

基于大规模路由模拟的强度测试及结果分析

崔 勇, 徐明伟, 徐 恪, 吴建平

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘 要: 随着互联网规模的扩大, 路由器中路由协议实现的处理能力和稳定性越来越重要. 本文提出了路由协议实现的强度测试技术, 并使用我们所研制的测试仪 IP TEST 对 CISCO2600 路由器进行了强度测试, 证明其 OSPF 实现的计算复杂度是 $O((\ln N)^4)$, 并给出了其支持的网络规模上限. 实验证明, 这种强度测试技术可以测试路由协议实现大规模路由抖动时的稳定性及其计算复杂度和可扩展性, 并可广泛用于测试其他路由协议实现如 RIP、BGP 等.

关键词: 强度测试; 路由协议; 测试方法; 随机 Petri 网

中图分类号: TP393.06 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 08 1238-04

Stress Testing and Result Analysis Based on Large-Scale Route Simulation

CUI Yong, XU Ming wei, XU Ke, WU Jiarping

(Dept. of Computer Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The stability and capability of routing protocol implementations (RPI) in a router is becoming more and more important with the growth of Internet. This paper proposes a novel approach named stress testing technique to test RPI. Comparing with traditional testing techniques, we propose the abstract method of stress testing and build the test environment. A stochastic Petri Net model given in this paper illustrates the stress testing process for OSPF. Based on this approach, we test CISCO2600 with tester IP TEST. The result shows: the computational complexity of its OSPF implementation is $O((\ln N)^4)$ and the upper bound is 43,000 networks. This experiment shows that the stress testing technique can be used to inspect the stability, the computational complexity and scalability of RPI. Furthermore, this test technique can be widely used to inspect other types of RPI, such as RIP, BGP etc.

Key words: stress testing; routing protocol; test method; Petri net model

1 引言

Internet 中每个路由器通常具有很多路由表项, 当一个路由器启动时, 其他路由器往往在很短的时间内向其发送大量路由信息, 这种大规模高速路由交互常常会导致路由器崩溃. 然而目前有关路由协议的研究往往偏重于理论方面, 缺乏在大数据量的路由信息交互状况下对具体协议实现的测试^[1~4]. 有关路由协议方面测试的研究主要集中在一致性测试上^[5,6], 并有了一些标准^[7]. 有关性能、稳定性方面的测试研究很少, 虽然测试仪厂商纷纷推出了测试平台^[8~11], 但这些测试平台只是提供最基本的路由信息发送功能, 而缺少系统的测试方案和测试结果分析方法, 更没有一个较为成熟的大规模路由数据测试手段和结果分析方法. 因此, 使用这些仪器的人员往往制定出不合理的测试要求. 本文为此提出了强度测试方法, 基于路由协议仿真与被测路由器的协议实现进行动态的大规模高速路由交互, 从而实现了对路由协议的测试.

2 协议测试分类比较

传统上协议测试被人为地分成三种类型: 一致性测试、互

操作性测试和性能测试^[12]. 其中一致性测试、互操作性测试属于功能测试范畴, 用于测试网络部件输入、输出行为之间的功能关系.

定义 1 一致性测试

一致性测试依据协议描述对协议的某个实现进行测试, 检测被测系统中的协议实现 IUT (Implementation Under Test) 是否严格遵守相应的协议描述^[7].

由于协议一致性测试是有穷测试, 以及测试中可能会出现测试结果不确定的测试例, 因此对一个协议实现单纯进行一致性测试并不能确保它与另一个协议实现之间的成功通信, 还需要将协议实现放在一个实际的通信网络环境中进行测试.

定义 2 互操作性测试

互操作性测试是检测不同的协议实现之间是否能够成功可靠地进行通信交互的测试方法, 其重点是测试协议实现之间互操作的能力.

一个协议实现能否通过一致性测试和互操作性测试是它能否入网与其他系统成功互通的决定性保障.

