

Internet 流量模型的研究^{*}

时培昕 雷振明

(北京邮电大学信息工程学院宽电信技术研究中心 北京 100876)

摘 要 对于网络性能评价,一种有效的流量模型是不可或缺的,然而很难找到这种既简单又正确的模型。本文吸取了经验模型的 TCP 连接流量模型的优点,提出一种 WWW 流量模型。通过严格的仿真和模型验证,证明该模型与实际流量吻合得很好,且易于实现。

关键词 Internet 流量模型,自相似,WWW 应用

A Research on Internet Traffic Modeling

SHI Pei-Xin LEI Zhen-Ming

(College of Information Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract An effective traffic model is necessary when we are evaluating network performance, and it is hard to find a simple but correct model. In this paper, we propose a WWW traffic model that combines the advantages of empirical parameter models and TCP connections throughput models. Through rigid simulation and model verification, we prove that the model conforms to real traffic exactly and easy to be implemented.

Keywords Internet traffic modeling, Self-similar, WWW application

0 引言

在对包括拥塞控制、接纳控制、队列管理和调度等各个方面网络性能的研究过程中,为了检验一个想法,我们通常使用网络仿真或者网络流量模型。对于端到端的拥塞控制、实时的媒体传输等,由于考虑的是中间网络施加的影响,因此我们需要构建一套完整的网络仿真拓扑,才能考虑应用层、传输层以及网络层所共同产生的作用。仿真的优点是系统全面,结果能够比较贴近真实的数据,但是实现起来比较复杂,在牵涉到协议改动的时候,往往需要进行大量的工作。目前所使用的网络仿真工具主要是指 NS^[1]和 OPNET^[2]。

同时,对于相对比较独立的功能,如接纳控制、队列管理和调度以及其他网络性能的评估等,仿真就显得多余有时甚至是无能为力了。比较常用的方法是把一个合适的网络流量模型叠加在需要验证的机制上,以模型产生的流量代替实际或者仿真中产生的流量,来分析结果和预期之间的差异。这时候,我们就不需要引入包括 TCP/IP 在内的协议栈,省去了大量同协议相关的运算,缩短了算法的验证周期。这种方法的关键在于流量模型是否能够反映真实网络中的流量特性,并且是否具有适应不同场合的能力。

本文结合了应用层参数模型和传输层连接模型的优点,提出了一种基于 TCP 连接流量特征的 WWW 流量模型,经过仿真和模型验证,这种模型很好地吻合了实际流量。首先简单概括了 Internet 流量特性研究的一些背景。针对应用层的参数模型以及 TCP 连接模型分别进行了详细的介绍,然后提出了 OWTM(Object-based WWW Traffic Model)模型。通过仿真和严格的模型检验,证明了这种模型同仿真的数据具有很强的相似性。最后,我们对模型的特点和意义进行了定性的

分析和说明。

1 Internet 流量简介

1.1 Internet 流量的自相似特性

最早的流量特性研究开始于传统电话网络的业务模型,使用无记忆的泊松流以及排队理论对网络性能进行建模分析,取得了相当成功的效果。但当把这套理论应用到包交换网络中时,却发现预期的结果与实际结果差异非常大,原先的模型根本无法使用。自从文[3]发现 LAN 上的流量具有自相似特性之后,关于网络流量的自相似特性研究就没有间断过。文[4]在对收集到的大量 FTP、Telnet 报文进行仔细分析之后指出,泊松模型已经不适合 WAN,取而代之的将是突发性很强的自相似流量。文[5]也针对大量的 WWW 流量进行了自相似验证,并指出产生自相似特性的最主要原因来自报文大小的重尾分布。在此之后,文[6,7]又分别提出了变化速率视频流量以及七号信令网络流量的自相似特性。

