基于 SMP 的无线传感器网络拓扑容侵定量评估

熊书明，王良民，詹永照
(江苏大学 计算机科学与通信工程学院，江苏 镇江 212013)

摘 要：提出了基于半马尔可夫过程(SMP)的拓扑容侵定量评估模型。因节点计算、存储能力等限制，在入侵结果统一层面上建模，简化了模型设计。利用内嵌 DTMC 求解出拓扑可用性、稳定性和服务率指标，提出贝叶斯网络指标推理方法，提高了容侵能力评估的准确性。分析了模型对参数的敏感性，通过实例剖析和比较，验证了拓扑容侵定量评估模型的有效性。

关键词：无线传感器网络；半马尔可夫过程；拓扑容侵；贝叶斯网络；定量评估
中图分类号：TP393 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-436X(2010)07-0024-09

Quantitative evaluation of topology intrusion tolerance in wireless sensor networks based on semi-Markov process

XIONG Shu-ming, WANG Liang-min, ZHAN Yong-zhao
(School of Computer Science & Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Based on semi-Markov process (SMP) a quantitative evaluation model was proposed to estimate ability of the topology intrusion-tolerance. For some limitations of node computation ability and storage ability the model was set up on the uniform intruding results to simplify the design. Using the DTMC embedded in SMP to solve attributes describing intrusion-tolerance, thus such attributes of the topology as availability, stability and servicing rate could be obtained. A Bayes network reasoning model was proposed to enhance accuracy of evaluation of intrusion tolerance ability. Sensitivity of parameters in the model was analyzed. It confirms validity of the quantitative evaluating model of topology intrusion tolerance through examples analysis and comparison.

Key words: wireless sensor networks; semi-Markov process; topology intrusion tolerance; Bayes network; quantitative evaluation

1 引言

布置在恶劣甚至恶意环境下的无线传感器网络(WSN, wireless sensor networks)，常会因为随机故障或者入侵威胁等形成节点失败，需要发起新的拓扑生成操作。目前，针对拓扑控制的研究主要集中在容错[1~4]和容侵[3~5]的拓扑生成和更新方面，容忍入侵机制在 WSN 的安全保障方面受到越来越多的

收稿日期：2009-12-23；**修回日期**：2010-05-27
基金项目：国家自然科学基金资助项目（60703115）；国家博士后科学基金资助项目（20070420955）；江苏省自然科学基金资助项目（BK2007560）；江苏省博士后科学基金资助项目（0702003B）；江苏省研究生创新计划基金资助项目（CX09B_203Z）；国家社会科学基金资助项目（09CTJ006）
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60703115); The National Post-Doctor Science Foundation of China (20070420955); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2007560); The Post-Doctor Science Foundation of Jiangsu Province (0702003B); The Graduate Innovative Foundation of Jiangsu Province (CX09B_203Z); The National Social Science Foundation of China (09CTJ006)

关注。然而，容侵拓扑更新和自再生操作会影响到作为支持上层路由操作的拓扑连通服务，可能导致拓扑割裂；同时，频繁的拓扑安全更新操作必然增加网络不必要的资源开销，缩短了恶意环境下传感器网络的生命期。因此，需要研究安全拓扑构建模块的容侵性能定量评估，为发起新一轮拓扑自再生操作提供决策依据。

Albert[6]最早针对有线复杂网络结构，利用统计分析的方法探讨影响拓扑容侵能力的因素。在无线传感器网络容忍入侵能力评估的研究中，Wang[3]较早从拓扑容错和容侵角度研究 WSN 拓扑对节点失败的容忍能力，对分层拓扑容侵能力给出了定性评估。Ma[4]主要考虑在传感器网络路由层次上，以多版本多路径思想来确保数据传输的容忍能力，提出了一个容侵/容错的 3 层通用模型 MVMP 框架进行容忍能力的评估。Wang[5]在面对入侵的环境下，基于三色思想提出了具有较强容侵能力的传感器网络拓扑生成算法，从理论上对拓扑容侵能力进行了分析推导，并依据容忍能力适时启动拓扑自再生。然而，这些工作并没有给出评估拓扑容侵能力的衡量指标；而且，针对传感器网络的拓扑容侵，现有工作多数仅仅强调拓扑对失败容忍能力的保证，一般仅从定性分析的角度来评估拓扑的容忍能力，由此影响到容侵拓扑更新的合理决策。本文提出了基于半马尔可夫过程(SMP)的无线传感器网络拓扑容侵定量评估模型，结合 Bayes 推理网络对拓扑可用性、稳定性和服务率指标进行了定量分析，能够准确评估拓扑容侵能力，便于传感器网络拓扑结构的重新配置。

2　拓扑容侵能力评估的状态变迁模型

2.1　基于 SMP 的拓扑容侵状态转移模型

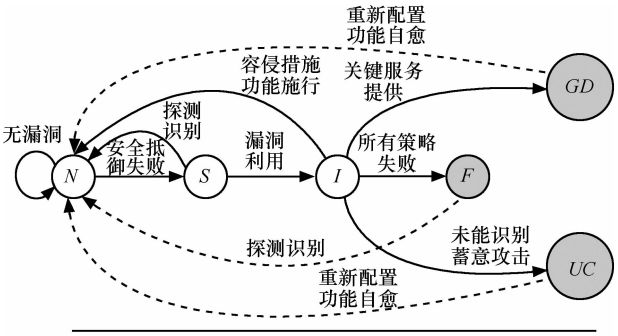
传感器网络会受到诸如 DoS、Hello 洪泛、污水池和 Sybil 等攻击[7]，导致拓扑构建出现安全失败。本节提出了基于 SMP 的拓扑容侵状态转移模型，描述攻击导致的拓扑容侵状态变化和容侵模块应对攻击所处的各种状态。

