

基于自愈技术的无线传感器网络基站生存模型

何欣^{1,2}, 桂小林¹

(1. 西安交通大学计算机科学与技术系, 710049, 西安; 2. 河南大学计算中心, 475001, 河南开封)

摘要: 传统无线传感器网络(WSN)的安全研究主要集中在提高系统的抗入侵能力上, 却很少涉及系统被入侵或失效后如何继续对外提供服务的问题, 为此引入自愈技术的思想, 构建了一种 WSN 基站生存模型. 通过监测系统性能来预测系统失效点, 及时执行自愈操作, 从而在攻击、失效发生后, 使系统仍能继续提供服务. 此外, 使用半马尔科夫过程来描述模型, 并通过分析模型稳定健康状态的概率, 发现系统受损状态的检测率是提高模型生存性的关键参数. 仿真结果显示, 系统检测率与失效率之间呈反向变化关系, 通过自愈技术提高检测率并及时进行自愈恢复, 可显著降低系统失效率, 提高系统的生存性.

关键词: 无线传感器网络; 生存性; 自愈技术; 半马尔科夫过程

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)08-0950-04

Survivable Model for Base Station in Wireless Sensor Network with Rejuvenation Technology

HE Xin^{1,2}, GUI Xiaolin¹

(1. Department of Computer Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Computer Center, Henan University, Kaifeng 475001, China)

Abstract: The conventional security technology for wireless sensor network (WSN) mainly is focused on improving the anti-invasion ability, but not on providing external services after the invasion and failure, and hence, the survivability of WSN is poor. Based on the rejuvenation technology, a survivable model for base station in WSN is designed. The uninterrupted services can be provided by the model in face of attack or failure by monitoring system performance to predict the rejuvenation interval and timely implementing rejuvenation recovery. By analyzing the probability in steady health state of the model using semi-Markov process, it is found that the detect probability in the compromised state is a key point to improve the model survivability. According to the experimental results, the failure probability varies inversely with the detect probability. Therefore, the failure probability can be reduced significantly and hence the survivability of the system can be enhanced by increasing the detect probability and timely implementing rejuvenation recovery.

Keywords: wireless sensor network; survivability; rejuvenation technology; semi-Markov process

目前, 有关无线传感器网络(WSN)生存性的研究主要集中于安全领域, 通过加密、安全协议等手段来保证信息的机密性、认证性和完整性, 以提高系统

的抗入侵能力^[1-2]. 但是, 由于传感器网络环境的开放性、网络攻击手段的多样性, 以及常用入侵检测技术存在检测率低、误报率高等问题, 致使传统的安全

技术无法保证网络能有效抵御外来攻击,所以入侵后的网络生存能力比较低.因此,如何使入侵后的系统仍能对外提供服务,提高 WSN 的网络生存性将成为今后研究的重点.

一种称为软件自愈^[3-4]的容错技术正逐渐发展起来,它通过监测系统资源的使用情况,并在软件老化时采取自愈恢复操作,可有效避免软件失效.将其运用于安全领域,既能处理内部失效问题,提高系统的可靠性,又可排除某些外部攻击带来的安全隐患(如 DoS 攻击等)^[5-6],提高系统的安全性,并从整体上提高系统的生存性.据此,本文将自愈技术运用于 WSN,提出了一种基于自愈技术的 WSN 基站生存模型.

1 基于自愈技术的 WSN 基站生存模型

自愈技术需要不断检测环境资源信息,以便及时决策并采取相应的操作.在 WSN 中,由于普通传感器节点的资源能力是有限的(例如计算能力比较低,存储量较小,电源能量有限),所以无法承担检测操作带来的开销.同时,为了节能而常常采用的休眠/唤醒策略也不适于检测操作,由此导致了将自愈技术运用于 WSN 的技术瓶颈.然而,通过 WSN 的结构特点可以看到,基站是 WSN 与外部网络连接的桥梁,传感器节点将数据信息通过基站向外传递,外部的控制信息也需要通过基站向内发送.显然,基站的生存性直接影响着 WSN 的生存性,同时基站也能够承担自愈操作带来的资源需求.因此,利用自愈技术来提高基站的生存性,从而进一步提高 WSN 的整体生存性能,是本文研究的目的.

1.1 WSN 基站的自愈生存架构

自愈生存架构如图 1 所示,其关键部件如下.

(1)监视器.在架构中需构建一个监视器,通过各种代理(软件传感器)不断获取系统资源的上下文信息,从而及时检测和汇总数据.

(2)分析部件.分析部件利用策略参数数据库提供的信息,对收集到的数据进行决策,分析异常资源消耗情况及其危害程度,判断是否采取自愈操作.