自相似的特性为流量研究开拓了一片全新的领域。一方面,我们完全可以根据它的特点,利用相关的数学工具构造出同现实环境非常接近的流量模型来检验网络的性能。另一方面,自相似流量的突发性、长程相关性又对我们的网络设计和优化提出了前所未有的挑战。但是由于缺少有效的数学工具,目前对自相关流量的研究还刚刚起步,这里面包括使用简单的数学运算估计流量的自相似程度——Hurst 参数^[8]和利用自相似流量进行某些网络功能的验证^[9]。

1.2 Internet 流量模型

现有的流量模型大致可以分为三种。一类是利用现有的各种应用层参数模型,通过仿真所产生的网络流量。这种模型也叫做经验模型(Empirical Model),它们通过直观的参数反

^{*} 本文由国家重大自然科学基金项目“高速信息网中关键基础问题”(项目编号:69896240)资助。时培昕 博士生,研究方向:ATM 与 IP 技术研究。雷振明 教授,主要从事 IP/ATM 宽带网络方面的研究。

映特定应用(WWW、FTP 或 Telnet)一些内在的不变特征,而这些特征同仿真环境是完全独立的。文[10~12]都在这上面做过大量的研究工作,总结出了相对稳定的经验模型。使用仿真产生的结果同现实的流量具有很强的相似性,但是它反映的只是应用层的参数特征,我们无法直接分析它所具有的传输层和网络层的特性。另一类是单纯的数学模型,即通过数学运算产生具有自相似特性的时间序列去拟合网络的流量,如文[13]中提到的分形高斯噪声、多重重尾分布叠加、M/G/∞ 处理模型以及 FARIMA 过程。它的优点是简单,只牵涉到数学运算而不需要设置很多参数,但是这种方法产生的只是一种具有自相似特性的数据,而并非我们所需要的特定应用的网络流量。还有一类模型是以单个连接的流量模型为单位,把许多这样的模型叠加产生近似的流量模型,如文[14]。这种模型虽然可以动态地体现网络层和传输层的流量特征,但是它无法反映特定应用的流量特性。总之,这些模型都存在各自的优势和缺陷,如何把这些模型统一起来就成为我们研究流量模型的关键。

Internet 上的应用大多数都是基于 Client/Server 模式的,尤其以 WWW 业务为代表。在下面的分析中,我们将以 WWW 流量为例,并不失一般性地把这个结果推广到其他 Internet 应用上。

2 OWTM 流量模型

OWTM 模型以 TCP 连接在慢启动阶段的吞吐量流量模型为基础,以参数的形式直观反映了我们所关心的 WWW 业务特性,能够让我们同时得到同应用层和传输层、网络层相关的信息。在介绍 OWTM 模型之前,我们需要引入它的两个主要成分:WWW 参数模型和 TCP 慢启动流量模型。

2.1 WWW 参数模型

WWW 业务的基本单位是会话(Session),即一个用户从打开浏览器到关闭所有浏览器的过程,包括一系列发送请求、接收数据以及发送响应的子过程。它的主要特征参数如下:

- Request-Size:请求的大小;
- Session-Size:会话中所打开的页面个数;
- Inter-Page:页面开始时间的间隔;
- Page-Size:页面所包括的对象个数;
- Inter-Object:对象开始时间的间隔;
- Object-Size:对象的大小。

研究证明,尽管 WWW 流量千变万化,但是这些决定 WWW 流量宏观特性的参数却存在着某些统计规律,基本上可以看作是随机变量。通过采集和分析大量的数据来确定这些随机变量的分布,把它们归纳成相对稳定的经验参数,这就形成了 WWW 参数模型。文[10~12]等提出了各自的参数模型,虽然样本空间大小的不同导致它们之间存在一些差异,但这些差异都只是表现在某些统计特性,如均值、方差的细小差别上,对模型的整体并没有太大影响。同时,我们考虑的并不是单个用户的流量特性,而是许多具有独立同分布的用户流量叠加之后的结果,参数的统计特性差异会在叠加的过程中得到一定的削弱。

我们借鉴了文[12]所使用的 WWW 参数模型,其优势在于很好地体现了上面参数之间的层次关系,并且在 NS 下得到实现,便于我们进行模型验证。它对上述特征参数的设置如表 1 所示。

