

多域服务环境下的分布式故障诊断算法

褚灵伟^① 邹仕洪^① 程时端^① 田春岐^② 王文东^① 胡博^①

^①(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室 北京 100876)

^②(同济大学电子与信息工程学院 上海 200092)

摘要: 多域服务环境下, 域间故障传播导致的跨域症状会对故障诊断算法性能造成影响。该文提出了多域服务环境下的分布式依赖模型, 在该模型基础上提出分布式故障诊断算法, 并从减小通信开销、更准确的症状引发评估函数和虚假症状概率 3 个方面对算法进行了改进。仿真结果显示, 该文算法可以有效诊断多域环境下的服务故障。

关键词: 故障管理; 故障诊断; 分布式诊断; 分布式依赖模型

中图分类号: TP393.07

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)04-0836-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00270

Distributed Fault Diagnosis Algorithm in Multi-domain Service Environment

Chu Ling-wei^① Zou Shi-hong^① Cheng Shi-duan^①

Tian Chun-qi^② Wang Wen-dong^① Hu Bo^①

^①(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

^②(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In multi-domain environment, symptoms caused by inter-domain fault propagation will affect fault diagnosis algorithm. A distributed dependency model is proposed to build the dependencies in service system. Based on the dependency model, a distributed fault diagnosis algorithm is proposed, and the algorithm is improved from three aspects: reduce communication cost, accurate effect evaluation function and spurious symptom probability. Simulation results show that the fault diagnosis algorithm is efficient in multi-domain service environment.

Key words: Fault management; Fault diagnosis; Distributed diagnosis; Distributed dependency model

1 引言

近年来, 服务提供商开发了各种各样的 Internet 服务, 为了保证服务 QoS, 服务提供商迫切需要一种有效的服务故障管理机制。故障诊断^[1-4]是故障管理中非常重要的步骤, 目标是根据观察到的症状集快速准确地推理出故障假设。

Internet 服务可能由分布在多个组织或企业内的子服务组合而成^[5], 因此 Internet 服务管理将涉及到多个管理域。研究人员普遍认为, 应当划分管理信息和功能, 并用分布式的方式管理多域服务系统^[4]。

Katzela 等人^[6]提出了设计分布式故障诊断系统的理论基础。分布式故障诊断不存在中央管理器, 由分域管理器协同工作诊断故障。在分析告警时, 各域需要为每个相关跨域告警关联代理节点, 同时为代理节点分配一个概率值, 表示告警由其他域中故障引起的概率。Bouloutas 等人^[7]证明了计算代理节点的准确概率值是 NP-complete 问题。Steinder 和 Sethi^[8]提出跨多个自治域的分布式故障诊断算法, 在所有自治域内寻找最可能的故障假设。但是, 该算法非常耗时和低效的, 而且依赖部分全局结构信息。Fischer 等人^[9]提出了一个二域环境下的分布式故障诊断方案。但是该方法难于推广到更多域情况。Khanna 等人^[10]提出了一个基于分布式监测系统的故障诊断框架, 但是基于分层管理方式的。

本文提出了分布式故障依赖模型, 及多域协作分布式故障诊断方案, 各域可以自由选择概率推理技术, 如 MCA+^[11], IHU^[12] 等。为进一步提升算法

2009-03-04 收到, 2010-01-04 改回

国家自然科学基金(60603060), 新世纪优秀人才支持计划项目(NECT-08-0739, NECT-07-0109), 核高基重大专项(2009ZX01039-002-001-07)和中国-瑞典下一代网络国际合作项目(2008DFA12110)资助课题

通信作者: 邹仕洪 zoush@bupt.edu.cn

性能, 从减小通信开销、引发跨域症状的可能性评估函数和虚假概率的计算这3个方面对算法进行改进, 即为 ADDA 算法 (Advanced Distributed Diagnosis Algorithm)。仿真结果证明了本文算法的有效性。