(3)执行部件.执行部件根据资源异常消耗的原因(软件内部缺陷造成的,还是外部攻击的结果),在自愈操作过程中采取不同的处理策略.此外,还可以采用重配置操作^[7],根据系统漏洞及时打补丁,以避免系统内部缺陷导致错误重复出现或者同样的外部

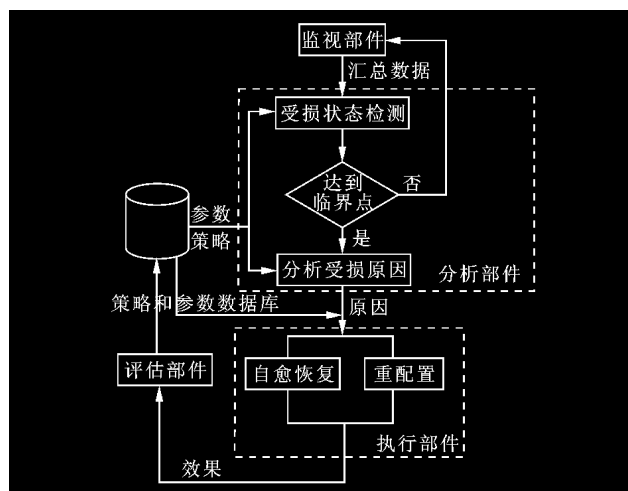


图1 WSN 基站的自愈生存架构

攻击继续发生等.

(4)评估部件.评估部件根据系统恢复后的性能情况,对影响本次操作的原始策略进行评估,并将评估结果写入策略库,这样可以使得该框架模型能根据环境变化进行自适应调整.

1.2 关键技术

利用自愈技术的关键点是在系统受损状态的临界点选取上,过早选取会导致自愈操作频繁而降低对外服务的能力,过晚选取则会因未及时监测到受损状态而失去自愈的意义.目前,一般采用统计的方法(如神经网络方法)对收集到的系统资源状态数据进行分析,以拟合系统老化和攻击导致的数据变化规律,预测未来的变化趋势,并通过设置阈值求取最佳临界点,提高系统临界点的检测成功概率.

此外,恢复操作包括自愈恢复和重配置.自愈恢复通常是清理系统内部状态(如垃圾回收、刷新操作系统内核表、重新初始化内部数据结构等),阻断外部恶意链接,释放系统资源,恢复系统性能.重配置操作则是根据系统漏洞打补丁,以避免类似事件再次发生.

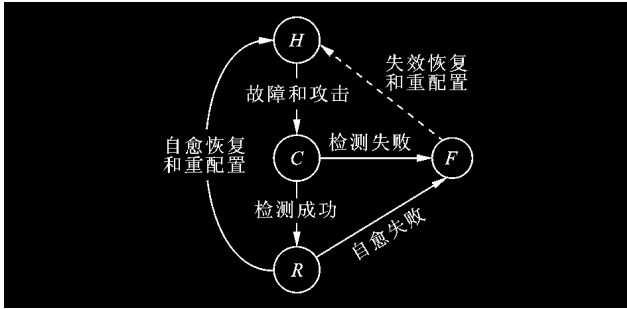
2 使用半马尔科夫过程进行模型分析

2.1 WSN 基站的半马尔科夫过程生存模型

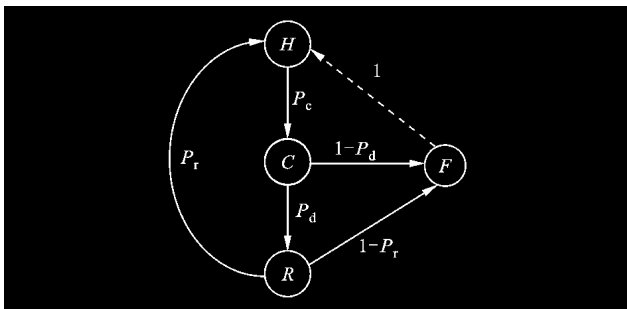
WSN 基站的半马尔科夫过程(SMP)生存模型及其状态转换如图 2 所示,利用 SMP 描述 WSN 基站的生存模型见图 2a,模型的状态转换见图 2b.

基站在初始情况下处于健康状态 H ,随着基站的长期运行,基站内部的软件缺陷或者各种攻击均可导致系统资源出现异常损耗,促使系统进入受损状态 C .此时,如果分析部件能够成功检测到资源异常,则系统进入自愈状态 R ,并根据决策系统提供的

策略进行自愈恢复操作,利用重配置技术为系统打补丁,使系统恢复到健康状态 H ;如果分析部件未能及时检测到资源异常,随着系统损失的加大或恶意攻击的持续进行,系统逐渐进入失效状态 F ,此时只能等待系统管理员进行手工恢复和重配置操作,以便恢复到健康状态 H .



