

基于QoS关联分析的分布式系统可生存性评估

张勇实, 张乐君, 张健沛, 杨静, 国林, 夏磊

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

【摘要】可生存性分析技术的研究成果中缺少对运行系统进行在线、实时评估的方法,而分布式系统的规模逐渐增加使得传统的基于数学模型的方法无法应用。该文首先分析了服务质量(QoS)是系统生存性能力的外在表现形式;其次,提出基于服务质量属性关联分析的分布式系统可生存性层次化评估模型;再给出了QoS之间关联性的计算方法以及对关键属性及分布式系统可生存性的量化评估方法;最后,在实验环境中考察了3种关键服务的一周生存性评估情况,以及攻击时系统可生存性的变化情况,并与其他算法进行了对比分析。

关键词 关联分析; 分布式计算机系统; 评估模型; 服务质量; 可生存性

中图分类号 TP393

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.01.023

Distributed System Survivability Evaluation Based on the Correlations Analysis of QoS

ZHANG Yong-shi, ZHANG Le-jun, ZHANG Jian-pei, YANG Jing, GUO Lin, and XIA Lei

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University Harbin 150001)

Abstract Quality of service (QoS) as the manifestation of system viability is analyzed in this paper. A hierarchical evaluation model for the distributed system survivability based on the attributes association analysis of QoS is proposed. The calculation method for the correlations of QoS and the quantifiable evolution method for key attributes and distributed system survivability are given. The evaluating situation of survivability of three kinds of key services during one week is observed and studied by experiments. The comparative analysis with other algorithms is also presented.

Key words correlation analysis; distribution computer system; evaluation model; quality of service; survivability

随着网络规模的不断扩大、用户需求的不断膨胀和新服务的不断增加,分布式系统得到了广泛的应用。分布式系统的特点给系统的设计、实现、评估、操作和安全维护都带来了不利因素。如何确保分布式系统的安全性,成为当前亟待解决的问题。文献[1]提出可生存性,是指系统提供基本服务的能力,即系统在面临攻击、失效和偶然事件的情况下仍然可以按照需求及时完成任务的能力^[2]。

国内外对系统生存性评估的研究已有了一定的发展,其中SEI的CERT/CC的SNA(survivable network analysis)^[3-4]方法是一个常用的生存性评估方法,该方法为生存性分析提供了一套可行的思路和可供参照的实践经验,但该方法仅仅提供了一种生存性评估的粗略框架和定性分析,并未给出分析的详尽技术手段,也未给出生存性的具体量化指标。文献[5]

对SNA方法进行改进并提出了一种生存性评估的系统方法,另外还有部分学者对利用图、有限状态机等对系统的生存性能进行理论上的建模。国内的研究人员也对可生存性的定义^[6]、可生存性分析^[7]及可生存性增强^[8]等方面进行了探索。

1 相关工作

对可生存性技术研究的典型方法和成果如文献[6],该文通过将网络系统简化为数据流图,并根据数据流图的连通性对系统生存性进行了分析。文献[9]提出FSQ框架对复杂系统进行生存性建模,通过利用流、服务和质量属性3个方面的描述评估和管理系统生存性。文献[10]对SNA中的3R模型进行研究,通过考察系统面临攻击时提供服务的能力获得生存性图,为提高系统生存性、抵御攻击提供依据。

收稿日期: 2011-04-25; 修回日期: 2012-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(61073043, 61073041, 61100008); 黑龙江省自然科学基金(F200901, F201023); 高等学校博士学科点专项科研基金(20112304110011); 中央高校基本科研业务费专项资金(HEUCF061002)

作者简介: 张勇实(1983-), 男, 博士生, 主要从事数据与知识工程、数据挖掘等方面的研究。

由于分布式系统复杂性和规模的增加,对系统中QoS属性相关性信息研究在对系统进行分析和管理变得很重要。国内外的学者已经对建立服务请求失败关联性模型^[11]和服务器响应时间关联性模型^[12]进行了研究。分布式系统中被QoS属性的关联性正在研究中,现有的研究在这方面做了一些尝试^[13-14]。文献[15]提出了一种根据攻击前、中、后3个阶段的QoS变化对可生存性进行量化评估的方法,但该方法忽略了QoS属性之间的关系,所以该方法只能应用在系统测试的实验环境中,而无法在分布式系统运行时进行评估。

