

优化端至端 SLA 的代价分析

摘要 文章提出了优化端至端 SLA 的代价模型。模型分析了在一定的网络流量下如何以最小的链路带宽和路由器缓冲获得满意的网络吞吐量、单向延迟以及丢包率。文章最后基于网络仿真器 ns-2 给出了代价模型的一个具体实现。

关键词： 代价； 带宽； 缓冲； 吞吐量； 单向延迟； 丢包率； ns-2

1 引言

上世纪九十年代中期以来，随着互联网和公司网络的增长，Internet 上的商业活动日益增多，包括政府机关、科研机构、大型企业以及一般消费者，他们已逐渐利用基于 Internet 的网络服务作为其商业活动的一种手段，因此网络服务管理和用户管理已成为 Internet 管理的重点。其中网络服务管理的研究重点也已从网络有效性（连通性）管理转到可接受的服务质量管理（Quality of Service, QoS）。

为了给用户提供端到端的服务质量保证，服务提供商同用户通过 SLA（Service Level Agreements）来协商 QoS 级别。SLA 是服务提供商和用户之间为相互协商的 QoS 级别签订的一个服务期望行为和 QoS 参数的合同。

SLA 参数的定义还没有一个公共的标准，IETF 的 IPPM 工作组定义了三个常用的 SLA 参数：吞吐量、单向延迟、丢包率。

吞吐量：实际传输带宽，可以用每秒的字节数来记。FTP，VoIP，视频点播等应用都需要有足够的吞吐量。

单向延迟：IP 包经过 A、B 两点时的时间差。对于 VoIP 来讲，延迟越大失真也就越大。

丢包率：在 A 点出现，在 B 点未出现的 IP 包占在 A 点出现的所有包的百分比。丢包率越大，报文重传率也就越高、单向延迟越大、听觉失真也越严重。

随着网络上应用的增多，用户对 QoS 的要求也越来越高，网络服务提供商必须从软件和硬件两个不同的角度去提高网络的服务性能。

软件方面可以增加或修改某些网络协议，譬如增加 DiffSer，改变路由器转发算法。

硬件方面可以增加网络瓶颈处的带宽或关键路由器缓冲队列长度等网络参数来改善网络性能，但不能一味增加，这样花费太大，如何以最小的代价增加硬件性能来满足用户的 QoS 需求这是文章研究的重点。

文章依据最优化理论，在一定的网络流量下，通过增加网络瓶颈处的带宽或关键路由器缓冲队列长度建立了优化三种 SLA 参数（吞吐量、单向延迟、丢包率）的代价模型，并基于网络仿真器 ns-2 给出了一个实现此模型的方法。

2 网络仿真器 ns-2 简介：

在过去的十几年里，internet 上的应用越来越多，应用上的一些特殊需求导致了许多新的协议和算法出现。这些需求包括服务质量的支持，组播传输，网络安全，移动网络，以及策略管理。对新的协议和算法的开发和评估需要涉及许多设计方面的问题。尽管可以在实验室、宽区域的测试床或定制的仿真器对他们进行小范围的评估，但是建造测试床和试验环境相当昂贵，并且很难重新配置，此外，重复某些网络现象也是很困难的，例如无线电波干扰，

基金项目：本文受国家 863 课题“2001AA112060”资助。作者简介：葛立青，硕士研究生，主要研究方向为网络行为学。程光，博士研究生，主要研究方向为网络行为学。龚俭，工学博士，教授，博士生导师，主要研究方向包括网络管理、网络安全、网络行为学等。

因此要比较和评估协议设计需要付出巨大的努力。

为了用模拟的方法进行协议设计,研究人员常常在小范围的拓扑结构和简单静态的假设下对单个的协议进行模拟。创建一个全面的先进的网络模拟环境因为很高的花费而难以实现。因为这个限制,不同工作组的模拟结果就缺乏标准和难以重复。因此需要一个被广泛使用的多协议网络仿真器。**ns-2** 就是这样的多协议网络仿真器。

ns-2 是 **VINT(Virtual InterNetwork Testbed)**工程研究组为网络研究人员进行新的互联网协议的设计和部署提供的先进的仿真工具, **ns-2** 具有以下特征:

