

## 网络虚拟化环境下的服务故障诊断算法<sup>\*</sup>

张顺利<sup>+</sup>, 邱雪松, 孟洛明

(网络与交换技术国家重点实验室(北京邮电大学), 北京 100876)

### Service Fault Diagnosis Algorithm in Network Virtualization Environment

ZHANG Shun-Li<sup>+</sup>, QIU Xue-Song, MENG Luo-Ming

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology (Beijing University of Posts and Telecommunications), Beijing 100876, China)

+ Corresponding author: E-mail: zhangshunli81@163.com

Zhang SL, Qiu XS, Meng LM. Service fault diagnosis algorithm in network virtualization environment. *Journal of Software*, 2012, 23(10): 2772-2782 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4171.htm>

**Abstract:** The virtual network provider (VNP) cannot diagnose all service faults of virtual networks, because the substrate network is transparent for VNP within the network virtualization environment. To solve this problem, the paper presents a service fault propagation model based on mapping relationships. In terms of the large fault set, the large symptom set, and noisy and dynamic environments, which result in the higher false positive rate and the longer running time of existing fault diagnosis algorithms, a service fault diagnosis algorithm based on inherent correlation among symptoms (SFDoIC), is proposed. Simulation results show that algorithm SFDoIC can solve the difficult problems in fault diagnosis that are caused by the transparency of the substrate network for VNP, effectively reducing the false positive rate and decreasing running time.

**Key words:** network virtualization; virtual network; substrate network; service fault diagnosis; symptom inherent correlation

**摘要:** 网络虚拟化环境下, 底层网络的透明性造成虚拟网提供商不能诊断所有的虚拟网服务故障. 为解决此问题, 提出了基于映射关系的虚拟网服务故障传播模型. 针对故障传播模型中故障集与症状集较大、网络环境动态和噪声大而导致的已有诊断算法误报率高、时间复杂度高的问题, 基于网络虚拟化环境下症状内在相关性特点, 提出了一种新的基于症状内在相关性的虚拟网服务故障诊断算法 SFDoIC(service fault diagnosis algorithm based on inherent correlation among symptoms). 仿真实验结果表明, SFDoIC 算法能够很好地解决底层网络透明性造成的虚拟网服务故障难以定位的问题. SFDoIC 算法可以有效地降低诊断算法的误报率, 显著缩短诊断算法的运行时间.

**关键词:** 网络虚拟化; 虚拟网; 底层网络; 服务故障诊断; 症状内在相关性

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

网络虚拟化是解决网络僵化问题的重要方法<sup>[1-3]</sup>. 在网络虚拟化环境下, 原来的网络提供商(network

\* 基金项目: 国家自然科学基金(60973108, 60902050, 61121061); 国家高技术研究发展计划(863)(2011AA05A116, 2011AA01A102); 国家教育部博士点基金(20110005110011)

收稿时间: 2011-02-24; 修改时间: 2011-11-02; 定稿时间: 2011-12-31

provider,简称 NP)被划分为底层网络提供商(substrate network provider,简称 SNP)和虚拟网络提供商(virtual network provider,简称 VNP).SNP 负责建设底层网络(substrate network,简称 SN),VNP 租用 SNP 的底层网络资源,建设虚拟网络(virtual network,简称 VN),为终端用户提供各种专业服务.网络虚拟化后,资源共享度提高使得故障传播模型变得更加复杂<sup>[2,3]</sup>,虚拟化、节点迁移、链路分割等技术使底层网络资源更容易被耗尽和互相干扰<sup>[4-7]</sup>,同时,也增加了虚拟网服务发生故障的概率.为了提高虚拟网服务的性能和可靠性,快速准确的故障诊断算法非常必要.

对于 VNP 来说,底层信息的透明性是网络虚拟化的一个显著特点.底层信息的透明性是指底层网络设备的运行情况、底层设备的先验故障概率、虚拟网设备与底层网络设备的映射关系等信息,对于 VNP 都是不可知的.底层网络的操作和管理、底层网络与虚拟网的映射信息维护等都是 SNP 的职责.VNP 只负责管理自己的虚拟设备和虚拟网上承载的服务.由于底层信息透明性这一特点,虚拟网服务故障诊断存在两个难题:

- (1) 由于底层网络对每个虚拟网是透明的,VNP 不可能诊断所有的故障.传统网络中,网络服务和网络设备都是被同一个管理者管理,网络设备的先验故障概率和条件概率都已知<sup>[8,9]</sup>.但在网络虚拟化环境下,虚拟网服务使用的资源与底层网络中的资源之间存在着复杂的映射关系<sup>[4-7]</sup>,底层网络对每个虚拟网是透明的.所以,当虚拟网上承载的服务出现故障时,VNP 不能准确诊断所有的故障,需要将不能诊断的症状信息发送给 SNP.SNP 根据自己接收到的症状信息进行故障诊断及故障修复;
- (2) 症状集包含的症状和故障集中包含的故障较多,故障诊断的时间复杂度较高.在传统网络中,一个网络上承载多个服务<sup>[8,9]</sup>.但在网络虚拟化环境下,一个底层网络上会同时映射多个虚拟网,每个虚拟网上又承载多个服务.所以,故障集合和症状集合的规模都呈指数倍增长,故障诊断花费的时间会较长.

为了解决上述两个难题,本文首先提出网络虚拟化环境下基于映射关系的服务故障传播模型,解决底层网络透明性造成的虚拟网服务故障难以定位的问题;其次,提出一种新的基于症状内在相关性的虚拟网服务故障诊断算法(service fault diagnosis algorithm based on inherent correlation among symptoms,简称 SFDoIC),以解决症状集包含的症状和故障集中包含的故障多、故障诊断的时间复杂度高的问题.