本文在已有研究结果的基础上,提出基于QoS属性关联分析的分布式系统可生存性层次化评估模型;其次,考虑分布式系统关键服务之间的关联性,给出了QoS之间关联性的计算方法以及对关键属性及分布式系统可生存性的量化评估方法;最后,通过实验对本文提出的方法进行了验证。

2 分布式系统生存性层次化评估模型

2.1 相关定义

为了更好地描述本文所介绍的评估模型,首先给出以下几个定义:

定义 1 分布式系统提供的服务集合为一个二元组, $S = \{S_E, S_N\}$, 其中, $S_E = \{s_{E1}, s_{E2}, \dots, s_{En}\}$ 为关键服务, $S_N = \{s_{N1}, s_{N2}, \dots, s_{Nm}\}$ 为非关键服务。关键服务是系统在遭受攻击等突发事件的情况下,仍必须提供的服务。

定义 2 关键服务质量属性集合是包含所有评价系统中关键服务 S_E 的 QoS 集合, 记为: $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_o\}$ 。其中, o 代表 QoS 属性的种类。

定义 3 每个关键服务所关注的 QoS 属性, 表示为 $Q^{S_i} = \{q_A^i\}$, 其中, $A \subseteq \{1, 2, \dots, p\}$, q_A^i 表示服务 S 关注的 1 号服务质量测度。

分布式系统可生存性是指系统提供关键服务的能力,是系统应对潜在攻击、故障、灾难等事件的能力,因此这种能力的外在表现形式为关键服务运行期间的服务质量,但单纯的服务质量变化并不能够说明系统生存能力发生了变化(在下面的实例中说明),因此本文给出的分布式系统可生存性定义为:

定义 4 分布式系统可生存性是保证关键服务的服务质量属性关系维持在正常范围内的能力,关键服务集合 S_E 所包含 QoS 属性集合为 Q^{S_E} , 因此本文将分布式系统的可生存性用集合 Q^{S_E} 中 QoS 测度的关联度发生变化情况(适应度)进行描述。

2.2 分布式系统可生存性层次化评估模型

采用层次化方法将可生存性量化任务分解为 3 个层次,通过计算各关键服务的服务质量属性关系的适应度(可生存属性),最终归结出系统的可生存性。第一层为分布式系统整体可生存性;第二层为关键服务可生存性;第三层为基本服务的服务质量属性之间的关联关系。各层之间通过多种依赖关系描述,定义 W 是影响系统中基本服务的重要程度; E 是基本服务所关注的服务质量重要度,如图 1 所示。

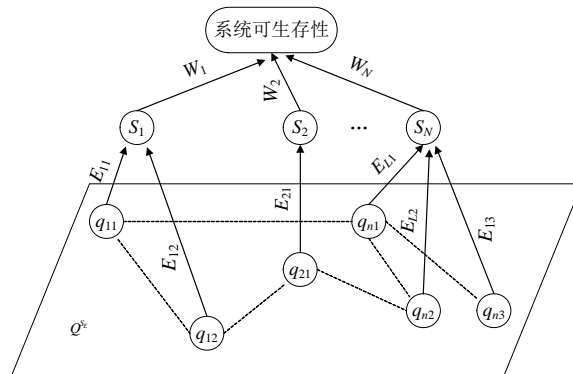


图1 分布式系统可生存性层次化评估模型

分布式系统的生存性是由关键服务的可生存性计算而得,因此系统生存性计算公式为:

$$SUR_t = \sum_{i=1}^k W^i \times sur_t^i \quad (1)$$

式中, sur_t^i 代表 t 时刻服务 i 的可生存性; W^i 代表第 i 个关键服务的权重。服务可生存性可通过分析服务质量的属性关联分析得到,假设服务 i 关注 j 个服务质量,那么服务 i 在 t 时刻的可生存性为:

$$sur_t^i = \sum_{j=1}^n E^j \times (1 - |R_t^j - R_{t-1}^j|) \quad (2)$$

式中, E^j 代表 QoS 属性 j 的重要度; R_t^j 代表 t 时刻第 j 个 QoS 属性的适应度; $|R_t^j - R_{t-1}^j|$ 代表第 j 个 QoS 属性的适应度在 $t-1 \sim t$ 时刻适应度的变化情况,当适应度发生变化时体现系统可能存在隐患,服务生存性指标降低, R_t^j 的具体计算方法将在下面介绍。