表 1 WWW 模型的参数设置

特征参数	特征参数的分布	说明
Request-Size	Exponential	Mean: 1, std: 1.5
Session-Size	Exponential	Mean: 10, std: 5
Inter-Page	Pareto	mean: 50, shape: 2
Page-Size	Pareto	mean: 4, shape: 1.2
Inter-Object	Pareto	mean: 0.5, shape: 1.5
Object-Size	Pareto	mean: 12, shape: 1.2

多个用户叠加之后的 WWW 业务流量不仅与上面的参数密切相关,还受到另外两个参数的影响:会话的数目(Session-Number)和会话开始的时间(Session-Start-Time)。Session-Number 表示对流量有贡献的会话数目,显然会话数目越多,流量所表征的网络负载程度就越高,对于我们需要模拟的特定的网络规模和特定的时间段来说,这个值一般是确定的;Session-Start-Time 则间接地反映了不同时间段的网络变化趋势,我们可以使用均匀分布来表示网络利用率平稳时段,也可以用高斯分布来表示上网高峰时段。具体的统计特性依赖于特定的模拟环境。这两个参数共同决定了 WWW 业务的流量密度、包络以及负载程度等宏观特性。

2.2 TCP 慢启动流量模型

统计表明,大部分的 TCP 连接并没有遭遇到报文丢弃,而在慢启动阶段就已经结束。我们的 TCP 流量模型^[15]就是建立在这个结论上。它主要依据了 TCP 拥塞控制机制中的两个关键思想:

- 以 RTT 为单位, TCP 连接的吞吐量在慢启动阶段按指数增长;
- 由于网络中存在瓶颈带宽而限制了 TCP 流量的增长速度,当 TCP 连接的突发流量超过 Bandwidth-Delay Product (BDP)之后,流量会稳定在瓶颈带宽 V_B 上。

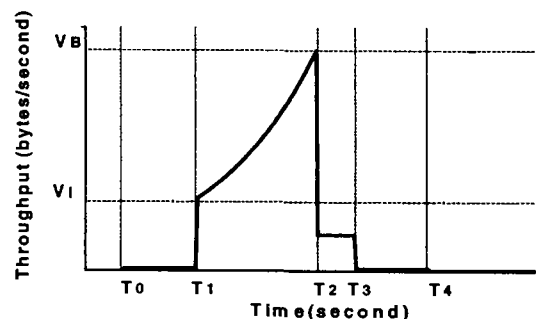


图 1 TCP 慢启动流量模型 1

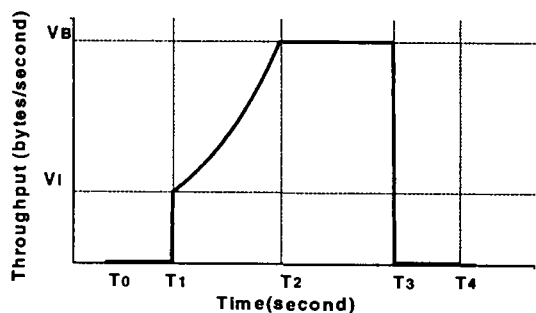


图 2 TCP 慢启动流量模型 2

从上面可以知道,当 TCP 连接上需要传输的数据量超过

一定门限时,就会发生 TCP 流量稳定的现象。图 1 和图 2 分别表示了当 TCP 连接上所承载的数据低于和超过这个门限 V_{th} 时, TCP 连接的流量模型。

在这个模型中,环回时间 RTT 和瓶颈带宽 V_B 决定了图 1 和图 2 中的各个参数。为了便于分析,我们沿用了文[15]中关于 RTT 取值为恒定值的假设,而且我们在文[15]中也证明了,模型不会因 RTT 的小范围的波动而产生较大的变化。对于我们所研究的特定的网络来说,RTT 和 V_B 都可以认为是比较稳定的值,通过大量的采样数据获得它们的典型值。RTT 可以根据 TCP 协议中的指数平均方法获得^[17],而 V_B 则可以从响应的返回速度中得到^[18]。