定义 1　拓扑容侵状态转移模型是一个有序四元组，如式(1)所示：

$$TIM=(q_0, T, Z_s, \delta) \tag{1}$$

其中，$q_0 \in Z_s$ 是容侵拓扑构建模块的初始状态 N，T 是离散时间集，描述了各状态的一个离散时间序列，$Z_s=\{N、S、I、F、GD、UD\}$是容侵模块的状态集，而 δ 是控制状态转移规律的 $T\times Z_s$ 到 $T\times Z_s$ 映射。

根据定义 1，容侵拓扑构建过程从初始态 q_0 开始，在离散时间序列上，由 δ 控制拓扑容侵状态的转移，图 1 给出基于半马尔可夫过程的容侵拓扑状态转移过程。通常情况下，入侵者对拓扑构建过程的攻击影响和拓扑容侵模块对恶意攻击的类型、强度、持续时间及攻击频率等的认识都存在一定的不确定性。模型 *TIM* 以一定的概率来描述状态间的变迁，从而可以分析系统处于各状态的概率。



N: 表示拓扑构建处于正常状态，未受到攻击
S: 表示构建过各自于易受攻击的状态
I: 表示处于被入侵状态
F: 表示拓扑构建处于失败状态
GD: 表示处于“优雅降级”服务状态仅提供关键核心服务
UC: 表示处于未检测到破坏状态

图 1　容侵拓扑构建的状态迁移

图 1 中，拓扑构建初始时处于正常状态 *N*，各种典型的安全机制正常工作。安全机制不能抵御入侵时，系统进入敏感状态 *S*，入侵者通过多种探测技术已发现拓扑构建模块的脆弱性，发起了针对拓扑生成的攻击。如果攻击者成功利用系统漏洞，则进入状态 *I*，系统被入侵，此阶段容侵机制可以利用资源冗余、大数表决等来减少入侵带来的危害。由于容侵机制的安全强度不同，攻击行为可能造成的危害也不一样，如果容侵机制未能检测出针对拓扑的攻击，则进入 *UC* 状态，拓扑控制模块不能采取任何抵御措施，最终出现拓扑割裂。如果检测到攻击行为，则容侵模块以一种“优雅降级”的服务方式，保证关键服务的持续性，进入 *GD* 状态，但需人工干预恢复到正常状态；否则，完全失控进入状态 *F*。

分析该状态迁移过程需要 2 个参数，包括状态的逗留时间和状态间的转移概率。

定义 2　h_i 是拓扑模块在状态 i 的平均逗留时间，$i \in Z_s$；p_{ij} 是状态 i、j 间的转移概率，i、$j \in Z_s$。

2.2　容侵能力评价指标

针对无线传感器网络拓扑容侵能力的分析，考

虑拓扑可用性(TA)、拓扑稳定性(TS)和拓扑服务率(TRoS) 3 个指标。主要从评价拓扑容侵能力的角度直接分析拓扑构建过程中各状态的变迁，忽略一些入侵者具体的攻击手段和拓扑容侵机制的响应细节。3 个评估指标的定义如下。

定义 3 拓扑可用性 TA。它是指在概率意义下容侵拓扑构建到达稳定状态时，拓扑模块提供连通服务的概率 P_{TA}。

可用性分为瞬时可用性和稳态可用性[8]，定义 3 指的是拓扑稳定状态下的可用性，着重描述容侵拓扑在攻击影响下的服务能力。在图 1 中，设拓扑不能提供服务的状态集合为 $S_{\mathrm{TA}\#}$，$\pi_i(i\in Z_{\mathrm{s}})$是在稳态意义下状态 i 所处的概率，可以给出拓扑可用性如下数学描述：

$$P_{\mathrm{TA}}=1-\sum_{i\in S_{\mathrm{TA}\#}}\pi_i \tag{2}$$

定义 4 拓扑稳定性 TS。在容侵拓扑构建到达任一吸收态 S_A 之前，拓扑构建处于未受攻击状态 N 的时间与处于临时态 $S_{A\#}$总时间的比值 P_{TS}。

吸收态反映了系统最终会陷入一种自动不可恢复状态，只有等待人工干预。临时态反映了状态迁移过程中，系统所处的多个中间状态。

TS 描述了容侵拓扑构建模块的安全入侵容忍能力，可为拓扑容侵能力的重新配置提供参考依据，形式化描述如下：

$$P_{\mathrm{TS}}=\frac{V_N h_N}{\sum_{i\in S_{A\#}}V_i h_i} \tag{3}$$

其中，V_i和 h_i分别表示在到达任一吸收态之前处于状态 i 的次数和平均逗留时间。

定义 5 拓扑服务率 TRoS。它是指平均安全故障时间(MTTSF)在一个拓扑服务周期内所占的比例 P_{TRoS}。

MTTSF 给出了拓扑构建过程在进入某一吸收态之前所持续的时间，但是在面对安全入侵时，拓扑构建最终会以某种概率进入相应的吸收态，拓扑服务率 TRoS 反映了容侵模块在整个工作期间有效工作时间占的份额，设在概率意义下，一个拓扑服务周期是 T，拓扑服务率数学定义如下所示：

$$P_{\mathrm{TRoS}}=\frac{MTTSF}{T} \tag{4}$$

综合上述指标，利用函数 f 描述拓扑容侵能力值 P_{CoIT} 随评估指标变化的关系，如式(5)所示：

$$P_{\mathrm{CoIT}}=f(P_{\mathrm{TA}},P_{\mathrm{TS}},P_{\mathrm{TRoS}}) \tag{5}$$