2.3 QoS属性的关系模型

由于分布式系统中所处理业务具有流程相关性,这必然使各计算机的 QoS 属性满足一定的关联关系,而这种关系可以通过对 QoS 属性的历史数据分析得到。如在 Web 网站服务流程中,主机 A 是 Web 服务器,主机 B 是数据库服务器, A 向 B 发出的数据查询请求需要得到 B 的响应,那么主机 A 的数据流出量与主机 B 的数据流入量、CPU 利用率及内存使用率都存在着一一定的关联关系。因此,本文首先介绍一对 QoS 属性的关联度计算方法,进而可以扩展到 Q^{S_E}

集合中。

在时刻 t , 将两个QoS属性 q_1 、 q_2 的值看做是一个二维特征向量 $x_t = (q_1, q_2)$, 那么首先要建立一个描述数据 x_1, x_2, \dots, x_t 相关性的模型 M , 假设 x 取自一个二维有限数值空间, 为了规避不同QoS属性的区别, 将该空间分割为若干个非重叠的矩形单元网格, 所有这些非重叠矩形单元的集合形成一个网格结构 $G = (c_1, c_2, \dots, c_p)$ 。在 G 的基础上, 定义拥有新的观测值 x_{t+1} 的概率。为了简化问题, 根据马尔科夫形式, 假设 $t+1$ 时刻的观测值仅仅依靠当前的值而不依靠任何过去的值, 得到 $P(x_{t+1} | x_t, \dots, x_1) = P(x_{t+1} | x_t)$ 。假设 $x_{t+1} \in c_j$ 且 $x_t \in c_i$, 那么利用当 x_t 属于单元 c_i 时 x_{t+1} 落在单元 c_j 内的概率 $P(x_{t+1} \in c_j | x_t \in c_i)$ 近似 $P(x_{t+1} | x_t)$, 因为 c_i 和 c_j 取自网格单元集合 $G = (c_1, c_2, \dots, c_p)$, 所以定义一个 $p \times p$ 维的矩阵 V , 其中 $V_{ij} = P(x_{t+1} \in c_j | x_t \in c_i)$ 。矩阵 V 的第 i ($1 \leq i \leq p$) 列定义为一个从 c_i 到网格中任意一个单元转变的离散概率分布, 那么有 $\sum_{j=1}^p P(x_{t+1} \in c_j | x_t \in c_i) = 1$ 。

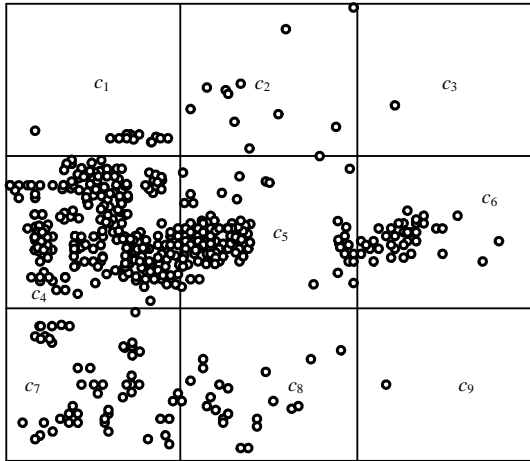


图2 网格结构示意图

表1 转移概率矩阵示意表 单位: %

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
c_1	21.67	13.23	9.45	13.25	11.01	7.55	9.76	7.44	6.64
c_2	13.20	20.87	13.19	10.02	13.11	10.02	6.32	6.95	6.32
c_3	9.45	13.23	22.98	7.33	11.03	13.56	5.51	7.29	9.62
c_4	13.16	9.83	6.59	19.72	13.16	7.90	13.16	9.83	6.65
c_5	8.63	12.02	8.63	12.02	17.40	12.02	8.63	12.02	8.63
c_6	6.65	9.83	13.16	7.90	13.16	19.72	6.59	9.83	13.16
c_7	9.62	7.29	5.51	13.56	11.03	7.33	22.98	13.23	9.45
c_8	6.32	6.95	6.32	10.02	13.11	10.02	13.19	20.87	13.20
c_9	6.64	7.44	9.76	7.55	11.01	13.25	9.45	13.23	21.67