## 1 相关工作与本文贡献

网络虚拟化是一个比较新的研究领域<sup>[1-3]</sup>,当前研究主要集中在虚拟网映射算法方面<sup>[4-7]</sup>,虚拟网故障管理相关的研究文献较少.文献[10]使用路由器迁移技术解决网络故障问题,提出了能够实现快速迁移的路由器框架.文献[11]基于自主计算理论设计了每个网络节点的架构,使每个网络节点具有自主管理的能力,能够根据网络环境的变化采取优化措施,提高网络性能.文献[12]考虑到不同底层网络的异构性导致的虚拟网上端到端服务性能难以确定的问题,提出了端到端服务性能分析模型.但是,当前的研究并没有解决底层网络透明性造成的虚拟网服务故障难以定位的问题,也没有解决症状集包含的症状和故障集中包含的故障多、故障诊断的时间复杂度高的问题.为了更好地解决这两个问题,下面描述与本文相关的 Internet 和承载网中的服务故障诊断.

在 Internet 服务故障诊断方面,文献[8]分析了服务故障管理中存在的问题,提出分层故障管理模型,使用贝叶斯网作为各层的故障传播模型.针对网络的噪声和动态性特点,提出噪声的过滤算法和基于贝叶斯的故障诊断算法.为了解决大规模和有噪声环境下诊断时间复杂度高的问题,文献[9]提出了基于贝叶斯网络条件独立属性的探测集合选择算法.实验结果表明,提出的算法在不降低诊断性能的前提下,极大地减少了诊断时间开销.为了降低服务动态性对故障诊断算法性能造成的影响,文献[13]分析了互联网服务的动态性,提出了先验故障概率和故障传播模型的更新方法,获得了较好的诊断结果.为了降低文献[14]中诊断算法的时间复杂度,文献[15]基于文献[16]中提出的故障疑似度函数定义,提出了一种基于贝叶斯疑似度的启发式故障定位算法,诊断算法的时间复杂度减少为  $O(|F| \times |S|)$ .

关于承载网的故障诊断,也是一个新的研究热点(关于承载网和网络虚拟化的区别,可以参考文献[2,3]).文献[16]提出了承载网络环境下分层的故障传播模型,为了提高诊断效率,将被动诊断和主动探测相结合,提出了基于增量告警的故障诊断算法.为了克服网络规模庞大和精确定位故障难度较大的问题,文献[17]提出基于组

件的信任推理算法.文献[18]在文献[17]的基础上引入主动探测,提高了服务故障诊断的准确率,降低了误报率.

通过对相关文献的分析,考虑到症状的不准确性和网络环境的动态性更容易引起噪声的问题<sup>[2,4,10]</sup>,本文提出了分层的故障传播模型.由于当前存在的研究并不能解决网络虚拟化环境下底层信息的不可访问、故障集合和症状集合较大两个难题,本文做了下面几个方面的贡献:

- (1) 为了解决底层网络透明性造成的虚拟网服务故障难以定位的问题,提出了基于映射关系的服务故障传播模型.基于虚拟网映射关系,对服务故障传播模型进行了化简;
- (2) 为了解决症状集包含的症状和故障集中包含的故障较多、故障诊断的时间复杂度较高的问题,提出了基于症状内在相关性的故障集合过滤器算法.对文献[16]中提出的故障贡献度计算方法进行了改进,使其适应网络虚拟化环境.提出新的基于贡献度的启发式故障诊断子算法.基于症状内在相关性的故障集合过滤器算法和基于贡献度的启发式故障诊断子算法,共同构成了基于症状内在相关性的虚拟网服务故障诊断算法 SFDoIC;
- (3) 在仿真环境下,首先证明了 SFDoIC 算法能够很好地解决底层网络透明性造成的虚拟网服务故障难以定位的问题;其次,对本文提出的算法 SFDoIC 和传统算法 SFDoIC-no-Filter 进行了比较.实验结果表明,SFDoIC 算法可以有效地降低诊断算法的误报率,显著缩短诊断算法的诊断时间.

## 2 虚拟网服务故障诊断

### 2.1 故障传播模型

首先给出几个网络虚拟化环境下服务故障诊断使用的重要定义.

**定义 1(组件).** 每个组件都是系统中的元素,包括虚拟组件  $C^{VN}$  和底层组件  $C^{SN}$ .虚拟组件包括虚拟节点和虚拟链路.底层组件包括底层节点和底层链路.虚拟组件的资源由底层组件分配.

**定义 2(服务).** 由虚拟网络提供的、为满足终端用户一定需求的功能集合,例如在虚拟网上为用户提供的 IPTV 服务、网络游戏服务、端到端的语音通信服务等.一个服务由多个虚拟组件承载.不同的服务可能依赖相同的虚拟组件.本文主要研究端到端的虚拟网服务.

**定义 3(症状  $S$ ).** 服务运行时所表现出来的可观测信息.它是由被管网络上报给网管系统的信息.本文将服务的正常信息描述为正症状,服务的异常信息描述为负症状. $VN_i$  上服务  $j$  的症状表示为  $s_j^{VN_i} \in S^{VN_i}$ .

**定义 4(故障  $F$ ).** 每个组件在发生异常时,都会导致一个或者多个负症状发生.一个负症状的发生,一定是由于一个或者多个组件发生异常所导致的.当组件正常时,只与它相关的负症状不会发生.同样,当所有组件正常时,所有服务都正常运行,网管系统接收的都是正症状.所以,本文将每个组件描述为一个故障,并针对负症状,定位导致其发生的异常组件. $VN_i$  上的虚拟组件  $j$  的故障表示为  $f_j^{VN_i} \in F^{VN_i}$ .底层网络上底层组件  $i$  的故障表示为  $f_i^{SN} \in F^{SN}$ .虚拟节点和虚拟链路的先验故障概率表示为  $p(s_j^{VN_i})$ ,底层节点和底层链路的先验故障概率表示为  $p(f_i^{SN})$ .由于网络虚拟化后虚拟组件由底层组件提供,并且底层组件对于虚拟组件是透明的,所以,本文仅定义底层组件故障的先验概率取值范围为(0,1).