3 DTMC 的容侵指标求解及能力评估

3.1 DTMC 的形式化描述

从基于 SMP 的状态迁移模型可知，容侵拓扑构建模块在各状态之间的迁移满足马尔可夫性，即将来的状态仅取决于当前的状态，且在离散时间序列上进行状态间转变。因此，采用离散时间马尔可夫链(DTMC)对整个的状态迁移进程进行分析，图 2 描述了 SMP 的嵌入马尔可夫链，其形式化描述由定义 6 给出。

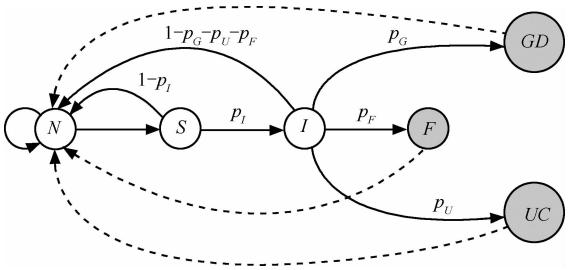


图 2 拓扑容侵评估的 DTMC 模型

定义 6 离散时间马尔可夫链(DTMC)是一个有序六元组，如式(6)所示：

$$TIMI=(q_0,p_0,T,Z_{\mathrm{s}},T_{\mathrm{s}},\boldsymbol{P}) \tag{6}$$

其中，q_0、T 和 Z_{s}的含义同 SMP 模型，T_{s}={h_N, h_S, h_I, h_F, h_G, h_U}是拓扑构建模块处于各状态的平均逗留时间，$\boldsymbol{P}$ 是各状态间的迁移概率矩阵，由图 2 可知，矩阵 $\boldsymbol{P}$ 可表示为

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ \tilde{p}_I & 0 & p_I & 0 & 0 & 0\\ \tilde{p}_{GFU} & 0 & 0 & p_F & p_G & p_U\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix},$$

$$\begin{cases}\tilde{p}_I=1-p_I\\ \tilde{p}_{GFU}=1-p_G-p_F-p_U\end{cases} \tag{7}$$

矩阵 $\boldsymbol{P}$ 的行列都以 N，S，I，F，GD，UC 顺序排列。有关状态转移概率和平均逗留时间使用的符号及含义如下所示。

p_I：脆弱状态下，进入入侵状态的概率。

p_F：所有容侵策略均失败的概率。

p_U：未检测到成功入侵的概率。

p_G：拓扑服务优雅降级的概率。

h_N：容侵拓扑构建处于正常状态的平均时间。

h_S：脆弱状态下，构建模块遭受入侵的平均时间。

h_I：在入侵状态，拓扑容侵模块决策的平均时间。

h_F：容侵策略失败时，恢复到正常态的平均时间。

h_G：拓扑在降级状态下的平均持续时间。

h_U：攻击成功时，未能检测到入侵的平均时间。

3.2　指标求解

3.2.1　拓扑可用性

为计算拓扑可用性，需要得到 SMP 模型中各状态的稳态概率，首先求出 DTMC 模型中各状态的稳态概率。

在图 2 的 DTMC 模型中，根据文献[9]可得：

$$\overline{\boldsymbol{v}} = \overline{\boldsymbol{v}} \cdot \boldsymbol{P} \tag{8}$$

其中，$\overline{\boldsymbol{v}} = [v_N, v_S, v_I, v_F, v_G, v_U]$ 是 DTMC 模型各状态在稳态下的概率极限分布向量。有约束条件：

$$\Sigma_i v_i = 1, \quad i \in Z_S = \{N, S, I, F, GD, UC\} \tag{9}$$

联立式(8)和式(9)求解，得 DTMC 模型中稳态意义下状态的概率向量 $\overline{\boldsymbol{v}}$：

$$\overline{\boldsymbol{v}} = \frac{1}{2 + p_I + p_I(p_G + p_F + p_U)} \cdot \left(1,\ 1,\ p_I,\ p_I p_U,\ p_I p_F,\ p_I p_G\right) \tag{10}$$

采用文献[9]提出的方法，得到 SMP 各状态稳态概率的计算公式如下：

$$\pi_i = \frac{v_i h_i}{\Sigma_j v_j h_j}, \quad i、\ j \in Z_s \tag{11}$$

其中，v_i 是 DTMC 中各状态的稳态概率，h_i 是状态 i 的平均逗留时间，因此，需要确定每个状态的平均逗留时间。h_i 往往取决于入侵者的攻击能力、安全模块的防护强度和容侵拓扑构建模块的容忍能力等诸多因素，具有不确定性和随机性，故在各状态逗留时间的概率分布往往呈现多样性。本文从渐进意义上考虑容侵状态的平均逗留时间，所以，根据文献[8]可以假设在状态 N、S、I 实际服从 Weibull(λ, k)分布，而在状态 F、GD、UC 服从 gamma(k, θ)分布。在状态 N 和 F 的期望逗留时间可表示为

$$h_N = \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{1/k} \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right), \quad h_F = k\theta$$

联立式(10)和式(11)求解，得 SMP 模型中各状态的稳定概率向量 $\boldsymbol{\Pi}$：

$$\boldsymbol{\Pi} = \frac{1}{h_N + h_S + p_I h_I + p_I p_U h_F + p_I p_F h_G + p_I p_G h_U} \cdot \begin{pmatrix} h_N \\ h_S \\ p_I h_I \\ p_I p_U h_F \\ p_I p_F h_G \\ p_I p_G h_U \end{pmatrix} \tag{12}$$