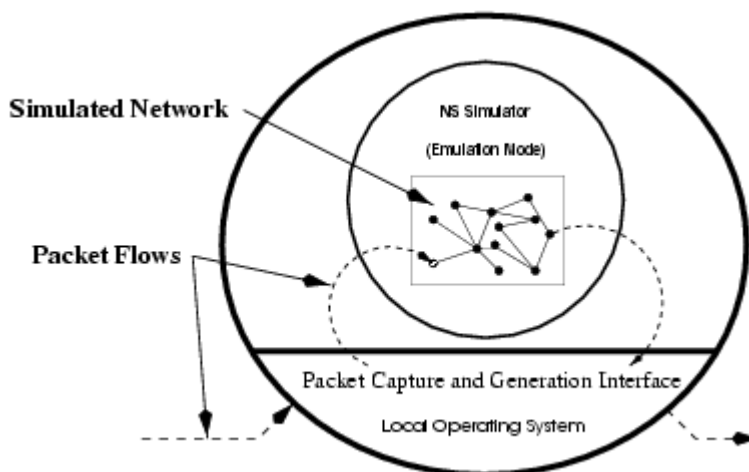
1. 抽象(**abstract**): 不同的仿真粒度能适应不同细节和不同层次的仿真。研究者能在许多不同的网络层次来对协议进行研究。范围可从一个单一协议到许多数据流的聚合以及许多协议的交互。
2. 仿效(**emulation**): 大多数模拟试验仅仅是用仿真器里的协议和算法。而仿效允许一个正在运行的 **ns-2** 仿真器和实际的网络进行互操作。
3. 特定情节(**scenario**)的生成: 在适当的条件下测试协议对于取得有效的、可用的结果是十分关键的。**Ns-2** 提供了复杂的流量模式、拓扑结构、以及动态事件(连接失效等)的自动创建。这些有助于生成特定的情节。
4. 可视化: 研究者需要工具来帮助他们理解网络仿真的复杂行为, 仅提供性能的统计数字表不足以全面反映网络的行为。**VINT** 提供了可视化的网络行为动态显示工具 **nam**, 它有助于培养网络研究者对协议行为的直觉认识, 有助于进行协议行为调试
5. 可扩展性: 仿真器应该容易扩展以至于使用者能增加新的功能、设定不同的情节, 研究新的协议。**Ns** 提供了两种程序设计工具(**Tcl,C++**)使得运行脚本更容易写, 以及新协议的运行更有效。

基于 **ns-2** 的仿真测量的基本途径是先生成特定的情节然后再将需要的流量加入。特定情节的生成需要完成三项任务:

- ! 网络的拓扑结构: 定义节点之间的连接以及带宽等网络特征
- ! 网络流量模型: 设定发送者和接收者的位置以及相关的要求
- ! 网络的动态行为: 包括节点和连接的故障等网络动态特性

这三项任务的具体实现需根据实际被模拟网络的情况来设定。

网络流量的注入方式如图 1

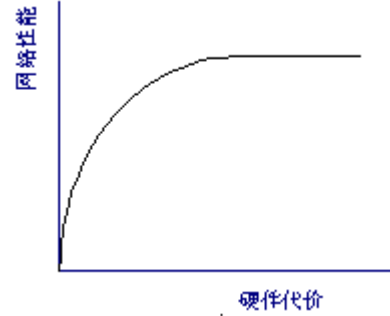


(图 1)

其中特定情节的生成是仿真测量的关键环节,它需要你对网络的每一细节有足够的了解包括路由器的配置、链路的带宽和延迟等。

3 优化 SLA 的代价模型

在不变的网络流量下，硬件设备代价和网络服务性能之间的关系如图 2 所示。从图中可知，在硬件代价较低的时候，网络服务性能随着硬件代价的增长快速提高，但当硬件代价增加到一定的时候，网络性能提高的幅度很小。根据曲线，一定的网络性能仅需付出一定的网络硬件代价，这个代价就是所要求的最小硬件代价。