如图2所示, 特征空间被分割为9个网格, 生成的矩阵 V 如表1所示。假设 x_t 包含在网格 c_2 , 考虑 $P(x_{t+1} | x_t)$ 的离散概率分布通过矩阵 V 中的第2行来

描述, 正如图2所显示的, 当 x_t 时刻的位置为 c_2 时, c_j 上概率越高意味着 x_{t+1} 更有可能落在 c_j 中。

3 QoS属性的关联模型计算

3.1 网格生成方法

由于QoS属性的数据是具有时序性的, 因此在历史数据 $\{x_t\}_{t=1}^n$ 的基础上, 力求设计一个被网格单元 (c_1, c_2, \dots, c_p) 定义的结构。为了能够保证相似的数据能够被分配到同一个网格中, 首先取一个维度上的上下限构成一个区间, 然后将该区间分割为单位长度的大小, 并计算落入每个单元内点的数量Num, 如果Num对于一个阈值 β 是相似的, 则合并临近的单元格, 对每一维度都采用上面的过程并通过两维的交叉间隔获得所有的网格。在更新过程中, 大部分情况下一个新的观测值 x_{t+1} 落入网格结构 G 定义的其中一个网格中, 然而 x_{t+1} 也可能超出这个范围(上限为 u)。由于观测数据通常是逐渐变化的, 因此当 x_{t+1} 与网格的边界足够接近才进行更新。首先需要计算历史数据中数据的平均间隔为 $D_{arg} = \sum_{i=1}^t (x_i - x_{i-1}) / t$, 其次判断 x_{t+1} 是否大于临界值, 即 $x_{t+1} \leq u + \lambda D_{arg}$ 。如果满足则更新网格结构; 如果不满足则认为出现了一个离异点。网格动态生成算法如下所述。

输入: 两个QoS属性历史数据集 $\{x_t^{k=1,2}\}_{t=1}^n$, 分布相似阈值 $\beta^{k=1,2}$, 边界参数 $\lambda^{k=1,2}$ 。

输出: QoS属性对的网格结构图

- 1) int $u[2] = \{0\}$; //历史数据上限
- 2) int $l[2] = \{0\}$; //历史数据下限
- 3) int $dtotal[2] = \{0\}$; //平均距离总和
- 4) int $darg[2] = \{0\}$; //平均间隔
- 5) for($k = 1; k \leq 2; k++$){
- 6) for($i = 1; i \leq n; i++$){
- 7) if($x_i^k > u$) $u[k-1] = x_i^k$; //计算最大值
- 8) if($x_i^k < l$) $l[k-1] = x_i^k$; //计算最小值
- 9) if($i > 1$) $dtotal[k-1] = |x_i^k - x_{i-1}^k| + dtotal[k-1]$; //计算总平均间隔
- 10) }//end for
- 11) $darg[k-1] = dtotal[k-1] / n - 1$;
- 12) divide the $u[k-1] - l[k-1]$ zone into small unites z_1, z_2, \dots, z_y ; //分割区间
- 13) for($i = 1; i < y; i++$){
- 14) if($|z_{i+1}^k - z_i^k| < \beta^k$) combine z_{i+1}^k and z_i^k
- 15) }//end for

```

16) }//end for
17) across the new zone and build the grid;
18) while(new data exists ){//新数据到达
19)   if( $u[k-1] < x_i^k \leq u[k-1] + \lambda \times \text{darg}[k-1]$ )
20)     {update grid;
21)     update  $\text{darg}[k-1]$ ;
22)     }
23) }//end while