2.3 OWTM 流量模型

WWW 参数模型的最小单位是一个对象(Object),可通过一个 TCP 连接来承载。而这个 TCP 连接的流量模型我们完全可以套用上一节的慢启动流量模型,这就是 OWTM 模型的出发点。由于 WWW 业务是一个典型的 Client/Server 应用,它包括用户发送的请求、服务器返回的数据以及用户的响应,其中最主要的是服务器返回的数据,我们在以下的分析着重分析这部分流量的特性,对它的流量进行建模。而用户请求流量的特性完全可以按照类似的方法归纳出来,在这里不再详述。

首先,必须明确模型的应用场合,也就是它需要模拟的实际环境。这主要由 WWW 参数模型中 Session-Number、Session-Start-Time 以及慢启动模型中 RTT、 V_B 等参数的设置来决定。前面已经说过,它们的设置同特定的网络规模、特定的时间段有很大的联系,可以根据实际的情况选择不同的参数来表征不同的模拟环境。

然后,根据表 1 中的各个参数的分布和对应的统计特性,产生它们所对应的随机值。当所有的随机值都已经确定的时候,我们就会获得每个会话中每一个对象的大小以及它的开始时间。设 N_{obj} 表示所有对象的个数, t_i 表示每个对象的开始时间,而 S_i 表示每个对象的大小(以需要使用的 MTU 个数为单位),RTT_i 和 $V_{B,i}$ 分别表示对应的环回时间和瓶颈带宽,我们就可以得到在 t 时刻所有用户叠加之后的流量 $T(t)$ 为:

$$T(t) = \sum_{i=1}^{N_{obj}} T_i(t - t_i, S_i, RTT_i, V_{B,i}) \quad (1)$$

其中 $T_i(t, S_i, RTT_i, V_{B,i})$ 表示 t 时刻第 i 个对象对应的 TCP 连接的吞吐量,如图 1 和图 2 所示。从(1)中可以看出,模型同文[13]所提到的 ON/OFF 模型基本上是一致的,不同之处在于它同时还反映了我们所关心的应用层宏观特征。

3 仿真和模型验证

这一节将对 OWTM 模型进行验证,观察它同 NS 仿真所产生的流量的差异以及流量的自相似特性。

3.1 仿真环境

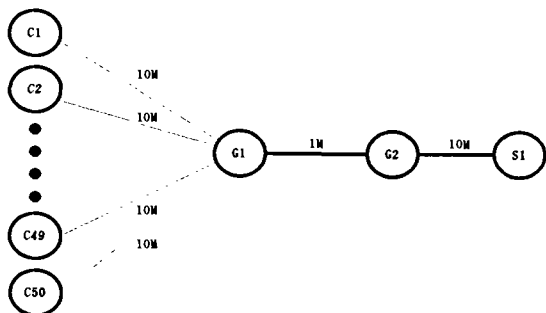


图 3 仿真拓扑

我们使用了图 3 所示的仿真拓扑。共有 50 个会话($C_1, C_2, \dots, C_{50}$)同服务器 S1 建立连接。瓶颈带宽为 1Mbps,其余为 10Mbps。链路延迟都为 5ms。受篇幅限制,我们只分析两种仿真环境下的瓶颈带宽 G_1-G_2 的流量特性。它们对 Session-Start-Time 的设置如表 2 所示,分别体现了网络利用率平稳和集中时的网络特性。其余参数与表 1 中一致。