例如,在图 1 所示的虚拟网网络映射关系中,底层网络上承载了两个虚拟网,即  $VN_1, VN_2$ .假设  $VN_1$  上承载服务  $S_1^{VN_1}, S_2^{VN_1}$ ,  $VN_2$  上承载服务  $S_1^{VN_2}, S_2^{VN_2}$ .其中,  $S_1^{VN_1}$  提供端到端的服务  $a_1-b_1$ ;  $S_2^{VN_1}$  提供端到端的服务  $a_1-c_1-d_1$ ;  $S_1^{VN_2}$  提供端到端的服务  $a_2-e_2-d_2$ ;  $S_2^{VN_2}$  提供端到端的服务  $b_2-d_2-e_2$ .

**定义 5(故障传播模型).** 描述症状  $S$  和故障  $F$  二者之间关系的二分贝叶斯网络.其中,父节点表示故障  $F$ ;子节点表示症状  $S$ ;父节点和子节点之间的连线值表示父节点发生时,子节点发生的概率,又称为条件概率.如果网络没有噪声并且网络模型准确,父节点和子节点之间的连线值为 1,否则为(0,1).虚拟节点和虚拟链路的条件概率表示为  $p(s_j^{VN_i} | f_j^{VN_i})$ .底层节点和底层链路的条件概率表示为  $p(s_i^{SN} | f_i^{SN})$ .

与文献[9]相似,本文为每个虚拟网的服务建立的故障传播模型如图 2 所示(由于症状和故障关系比较多,为

了简化图形,本文仅描述节点故障,链路故障与节点故障的描述类似).图 2(a)中,上层为  $VN_1$  的  $S_1^{VN_1}$  和  $S_2^{VN_1}$  两个服务的症状,下层为能够产生这两个症状的相关故障.图 2(b)中,上层为  $VN_2$  的  $S_1^{VN_2}$  和  $S_2^{VN_2}$  两个服务的症状,下层为能够产生这两个症状的相关故障.

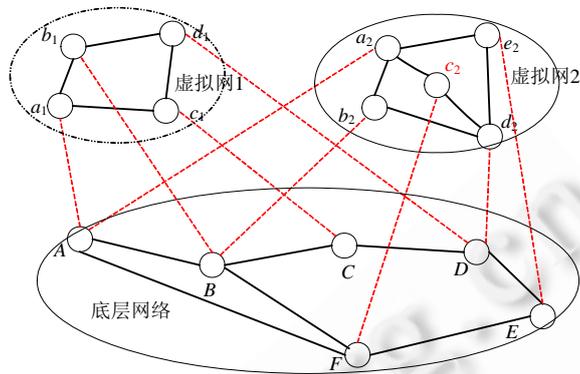


Fig.1 Virtual network mapping

图 1 虚拟网映射

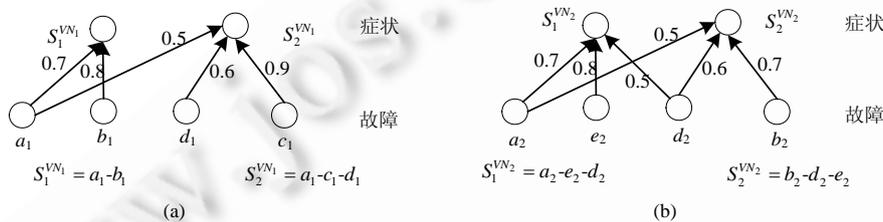


Fig.2 Service fault propagation model of virtual network

图 2 虚拟网的服务故障传播模型

由于底层网络的不可访问性,VNP 不知道每个底层设备的先验故障概率.每个虚拟组件的先验故障概率不可知,所以 VNP 不能定位所有的服务故障.当 VNP 不能定位故障时,需要将其上面的不能被诊断的服务故障传播模型发送给底层网络,由 SNP 进行故障诊断.SNP 接收到 VNP 上报的服务故障模型后,根据虚拟网在底层网络上的映射关系,找到承载当前服务的底层节点和底层链路资源.在寻找底层资源时,包括节点资源映射和链路资源映射两个过程:

- (1) 节点映射:一个虚拟网节点映射在一个底层节点上(图 1 中, $a_1$  被映射在 A 节点上);
- (2) 链路映射:一条虚拟网链路映射在一条底层链路上(图 1 中, $a_1 - b_1$  被映射在 A-B 链路上);或者被映射在多条底层链路上(图 1 中, $a_1 - c_1$  被映射在 A-B,B-C 两条链路上).

如文献[4,5]中所述,虚拟网映射到底层网络时,同一个虚拟网的不同节点不能被映射到同一个底层节点上.本文也按照这个约定进行映射.综上所述,根据虚拟网和底层网络的映射关系,网络虚拟化环境下的服务故障传播模型如图 3 所示.

图 3 中的上两层描述了虚拟网上的症状与故障之间的服务故障传播模型,下两层描述了虚拟资源到底层资源之间的映射.为了进行故障诊断,需要将图 3 进行化简,生成可用于故障诊断的服务故障传播模型.在化简时,本文将虚拟网资源导致症状的条件概率直接传递给承载它的底层网络资源.例如,图 3 中  $S_1^{VN_1}$  和  $a_1$  之间的条件概率为 0.7,化简后,  $S_1^{VN_1}$  和 A 之间的条件概率为 0.7.化简后的两层服务故障传播模型如图 4 所示.

但从图 4 可以看出,服务模型的故障集和症状集非常庞大,能够导致现有故障诊断算法诊断性能下降、时间复杂度过高.为了解决这个问题,本文提出一种新的基于症状内在相关性的虚拟网服务故障诊断算法

SFDoIC,下面对这一算法进行详细描述.