(图 2)

这里建立的代价模型着重研究网络瓶颈链路的带宽和关键路由器缓冲区大小给三种 SLA 参数(吞吐量、单向延迟、丢包率)带来的影响。

设硬件代价为 Cost (元)，网络瓶颈处的带宽为 x (Mbps)，关键路由器缓冲区长度为 y (byte)。吞吐量为 u (byte/s)，单向延迟为 v (s)，丢包率为 w 。则：Cost 和 x 、 y 之间的关系为

$$\text{Cost} = f(x, y) \quad (1)$$

公式(1)有如下性质：

- Cost 是 x 的单调递增函数
- Cost 是 y 的单调递增函数
- x 和 y 对 Cost 的影响是相互独立的

u 、 v 、 w 也都是 x 、 y 的函数：

$$u = f_1(x, y); v = f_2(x, y); w = f_3(x, y)$$

设用户的要求 $u \geq d1$; $v \leq d2$; $w \leq d3$ 。则所求目标的数学表示为：

$$\begin{aligned} \min \text{Cost} &= f(x, y) \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} f_1(x, y) - d1 \geq 0 \\ f_2(x, y) - d2 \leq 0 \\ f_3(x, y) - d3 \leq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

这是带约束的非线性最优化问题，只要其中的函数和条件确定就可求出最小的 Cost。

为了便于求解 f_1, f_2, f_3 ，在下面的研究实例中分别固定 $x(x_0)$ 和 $y(y_0)$ ，然后利用 ns-2 进行仿真测量求出 $f_1(x_0, y), f_2(x_0, y), f_3(x_0, y), f_1(x, y_0), f_2(x, y_0), f_3(x, y_0)$ 。则计算最小的 Cost 可按照下述步骤进行：

1) 若 y 不变，因为 u 、 v 、 w 随着 x 的增大性能越来越好，所以设

$$x1 = \min\{x \mid f_1(x, y_0) \geq d1\};$$

$$x2 = \min\{x \mid f_2(x, y_0) \leq d2\};$$

$$x3 = \min\{x \mid f_3(x, y_0) \leq d3\};$$

$$\text{则 } x = \max(x1, x2, x3);$$

最后根据公式 (1) 计算出 Cost。

2) 若 x 不变，因为 v 随着 y 的增大性能越来越差，而 u 、 w 正好与之相反，故而这里求最优的 y 时不考虑 v (v 性能的增加可通过其他手段，譬如增加带宽)，方法如下：

$$\text{设 } y1 = \min\{y \mid f_1(x_0, y) \geq d1\};$$

$$y3 = \min\{y \mid f_3(x_0, y) \leq d3\};$$

$$\text{则 } y = \max(y1, y2);$$

最后根据公式 (1) 计算出 Cost。

此代价模型的具体实现可以基于 ns-2 根据上节所述的方法仿真实验的网络，注入实际的网络流量从而仿真测量求出 f_1, f_2, f_3 。

4 研究实例

我们的研究实例仅仅是给读者提供一个用 ns-2 来仿真测量 SLA 参数和进行最小硬件代价研究的直观感受。在这个实验中，仿真的体系结构如图 3 所示：链路 AB 的带宽为 100Mbps，延迟为 10ms，CD、CE 之间链路带宽为 10Mbps，延迟 10ms，瓶颈链路 BC 带宽为 1Mbps，延迟 20ms。A 服务器分别向 D、E 客户机发送 HTTP 流量。我们的实验是仿真测量瓶颈链路 BC 之间的端至端吞吐量、丢包率、单向延迟。为了计算这些 SLA 参数，在路由器 B 入口和路由器 C 出口处分别测量时戳和分组 ID。