定义 3 性能测试

性能特性通常建立在功能测试的基础上, 着重关注于协议实现的性能参数, 包括吞吐量、传输延迟、抖动等, 并以此对系统做出正确的性能评价。

除了上述的三种基本测试类型外, 为了测试在下层协议不稳定、网络传输丢失率高、延迟大等特殊情况下协议或者系统的适应能力和错误恢复能力, 定义了鲁棒性测试。

定义 4 鲁棒性测试

鲁棒性测试主要监测协议实体或者系统在人为制造的恶劣环境下正常运行和错误恢复的能力。

然而, 以上的几种测试方法并不能够测试在路由协议泛滥下的系统稳定性, 以及路由抖动时系统的稳定性, 更无法估算出协议实现中路由表项的个数与计算量的复杂度关系。

定义 5 强度测试

强度测试是在路由层面上模拟大规模网络环境, 通过协议仿真实现与 IUT 快速交互大量路由分组, 用以检测 IUT 的运算复杂度和在高速接收路由信息时的处理能力及其上限。

强度测试着重于大数据量和快速交互这两个方面。与性能测试相比, 强度测试主要强调在大数据量时协议实现的稳定性以及 IUT 能够支持的程度。由于路由协议分组并不涉及到通常所说的吞吐量、传输延迟、延迟抖动等概念, 因此性能测试是不适用于路由协议的。与鲁棒性测试相比, 强度测试并不制造与极端恶劣的环境(如交互大量 MaxAge 路由等), 也不关心错误恢复的问题。强度测试属于性能测试范畴, 与各种的性能测试一样都是基于功能测试的。

3 强度测试方法

我们设计了如图 1 所示的路由协议强度测试的抽象测试方法。PDU (Protocol Data Unit) 为协议数据单元, PCO (Point of Control and Observation) 为控制观察点, ASP (Abstract Service Primitive) 为抽象服务原语, SAP (Service Access Point) 为服务访问点。测试管理器的作用是根据测试目的, 完成测试生成的功能, 并将测试生成的结果——模拟的网络拓扑信息发送给下测试器 LT (Lower Tester)。LT 负责采集 IUT 发送来的 PDU, 并根据收到的 PDU 产生相应的测试数据, 通过服务提供者与 IUT 交互。从这个模型可以看出, LT 和 IUT 之间的 PDU 交互采用的是一个虚拟通道, 实际上是通过服务提供者(网络)实现的。在 LT 与服务提供者之间选取了 PCO, 对 IUT 的行为进行监控和分析。服务提供者通过网络接口实现分组传输 ASPs。

强度测试环境如图 2 所示。研制了测试系统 IP-TEST 来完成测试管理器和 LT 的工作。该系统包含两个部分: 测试仪



图 1 抽象测试方法

图 2 路由模拟强度测试环境

和监控机。监控机主要的功能是实现有好的用户界面并控制测试仪完成各种功能。测试仪主要提供了路由模拟的功能, 通过 OSPF 协议仿真模拟大规模网络环境与 IUT 交互。网络数据统计分析工作站监测 PCO 并统计分析数据。IUT 是具有 64M 内存运行 IOS12.0 的 Cisco2600 路由器, 服务提供者是 10Mbps 的以太网。

4 OSPF 强度测试过程描述

下面基于随机 Petri 网 SPN (Stochastic Petri Net) 对 OSPF 协议实现的强度测试过程进行描述, 如图 3 所示。通过这些位置和变迁之间的关系, 清晰的描述了测试过程中路由信息的传递过程。而协议中 Hello 分组并不包含路由信息, 并且数据量很小, 因此并不是强度测试所关心的内容。令 $i = 1$ 到 4, 位置 P_{si} 表示当前正准备发送数据到网络上, P_{ri} 表示当前正从网络上接收数据, P_{wi} 表示处于等待状态, 等待时钟超时。随机变迁 T_{ni} 表示 P_{si} 发送数据到 P_{ri} 接收数据之间数据在网络上传输的延迟, T_{pi} 表示处理机在接收到网络数据后进行处理的延迟, T_{li} 表示向网络发送数据时数据丢失的可能性, T_{wi} 表示时钟超时的状态变迁。

下面首先介绍图中所涉及到的 OSPF 名词^[13]: 链路状态数据库描述分组 DDP (Database Description Packet) 用于描述测试仪模拟的链路状态信息摘要; 链路状态请求分组 Request 用于描述 IUT 希望得到的链路状态信息; 链路状态更新分组 Update 用于详细描述 IUT 所请求的链路状态信息; 链路状态应答分组 Ack 用于向测试仪表示已经收到的更新分组。