如图 1 所示的 SMP 模型中，拓扑构建模块处于 F、UC 状态时，容侵模块没有检测出对系统的攻击和虽然已检测出但不能采取有效容忍措施，不能提供拓扑连通服务，即在这 2 个状态下拓扑不具可用性，所以集合 $S_{\mathrm{TA\#}}$={F, UC}，由式(2)和式(12)得计算拓扑可用性 TA 的公式如下：

$$P_{\mathrm{TA}} = 1 - \sum_{i \in S_{\mathrm{TA\#}}} \pi_i = 1 - (p_U h_F + p_G h_U) \frac{p_I}{h_N} \pi_N \tag{13}$$

3.2.2　拓扑稳定性

定义 4 指出，可将 DTMC 的状态分为临时态 Z_t 和吸收态 Z_a。图 2 中，拓扑构建过程一般在 N、S、I 3 个状态之间来回振荡，只有在容侵机制不能正常发挥效用时才进入 F、GD、UC 中的任一状态，等待人工干预。因此，Z_t={N、S、I}，Z_a={F、GD、UC}，对应临时态 Z_t 和吸收态 Z_a 的状态迁移概率矩阵 $\boldsymbol{P}'$如下：

$$\boldsymbol{P}' = \left[\begin{array}{ccc:ccc} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{p}_i & 0 & p_i & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{p}_{GFU} & 0 & 0 & p_F & p_G & p_U \\ \hdashline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \tag{14}$$

按照临时态和吸收态两两组合的 4 种情况划分为 4 个区域，右上角子矩阵设为 $\boldsymbol{C}$。

设 V_i 是到达任一吸收状态前，在临时态 i 的平均次数，计算 V_i 的公式如下：

$$V_i = q_i + \sum\nolimits_{j \in Z_t} V_j p'_{ji}, \quad i \in Z_t \tag{15}$$

其中，q_i 是初始状态为 i 的概率，本文假设状态 N 是初始状态，有[$\boldsymbol{q}_i$]=[1, 0, 0]。

解式(15)得到处于各临时态的平均次数向量 $\boldsymbol{V}$：

$$\boldsymbol{V} = \frac{1}{p_I(p_G + p_U + p_F)} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ p_I \end{pmatrix} \tag{16}$$

联合式(3)和式(16)，结合各临时态的平均逗留

时间 h_i，可得拓扑稳定性 TS 的值。

$$P_{\mathrm{TS}}=\frac{h_N}{h_N+h_S+p_I h_I} \tag{17}$$

3.2.3 拓扑服务率

拓扑服务率 TRoS 可以很好地刻画整个拓扑服务周期内的有效工作时间份额，反映了容侵拓扑模块在一定攻击下的整体服务能力，针对拓扑构建的不同攻击威胁将导致进入不同的吸收状态，相应地，其危害也不一样。利用文献[8]提出的方法，计算平均安全故障时间 MTTSF 和由初始状态 N 进入各吸收态的概率 b_{1j} 公式如下：

$$\begin{cases} MTTSF=\sum_{i\in Z_t} V_i h_i \\ b_{1j}=\sum_{i\in Z_t} V_i c_{ij},\ j\in Z_a \end{cases} \tag{18}$$

联立式(16)和式(18)求解得：

$$\begin{cases} MTTSF=\dfrac{1}{p_F+p_G+p_U}\left(\dfrac{h_N}{p_I}+\dfrac{h_S}{p_I}+h_I\right) \\ b_{1F}=p_F(p_G+p_U+p_F)^{-1} \\ b_{1G}=p_G(p_G+p_U+p_F)^{-1} \\ b_{1U}=p_U(p_G+p_U+p_F)^{-1} \end{cases} \tag{19}$$

由式(4)和式(19)求解拓扑服务率 TRoS 得：

$$P_{\mathrm{TRoS}}=\frac{h_N+h_S+p_I h_I}{h_N+h_S+p_I(h_I+p_F h_F+p_G h_G+p_U h_U)} \tag{20}$$

3.3 基于贝叶斯网络的综合指标分析

文献[10]指出，近年来贝叶斯网络(BN, Bayes network)模型在可靠性分析领域中的应用逐渐得到关注，本文提出一个 BN 模型来预测、评估无线传感器网络拓扑容侵能力和各项评价指标对容侵能力的影响度。

图 1 所示的状态迁移模型从概率的角度分析、计算拓扑可用性、稳定性和服务率，这其中蕴含着一定的统计特性和内在联系。为对拓扑容侵能力和其与各属性的相互关系进行预测及统计推断，设计的贝叶斯网络模型如图 3 所示，形式化描述为 $G=(N, R)$，