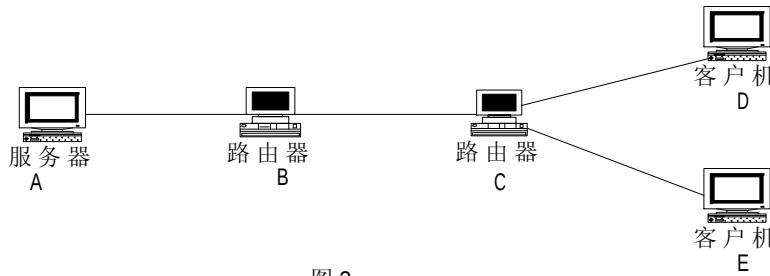


图 3

B-C 段连接是整个网络的瓶颈，我们可以在网络流量不变的情况下通过变化 B-C 段连接的带宽以及路由器 B 的缓冲队列长度来观察 B-C 段端到端吞吐量、丢包率以及单向平均延迟的变化，以求它们之间的函数关系。模拟时间为 30s。其中设 $Cost = a * x + b * y$ ， $d_1 = 1500$ 、 $d_2 = 0.03$ 、 $d_3 = 1\%$ 。

1) 改变带宽（其他网络参数不变，队列长度为 $10 * 1000$ byte）

带宽从 0.1Mbps 到 15Mbps 时，BC 段吞吐量、丢包率、单向延迟的变化分别见图 4、图 5、图 6（图中红实线表示测量结果，蓝虚线表示拟合后的函数）。从图中可看出：在 BC 段带宽从 0.1Mbps 增加到 3Mbps 时，吞吐量急剧增大，丢包率、单向平均延迟急剧减小。但当带宽从 3Mbps 继续向上增加时，三种 SLA 参数性能增加幅度越来越小，若盲目的继续增大带宽只会浪费资源。

在一定的误差许可下，根据最小二乘法求拟合函数 f_1 、 f_2 、 f_3 可得：

当 $0.1 \leq x \leq 15$ ， $y = 10 * 1000$ 时

$$f_1(x, 10000) = 1862.7 \exp(-0.313/x)$$

$$f_2(x, 10000) = 0.0917 \exp(-1.773x) + 0.002$$

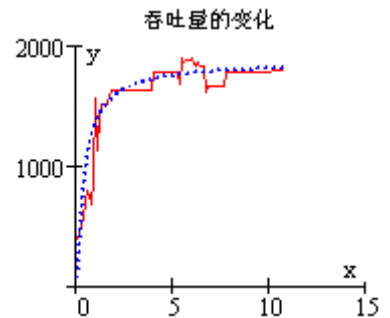
$$f_3(x, 10000) = 0.839 \exp(-5.51x) + 0.01$$

则按计算最小 Cost 的步骤 1) 得：

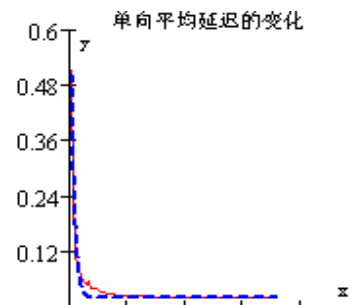
$$x_1 = 1.3, \quad x_2 = 1.6, \quad x_3 = 1.2$$

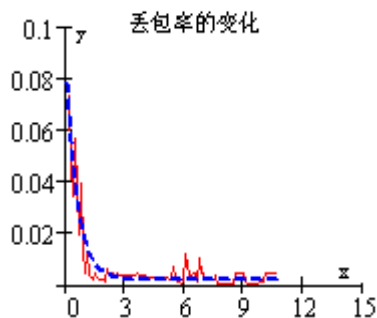
$$x = \max(x_1, x_2, x_3) = 1.6$$

故而 $Cost = 1.6a + 10 * 1000b$



(图 4)





(图 5)

(图 6)

2) 改
带宽为 1Mbps)