表 2 两种仿真环境

	Session-Start-Time 分布	说明
仿真 1	均匀分布	$U(0,1000)$
仿真 2	正态分布	$N(300,50)$

我们使用 NS 下的 WebTraf 模块进行 WWW 流量的仿真,该模块完全按照文[12]中关于各个随机变量的设置说明实现,但它使用单向 TCP 连接进行数据传输,而实际上 WWW 服务器返回的响应和用户发送的请求是通过同一个 TCP 连接完成的。我们对此进行了改进,同时增加了建立连接和拆除连接的开销。仿真的结果不仅产生了我们需要的流量数据,同时也产生了每个对象的大小和开始时间,后者则同 RTT(经计算为 48ms)、 V_B (1Mbps)一同作为 OWTM 模型的输入变量,最终通过(1)得到模型的结果。

3.2 模型和仿真数据的差异

判断两种流量的差异并没有一个很好的标准,但由于我们关心的只是网络流量的宏观变化特性,因此使用了一种比较直观的方法来分析两者的区别,即观察网络流量主要的变化趋势。我们分别把仿真和模型所产生的流量数据通过一个低通滤波器,然后观察输出结果的差异。低通滤波器的实现如式(2)所示,其中 $V(n)$ 和 $W(n)$ 分别表示输入和输出的数据,而使用的权值 $W_q=0.01$ 。

$$W(n+1) = (1 - W_q) \times W(n) + W_q \times V(n) \quad (2)$$

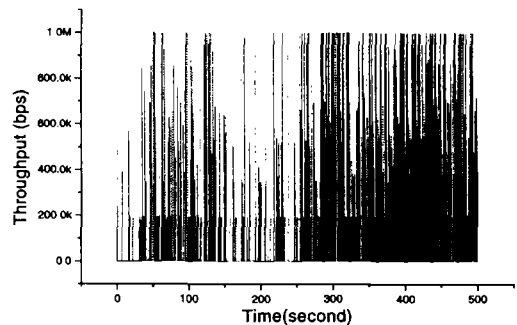


图 4 仿真 1 的实际吞吐量

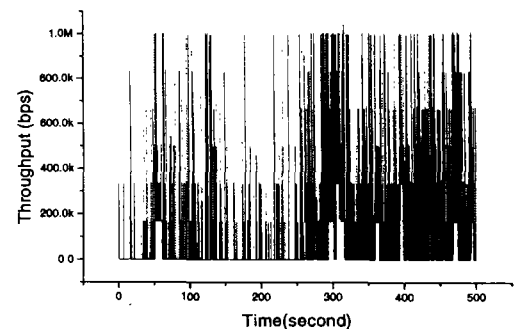


图 5 仿真 1 的模拟吞吐量

图 4~图 9 分别是两种仿真环境下仿真的流量、模型的

流量以及它们分别通过低通滤波器之后的结果。可以清楚地看到,模型的流量从变化趋势上很好地吻合了仿真的流量。我们还针对不同的 Wq 进行了评估,当 Wq 在 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ 变化时,模型同仿真的流量都有较高的吻合程度。由于式(2)和 RED 中对输入数据的处理方法相似,这个结果实际上也说明了 OWTM 模型的结果同仿真或者实际数据在 RED 机制上所产生的结果是非常接近的。