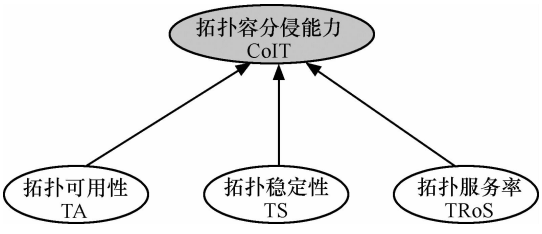


图 3 拓扑容侵能力评估的贝叶斯网络模型

N 代表图 G 中 4 个节点的集合，R 代表推理图中相邻 2 个节点间依赖关系的集合。

拓扑容侵能力 CoIT 可通过拓扑可用性 TA、稳定性 TS 和服务率 TRoS 及它们与拓扑容侵能力的关系来深入度量。根据先验知识，假设 TA、TS 和 TRoS 在描述拓扑容侵能力 CoIT 时可信的概率分别为 $P(\theta_{\mathrm{TA}})$、$P(\theta_{\mathrm{TS}})$和 $P(\theta_{\mathrm{TRoS}})$，这 3 个值可通过评估过程中获得的信息进行后验分析加以不断改进，使它们逼近真实值。根据定义 3、定义 4 和定义 5，这 3 个指标分别从不同角度刻画拓扑容侵能力，它们在描述容侵能力这一事件的样本空间上互不相容，构成一个划分；同时，以概率 $P(CoIT)$来描述拓扑容侵能力的强弱(1 最强，0 最弱)。基于贝叶斯网络推理规则，CoIT 与 TA、TS 和 TRoS 3 个指标的关系可通过图 3 节点之间的连接关系来形式化描述。在拓扑可用性以先验概率 $P(\theta_{\mathrm{TA}})$可信的前提下，它导致拓扑容侵能力以条件概率 $P(CoIT|\theta_{\mathrm{TA}})$发生(该值反映了从拓扑可用的角度表示容侵能力的强弱，可由前述的 DTMC 计算得到，即 P_{TA})。由全概率公式得：

$$\begin{aligned} P(CoIT)&=P(\theta_{\mathrm{TA}})P(CoIT\mid\theta_{\mathrm{TA}})+ \\ &P(\theta_{\mathrm{TS}})P(CoIT\mid\theta_{\mathrm{TS}})+P(\theta_{\mathrm{TRsS}})P(CoIT\mid\theta_{\mathrm{TRoS}}) \end{aligned} \tag{21}$$

式(21)表示在已知 3 个拓扑容侵能力衡量指标的可信概率下，利用 3 个指标所反映容侵能力的当前值，综合评判得出拓扑容侵能力的强弱，刻画了 3 个指标与综合值之间的关系。

此时，对 TA 有以下条件概率公式成立：

$$P(\theta_{\mathrm{TA}}\mid CoIT)=\frac{P(\theta_{\mathrm{TA}})P(CoIT\mid\theta_{\mathrm{TA}})}{P(CoIT)} \tag{22}$$

同理，对稳定性和服务率有类似的分析。

4 拓扑容侵能力分析与评价

4.1 模型工作参数

不失一般性，选取 p_I 和 h_N 参数分析其对不同指标和拓扑容侵能力的影响。

1) 状态迁移概率

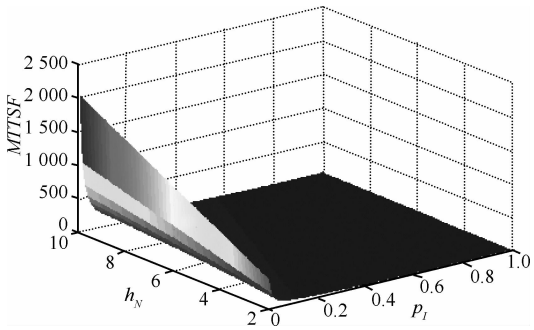
在图 2 描述的 DTMC 模型中，P_G 是拓扑构建模块从状态 I 进入优雅降级状态 GD 的概率，以实现拓扑功能的核心服务，不妨设 P_G=0.2。在 I 状态下，未能检测到恶意节点的入侵概率是 P_U，其值设为 0.2，该状态下容侵模块完全不可操控而进入失败状态 F 的概率较小，设 P_F=0.1。

2) 状态平均逗留时间

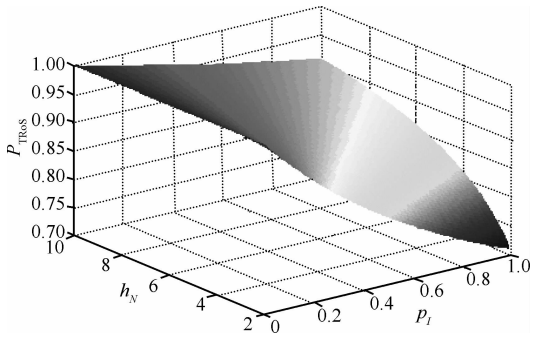
设时间单位是 1，在脆弱状态下，入侵者发现漏洞、拓扑构建模块遭受入侵的平均时间 h_S=0.2，容侵模块在入侵状态下进行多种控制决策的平均时间 h_I=0.4。在容侵策略失败时，系统恢复到正常状态所需的平均时间 h_F=0.7，同理，设在降级状态下的平均持续时间 h_G=2，入侵成功时，未能检测到入侵的平均时间 h_U=3。

4.2　拓扑容侵能力的参数敏感性

如图 4(a)所示，平均安全故障时间 *MTTSF* 随参数 p_I 变化明显，当 p_I 超过一定阈值时，*MTTSF* 表示的拓扑安全绝对时间显著减少，在较低的 p_I 取值时，*MTTSF* 随 h_N 线性增长。因此，为提高容侵拓扑模块一次工作的有效时间，应确保较低的 p_I 取值，即需要增强拓扑容侵模块的防护强度。图 4(b)描述了拓扑服务率随 h_N 递增和随 p_I 递减的趋势。当 p_I 和 h_N 取值都较大时，尽管有较高的拓扑服务率，但是绝对服务时间非常短，所以，在较高的拓扑服务率下，拓扑构建模块的容侵能力可能呈现出某种振荡特性，此时需要较多的外部干预。