```

历史数据初始化的网格结构示意图和在线更新的网格结构示意图如图3所示, 能够看到数据随着垂直轴进化, 因此, 两个间隔被增加来适应这些变化。

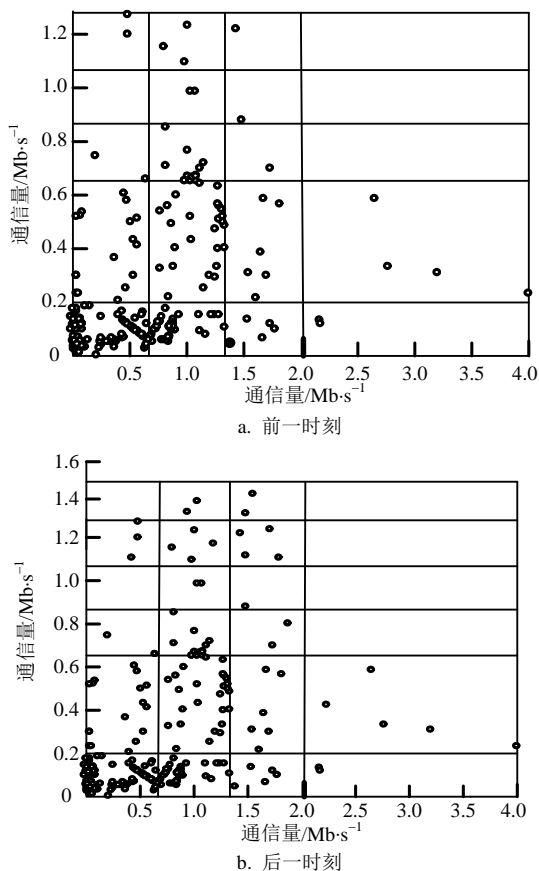


图3 在线更新的网格结构示意图

3.2 转化概率矩阵计算

本文使用贝叶斯理论计算这种概率转化过程, 为讨论方便, 用 $P(x_t \rightarrow x_{t+1})$ 表示 $P(x_{t+1} | x_t)$; 用 $P(c_i \rightarrow c_j)$ 表示 $P(x_{t+1} \in c_j | x_t \in c_i)$, 因此有 $P(c_i \rightarrow c_j | D) = P(D | c_i \rightarrow c_j) P(c_i \rightarrow c_j) / P(D)$ 。其中 D 是历史数据集, 由于本文目的是推导从 c_i 到 c_j 的概率, 与 $P(D)$ 是没有关联的, 因此将其忽略, 有:

$$P(c_i \rightarrow c_j | D) \propto P(c_i \rightarrow c_j) \prod_{t=1}^{n-1} P(x_t \rightarrow x_{t+1} | c_i \rightarrow c_j) \quad (3)$$

式中, n 是 D 的大小。在 D 中所有的数据被监测到之

后, 就能够得到后验的概率 $P(c_i \rightarrow c_j | D)$ 。

贝叶斯方法把 c_i 到 c_j 的转变看做是一个先验分布的随机变量。它反映了可能转变的知识。 $P(c_i \rightarrow c_j)$ 可以通过在对历史数据 D 中的统计分析得到。根据定义和约束:

$$\sum_{j=1}^p P(c_i \rightarrow c_j) = 1$$

从 c_i 到任何单元的转变先验概率均能够被计算。

下面需要计算 $P(x_t \rightarrow x_{t+1} | c_i \rightarrow c_j)$ 。如果 x_{t+1} 实际上落入 c_h , 就设置 $P(x_t \rightarrow x_{t+1} | c_i \rightarrow c_h)$ 为所有数据对中的最高值。同时, 由于空间接近趋势, c_i 到 c_h 近邻的进一步转化发生是很有可能。本文假设考虑网格距离的转换概率指数衰减并使用如下的更新规则:

$$P(x_t \rightarrow x_{t+1} | c_i \rightarrow c_j) \propto P(x_t \rightarrow x_{t+1} | c_i \rightarrow c_h) / e^{d(c_i, c_j)} \quad (4)$$

$x_{t+1} \in c_h, x_t \in c_i$

式中, $d(c_i, c_j)$ 是 c_i 到 c_j 的距离; e 为概率衰减比例。

因此得到:

$$P(c_i \rightarrow c_j | D) \propto P(x_t \rightarrow x_{t+1} | c_i \rightarrow c_h) \times P(c_i \rightarrow c_j) / e^{d(c_i, c_j)} \quad (5)$$

再根据约束 $\sum_{j=1}^p P(c_i \rightarrow c_j | D) = 1$ 就可以计算出

每一个 $P(c_i \rightarrow c_j | D)$, 构造出QoS属性的转化概率矩阵。

3.3 QoS属性关联度及适应度计算

由于本文为每两个QoS属性建立两两关联模型, 因此有 $o(o-1)/2$ 个模型来刻画模型中的所有关联。本文提出用关联度参数体现QoS属性之间关系, 用适应度参数反映QoS属性的运行情况。