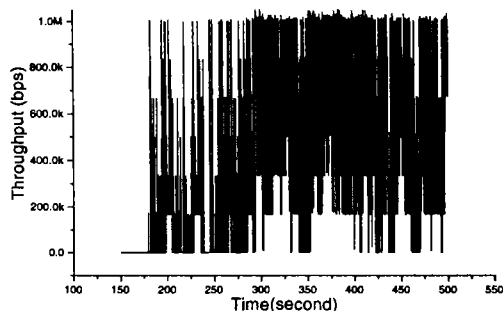


图 6 仿真 2 的实际吞吐量

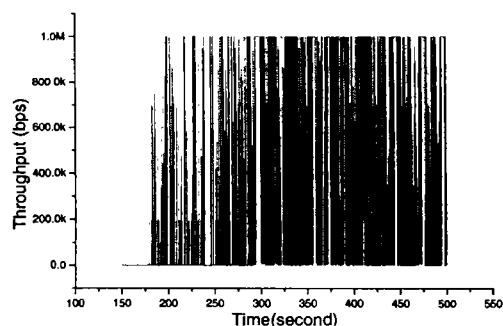


图 7 仿真 2 的模拟吞吐量

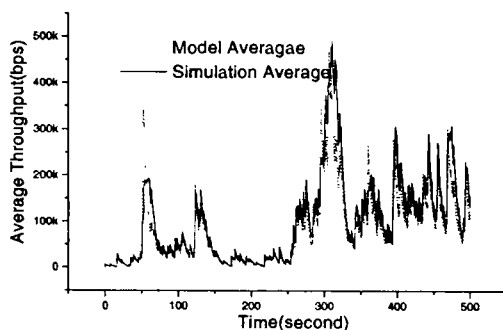


图 8 仿真 1 实际和模拟吞吐量的低通输出

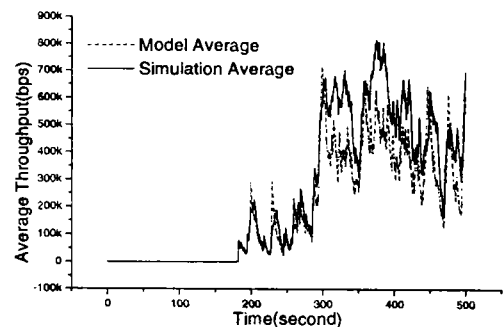


图 9 仿真 2 实际和模拟吞吐量的低通输出

3.3 自相似特性验证

关于流量自相似特性验证的方法很多,常用的主要有 Variance-Time、R/S 统计、绝对值以及周期图等,它们都是利用自相似的某些特性作出对数坐标图,然后使用拟合的方法来获得自相似特性的标准——Hurst 参数。具体的计算方法请参考文[8]。

我们采用前面三种方法对仿真数据和模型数据分别做了运算,得出结果如表 3 所示。从表 3 中可以看到,模型同仿真结果的自相似程度非常接近。同时还可以看出,随着负载的增加,自相似的程度也会增加,这与文[13]的结论是符合的。

表 3 自相似程度估计

	Variance-Time		R/S		绝对值	
	仿真 1	仿真 2	仿真 1	仿真 2	仿真 1	仿真 2
仿真	0.72	0.78	0.69	0.75	0.67	0.76
模型	0.71	0.75	0.70	0.73	0.69	0.75

4 模型的分析 and 讨论

从模型和实际的仿真结果的对比可以看出,模型具有以下的特点:

- 在负载较轻的时候($<65\%$),模型同实际的仿真结果有着较高的吻合程度;
- 当负载较高时($>65\%$),模型出现了一些偏差,并且随着负载程度的提高、高负载持续时间的增加,偏差会增大;

我们分析了仿真的数据,发现出现偏差的原因主要是由于瓶颈节点处理能力有限,当负载增加时,TCP 连接的环回时间 RTT 也随着增加,同原来 RTT 为定值的假设有较大的出入。我们或者可以根据网络的负载程度动态调整每个 TCP 连接的 RTT,或者可以通过为模型增加反馈的算法来减小这种差异,但是这些实现的复杂程度都很高,同模型的简单有效的初衷相违背。考虑到模型需要模拟的环境一般的负载程度都比较低,我们可以认为在大部分情况下模型还是能够很好地模拟实际流量的。

另外,我们分析的只是瓶颈节点处的流量,对于非瓶颈节点,由于负载程度很低,因此不存在上面讨论的问题,模型同实际的仿真流量吻合得很好。

对于用户一侧请求和响应数据的流量,我们并没有做仔细的研究,但是由于牵涉到 TCP 连接使用响应机制的问题,需要针对不同响应机制建立它们所对应的模型。我们将在后续的工作中对此进行更详细广泛的分析研究。

虽然我们研究的是 WWW 流量模型,但是从实现的原理来看,这种模型对于任何 Client/Server 模式的应用都是适用的,所需要做的工作只是针对不同的应用修改参数的设置。