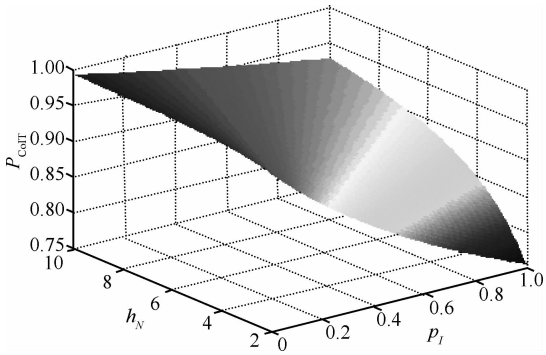
(a) 平均安全故障时间随 h_N 和 p_I 的变化趋势



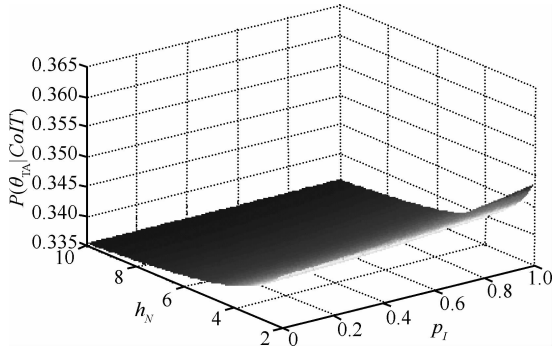
(b) 拓扑服务率随 h_N 和 p_I 的变化趋势

图 4　平均安全故障时间和拓扑服务率随 h_N 和 p_I 的变化趋势

图 5(a)给出了拓扑容侵能力 P_{CoIT} 随 h_N 递增，而随 p_I 递减的函数变化趋势。由图 5(a)可知，为了提高容侵拓扑模块的容侵能力，在给定工作参数下，必须增加在状态 *N* 的 h_N 和减少进入入侵状态 *I* 的概率 p_I 来保证。图 5(b)给出了拓扑可用性的后验概率可信度 $P(\theta_{\mathrm{TA}}|CoIT)$ 随 p_I 递增和随 h_N 递减的趋势，说明如果希望增加可用性在衡量拓扑容侵能力中的权重，可通过提高进入入侵状态 *I* 的概率 p_I 的值或减少处于正常状态 *N* 的平均逗留时间 h_N 实现。



(a) 拓扑容侵能力随 h_N 和 p_I 的变化趋势



(b) 拓扑可用性的后验可信率随 h_N 和 p_I 的变化趋势

图 5　拓扑容侵能力和拓扑可用性的后验概率随 h_N 和 p_I 的变化趋势

4.3　拓扑容侵实例剖析及模型验证

本节对 LEACH[11]和 ASCENT[12]2 个实际的拓扑构建机制进行容侵能力分析，以评估模型的有效性。

4.3.1　Sybil 攻击的模型评估能力分析

Sybil 攻击时，恶意节点会伪造多个节点身份，从而削弱原有的节点冗余作用和破坏拓扑构建进程。在 LEACH 成簇过程中，Sybil 攻击能在一定范围内影响网络的分簇，恶意节点自身和伪造的虚假节点都可自选为簇头，从而控制住整个簇，导致以恶意节点为中心的一定规模区域内合法节点的拓扑割裂。然而，ASCENT 算法从概率的角度，以每个节点维持一定的邻居节点个数(连通度)来保证拓扑连通，通过链路质量来判断各节点的邻居关系。ASCENT 算法能够较好地屏蔽 Sybil 攻击带来的不良影响，如果恶意节点和伪造节点不断地丢弃邻居节点的数据包，邻居节点必然在一定时间后识别出

这种攻击，从而发出 HELP 包启动邻居节点的加入工作，维持拓扑连通。初步的单簇实验证实了 Sybil 攻击下 ASCENT 比 LEACH 有更强的适应性，前者的容侵能力优于后者。

在评估模型中，由上述分析，ASCENT 进入入侵状态的概率 p_I 值要小于 LEACH 中的值，而正常态的逗留时间 h_N 前者大于后者。不失一般性，取 ASCENT 和 LEACH 状态转换模型的 p_I 分别为 0.1 和 0.4，h_N 分别为 13 和 2，其余参数仍然利用 4.1 节中的设置，得到的量化结果如图 6 所示。由图 6 可见，针对 Sybil 攻击，ASCENT 在各个方面的拓扑容侵能力均优于 LEACH，特别是拓扑服务率显著优于 LEACH，2 个算法的定量比较结果与上述分析结果一致，验证了拓扑容侵能力量化评估模型的有效性。

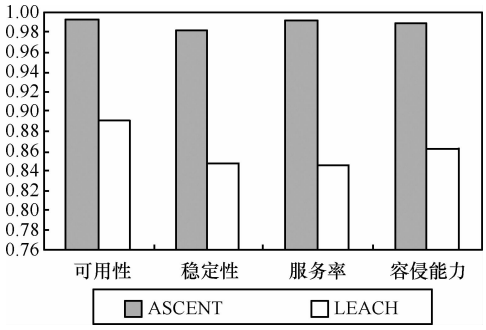


图 6 Sybil 攻击的 ASCENT 与 LEACH 容侵比较

4.3.2 Hello 攻击的模型评估能力分析

针对 LEACH 发起 Hello 攻击的恶意节点会使用大功率无线设备广播 Hello 包，使得较大区域内的节点以较强的功率接收到该信息，都错误地加入以恶意节点为簇头的簇内，导致网络拓扑割裂。事实上，此时发生了链路非对称情况，部分节点的信号不可能到达恶意簇头。可见，LEACH 协议对 Hello 攻击的容忍能力很差，极端情况拓扑完全割裂，整个网络不可用。ASCENT 算法在 Hello 洪泛攻击威胁下，根据链路质量，节点 i 会错误地认为恶意节点是其一个合法邻居，降低了合法邻居个数，减弱了拓扑连通的服务能力。然而，这种影响是有限的，节点 i 仍然有 k–1 个合法邻居(k 为从概率角度保持的邻节点个数)，仍然可以保持较好的连通性，对 Hello 攻击具有较强的容忍能力，初步测试验证了这一点。