2 分布式依赖模型

为了表示多域环境下依赖关系且保护域内结构和信息安全, 本文提出能够同时表示域内和域外依赖关系的分布式依赖模型, 这些依赖关系可以在服务运行过程或服务创建过程获得^[11]。假设存在多个域的环境下, 我们为每个域建立一个二分贝叶斯网络依赖模型^[13]。依赖模型的上层节点为本域内的服务集 $S = \{s_i\}$, $s_i = 1$ 表示服务异常, $s_i = 0$ 表示服务正常。下层节点包括域内组件集 $F = \{f_i\}$ 和域外相关子服务集 $S' = \{s'_i\}$ 。 $f_i = 1$ 表示组件发生故障, $f_i = 0$ 表示组件正常, $s'_i = 1$ 表示该子服务发生异常且传播故障到本域, $s'_i = 0$ 表示该子服务未传播故障到本域。每个组件关联一个先验故障概率 $P(f)$; 每条有向边关联一个表示依赖强度的条件概率 $P(s|f)$, 这些值可以通过外部观察, 故障注入技术^[14]或者服务依赖发现工具^[15]获得。与上层节点 a 存在依赖关系的下层节点集表示为 $\text{Par}(a)$, 与下层节点 b 存在依赖关系的上层节点集表示为 $\text{Child}(b)$ 。本文中假设服务异常的可能原因相互独立并且以逻辑运算符 OR 结合, 即 noisy-OR 模型^[16]。

图1显示了一个二域服务场景建立依赖模型的简单例子。图1左边所示的服务场景包括两个管理域 a 和 b 。服务 A 调用 b 域中的服务 D , 而 D 又调用域内的 E 。因此当 D 或 E 发生异常时, 均有可能导致 A 的异常, 即发生跨域故障传播; 同理 C 或 E 异常时, 可能导致 B 的异常。图1右边显示了为域 a 和 b 分别建立的模型, 为简化图形, 模型中没有注明概率值。

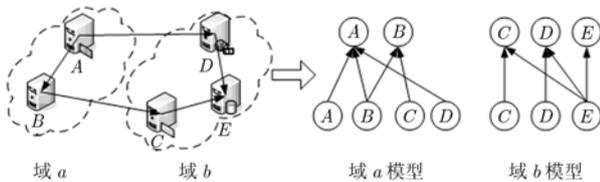


图1 建立分布式依赖模型

3 分布式故障诊断算法

多域环境下, 同时存在域内故障传播和域间故障传播。本文主要研究域间故障传播的诊断方案, 在完成对跨域症状的处理后, 可使用已有单域故障

诊断算法推理故障假设。

假设某域 D_i 观察到跨域服务 s 发生异常, 域 D_i 根据依赖模型将 s 映射到与其相关的域外子服务集 S , s 可能由 S 中元素引发。 D_i 将 S 中位于另一个域 D_k 内的元素以症状形式向 D_k 报告。域 D_k 收到其他域报告的症状后, 需要评估本域内故障引发这些症状的可能性, 并将这些值返回报告症状的域。由于 s 同样可能由 D_i 域内故障引发, 因此 D_i 采用类似方式评估本域故障引发 s 的可能性。当收到返回的评估值后, D_i 采用一定的比较机制比较评估值, 再将跨域症状分配给最可能导致该症状的域来诊断。如果域 D_k 收到由其他域分配的症状, 即认为该症状由它的域内故障导致, 可以将分配到的所有症状和域内症状一起进行诊断, 从而得出更准确的故障假设。

多域环境下的分布式故障诊断算法描述如下:

算法 DDA (Distributed Diagnosis Algorithm in Multi-Domain Environment)

症状交换阶段:

(1) 为本域观察到的每个跨域症状选择所有与其存在依赖关系的域;

(2) 将跨域症状映射为选定域的相关子服务, 并将其作为症状报告至选定域。

影响评估阶段:

(1) 计算本域内故障引发其他域所报告症状的评估值;

(2) 将该值返回给报告症状的域。

症状分配阶段:

(1) 根据返回的评估值, 为本域观察到的每个跨域症状选择最可能引发该症状的域;

(2) 将症状分配给选定域。

故障诊断阶段:

使用单域故障诊断算法对域内症状和分配的症状进行诊断, 得出故障假设 H 。

假设域外报告的症状为 s , 域 D_k 对其评估值计算如下:

$$P_{D_k}(s) = \max_{f \in \text{Par}(s)} P(f) \cdot P(s|f) \quad (1)$$

为了进一步提高算法性能, 本文从以下方面对 DDA 算法进行改进。

3.1 优化通信开销

如果在交换症状前, 当前域根据观察到的症状推理这些子服务异常的概率, 就能根据这些值选出存在高概率子服务的域, 这些域就是最可能导致该跨域症状的域。假设域 D_i 当前观察到的跨域症状集合为 S_N , 其模型中与 S_N 相关的域外子服务为 F_{S_N} 。

每个子服务 f 的异常概率表示为在给定观察 S_N 的条件下, f 向本域传播故障的概率。由于这些子服务实际处于其他域中, 本域无法获得定它们的先验故障概率, 在此假设它们的先验故障概率为相同值。