总结 一个模型的好坏需要根据它对研究的贡献,而不是根据它同实际的吻合程度而定。本文在应用层参数模型和传输层流量模型的基础上,建立了一种能够同时反映这两层特点的 OWTM 模型,通过严格的模型验证,证明了模型同实际的数据具有一定程度的相似性。OWTM 模型为研究 Internet 上千差万变的流量特性提供了一个简单而准确的参考模型,同时也是一个验证各种功能在自相似环境下性能的有效的手段。

参考文献

- 1 Network Simulator 2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>
- 2 OPNET. <http://www.opnet.com/>

相关的事件处理器分割开来,提高了软件重用性、移植性和灵活性。

- **Leader/Followers 模式** 该模式是一种性能极佳的同步模型,在这个模型中,核心是一个线程池,线程池中的线程通过一个同步装置(信号量)来交替地占有一组事件源来进行监测、分离、分发以及事件处理。

- **Service Configurator 模式** 该模式把系统中个体组件的实现与它们被配置进系统的时间分离开来。通信应用服务框架使用服务配置器模式来在安装时或运行时动态地优化、控制及重配置服务策略。

设计模式层是通信应用服务框架中最重要的一层:我们通过 Acceptor-Connector、Reactor、Leader/Followers 和 Service Configurator 几种设计模式实现了通信应用服务的基本组成部分。这样使得开发人员只需关心那些与具体应用相关的处理,使得开发效率大为提高。

7 应用

笔者根据通信应用服务框架成功地构造了一个应用级网关。该网关将作为底层基础应用于金融业务中。

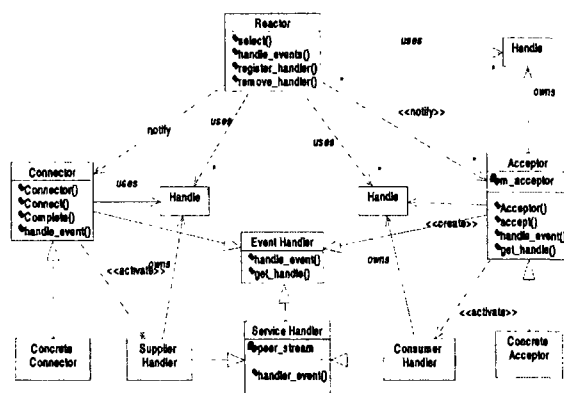


图 3 网关结构图

如图 3 所示的网关结构图,与图 2 进行比较可以看到,我们只是在原框架的基础上实现了两个主要的事件处理器 Supplier Handler 和 Consumer Handler,它们实现的是与消息

格式和网关的路由协议有关的应用特有的细节。从网关这个应用可以看到:开发通信应用服务软件无需再开发那些与应用无关的组件,直接使用通信应用服务框架提供的组件即可,开发人员需要开发的是那些与应用相关的部分,这些功能可以通过继承被加入到通信应用服务框架中,从而可以很方便地实现一个通信应用服务软件。

总结 本文描述了如何通过设计模式构造一个通信应用服务框架,并通过此框架设计通信应用服务软件。可以看到,设计模式和框架可以帮助通信应用服务的开发人员克服通信软件中那些常见的困难,从而提高开发的效率,并构造出易维护、通常也是高性能的通信软件。

