。从图 8 和 9 中可以看出,随着移入速率与移出速率的增大,网络生存性先是逐渐增大然后逐渐减小。为了研究移入与移出速率变化对网络生存性的影响,把参数设置为 V1 中的值,持其

他参数不变只改变 MG 和 MC。从图 10 中可以看出,移入速率与移出速率对网络生存性的影响,并且从图中可以得到网络生存性最佳时的移入与移出速率。

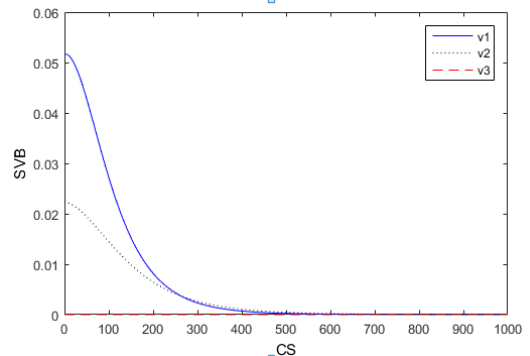


图 7 自私速率对生存性的影响

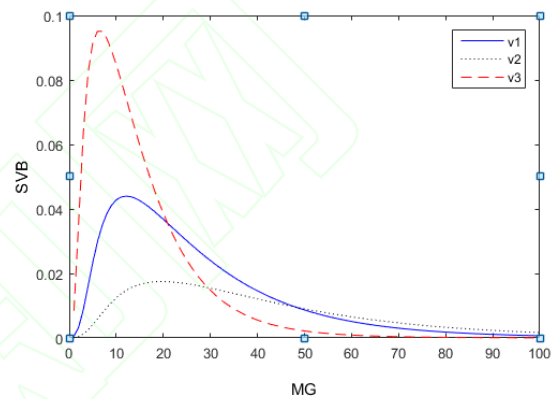


图 8 移出速率对生存性的影响

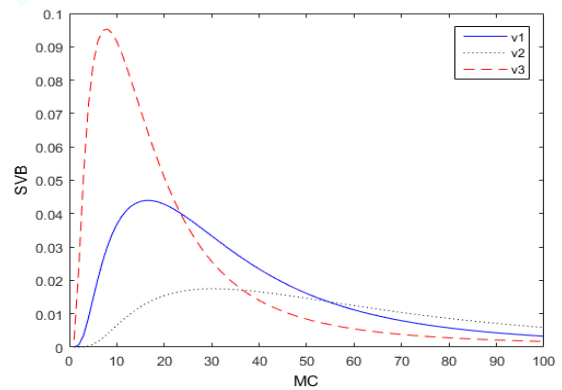


图 9 移入速率对生存性的影响

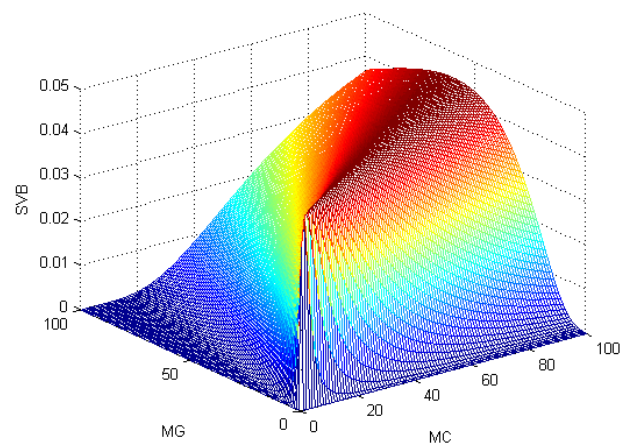


图 10 移入与移出速率对生存性的影响

## 4 结束语

WSN 生存性评估模型是 WSN 生存性分析的重要内容,本文首先建立单节点的行为转移模型,并研究了该模型中的节点隔离问题。然后根据节点的移入与移出速率建立节点的分布模型,该模型不用考虑网络的拓扑结构。最后以上述模型为基础,以无线传感器网络的稳态  $k$  连通概率为生存性指标对整个无线传感器网络进行生存性评估。分析验证结果表明,该模型用来评估 WSN 的生存性是有效可行的。