以 S_f 表示 f 的后代节点中观察到的跨域症状集合, 即 $S_f = \text{Child}(f) \cap S_N$ 。对域外子服务的后验概率推理如下:

$$P(f | S_N) = P(f) \cdot \prod_{s \in S_f} P(s | f) / \sum_{f \in \text{Par}(s)} P(f) \cdot P(s | f) \quad (2)$$

在计算结束后, 当前域为每个跨域症状选择一部分协商域来交互症状, 这些域中应当存在后验概率较大的子服务。

如果当前域观察到一个跨域症状, 该症状与 m 个域存在依赖关系。改进算法选择其中 SDR $\cdot m$ 个域协商症状分配。假设与每个域的交互症状, 返回评估值及分配症状的通信开销均为 c , 则诊断该症状的通信开销为 $(2 \cdot \text{SDR} \cdot m + 1) \cdot c$ 。调节 SDR 值, 即可以控制通信开销。

3.2 优化引发跨域症状可能性的评估函数

假设当前域观察到域内症状集 S_N , 即只存在域内依赖关系的服务症状, 我们可以使用这些症状做单域故障诊断, 得出初步的故障假设 H' 。如果其他域报告的症状可由 H' 解释, 则评估值修改为 H' 中发生故障引发该症状的最大值; 如果该症状不可由 H' 中故障解释, 则依然使用式(1)评估。对式(1)修改如下:

$$P_{D_k}(s) = \begin{cases} \max_{f \in H'} P(s | f), & s \in \text{Child}(H') \\ \max_{f \in \text{Par}(s)} P(f) \cdot P(s | f), & s \notin \text{Child}(H') \end{cases} \quad (3)$$

其中 $H' = \arg \max_{H' \subseteq F} P(H' | S_N)$, $\text{Child}(H') =$

$$\bigcup_{f \in H'} \text{Child}(f)。$$

3.3 虚假症状

DDA 算法认为分配到的症状必定是由于当前域内故障导致的, 但是可能存在错误分配症状的现象, 即分配到症状的域实际上没有引发该症状。为了减小这种现象带来的影响, 要为每个分配症状增加关联一个代理故障节点, 表示该症状实际由其他域中故障导致, 节点先验概率为该症状由其他域导致的可能程度, 即虚假症状概率。虚假症状概率应由发现跨域症状的域进行评估, 再随症状分配到最可能引发病状的域。

假设域 D_i 观察到跨域症状 s , 且已经收到来自相关域的最大评估值 $\{P_{D_k}(s)\}$, 根据这些值确定分配该症状的域为 D_k , 计算错误分配的虚假概率值 $P_s(s)$ 如下:

$$P_s(s) = \max_{j \neq k} (P_{D_j}(s)) \quad (4)$$

在对分配到症状进行故障诊断前, 需要为分配到的症状增加关联代理节点和相关概率值, 并去除原模型中与之相关的域外组件节点。如果诊断假设中包含该代理节点, 则可以简单地将该节点从最终结果中删除。

3.4 改进算法描述

综合上述改进, 多域服务环境下的分布式故障诊断算法描述如下:

算法 ADDA (Advanced Distributed Diagnosis Algorithm in Multi-Domain Environment)

症状交换阶段:

(1) 使用当前域的跨域症状集推理相关域外子服务的可能传播概率;

(2) 为每个观察到的跨域症状选择包含最大可能传播概率子服务的若干协商域;

(3) 将该跨域症状映射为选定域的相关子服务, 并将其作为症状报告至协商域。

影响评估阶段:

(1) 使用域内症状计算部分故障假设 H' ;

(2) 根据 H' , 计算本域内故障引发其他域报告症状的评估值;

(3) 将该值返回给报告症状的域。

症状分配阶段:

(1) 根据返回的评估值, 为本域观察到的每个跨域症状选择最可能引发该症状的域;

(2) 为该域计算症状错误分配的虚假症状概率;

(3) 将症状和虚假概率值同时分配给选定域。

故障诊断阶段:

(1) 为每个分配到的症状节点增加关联一个代理故障节点, 其先验概率为分配的虚假概率值;

(2) 使用单域故障诊断算法对域内症状和分配的症状进行诊断, 得出故障假设 H 。

4 仿真分析

本文以多域服务环境为仿真场景。仿真开始时, 随机产生 10 个独立管理域, 每个域中包含 m 个服务, 为简单起见, 假设域内组件和服务数目相等, m 变化范围为 [20, 100]。为每个服务随机选择域内组件作为依赖组件, 从而构成该域内部的依赖关系。从这些域的所有服务中随机选择一定比例 (该比例记为 CSR) 的服务作为跨域服务, 为每个跨域服务选择域外服务作为调用的子服务, 从而构成域间依赖关系。上述依赖关系确定后, 根据第 3 节方法建立分布式依赖模型。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。每个场景