SPN 模型中, 位置 P_{s1} 表示测试仪正在发送 DDP; P_{s2} 表示 IUT 正在发送 Request; P_{s1} 表示测试仪正在发送 Update; P_{s2} 表示 IUT 正在发送 Ack。位置 P_{r1} 表示 IUT 接收 DDP; P_{r2} 表示测试仪接收 Request; P_{r3} 表示 IUT 接收 Update; P_{r4} 表示测试仪接收 Ack。位置 P_{w3} 表示 IUT 在发送 Request 后, 等待接收 Update; P_{w4} 表示测试仪在发送 Update 后, 等待接收 Ack。随机变迁 T_{w3} 表示 IUT 在发送 Request 后, 等待接收 Update 或时钟超时; T_{w4} 表示测试仪在发送 Update 后, 等待接收 Ack 或时钟超时。

5 Petri 网模型化简

上述 SPN 模型描述了强度测试中 IUT 和测试仪的交互过程, 对于白盒测试而言, 可以通过设置多个 PCO 观察到大部分变迁的时间和稳定状态概率, 从而计算出其他不可测量的数据。由于我们采用的是黑盒测试法, IUT 内部是不可观察的, 所以需要简化该模型。

简化方法主要包括三个部分: (1) 无分组丢失: 采用图 2 的测试环境, 在初步实验中测得分组丢失的概率非常小, 因此省略对分组丢失、重传的考虑; (2) 无网络传输延迟: 确认延迟 (1-3 秒) 远大于网络延迟, 因此网络延迟忽略不计; (3) 无测试仪计算延迟: 由于测试仪使用多路平衡树大大减小数据库处理延迟, 而最短路径树的计算在与 IUT 交互之前就完成了, 因此可忽略其计算延迟。

如图 4 所示简化的 SPN 模型, P_{s1} 表示测试仪发送 DDP

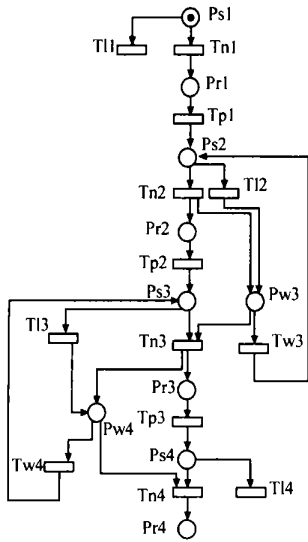


图 3 OSPF 测试过程的 SPN 模型

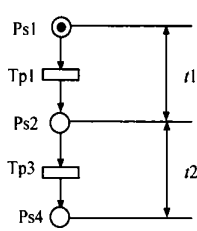


图 4 精化设计后的模型

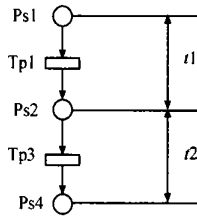


图 5 强度测试系统的 SHLPN 模型

到网络上。Tp1 表示 IUT 在接收到 DDP 后的处理过程及其延迟。Ps2 表示 IUT 发送 Request 分组以及测试仪接收到该分组后发送 Update 分组的过程，由于这个过程的处理时间很短，因此用一个状态来描述。Tp3 表示 IUT 在接收到 Update 分组后的处理过程及其延迟，直到发送 Ack。Ps4 表示测试仪接收到 Ack。

由于这两个变迁可以通过 IUT 的外部行为测量，因此使用这个模型来描述测试过程。最后引入如图 5 所示的具有标识变量的随机高级 Petri 网 SHLPN。位置 Ps1 中具有 N 个标记，每个标记代表一个子网，强度测试就是确定 N 与 t_1 、 t_2 的关系。

6 强度测试结果与分析

强度测试中，测试仪与 IUT 之间实现了大规模高速 OSPF 路由交互。由于 t_1 与 t_2 类似，这里只考虑随机变迁 t_2 的数学期望 $E(t_2)$ 与测试规模 N 的关系，如图 6 所示。Y 轴表示测试仪发出 LSA 到收到相应 Ack 之间的延迟，X 轴是网络节点数 N 。