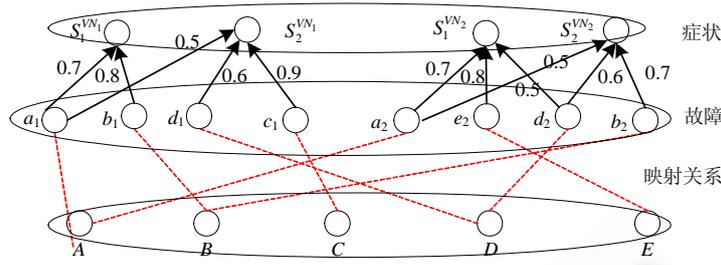


Fig.3 Service fault propagation model based on mapping relationship  
图 3 基于映射关系的服务故障传播模型

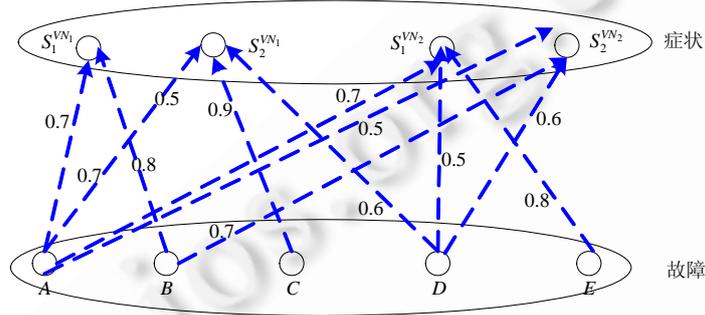


Fig.4 Simplified service fault propagation model  
图 4 化简后的服务故障传播模型

2.2 基于症状内在相关性的虚拟网服务故障诊断算法

基于症状内在相关性的虚拟网服务故障诊断算法 SFDoIC 包括基于症状内在相关性的故障过滤子算法和基于贡献度的启发式故障诊断子算法.其中,基于症状内在相关性的故障过滤子算法(fault filter algorithm based on inherent correlation among symptoms,简称 FFoIC)用于过滤虚假故障,解决故障诊断时故障集庞大的问题,从而提高故障诊断的性能.基于贡献度的启发式故障诊断子算法(heuristic fault diagnosis algorithm based on contribution degree,简称 HFDoCD)用于解决症状集庞大的问题,从而降低诊断算法的时间复杂度,下面对这两种子算法进行详细描述.

2.2.1 基于症状内在相关性的故障集合过滤算法

从图 4 可知,网络虚拟化环境下,同一个底层资源上的故障可以产生的症状数量快速增加.为了降低计算复杂度、提高故障诊断的性能,本节使用基于症状内在相关性的方法过滤虚假故障.首先给出症状内在相关性的定义如下.

定义 6(症状内在相关性). 这是指同一个虚拟网的不同服务故障、不同虚拟网的不同服务故障都会由同一个底层网络设备故障导致.

在故障过滤时,底层网络可以知道每个底层网络上承载几个虚拟资源,但是每个虚拟资源上承载的服务个数,底层网络是不知道的.所以在计算症状数量时,基于症状内在相关性,同一个虚拟网内由相同的底层网络资源导致的服务症状仅仅考虑为单个症状.例如,图 3 中, a1 被映射在底层资源 A 上,A 上承载同一个虚拟网 VN1 的两个服务 S1^VN1 和 S2^VN1,所以在计算症状数量时,仅仅计算为 1 个症状.同时,A 也承载 VN2 的一个服务 S1^VN2,所以 A 上的所有症状个数为 2.

本文提出的基于症状内在相关性的故障集合过滤算法如算法 1 所示.算法 1 首先计算每个故障相关的已经

被观测到的症状占应该出现症状的比例(第2步~第4步).为了实现虚假故障过滤后还能保证所有的 $S$ 都能被相关故障解释以及提高故障诊断的准确率,算法中的第7步和第8步选择故障,对当前故障集中的故障不能解释的已观测症状进行解释.另外,算法中 $\chi$ 表示故障的可信度,取值范围为 $0 \leq \chi \leq 1$ ,可以根据故障诊断结果对其进行调整.当 $\chi$ 被设置为较大值时,故障集合能够覆盖的故障较少;反之,覆盖的故障较多.

**算法 1.** 基于症状内在相关性的故障集合过滤算法.

输入:症状集合 $S$ ;故障集合 $F$ ;

输出:疑似故障集合 $F'$ .

Step 1. 取出 $F$ 中的故障 $f_i^{SN}$ ;

Step 2. 计算 $f_i^{SN}$ 相关的症状个数 $num_{f_i^{SN} \rightarrow S_{O_{f_i^{SN}}}}$ , $f_i^{SN} \rightarrow S_{O_{f_i^{SN}}}$ 表示由 $f_i^{SN}$ 引起的被观测到的所有症状 $S_{O_{f_i^{SN}}}$ ;

Step 3. 计算 $num_{f_i^{SN} \rightarrow S_{f_i^{SN}}}$ , $f_i^{SN} \rightarrow S_{f_i^{SN}}$ 表示由 $f_i^{SN}$ 引起的所有应被观测到的症状 $S_{f_i^{SN}}$ ;

Step 4. 计算 $\alpha_i = num_{f_i^{SN} \rightarrow S_{O_{f_i^{SN}}}} / num_{f_i^{SN} \rightarrow S_{f_i^{SN}}}$ ;

Step 5. 如果有 $\alpha_i \geq \chi$ ,则将 $f_i^{SN}$ 放入到集合 $F'$ ;

Step 6. 如果 $F$ 集合不空,转 Step 1;

Step 7. 将使用 $F'$ 集合中所有 $f_i^{SN}$ 都不能解释的症状过滤到一个新的集合 $S_{\bar{F}}$ 中;

Step 8. 将包含 $S_{\bar{F}}$ 中的症状且 $\alpha_i$ 数值较大的故障放到 $F'$ 集合中,保证 $F'$ 能够覆盖所有被观测到的症状 $S_{O_i}$ ;

Step 9. 返回疑似故障集合 $F'$ .

### 2.2.2 基于贡献度的启发式故障诊断算法

在描述故障诊断算法之前,先说明本文故障诊断使用的4个假设:

- (1) Noisy-OR 模型<sup>[19]</sup>,即引起某个症状的多个故障相互独立、并且任何一个故障的发生都将引起该症状的发生;
- (2) 故障独立,即不同故障之间相互独立;
- (3) 底层网络资源发生故障时,承载在其上面的虚拟网的相关服务可能会出现异常.由于网络中存在噪声,或者由于虚拟网上的当前服务没有使用等原因,导致底层网络资源发生故障时,不一定能收到所有的症状,并且收到的症状不一定完全正确;
- (4) 多个故障同时发生的概率很低<sup>[20]</sup>,所以本文使用最少的故障集去解释症状的发生.例如,在图2中,导致 $S_1^{VN_i}$ 发生的可能的故障是 $\{a_1\}, \{b_1\}, \{a_1, b_1\}$ .当3种情况下故障的贡献度相同时,本文优先考虑 $\{a_1\}, \{b_1\}$ 两种情况.故障贡献度的定义见下文.