变 B 路由器缓冲队列长度 (其他网络参数不变,

缓冲队列的长队以数据报来度量 (每个数据报长度为 1000byte), 队列变化范围从能缓冲 1 个数据报到能缓冲 40 个数据报, 这时 BC 段吞吐量、丢包率、单向平均延迟的变化分别见图 7、图 8、图 9 (图中红实线表示测量结果, 蓝虚线表示拟合后的函数)。从图 7、图 8 中可看出: 和带宽增大的情况相似, 当缓冲队列长度从 1 到 24 时, BC 段吞吐量增加的幅度很大, 丢包率减小的幅度很大。但当队列长度超过 24 时, 吞吐量、丢包率变化很小, 继续增大队列长度意义不大。从图 9 中可看出, 随着缓冲队列长度的增大, 单向平均延迟逐渐增大, 这是由于每个报文在路由器 B 中排队等待处理的时间随着缓冲队列长度的增大而增大。这和代价模型中的假设是一致的, 所以在计算最小 Cost 是不考虑单向平均延迟。在一定的误差范围内, 根据最小二乘法求拟合函数 f_1 、 f_2 、 f_3 可得:

$$f_1(1, y) = 2014.8 \exp(-\exp(1.06 - 0.15y))$$

$$f_2(1, y) = 0.025 + 0.00247y - 3.169y^2$$

$$f_3(1, y) = 0.00825 \exp(5.4406 / y)$$

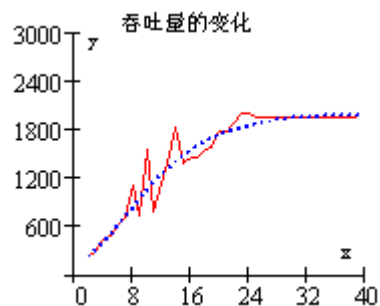
当 $x=1$, $0 < y < 40$ 时

则按计算最小 Cost 的步骤 2) 得

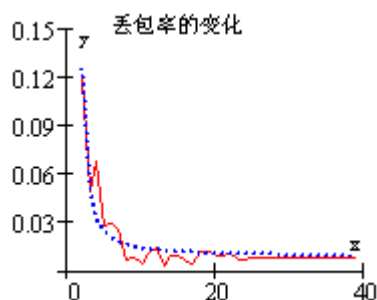
$$y_1 = 14, y_3 = 13$$

$$y = \max(y_1, y_3) = 14,$$

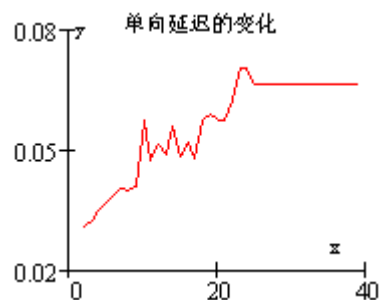
故而 $\text{Cost} = a + 14 \times 1000$



(图 7)



(图 8)



(图 9)

5 结语

QoS 随着网络上应用的增多越来越重要, 如何以最小的代价提供最好的网络服务是网络

研究工作者和网络服务提供商关心的课题。文章从提高瓶颈链路带宽和关键路由器缓冲区长度出发建立了优化端至端网络吞吐量、单向延迟、丢包率的代价模型，并基于Ns-2给出了此代价模型的一个具体实现。但文章建立的代价模型只考虑了带宽和缓冲区长度，其他网络因素对端至端SLA的影响也可建立起相应的代价模型并可利用Ns-2仿真实际的网络给出模型的具体实现。

参考文献

- 1 Michael Welzl . A Stateless QoS signaling Protocol for the Internet .
- 2 Krbin Fall ,Kannan Varadhan . The ns Manual . The VINT Project
- 3 C. Demichelis, CSELT . IP Packet Delay Variation Metric for IPPM . Internet –Drafts.
- 4 V. Paxson ,G. Almes. Framework for IP Performance Metrics . RFC 2330
- 5 G. Almes, S. Kalidindi . A One-way Packet Loss Metric for IPPM . RFC 2680.
- 6 G. Almes, S. Kalidindi . A One-way Delay Metric for IPPM . RFC 2679

Cost-model of optimizing point-point SLA

GE Li Qing CHENG Guang GONG Jian

(Southeast University Computer Science Department , Nanjing 210096,China)

Abstract: A Cost-model of optimizing point-point SLA is proposed in this paper, which analyse how to get better throughput , one-way delay,packet loss through the least bandWidth and buffer of router . In the end there is implementation of the model based on Network Simulator ns-2.

Keywords: Cost; BandWidth; Buffer; Throughput; One-way Delay; Packet Loss; ns-2