首先对这个图定性分析。在 $N < 4000$ 时， $E(t_2)$ 为 N 的递减函数，说明 IUT 中 OSPF 实现使用延迟应答机制^[13]：IUT 收到 LSA 时，并不立刻发送 Ack 分组应答，而是等待一定的时间或是收到一定数量(应答门限)的 LSA，然后产生一个应答报文确认。由于 LSA 数量有限，交互过程最后总有一部分尚未应答的 LSA，其数量小于应答门限，因此 IUT 会处在等待状态，期望收到更多的 LSA，直到超时。这部分 LSA 的延迟较大，我们称其为处在等待状态的 LSA。由于此时 CPU 尚未满负荷，因此处理时间很短，不是导致延迟的主要原因。随着 LSA 的数目增

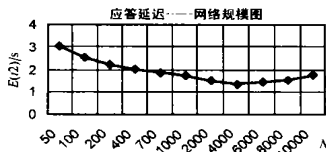


图 6 应答延迟与强度测试规模的关系

大，处于等待状态的 LSA 在所有 LSA 中所占的比例不断减小，因此 $E(t_2)$ 随着 N 的增加而减小。当 N 进一步增大时，由于 IUT 不断进行链路状态数据库操作、计算最短路径树，以及这些计算的规模也不断扩大，IUT 的 CPU 超负荷，导致计算延迟成为主要的延迟而不能及时确认收到的 LSA，因此 $E(t_2)$ 随着 N 的增加而增加。

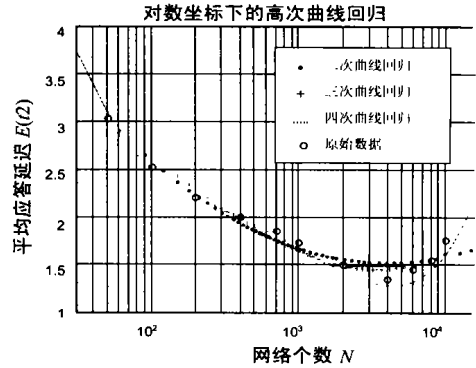


图 7 对数坐标下的高次曲线回归

下面进行定量分析。首先对 N 取对数，令横坐标 $x = \ln(N)$ ，纵坐标 $y = E(t_2)$ ，然后在对数坐标图上通过最小二乘法拟合曲线，如图 7 所示。其中四次曲线回归较逼近测试数据，说明 IUT 的 OSPF 实现的可扩展性较好，其性能 $E(t_2) \propto O((\ln N)^4)$ 。该四次曲线方程为：

$$E(t_2) = 0.0160(\ln x)^4 - 0.4082(\ln x)^3 + 3.8641(\ln x)^2 - 16.4158(\ln x) + 28.8157$$

基于上述曲线方程，可估算出当 $N = 43,000$ 时， $E(t_2) = 5.10s$ 。按照协议规定，5 秒内没有收到确认就重新发送更新分组而导致大量的 LSA 重新传送，并对 IUT 造成严重的负担，导致 IUT 效率急剧下降甚至失效，因此可以认为这是 IUT 所支持的路由表项数目的上限。

7 结论

随着互联网网络规模的扩大，路由器交互所依赖的路由协议实现的性能和稳定性越来越重要。本文提出了强度测试的方法，并与传统的一致性测试、互操作性测试、性能测试和鲁棒性测试进行了比较，进而给出了抽象测试方法和测试环境，并用随机 Petri 网描述了 OSPF 协议实现的强度测试过程，最后使用 IP-TEST 对 CISCO2600 路由器进行了强度测试。从实验结果可以看出，在大规模高速 OSPF 路由交互过程中：CISCO2600 非常稳定；其 OSPF 实现具有较好的可扩展性，计算复杂度为 $O(\ln N)^4$ ；其所能支持的 OSPF 路由表项数目的上限约为 43,000 条。实验证明，这种强度测试方法可以用于测试路由协议实现的稳定性和可扩展性并计算其复杂度和支持的上限，以及测试其他路由协议实现，如 RIP、BGP 等。

参考文献:

[1] Shaikh A, Vama A, Kalanpoukas L, et al. Routing stability in congested networks: Experimentation and analysis [A]. ACM Computer Communication Review [C], Sweden: Per Gunningberg, Oct. 2000, 30(4): 163