## 参考文献:

- [1] Mahmood M A, Seah W K G, Welch I. Reliability in wireless sensor networks: a survey and challenges ahead[J]. *Computer Networks*, 2015, 79: 166-187.
- [2] 邓鑫, 张乐君. 无线传感器网络可生存性增强技术研究概述[J]. *传感器与微系统*, 2014, 33(1): 1-4.
- [3] 彭三城, 贾维嘉, 王国军. Survivability evaluation in large-scale mobile Ad hoc networks[J]. *计算机科学技术学报: 英文版*, 2009, 24(4): 761-774.
- [4] Peng S C, Wang G J, Hu Zhongwang, *et al.* Survivability modeling and analysis on 3D mobile Ad hoc networks[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2011, 18(4): 1144-1152.
- [5] Mavaji V, Abbasi B. Survivability evaluation in wireless sensor network[C]//Proc of the 3rd International Conference on Advanced Management Science. 2011.
- [6] Zhang Q, Yu T, Ning P. A framework for identifying compromised nodes in wireless sensor networks [J]. *ACM Trans on Information & System Security*, 2008, 11(3): 1-10.
- [7] Sterbenz J P G, Krishnan R, Hain R R, *et al.* Survivable mobile wireless networks: Issues, challenges, and research directions[C]//Proc of the 1st ACM workshop on Wireless Security. New York: ACM Press, 2002: 31-40.
- [8] Knight J C, Sullivan K J. On the definition of survivability, Technical Report CS-TR-33-00 [R]. 2003.
- [9] 朱世才, 王海涛, 吴连才, 等. 基于 SMP 的分簇 WSN 生存性评估模型[J]. *传感技术学报*, 2014(3): 383-387.
- [10] 熊书明, 王良民, 詹永照. 基于 SMP 的无线传感器网络拓扑容侵定量评估[J]. *通信学报*, 2010, 31(7): 24-32.
- [11] Zhongqiu J, Shu Y, Liangmin W. Survivability evaluation of cluster-based wireless sensor network under DoS attacks[C]//Proc of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2009: 1-4.
- [12] Sun Qindong, Qiao Yimin, Wang Jiamin, *et al.* Node importance evaluation method in wireless sensor network based on energy field model[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016, 2016 (1): 1-9.
- [13] Newport K T. Incorporating survivability considerations directly into the network design process[C]//Proc of the 9th Annual Joint Conference of IEEE Computer and Communication Societies. 1990.
- [14] Moitra S D, Konda S L, Spriggs J E. A simulation model for managing survivability of networked information systems, CMU/SEI-2000-TR-020[R]. 2002.
- [15] Xing F, Wang W. On the survivability of wireless Ad hoc networks with node misbehaviors and failures[J]. *IEEE Trans on Dependable and Secure Computing*, 2010, 7(3): 284-299.
- [16] Yi Z, Doho T, Okamura H. Survivability modeling and analysis for a power-aware wireless ad hoc network[C]//Proc of the 4th International Congress on Ultra Modern Telecommunication and Control Systems and Workshops. 2012: 813-819.
- [17] Kumar P M, Gopalakrishnan S. Security enhancement for mobile Ad hoc network using region splitting technique[J]. *Journal of Applied Security Research*, 2016, 11(2): 185-198.
- [18] Praveen K S, Gururaj H L, Ramesh B. Comparative analysis of black hole attack in Ad hoc network using AODV and OLSR protocols[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 85 : 325-330.
- [19] Panos C, Ntantogian C, Malliaros S, *et al.* Analyzing, quantifying, and detecting the blackhole attack in infrastructure-less networks[J]. *Computer Networks*, 2017, 113: 94-110.
- [20] Bensaid C, Hacene S B, Faraoun K M. Detection and ignoring of blackhole attack in vanets networks[J]. *International Journal of Cloud Applications and Computing*, 2016, 6(2): 1-10.