(a)SMP生存模型



(b)状态转换图

图2 WSN基站的SMP生存模型及其状态转换图

2.2 生存性分析

下面对模型进行生存性分析.根据图2,利用连续马尔科夫链得出下列计算公式

$$\left. \begin{aligned} V_H P_c &= V_R P_r + V_F \\ V_H P_c &= V_C \\ V_R (1 - P_r) + V_C (1 - P_d) &= V_F \\ V_C P_d &= V_R \\ V_H + V_C + V_R + V_F &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: P_c 表示从健康状态 H 到受损状态 C 的转换概率; P_d 表示检测成功的概率; P_r 表示自愈成功的概率; V_H, V_C, V_R, V_F 分别表示各种状态概率.

求解式(1),可得到

$$\left. \begin{aligned} V_H &= \frac{1}{1 + 2P_c + P_c P_d - P_c P_d P_r} \\ V_C &= \frac{P_c}{1 + 2P_c + P_c P_d - P_c P_d P_r} \\ V_R &= \frac{P_c P_d}{1 + 2P_c + P_c P_d - P_c P_d P_r} \\ V_F &= \frac{P_c - P_c P_d P_r}{1 + 2P_c + P_c P_d - P_c P_d P_r} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

根据SMP,可获取各稳定状态的概率

$$\Pi_i = \frac{V_H h_i}{\sum_j V_j h_j} \quad (3)$$

将式(2)中的概率计算公式代入式(3),便得到稳定状态的概率.

健康状态 H 的稳定状态概率

$$\Pi_H = \frac{V_H h_H}{V_H h_H + V_C h_C + V_R h_R + V_F h_F} = \frac{h_H}{h_H + P_c h_C + P_c - P_d P_c (P_r h_F - h_R)} \quad (4)$$

式中: h_H 表示在健康状态 H 的停留时间; h_C 表示在受损状态 C 的停留时间; h_R 表示在自愈状态 R 的停留时间; h_F 表示在失效状态 F 的停留时间.

通过分析式(4)可知,稳定状态概率 Π_H 越大,则系统的失效概率 $(1 - \Pi_H)$ 越小,WSN基站的健壮性越好,生存能力就越强.为了提高系统的生存性,为式(4)选取合适的参数至关重要,以便求取最佳的稳定状态概率 Π_H (或者失效概率).由于本文考虑的是自愈技术对模型生存性的影响,因此受损状态成功检测的概率 P_d 将成为关键因素, P_d 越大则稳定状态概率 Π_H 越大,系统的失效概率 $(1 - \Pi_H)$ 越低,WSN基站的生存性越好.

3 实验仿真

本文通过性能参数(检测概率 P_d)的变化来反映系统的生存性.在WSN基站中,由于运行软件的复杂性及外部攻击的多样性,使得参数选取极为困难且无法通过计算直接获得,所以只能通过仿真实验进行模拟.又因Petri网与马尔科夫过程是同构的^[8],这样便可采用随机回报网(SRN)对生存模型进行重新描述,模型结构如图3所示.利用并行仿真工具SPNP^[9],便可进行SRN模型实验仿真.

分别在不利用自愈技术以及采用自愈技术且成功检测概率 $P_d = 0.3, 0.6, 0.9$ 的情形下进行了仿真,实验数据如表1所示,其中部分数据取自参考文献[3].

同健康状态的稳定概率一样,系统的失效概率也能反映模型的生存性能,因此本文采用失效概率来描述实验结果.出错和攻击后的失效概率越低,系统的生存性能就越好.

仿真结果如图4所示,从图中可看到:当未使用自愈技术时,系统对内部错误和外部攻击未采取任何有效措施,致使系统损失较大,系统的生存性能较低;当采用自愈策略时,系统根据内部资源信息的使

表1 实验数据

参数	取值	含义
T_f/h^{-1}	1/240	系统由健康状态到受损状态的时间分布函数均值
T_d/h^{-1}	1/216	系统由受损状态到最终失效的时间分布函数均值
T_r/h^{-1}	60	系统自愈过程的分布函数均值
T_u/h^{-1}	2	系统失效后自恢复过程的分布函数均值
P_d	0.3,0.6,0.9	受损状态检测成功的概率
P_u	$1-P_d$	受损状态检测失败的概率