1) QoS属性关联度计算。

在时刻 $t+1$ 的测量对有 q_a 和 q_b , 假设从时间1到 t 的监视数据的驱动更新模型为 $M_{t+1}^{a,b}$ 。 \mathbf{x} 表示包含来自 q_a 和 q_b 的测量值的二维特征向量。在 $t+1$ 时刻, 模型 $M_{t+1}^{a,b}$ 输出 c_i 到网格结构中任何单元 c_j 的转变概率。定义一个等级函数 $\partial(c_j) = \text{rank}(P(c_i \rightarrow c_j), P(c_i \rightarrow c_k))$, 其中 $k = 1, 2, \dots, p$, 其代表 $P(c_i \rightarrow c_j)$ 在矩阵 \mathbf{V} 的第 i 行的排序位置, 关联度定义为 $R_{t+1}^{a,b} = P_{M_{t+1}^{a,b}} - \partial_{M_{t+1}^{a,b}}(c_h) + 1 / P_{M_{t+1}^{a,b}}$, 其中 c_h 是 x_{t+1} 实际属于的单元, $P_{M_{t+1}^{a,b}}$ 是模型 $M_{t+1}^{a,b}$ 的网格单元数。离异点处在网格外面, 转变概率为零, 所以它们的关联度也为零。

表2给出了一个实例计算的关联度。假设 x_t 被包

含在 c_1 中并且 c_1 到其他网络的转变概率如表中第二行所示。如果 x_{t+1} 在单元 c_2 中, 首先根据转变概率排序, c_2 被排列在第3的位置, 那么计算关联度有 $\partial_{M_{t+1}^{a,b}}(c_h)=3$ 和 $P_{M_{t+1}^{a,b}}=9$, 因此结果是0.777。可以看出, 关联度模型 $M_{t+1}^{a,b}$ 在观测监视数据上的关联性。

表2 关联度计算示意表

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
c_1	21.67%	13.23%	9.45%	13.25%	11.01%	7.55%	9.76%	7.44%	6.64%
$\partial(c_j)$	1	3	6	2	4	7	5	8	9
$R_{t+1}^{a,b}$	1	0.777	0.444	0.888	0.666	0.333	0.555	0.222	0.111

2) QoS属性适应度计算。

对于一个QoS属性 $q_a (1 \leq a \leq p)$, 能够推断出 $o-1$ 个不同的模型, 每一个模型刻画 q_a 和 $q_b (b=1, \dots, a-1, a+1, \dots, o)$ 之间的关联性。在时刻 $t+1$, q_a 的适应度计算公式如下:

$$R_{t+1}^a = \sum_{b \neq a} R_{t+1}^{a,b} / (o-1) \tag{6}$$

式中, R_{t+1}^a 是建立在 q_a 和其他的QoS属性 q_b 上模型关联度的期望。

$R_{t+1}^{a,b}$ 仅仅评估两个QoS属性之间的关联模型(如图4中在“计算机A的连接处理数”和“计算机C的连接处理数”之间的链接), R_{t+1}^a 是 $R_{t+1}^{a,b}$ 的聚集, 如测量“计算机A的连接数”的关联值在它所有连接的QoS属性上被计算。这个进化模型能够在系统可生存性评估中提供不同粒度的数据分析。对于不重要级别的系统服务, 可以融合它们的适应度以致系统管理者能够为系统范围的生存性问题给出一个量化评分。如果平均分脱离正常状态, 管理者可以探究 R_{t+1}^a 甚至 $R_{t+1}^{a,b}$ 来定位系统错误发生的特定服务。当QoS属性数据能够被模型很好地描述, 就可以得到一个高的适应度值; 相反系统运行中的异常导致适应度下降。适应度降低表明QoS属性与其他属性之间发生了异常, 可生存性下降。因此本文根据所求的适应度参数 R_{t+1}^a 并利用式(1)和式(2)计算 $t+1$ 时刻关键服务的可生存性。