运行虚假故障过滤算法后, $F'$ 相对较小,但是底层网络接收到的是所有虚拟网的症状,所以症状集合会比较大.如果直接求包含所有 $S$ 并且故障数量最少的故障集合,计算复杂度将为 $O(|F| \times |S|^2)$ <sup>[8]</sup>.因此,基于文献[16]中提出的计算每个故障 $f_i^{SN}$ 贡献度的方法,将网络虚拟化环境下故障 $f_i^{SN}$ 的贡献度定义为

$$C(f_i^{SN}) = \sum_{s_i^{VN_i} \in S_{O_{f_i^{SN}}}} \mu(f_i^{SN} | s_i^{VN_i}) / \sum_{s_i^{VN_i} \in S_{f_i^{SN}}} \mu(f_i^{SN} | s_i^{VN_i}) \quad (1)$$

其中, $\mu(f_i^{SN} | s_i^{VN_i}) = p(s_i^{VN_i} | f_i^{SN})p(f_i^{SN}) / \sum_{f_i^{SN} \in F_{s_i^{VN_i}}} p(s_i^{VN_i} | f_i^{SN})p(f_i^{SN})$ , $S_{O_{f_i^{SN}}}$ 表示由 $f_i^{SN}$ 产生并且被观测到的症状, $S_{f_i^{SN}}$ 表示由 $f_i^{SN}$ 产生的所有症状, $F_{s_i^{VN_i}}$ 表示能够引起 $s_i^{VN_i}$ 的所有故障集合.

基于贡献度的启发式故障诊断算法如算法2所示.算法2首先计算故障集合中所有故障的贡献度,并降序放入队列 $h$ 中(第1步).算法第2步~第6步,从队列 $h$ 中依次取出故障 $f_i^{SN}$ ,用 $f_i^{SN}$ 对症状集中的症状进行解释,直到症状集合 $S$ 为空.在算法第4步中,当多个 $f_i^{SN}$ 的贡献度一样大时,取新产生 $S$ 数较多的一个.如果仍然相同,则将多个 $f_i^{SN}$ 都加入故障集.例如,在图5中,与 $f_1$ 相关的 $S$ 包括 $s_1, s_2, s_3, s_5$ .假设出现了 $s_1, s_2, s_3$ ,则 $f_1$ 的贡献度为

0.75.将 $f_1$ 放入准确的故障集合 $F''$ 中,删除 $S$ 中的 $s_1,s_2,s_3$ 之后, $h$ 集合中出现3个贡献度都是0.67的故障 $f_2,f_3,f_4$ .其中,与 $f_2$ 相关的症状包括 $s_2,s_4,s_5$ .假设 $S$ 中出现了 $s_4$ ,则 $f_2$ 新增一个症状 $s_4$ .与 $f_3$ 相关的症状包括 $s_4,s_5,s_6$ .假设 $S$ 中出现了 $s_4,s_6$ ,则 $f_3$ 新增两个症状 $s_4,s_6$ .与 $f_4$ 相关的症状包括 $s_7,s_8,s_9$ .假设 $S$ 中出现了 $s_7,s_9$ ,则 $f_4$ 新增两个症状 $s_7,s_9$ .所以,加入 $F''$ 集合的 $f$ 为 $f_1,f_3,f_4$ .同时,删除 $S$ 中的 $s_4,s_6,s_7,s_9$ .

**算法 2.** 基于贡献度的启发式故障诊断算法.

输入:疑似故障集合 $F'$ ;症状集合 $S$ ;

输出:准确的故障集合 $F''$ .

Step 1. 使用公式(1)计算 $F'$ 中的每个 $f_i^{SN}$ 的贡献度,并降序排列放入队列 $h$ 中;

Step 2. 取出队首 $f_i^{SN}$ ;

Step 3. 如果 $f_i^{SN}$ 的贡献度是最大的,则转 Step 5;

Step 4. 如果存在多个 $f_i^{SN}$ 的贡献度相同,则将其全部从 $h$ 中取出,计算它们识别的 $s_i^{VN}$ 与 $S$ 的交集,将能够产生交集但这些交集被其他交集包含的 $f_i^{SN}$ 去掉,剩余的 $f_i^{SN}$ 加入 $F''$ 中,并删除这些 $f_i^{SN}$ 在 $S$ 中的所有交集,转 Step 6;

Step 5. 如果 $f_i^{SN}$ 可以产生的症状与 $S$ 有交集,则将这个交集从 $S$ 中删除,并将 $f_i^{SN}$ 加入到 $F''$ 中;

Step 6. 判断 $S$ 是否为空,如果 $S$ 不为空,则转 Step 2;

Step 7. 返回 $F''$ .

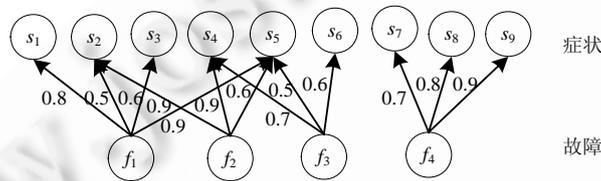


Fig.5 Example of selecting fault set method

图 5 选择故障集合方法举例

### 3 性能评估

#### 3.1 实验环境

##### (1) 网络拓扑

由于网络虚拟化目前没有真实的实验环境,本文与文献[4-7]相同,使用 GT-ITM<sup>[21]</sup>工具生成网络虚拟化环境下的底层网络和虚拟网络的拓扑.本文生成包含 300 个节点的底层网络拓扑.产生虚拟网络规模包括 5 个虚拟网和 20 个虚拟网两种.每个虚拟网的节点个数在 5 和 30 之间变化,使用映射算法<sup>[4]</sup>映射虚拟网到底层网络.