参考文献

- 1 Brooks F P. The Mythical Man-Month. Reading, MA: Addison-Wesley, 1975
- 2 Leffler S J, McKusick M, Karels M, Quarterman J. The Design and Implementation of the 4.3BSD UNIX Operating System. Addison-Wesley, 1989
- 3 Rago S. UNIX System V Network Programming. Reading, MA: Addison-Wesley, 1993
- 4 Schmidt D C, Harrison T H, Al-Shaer E. Object-Oriented Components for High-speed Network Programming. In: Proc. of the 1st Conf. on Object-Oriented Technologies and Systems, (Monterey, CA), USENIX, June 1995
- 5 Gamma E, Helm R, Johnson R, Vlissides J. Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. Reading, MA: Addison-Wesley, 1995
- 6 Johnson R, Foote B. Designing Reusable Classes. Journal of Object-Oriented Programming, 1988, 1: 22~35
- 7 Alexander C, et al. A Pattern Language. Oxford University Press, New York, 1977
- 8 Lakos J. Large-scale Software Development with C++. Reading, MA: Addison-Wesley, 1995
- 9 Schmidt D C. Wrapper Facade: A Structural Pattern for Encapsulating Functions within Classes. [C++ Report], Feb. 1999
- 10 Schmidt D C. Acceptor and Connector: Design Patterns for Actively and Passively Initializing Network Services. Workshop on Pattern Languages of Object-Oriented Programs, Aarhus, Denmark: ECOOP '95, Aug. 1995
- 11 Schmidt D C. Reactor: An Object Behavioral Pattern for Concurrent Event Demultiplexing and Event Handler Dispatching. in Pattern Languages of Program Design (J. O. Coplien and D. C. Schmidt, eds.), MA: Addison-Wesley, 1995
- 12 Jain P, Schmidt D C. Service Configurator: A Pattern for Dynamic Configuration of Services. In: Proc. of the 3rd Conf. on Object-Oriented Technologies and Systems, USENIX, June 1997

(上接第 29 页)

- 3 Leland W, et al. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic. IEEE/ACM Transactions on Networking, Feb. 1994
- 4 Paxson P, Floyd S. Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1995, 3: 226~244
- 5 Crovella M, Bestavros A. Self-similarity in world wide web traffic: Evidence and possible causes. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1997, 5(6): 835~846
- 6 Garrett M W, Willinger W. Analysis, modeling, and generation of self-similar VBR video traffic. In: Proc. of ACM SIGCOMM, 1994. 269~280
- 7 Duffy D E, McIntosh A A, Rosenstein M, Willinger W. Statistical analysis of CCSN/SS7 traffic data from working CCS subnetworks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1994, 12(3)
- 8 Taqqu M S, Teverovsky V. On Estimating the Intensity of Long-Range Dependence in Finite and In nite Variance Time Series. In: R. J. Alder, R. E. Feldman, M. S. Taqqu, eds. A Practical Guide to Heavy Tails: Statistical Techniques and Applications, Birkhauser, Boston, 1998. 177~217
- 9 Sikdar B, Chandrayana K, Vastola K S, Kalyanaraman S. Queue Management Algorithms and Network Traffic Self-Similarity. In: Proc. of IEEE HPSR, Kobe, Japan, May 2002. 319~323

- 10 Deng S. Empirical model of WWW document arrivals at access link. in ICC, 1996
- 11 Mah B. An empirical model of http network traffic. In: Proc. INFOCOM '97, Apr. 1997
- 12 Feldmann A, Gilbert A C, Huang P, Willinger W. Dynamics of IP traffic: A study of the role of variability and the impact of control. SIGCOMM'99, 1999
- 13 Popescu A. Traffic Self-Similarity, (invited) tutorial. In: the IEEE Intl. Conf. on Telecommunications, ICT2001, Bucharest, Romania, June 2001
- 14 Barakat C, Thiran P, Iannaccone G, Diot C. On Internet backbone traffic modeling. ACM Sigmetrics, Marian del Rey, June 2002 (extended abstract)
- 15 Peixin S, Youyue S, Zhenming L. A Study on TCP Throughput Stabilization in Slow Start Phase. Journal of Computer Engineering and Application. Adopted, to be released on 12th issue, 2003
- 16 Olén J, Kaj I. Slowstart Window Modeling for Single Connection TCP-Tahoe; [U. U. D. M Report]. Department of Mathematics, Uppsala University, 2001. 21
- 17 Postel J. Transmission control protocol. RFC793, Sep. 1981
- 18 Hoe J. Improving the Start-up Behavior of a Congestion Control Scheme for TCP. In: Proc. of ACM SIGCOMM'96, Stanford, CA, Aug. 1996. 270~280