在 ASCENT 和 LEACH 的拓扑容侵定量评估模型中参数 p_I 分别取为 0.1 和 0.4，h_N 分别为 10 和 6，其余参数同 Sybil 分析，得到的定量比较结果如图 7 所示。针对 Hello 洪泛攻击，ASCENT 在各方面均优于 LEACH 算法，量化比较结果与上述分析一致，验证了评估模型的有效性。

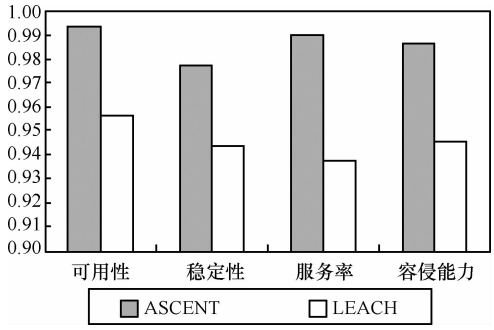


图 7 Hello 洪泛的 ASCENT 与 LEACH 容侵比较

5 相关工作比较分析

近年来，系统安全的定量评估开始受到研究人员的重视，本节针对采用不同评估技术的相关文献进行比较分析，表 1 给出了这些相关工作异同的对比。

Jonsson 等[13]提出了一个基于攻击者行为的入侵定量分析模型，描述了入侵行为的 3 个阶段。鉴于入侵者之间攻击能力存在巨大差异，该模型定量评估每个攻击者的入侵能力十分困难。Albert 等[6]针对复杂有线网络结构，用统计的方法分析了什么样的拓扑结构具有较高的容忍攻击能力。在基于 SMP 的安全系统定量评估研究中，较有影响的是 Madana[8]提出的安全属性定量分析模型，该模型是一个通用模型，直接应用到拓扑容侵的定量评估中存在较多困难，且中间状态显得过于冗余，求解复杂。殷丽华等[14]提出了一个优化的容忍入侵系统状态转移模型，建立 SMP 模型并对容侵系统安全属性进行定量分析。罗安安等[15]提出了一种针对 TNC 协议的基于半马尔可夫过程的评估模型，对可信网络连接的安全性进行量化分析。针对容侵系统的安全态势，秦华旺等[16]提出了一种基于入侵影响的评估方法，给出了数据机密度、完整度和可用度 3 个指标，得出了系统的安全态势，然而，该模型过于简单，不能准确描述系统的安全状态。WANG 等[3]建立了传感器网络拓扑容侵能力的数学模型，对拓扑容侵能力进行了分析，但并未给出具体的容侵能力衡量指标。

本文将 Madana[8]中基于 SMP 的建模方法用于研究 WSN 的拓扑容侵定量评估，提出了一个容侵

表 1　　**相关工作比较**

相关工作	设计思想	讨论对象	研究方法	复杂性	描述能力	评估指标	容忍能力与指标的关系
Jonsson[13]	攻击和阻止的概念框架	入侵过程	经验推导	较低	较强	无	未考虑
Albert[6]	可用连接数	有线网络	统计方法	较高	强	无	未考虑
Madana[8]		软件系统				可用性、MTTSF	
Yin[14]	SMP	容侵系统	概率方法	高	较强	可用性、MTTSF 和可执行性	未考虑
Luo[15]		可信网络连接				TNC 的认证性、机密性、完整性	
Qin[16]	攻击影响	容侵系统	理论推导	低	弱	数据机密度、完整度、可用度	考虑
Wang[3]	可用节点数	WSN 拓扑容忍模块	理论推导	较低	一般	无	未考虑
The Paper	SMP 和 Bayes 推理	WSN 拓扑容侵模块	概率方法	较高	强	拓扑稳定性、可用性、服务率	考虑

拓扑构建的状态转移描述模型；同时，针对传感器网络节点资源受限的不足，精简中间状态，降低了节点资源开销，利于延长网络寿命。从 SMP 模型中抽象出 3 个容侵能力衡量指标，再通过 Bayes 推理网络综合得出拓扑容侵能力，从而提高了模型描述能力。

6　结束语

针对入侵行为影响，本文提出了拓扑容侵定量评估模型，以量化、分析拓扑的容侵能力。该模型采用半马尔可夫过程将拓扑构建过程划分为 6 个状态，避免了对不同入侵威胁进行描述建模的复杂性，在入侵结果这个统一的层次上建模，简化了模型设计。利用内嵌 DTMC 模型求解容侵能力的各项指标，得出拓扑可用性、稳定性和服务率 3 个属性。通过贝叶斯推理网络，以新的样本值为后验信息，综合得出拓扑容侵能力；同时，不断改进 3 个属性对整个拓扑容侵能力的贡献权重，从而提高容侵能力评估的准确性，便于传感器网络拓扑的重新配置。

仿真实验分析了评估模型对不同参数的敏感性，从而获得拓扑容侵技术的关键点，为选取合理的容侵拓扑更新机制提供了理论支持。对 LEACH 和 ASCNT 2 个拓扑构建算法进行了容侵能力剖析，验证了评估模型的有效性。下一步将研究具体的入侵检测模型，抽象出不同入侵行为对容侵模块的统一影响，从而准确提供模型工作参数。

参考文献：

[1] MOHSEN R, MOHAMMADTAGHI H, VAHAB S M. Fault-tolerant and 3-dimensional distributed topology control algorithms in wireless multi-hop networks[J]. Wireless Networks, 2006, 12: 179-188.