##### (2) 端到端的服务生成

对于每个虚拟网络,从中选取 20%的节点作为源节点,对于每一个源节点,随机选择 3 个节点作为目的节点.在每一对源宿节点之间,使用最短路径算法生成路由,模拟一个端到端的服务.网络生成和路由确定后,根据诊断模型部分的描述方法建立依赖模型.底层网络资源的先验故障概率和条件概率随机产生,分别在[0.001,0.01]和(0,1)内均匀分布.

##### (3) 故障注入

为了注入故障,我们允许每个组件以自己的先验概率独立中断.基于已知的贝叶斯网络知识,使用贪婪搜索方法<sup>[22]</sup>产生用于测试端到端服务的主动探测集合.当探测到有故障发生时,探测节点将故障发送到监控中心.

##### (4) 噪声注入

将异常症状加入负症状集 $S_N$ ,再从中选择 $P_{loss} \times |S_N|$ 个症状为丢失症状从 $S_N$ 中移除,最后选择 $P_{false} \times |S_N|$ 个症

状为虚假症状加入  $S_N$ ,即得出最终负症状集  $S_N$ ,其中,  $|S_N|$ 表示  $S_N$ 中包括的症状个数.

观察到的正症状集  $S_p=S_O-S_N$ ,实验中,症状丢失率  $P_{loss}$  取值为 0.05,虚假症状率  $P_{false}$  取值为 0.05.

### 3.2 评价指标

本文使用 Accuracy 和 False Positive 两项评价指标,Accuracy 和 False Positive 的定义如下:

$$Accuracy = \frac{|H \cap F|}{|F|}, False-Positive = \frac{|H \cap \bar{F}|}{|F|},$$

其中,  $F$  表示真实的故障集合,  $\bar{F}$  表示节点本身没有故障但被诊断为有故障,  $H$  表示使用诊断算法得到的故障集合.

### 3.3 性能分析

性能分析包括两部分:(1) 验证本文提出的算法 SFDoIC 可以解决底层网络透明性造成的虚拟网服务故障难以定位的问题;(2) 将算法 SFDoIC 与传统算法 SFDoIC-no-Filter 进行比较,验证 SFDoIC 可以解决症状集包含的症状和故障集中包含的故障较多、故障诊断的时间复杂度较高的问题.在每个实验环节都仿真了 50 个案例,每个案例对应一个时间窗口.仿真结果均为案例结果的平均值.

#### 3.3.1 算法性能分析

##### 3.3.1.1 $\chi$ 取值对算法性能的影响

在基于症状内在相关性的故障集合过滤算法 FFoIC 中,  $\chi$ 表示故障可信度.当  $\chi$ 被设置为较大值时,故障集合能够覆盖的故障较少;反之,覆盖的故障较多.可以根据故障诊断结果对  $\chi$ 值进行调整.为了选择合适的  $\chi$ 值,本文对  $\chi$ 在取 0.4,0.5,0.6 这 3 个值的情况下,从算法的准确率、误报率、诊断时间这 3 个方面进行分析对比,实验结果如图 6 所示.

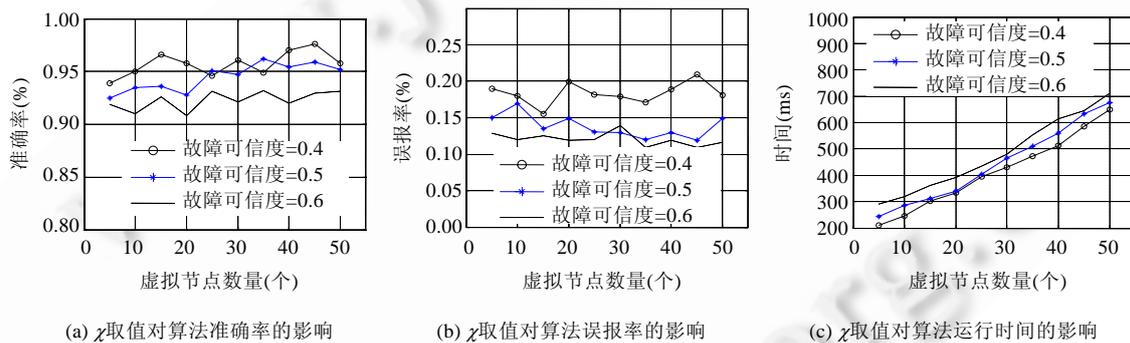


Fig.6 Effect of  $\chi$  value on performance of the algorithm

图 6  $\chi$ 取值对算法性能的影响

由图 6 可知,当  $\chi$ 取值为 0.4 时,算法准确率的平均值最高,诊断时间的平均值最短,但是误报率的平均值也较高.产生这种现象的原因是,当  $\chi$ 取值较小时,过滤后的故障集合仍然很大,可以防止真正的故障被过滤掉,所以诊断的准确率较高.但是由于故障集合较大,也导致虚假故障较多,所以误报率也较高.同时,由于故障集合较大,算法 FFoIC 可以不执行第 7 步和第 8 步,算法的运行时间也较短.反之,当  $\chi$ 取值为 0.6 时,算法诊断结果的误报率较低,但是准确率也较低,诊断时间较长.当  $\chi$ 取值为 0.5 时,算法获得了较好的诊断结果.所以在后续实验中,  $\chi$ 取值为 0.5.

##### 3.3.1.2 网络规模对算法性能的影响

为了分析网络规模对本文算法性能的影响,比较了 5 个虚拟网和 20 个虚拟网两种环境下算法的性能,实验结果如图 7 所示.由图 7(a)可知,20 个虚拟网环境下算法准确率的平均值比 5 个虚拟网环境下降低了 0.44%.但由图 7(b)可知,20 个虚拟网环境下算法的误报率比 5 个虚拟网环境下降低了 0.36%.所以,网络规模对算法诊断

结果的准确率、误报率影响很小.由图 7(c)可知,20 个虚拟网络规模时,算法的运行时间较长.因为虚拟网络数量的增加,较多的症状被发送给底层网络,导致故障和症状数量快速增加,可以通过提高算法运行环境的硬件配置来提高算法的效率.所以实验结果表明,网络规模对本文算法的性能影响较小.