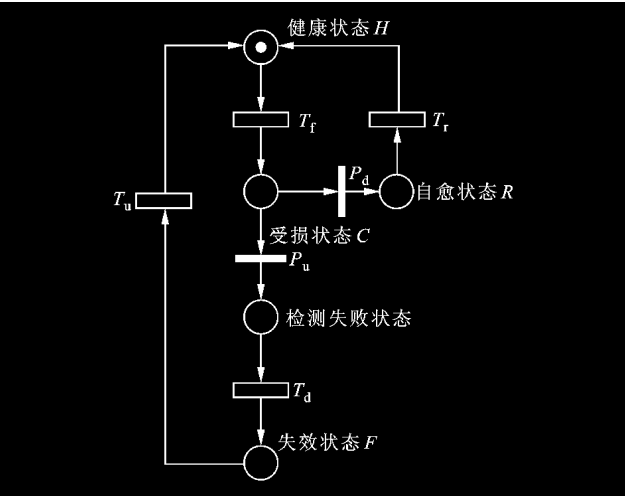


图3 WSN基站生存模型的SRN图

用情况和控制策略及时采取相应措施,由此推迟、预防了失效的发生,因此系统失效状态概率远低于未使用自愈技术的情况,系统的生存性明显提高.另外,系统对损失的检测概率越高,自愈恢复操作的响应越及时,系统失效的概率就越低,生存性能显然就越好.

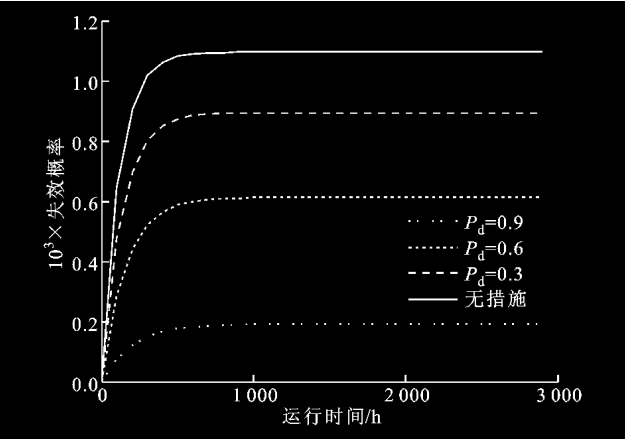


图4 生存模型的失效状态概率

综上所述,将自愈技术运用到 WSN 基站中,可延缓和预防因内部错误和外部攻击造成的系统失效,提高基站的生存能力,从而进一步提高 WSN 的整体生存性能.

4 结 论

通过将自愈技术运用于 WSN,提出了一种基于自愈的 WSN 基站生存模型.首先运用自愈技术构建了一个 WSN 基站生存架构,并使用半马尔科夫过程描述模型,同时分析推导了生存性能.其次,利用仿真工具 SPNP 进行了实验,结果显示,生存模型有助于提高 WSN 基站的生存性能,从而进一步提高 WSN 的整体生存性.

本文强调了自愈技术在提高 WSN 基站生存性方面的作用,并从理论上分析了可行性,但并未对与实际环境相关的自愈点监测技术、自愈重启过程、重配置技术等进行详细说明,因此选取具体的 WSN 应用场景进行自愈技术与重配置研究将是下一步的主要工作.另外,本文仅研究了通过提高基站生存性来提高 WSN 的整体生存性能的问题,能否将自愈技术直接作用于异构类型的 WSN 节点,以提高 WSN 生存性能,还有待于进一步研究.

参考文献:

[1] PERRIG A, STANKOVIC J, WAGNER D. Security in wireless sensor networks[J]. Communications of the ACM, 2004,47(6):53-57.

[2] SHAIKH R A, LEE S, SONG Y, et al. Securing distributed wireless sensor networks: issues and guidelines [C]//Proceedings of International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2006:226-231.

[3] GARG S, PULIAFITO A, TELEK M, et al. Analysis of software rejuvenation using Markov rejuvenation stochastic Petri nets [C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Software Reliability Engineering. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 1995:180-187.

[4] GROTTKE M, LI L, VAIDYANATHAN K, et al. Analysis of software aging in a web server [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2006,55(3):411-420.

[5] AUNG K M, PARK J S. A framework of software rejuvenation for survivability[C] // 18th International Conference on Advanced Information Networking and

- Application 2004. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2004:507-510.
- [6] AUNG K M M, PARK K, PARK J S. A survivability model for cluster system under DoS attacks [C]//Proceedings of High Performance Computing and Communications. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005: 567-572.
- [7] FUCHS G, TRUCHAT S, DRESSLER F. Distributed software management in sensor networks using profiling techniques [C]// Proceedings of 1st International Workshop on Software for Sensor Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006:1-6.
- [8] HAAS P J, SHEDLER G S. Stochastic Petri net representation of discrete event simulations [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1989, 15(4): 381-393.
- [9] CIARDO G, MUPPALA J, TRIVEDI K S. SPNP: stochastic Petri net package [C]//Proceedings of the 3rd International Workshop on Petri Nets and Performance Models. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 1989:142-151.

(编辑 苗凌)