[2] JORGIC M, GOEL N, KALAICHEVAN K, *et al*. Localized detection of k-connectivity in wireless ad hoc actuator and sensor networks[A]. Proc of the 16th IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN07)[C]. Hawaii, 2007.33-38.

[3] 王良民, 马建峰, 王超. 无线传感器网络拓扑的容错度与容侵度[J]. 电子学报, 2006,34(8):1446-1451.
WANG L M, MA J F, WANG C. Degree of fault-tolerance and intrusion-tolerance for topologies of wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(8): 1446-1451.

[4] MA R, XING L, MICHEL H E. Fault-intrusion tolerant techniques in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC'06) [C]. Indianapolis, 2006. 85-94.

[5] 王良民, 马建峰. 基于再生技术的无线传感器网络容侵拓扑控制方法[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(10): 1678-1685.
WANG L M, MA J F. Self-regeneration based method for topology control with intrusion tolerance in wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(10): 1678-1685.

[6] ALBERT R, JEONG H, BARABASI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406(27): 378-382.

[7] 裴庆祺, 沈玉龙, 马建峰. 无线传感器网络安全技术综述[J]. 通信学报, 2007, 28(8): 113-122.
PEI Q Q, SHEN Y L, MA J F. Survey of wireless sensor network security techniques[J]. Journal on Communications, 2007, 28(8): 113-122.

[8] MADANA B B, POPSTOJANOVA K G, VAIDYANATHAN K, *et al*. A method for modeling and quantifying the security attributes of intrusion tolerant systems[J]. Performance Evaluation, 2004, 56(1~4): 167-186.

[9] TRIVEDI K S. Probability and Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications[M]. New York: Wiley Press, 2001.

[10] 刘东, 张春元, 邢维艳等. 基于贝叶斯网络的多阶段系统可靠性分析模型[J]. 计算机学报, 2008,31(10):1814-1825.
LIU D, ZHANG C Y, XING W Y, *et al*. Bayes networks based reliability analysis of phased-mission systems[J]. Chinese Journal of Computers, 2008,31(10): 1814-1825.

[11] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor

networks[A]. Proc of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf on System Sciences[C]. Hawaii, USA, 2000. 3005- 3014.

[12] CERPA A, ESTRIN D. ASCENT: adaptive self-configuring sensor networks topologies[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(3): 272-285.

[13] JONSSON E, OLOVSSON T. A quantitative model of the security intrusion process based on attacker behavior[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1997, 23 (4) : 235-245.

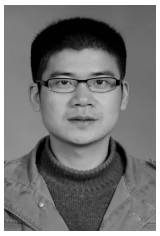
[14] 殷丽华,方滨兴. 入侵容忍系统安全属性分析[J]. 计算机学报,2006,29(8):1505-1512.
YIN L H, FANG B X. Security attributes analysis for intrusion tolerant systems[J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(8): 1505-1512.

[15] 罗安安, 林闯, 王元卓等. 可信网络连接的安全量化分析与协议改进[J]. 计算机学报, 2009,32(5): 887-898.
LUO A A, LIN C, WANG Y Z, *et al*. Security quantifying method and enhanced mechanisms of TNC[J]. Chinese Journal of Computers, 2009,32(5): 887-898.

[16] 秦华旺,戴跃伟,王执铨. 入侵容忍系统的安全态势评估[J]. 北京邮电大学学报, 2009,32(2):57-61.
QIN H W, DAI Y W, WANG Z Q. Security situation evaluation of intrusion tolerant system[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009, 32(2): 57-61.

作者简介：

熊书明（1974-），男，江苏泰兴人，江苏大学博士生，主要研究方向为安全无线传感器网络和性能评估。



王良民（1977-），男，安徽潜山人，博士后，江苏大学副教授，主要研究方向为安全无线传感器网络、容忍入侵理论与方法等。

詹永照（1962-），男，福建尤溪人，博士，江苏大学教授、博士生导师，主要研究方向为分布式计算和无线网络。

（上接第 23 页）

XIAO L Z, SHAO Z Q, MA H H, *et al*. An algorithm for automatic clustering number determination in networks intrusion detection[J]. Journal of Software, 2008, 19(8):2140-2148.

[12] GUHA S, RASTOGI R, SHIM S. CURE: an efficient clustering algorithm for large databases[A]. Proceedings of the 1998 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data[C]. New York, 1998. 73-84.

[13] 张红云, 刘向东, 段晓东等. 数据挖掘中聚类算法比较研究[J]. 计算机应用与软件. 2002,(2): 5-6,77.
ZHANG H Y, LIU X D, DUAN X D, *et al*. The comparison of clustering methods in data mining[J]. Computer Applications and Software, 2002,(2): 5-6,77.

[14] HAN J, KAMBER M. 数据挖掘: 概念与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
HAN J, KAMBER M. Data Mining: Concepts and Techniques[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

作者简介：

周亚建（1971-），男，陕西柞水人，北京邮电大学讲师，主要研究方向为移动通信、信息安全等。

徐晨（1984-），男，江苏泰州人，河海大学硕士生，主要研究方向为网络安全。

李继国（1970-），男，黑龙江富裕人，博士，河海大学教授、博士生导师，主要研究方向为信息安全、密码学理论与技术。