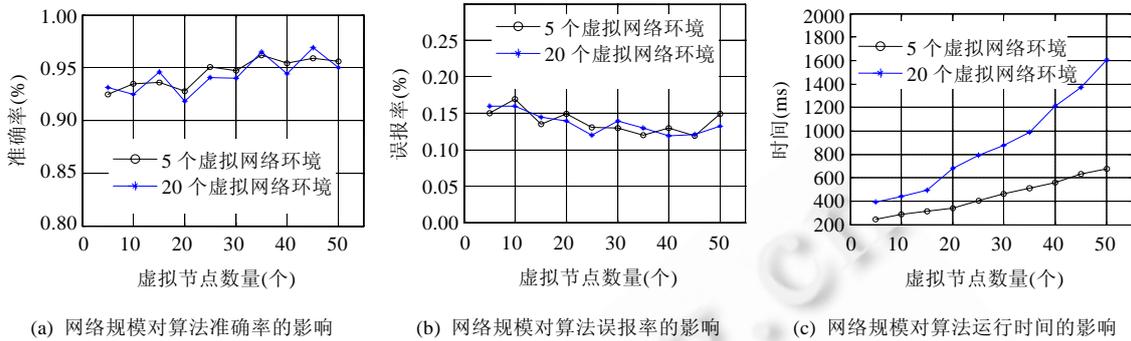


Fig.7 Effect of network size on performance of the algorithm

图 7 网络规模对算法性能的影响

3.3.2 与相关算法比较

为了验证本文提出的基于症状内在相关性的故障过滤子算法性能,比较了 5 个虚拟网环境下算法 SFDoIC 和 SFDoIC-no-Fliter 的诊断结果.SFDoIC-no-Fliter 是不包含故障过滤子算法的诊断算法,被用来模拟传统的诊断算法.实验结果如图 8 所示.

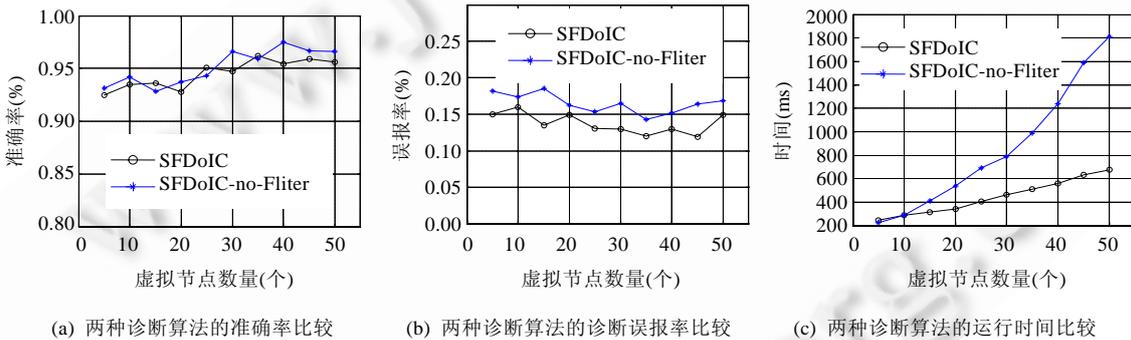


Fig.8 Comparison with related algorithm

图 8 与相关算法比较

由准确率的实验结果图 8(a)可知,两种算法的准确率都在 95%左右,都取得了较好的诊断结果.说明两种算法都能很好地定位故障,也说明本文的过滤算法并没有过滤掉多个导致症状发生的故障.由误报率的实验结果图 8(b)可知,SFDoIC-no-Fliter 误报率的平均值比 SFDoIC 误报率的平均值高出 2.46%.主要原因是网络虚拟化环境下,症状和故障数量较多,关系较为复杂.由于噪声的影响,导致诊断出的虚假故障的数量也较多.由运行时间的实验结果图 8(c)可知,随着网络规模的扩大,两种算法的执行时间都有所增加.算法 SFDoIC-no-Fliter 开始执行时运行时间相对较短,但是随着网络规模的扩大,执行时间增加得较快.主要原因是故障数量和症状数量增加,导致故障诊断的时间开销也很快增加.本文算法执行时间变化较慢,因为在执行故障诊断之前,算法 SFDoIC 基于症状内在相关性对故障集合进行了过滤.在大规模网络环境下,本文算法的执行时间比较稳定.

#### 4 总结和下一步工作

网络虚拟化是解决网络僵化问题的重要方法.为了提高虚拟网服务的性能和可靠性,本文提出了网络虚拟化环境下的基于症状内在相关性的虚拟网服务故障诊断算法 SFDoIC.仿真实验结果表明,SFDoIC 算法能够很好地解决底层网络透明性造成的虚拟网服务故障难以定位的问题.SFDoIC 算法可以有效地降低诊断算法的误报率,显著减少诊断算法的诊断时间.

虽然本文的故障诊断算法在误报率方面优于传统故障诊断算法,在大规模的网络环境中花费的时间更短,但是故障诊断的准确率还有待进一步提高.下一步工作将设计更加高效的服务故障诊断算法,提高故障诊断的准确率.例如,引入信任评估机制,对不能诊断的症状进行主动探测,提高症状集中症状的真实性.