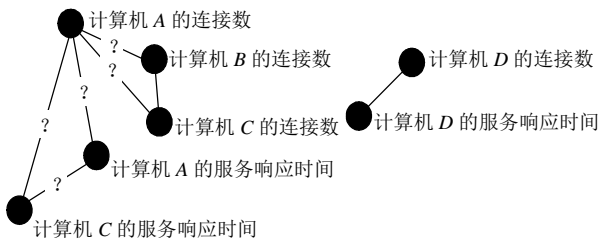


图4 QoS属性之间关联性分析示意图

4 实验与分析

本文选取了实验室环境中具有30个计算机节点的服务器集群, 对外提供3种不同的服务, 分别为DNS服务、WWW服务、FTP服务, 设置重要度向量为 $W = \{0.4, 0.3, 0.3\}$, 设置相同的QoS属性重要度, 并设定管理员感兴趣的QoS参数进行监测, 如服务响应时间、网络连接数、延迟抖动等。本文期望得到存在于同一台机器以及不同机器之间的QoS属性的关联度及关键服务的可生存性, 并最终分析系统的可生存性。选取一个月的监视数据作为训练集, 并以一周的数据作为测试集。

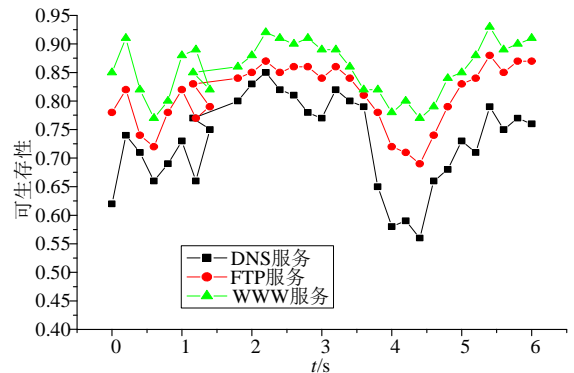


图5 DoS攻击时3种服务的可生存性变化状况

通过本文介绍的层次化评估模型, 计算攻击情况下3种服务的可生存性变化。图5描述了对系统中的DNS服务进行DoS攻击时(第4~6秒)3种服务可生存性的变化情况, 从图中可知, 在攻击发生时3种服务的生存性都有不同程度的下降, 以DNS服务下降得最为明显, 这是因为3种服务的关系模型发生了变化。采用文献[19]的生存性评估结果显示只有DNS服务可生存性下降了, 而其他两种服务并没有下降, 这显然是不合常理的。

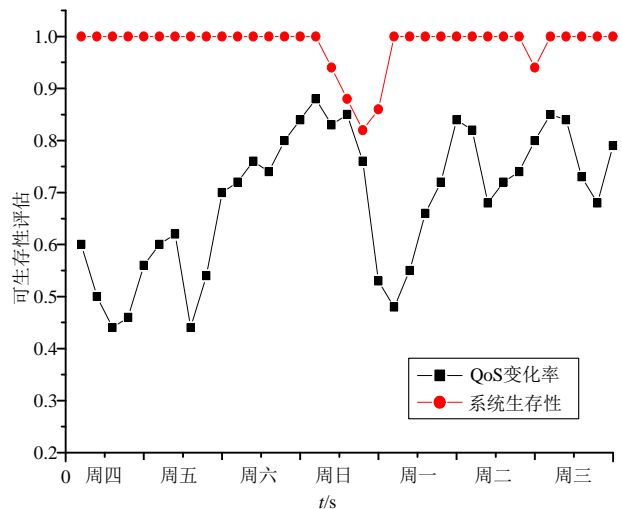


图6 一周系统可生存性评估情况图

本文使用一周的监视数据初始化模型,对一周时间内的数据进行评估。如图6所示,系统QoS属性值的变化具有周期模式。当用户访问不太活跃(包括周末)时,在时间段内系统QoS属性值变化不明显;在繁忙时,系统QoS属性变化比率增加。但是由于可生存性评估注重分析QoS属性的关系,在周三和周四的对比数据中仅仅是网络流量增加,因此生存性并未下降。综上所述,由于攻击数据和正常访问数据的分布模型不一样,因此本文提出的方法能够区分正常QoS属性变化和攻击导致的QoS变化情况。