- 174.
- [2] Sidhu D, Fu T, Abdallah S, et al. Open shortest path first (OSPF) routing protocol simulation [A]. Computer Communication Review [C]. USA: Oct. 1993. 23(4): 53- 62.
- [3] Cain B. Fast link state flooding [A]. Proc of IEEE GLOBECOM' 00 [C]. NJ, USA: 2000. 465- 469.
- [4] Paxson V. End to end routing behavior in the internet [J]. Networking, IEEE/ ACM Trans, 1997, 5(5): 601- 615.
- [5] Wang J, Hao R, Wu J. TUGEN: an automatic test suite generator integrating data flow and control flow methods [A]. Proc of IEEE International Conference on Communications [C]. New York, USA: 1998. 1: 286- 290.
- [6] Bi J. The research on distributed routing protocol conformance test based on formal techniques [D]. Beijing, China: Dept. of Computer Science, Tsinghua Univ. 1999.
- [7] ISO 9646 [S]. Information processing systems, open system interconnection, OSI conformance testing methodology and framework. 1991.
- [8] OSPF routing protocol emulation software [EB/OL]. [http://www. ixr a. com/](http://www.ixr.a.com/).
- [9] The adtech AX/4000 broadband test system [EB/OL]. [http://www. adtechinc. com/ products/ ax4000. asp](http://www.adtechinc.com/products/ax4000.asp).
- [10] Agilent technologies' QA robot [EB/OL]. [http://advanced. comms. agilent. com/ qarobot/](http://advanced.comms.agilent.com/qarobot/).

- [11] Agilent routertester, internet scale simulation for gigabit and terabit routers [EB/OL]. [http://advanced. comms. agilent. com/ RouterTester/](http://advanced.comms.agilent.com/RouterTester/).
- [12] Rayner D. OSI conformance testing [J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1987, 14(1): 79- 98.
- [13] Moy, J. OSPF version 2 [S]. IETF RFC2328, 1998.

作者简介:



崔 勇 男, 1976 年生于新疆乌鲁木齐, 博士研究生, 1995 年保送到清华大学计算机系读本科, 1999 年本科毕业后在该系直读博士学位, 研究领域包括计算机网络体系结构, 高速互联网路由体系结构, 路由协议的仿真、测试, 以及多目标优化的路由算法及其评价. Email: cy@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn.



徐明伟 男, 1971 年生于辽宁朝阳, 博士, 副教授, 研究方向包括计算机网络体系结构, 计算机网络性能评价和协议测试.

(上接第 1237 页)

- [5] Zhang Junbao, Hui J. Applying traffic smoothing techniques for quality of service control in VBR video transmission [J]. Computer communication, 1998, 21(4): 375- 389.
- [6] Feng W, Rexford J. Performance evaluation of smoothing algorithms for the transmitting prerecorded VBR video [J]. IEEE Trans on Multimedia, 1999, (9): 302- 313.
- [7] Ruenmiller C, Wilker J. An introduction to disk drive modeling [J]. IEEE Computer, 1994, 27(4): 17- 28.
- [8] Ghandeharizadeh S, Kim S H, et al. Placement of continuous media in multi zone disks [J]. Multimedia Information Storage and Management, 1996: 23- 35.
- [9] Kang J, Yeom H Y. Storing VBR Data on MZR Disks [A]. In Proc of the International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video [C]. June 1999.

- 48- 52.
- [10] 谢建国, 陈松乔. VBR 视频在 MZR 磁盘上的比例安置 [J]. 计算机工程与应用, 2001, 37(18): 22- 25.
- [11] MPEG trace [EB/OL]. [http://nero. informatik. uni-wuerzburg. de/MPEG/trace](http://nero.informatik.uni-wuerzburg.de/MPEG/trace).
- [12] Marshall A W, Olkin I. Inequalities: Theory of Majorization and its Applications [M]. New York: Academic, 1979.
- [13] Sanjay G R, Raghavan S V. Fast techniques for the optimal smoothing of stored video [J]. Multimedia System, 1999(7): 222- 233.
- [14] 谢建国, 陈建二, 等. 视频服务器中多网络 I/O 的调度与接纳控制 [J]. 软件学报, 2002. 8.
- [15] 林亚平, 程友清. 因特网上视频多点传输算法研究 [J]. 电子学报, 2001, 29(11): 1503- 1506.