中, 仿真 500 个案例。因为多个故障可能同时发生, 每个案例随机选择发生故障子集 $F_c \subseteq F, |F_c| \leq 3$ 。最终仿真结果为案例结果的平均值。

图 2-图 5 比较了跨域服务比率 $CSR = 0.5$ 的多域环境下的仿真结果。图中曲线 DDA 和 ADDA 分别表示本文提出的基本和改进的分布式故障诊断算法的结果, 曲线 DFI 代表文献[7]中分布式故障诊断算法的结果。DFI 的主要思想是将每个跨域症状分配给所有相关域诊断(即 $SDR = 1$), 在每个域中为跨域症状关联代表由其他域导致该症状的代理节点并分配虚假概率, 再在所有相关域内进行故障诊断。

图 2 比较故障诊断率 DR (Diagnosis Rate)。图中可见, 当 $SDR = 0.25$ 时, ADDA 的诊断率最低, 这是由于较少的协商域导致症状更容易错误分配; 当 $SDR = 0.5$ 和 0.75 时, ADDA 的诊断率接近且高于其他算法, 可见如果选择恰当的 SDR 值, 可以在诊断率和域间通信开销之间取得较好的平衡。比较 DDA 和 DFI 曲线可见, DFI 的诊断率高于 DDA, 这是由于 DDA 未考虑症状错误分配的虚假概率。

图 3 比较故障误判率 FPR (False Positive Rate)。随着 SDR 的增大, ADDA 算法在更大的协商域范围内选择分配域, 因此误判率也随之下降。DDA 算法没有考虑症状错误分配的影响, 因此误判率最高。DFI 将所有跨域症状分配到所有相关域诊断, 尽管考虑了虚假概率, 但是误判率依然比 SDR

$= 0.5$ 和 0.75 情况下的 ADDA 算法大。

图 4 比较诊断率方差 VDR (Variance of Diagnosis Rate)。该值描述了故障诊断率的分散程度, 可用于衡量算法的稳定性。VDR 的值越低, 说明算法的稳定性越好。图中可见, 当 $SDR = 0.25$ 时, ADDA 算法的稳定性最差; 而 SDR 取 0.5 和 0.75 时, ADDA 和其他算法的稳定性比较接近。

图 5 比较算法诊断时间(s), 该时间值包括了症状交换, 引发症状可能性评估, 症状分配和域内诊断的所需时间。随着域规模的增大, 所有算法的诊断时间全部增大。图中 DDA 算法所需时间最短。ADDA 算法的时间值大于 DDA, 且在不同 SDR 情况下的时间值非常接近。DFI 因为需要为每个跨域症状在所有相关域内进行诊断, 所以花费时间最长。

5 结束语

本文讨论了多域服务环境中的故障诊断问题, 分析了多域环境对故障诊断带来的影响。为建模多域环境下的域内和域间依赖关系, 且保证各域内的结构和信息安全, 本文提出了分布式依赖模型。在此模型基础上, 提出了基本的分布式故障诊断算法和改进的 ADDA 算法。仿真结果显示, 本文提出的 ADDA 算法获得了较好的诊断率, 误判率, 诊断率方差和时间性能。