5 结 论

分布式系统的规模逐渐增加使得传统的基于数学模型的生存性分析方法无法应用。本文的主要贡献是:1) 提出基于QoS属性关联分析的分布式系统可生存性层次化评估模型;2) 给出了QoS之间关联性的计算方法以及对关键属性及分布式系统可生存性的量化评估方法。该模型的优点是可以应用到各种规模的分布式系统中,并能够定位影响系统可生存性的关节点,给出多层次、多粒度的分析结果。下一步将重点研究基于服务质量网络关系划分的可生存性弱点分析,并进一步完善模型。

参 考 文 献

- [1] MEAD N R, ELLISON R, LINGER R C. Life-cycle models for survivable systems[C]//Proceedings of the 3rd Information Survivability Workshop(ISW-2000). Boston MA, USA: [s.n.], 2000, 24-26.
- [2] HOLLWAY B A, NEUMANN P G. Survivable computer-communication systems: The problem and working group recommendations[R]. Washington: US Army Research Laboratory, 1993.
- [3] MEAD N R, ELLISON R J, LINGER R C. Survivable network analysis method[R]. Pittsburgh, PA, USA: CMU, 2000.
- [4] ELLISON R J, LINGER R C, LONGSTAFF T. A case study in survivable network system analysis[R]. Pittsburgh, PA, USA: CMU, 1998.
- [5] JHA S, WING J, LINGER R, et al. Survivability analysis of network specifications[C]//International Conference on Dependable Systems and Networks. Pittsburgh, PA, USA: IEEE Press, 2000.
- [6] 包秀国, 胡铭曾, 张红丽, 等. 两种网络安全管理系统的生存性定量分析方法[J]. 通信学报, 2004, 25(9): 34-41.
- BAO Xiu-guo, HU Ming-zeng, ZHANG Hong-li, et al. Two survivability quantitative analysis methods for network security management systems[J]. Journal of China Institute of Communications, 2004, 25(9): 34-41.
- [7] 张乐君, 国林, 张冰, 等. 基于SPN的信息系统生存性分析建模研究[J]. 计算机研究与发展. 2009, 46(6): 1019-1027.
- ZHANG Le-jun, GUO Lin, ZHANG Bing, et al. Modeling of information system survivability analysis based on SPN[J]. Journal of Computer Research and Development. 2009, 46(6): 1019-1027.
- [8] ZHANG Le-jun, YANG Wu, WANG Wei, et al. A method to enhance service survivability based on autonomous configuration[C]//Proceedings of the 2nd International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences (IMSCCS' 07). [S.l.]: IEEE Press, 2007.
- [9] LINGER R, HEVNER A. Semantic foundations for survivable system analysis and design[C]//Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks. Goteberg, Sweden: [s.n.], 2001.
- [10] 高献伟, 林雪纲, 许榕生. 生存性分析方法中的3R量化分析方法[J]. 计算机仿真, 2004, 21(11): 125-128, 216.
- GAO Xian-wei, LIN Xue-gang, XU Rong-sheng. Quantifying of 3R in Survivable Network Analysis[J]. Computer Simulation. 2004, 21(11): 125-128, 216.
- [11] CHEN M Y, KICIMAN E, FRATKIN E. et al. Pinpoint: Problem determination in large, dynamic internet services[C]//Proceeding of DSN. California: IEEE Press, 2002: 595-604.
- [12] BAHL P, CHANDRA R, GREENBERG A, et al. Towards highly reliable enterprise network services via inference of multi-level dependencies[C]//SIGCOMM Comput Commun Rev. Kyoto, Japan: ACM, 2007.
- [13] JIANG G, CHEN H, YOSHIHIRA K. Discovering likely invariants of distributed transaction systems for autonomic system management[J]. Cluster Computing, 2006, 9(4): 385-399.
- [14] MUNAWAR M A, JIANG M, WARD P A S. Monitoring multitier clustered systems with invariant metric relationships[C]//Proceeding of SEAMS 2008. New York, Ny, USA: ACM, 2008: 73-80.
- [15] 张乐君, 王巍, 国林, 等. 网络信息系统生存性层次化分析模型研究[J]. 小型微型计算机系统. 2008, 29(6): 1117-1121.
- ZHANG Le-jun, WANG Wei, GUO Lin, et al. Research of network information system survivability hierarchy analysis model[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2008, 29(6): 1117-1121.

编辑 张俊