#### References:

- [1] Turner J, Taylor D. Diversifying the Internet. In: Proc. of the IEEE Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2005). 2005. 755–760. <http://arl.wustl.edu/Publications/2005-09/globecom05divNet.pdf> [doi: 10.1109/GLOCOM.2005.1577741]
- [2] Feamster N, Gao L, Rexford J. How to lease the Internet in your spare time. SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(1):61–64. [doi: 10.1145/1198255.1198265]
- [3] Chowdhury NMMK, Boutaba R. Network virtualization: State-of-the-Art and research challenges (topics in network and service management). IEEE Communications Magazine, 2009,47(7):20–26. [doi: 10.1109/MCOM.2009.5183468]
- [4] Yu M, Yi Y, Rexford J, Chiang M. Rethinking virtual network embedding: Substrate support for path splitting and migration. ACM SIGCOMM CCR, 2008,38(2):17–29. [doi: 10.1145/1355734.1355737]
- [5] Chowdhury NMMK, Rahman MR, Boutaba R. Virtual network embedding with coordinated node and link mapping. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2009. 783–791. <http://www.mosharaf.com/wp-content/uploads/vineyard-infocom09.pdf> [doi: 2009. 10.1109/INFCOM.2009.5061987]
- [6] Houidi I, Louati W, Zeghlache D. A distributed virtual network mapping algorithm. In: Proc. of the IEEE ICC. 2008. 5634–5640. <http://www-vs.informatik.uni-ulm.de/DE/intra/bib/2008/ICC/DATA/S11S03P03.PDF> [doi: 10.1109/ICC.2008.1056]
- [7] Cai ZP, Liu F, Xiao N, Liu Q, Wang ZY. Virtual network embedding for evolving networks. In: Proc. of the IEEE Telecommunications Conf. (GLOBECOM). 2010. 1–5. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683160]
- [8] Cheng L, Qiu XS, Meng LM, Qiao Y, Li ZQ. Probabilistic fault diagnosis for IT services in noisy and dynamic environments. In: Proc. of the IEEE/IFIP Int'l Symp. on Integrated Network Management (IM 2009). 2009. 149–156. [doi: 10.1109/INM.2009.5188804]
- [9] Cheng L, Qiu XS, Meng LM, Qiao Y, Boutaba R. Efficient active probing for fault diagnosis in large scale and noisy networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2010. 1–9. <http://rboutaba.cs.uwaterloo.ca/Papers/Conferences/2010/Lu10.pdf> [doi: 10.1109/INFCOM.2010.5462041]
- [10] Wang Y, Keller E, Biskebom B, Merwe JVD, Rexford J. Virtual routers on the move: Live router migration as a network management primitive. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2008 Conf. on Data Communication. 2008. <http://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall10/cos561/papers/VROOM08.pdf> [doi: 10.1145/1402958.1402985]
- [11] Clarissa CM, Lisandro ZG, Giorgio N, Marcus B. Distributed autonomic resource management for network virtualization. In: Proc. of the 2010 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symp. (NOMS). 2010. 463–470. [doi: 10.1109/NOMS.2010.5488490]
- [12] Duan Q. Modeling and analysis for end-to-end service performance in virtualization-based next generation Internet. In: Proc. of the IEEE Globecom. 2010. 1–6. [http://qosip.tmit.bme.hu/~gulyas/personal\\_page/skeleton.pdf](http://qosip.tmit.bme.hu/~gulyas/personal_page/skeleton.pdf) [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683132]
- [13] Chu LW, Zou SH, Cheng SD, Tian CQ, Wang WD. Efficient fault diagnosis algorithm in dynamic Internet service environment. Journal of Software, 2009,20(9):2520–2530 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3448.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03448]
- [14] Huang XH, Zou SH, Wang WD, Cheng SD. Internet services fault management: Layering model and algorithm. Journal of Software, 2007,18(10):2584–2594 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/2584.htm> [doi: 10.1360/jos182584]

- [15] Zhang C, Liao JX, Zhu XM. Heuristic fault localization algorithm based on Bayesian suspected degree. Journal of Software, 2010, 21(10):2610–2621 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3644.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03644]
- [16] Tang YN, Al-Shaer E, Boutaba R. Efficient fault diagnosis using incremental alarm correlation and active investigation for Internet and overlay networks. IEEE Trans. on Network and Service Management, 2008,5(1):36–49. [doi: 10.1109/TNSM.2008.080104]
- [17] Tang YN, Al-Shaer E. Towards collaborative user-level overlay fault diagnosis. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2008. 2476–2484. <http://kusu.comp.nus.edu/proceedings/infocom08/MC4-4-4.PDF> [doi: 10.1109/INFOCOM.2008.318]
- [18] Tang YN, Cheng G, Xu ZW, Al-Shaer E. Community-Base fault diagnosis using incremental belief revision. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Networking, Architecture, and Storage. 2009. 121–128. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5197308](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5197308) [doi: 10.1109/NAS.2009.24]
- [19] Steinder M, Sethi AS. Probabilistic fault localization in communication systems using belief networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2004,12(5):809–822. [doi: 10.1109/TNET.2004.836121]
- [20] Steinder M, Sethi AS. Probabilistic fault diagnosis in communication systems through incremental hypothesis updating. Computer Networks, 2004,45(4):537–562. [doi: 10.1016/j.comnet.2004.01.007]
- [21] Zegura EW, Calvert KL, Bhattacharjee S. How to model an internetwork. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 1996. 594–602. [http://reference.kfupm.edu.sa/content/h/o/how\\_to\\_model\\_an\\_internetwork\\_108096.pdf](http://reference.kfupm.edu.sa/content/h/o/how_to_model_an_internetwork_108096.pdf) [doi: 10.1109/INFOCOM.1996.493353]
- [22] Rish I, Brodie M, Sheng M, Odintsova N, Beygelzimer A, Grabarnik G, Hernandez K. Adaptive diagnosis in distributed systems. IEEE Trans. on Neural Networks, 2005,16(5):1088–1109. [doi: 10.1109/TNN.2005.853423]

#### 附中文参考文献:

- [13] 褚灵伟, 邹仕洪, 程时端, 田春岐, 王文东. 一种动态环境下的互联网服务故障诊断算法. 软件学报, 2009, 20(9): 2520–2530. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3448.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03448]
- [14] 黄晓慧, 邹仕洪, 王文东, 程时端. Internet 服务故障管理分层模型和算法. 软件学报, 2007, 18(10): 2584–2594. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/2584.htm> [doi: 10.1360/jos182584]
- [15] 张成, 廖建新, 朱晓民. 基于贝叶斯疑似度的启发式故障定位算法. 软件学报, 2010, 21(10): 2610–2621. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3644.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03644]



张顺利(1981—),男,山西运城人,博士生,主要研究领域为虚拟网的网络管理.



孟洛明(1955—),男,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为通信网,网络管理,通信软件.



邱雪松(1973—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为网络与业务管理.