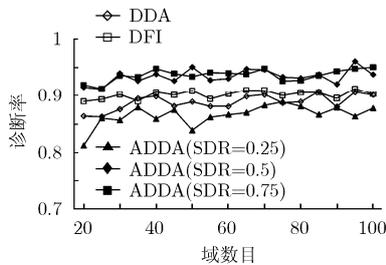


图 2 诊断率比较

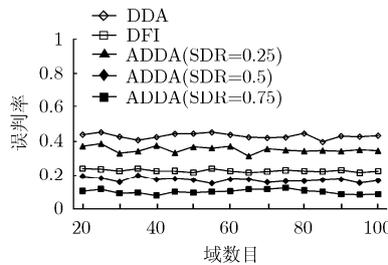


图 3 误判率比较

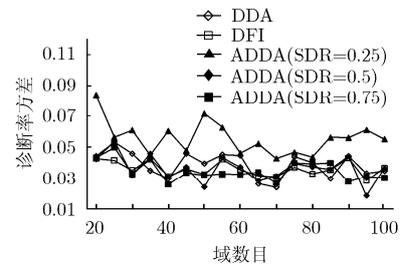


图 4 诊断率方差比较

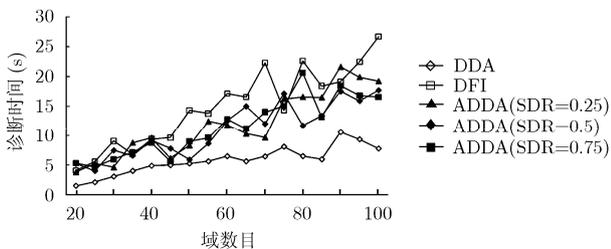


图 5 诊断时间比较

参考文献

[1] Jakobson G and Weissman M. Alarm correlation [J]. *IEEE*

Network, 1993, 7(6): 52-59.

[2] Li F and Thottan M. End-to-end service quality measurement using source-routed probes [C]. 25th IEEE International Conference on Computer Communications, Barcelona, Spain, April. 23-30, 2006: 1-12.

[3] Nguyen H X and Thiran P. Using end-to-end data to infer lossy links in sensor networks [C]. 25th IEEE International Conference on Computer Communications, Barcelona, Spain, April. 23-30, 2006: 1-12.

[4] Steinder M and Sethi A S. A survey of fault localization techniques in computer networks [J]. *Science of Computer Programming. Computer Systems(AH)*, 2004, 53(22):

- 165-194.
- [5] Jennings B and Malone P. Flexible charging for multi-provider composed services using a federated, two-phase Rating Process [C]. 10th IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. Vancouver, Canada. April. 3-7, 2006: 13-23.
- [6] Katzela I, Bouloutas A T, and Calo S B. Centralized vs distributed fault localization [C]. Proceedings of the Fourth International Symposium on Integrated Network Management IV, Santa Barbara CA, USA, 1995: 250-261.
- [7] Bouloutas A T, Calo S B, Finkel A, and Katzela I. Distributed fault identification in telecommunication networks [J]. *Journal of Network and Systems Management*, 1995, 3(3): 295-312.
- [8] Steinder M and Sethi A S. MultiDomain diagnosis of end-to-end service failures in hierarchically routed networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed System*, 2007, 18(3): 379-392.
- [9] Fischer W, Xie G, and Young J. Cross-domain fault localization: a case for a graph digest approach [C]. IEEE Third Workshop on Internet Network Management (INM'08), Orlando, FL, USA, 2008: 1-6.
- [10] Khanna G, Cheng M Y, Varadharajan P, Bagchi S, Correia M P, and Verissimo P J. Automated rule-based diagnosis through a distributed monitor system [J]. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2007, 4(4): 266-279.
- [11] Huang X H, Zou S H, Wang W D, and Cheng S D. Fault management for Internet service: modeling and algorithms [C]. IEEE International Conference on Communications, Istanbul, TURKEY. June. 2006: 845-859.
- [12] Steinder M and Sethi A S. Probabilistic fault diagnosis in communication systems through incremental hypothesis updating [J]. *Computer Networks*, 2004, 45(4): 537-562.
- [13] Chu L W, Zou S H, Cheng S D, and Wang W D. Active probing based Internet service fault management in uncertain and noisy environment [J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2008, 51(11): 1857-1870.
- [14] Bagchi S, Kar G, and Hellerstein J. Dependency analysis in distributed systems using fault injection: application to problem determination in an e-commerce environment [C]. 12th International Workshop on Distributed Systems: Operations and Management, Nancy, France. 2001: 1-14.
- [15] Basu S, Casati F, and Daniel F. Web service dependency discovery tool for SOA management [C]. 2007 IEEE International Conference on Services Computing, Salt Lake City, UT. July. 9-13, 2007: 684-685.
- [16] Steinder M and Sethi A S. Probabilistic fault localization in communication systems using belief networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004, 12(5): 809-822.
- 褚灵伟: 男, 1982 年生, 博士, 研究领域为服务故障管理、Web 服务技术。
- 邹仕洪: 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 研究方向为移动无线网络、网络服务质量与服务管理等。
- 程时端: 女, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为网络性能评估、QoS。
- 田春岐: 男, 1975 年生, 讲师, 研究领域为计算机网络服务质量、P2P 信任管理与激励机制。
- 王文东: 男, 1963 年生, 教授, 研究领域为高速网络理论技术。
- 胡 博: 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 研究领域为移动性管理、宽带路由与交换、新型互联网体系结构。