

基于 Pareto 分布的 IP 骨干节点输入通信量模型^{*}

饶云华¹ 曹 阳¹ 杨 艳¹ 吴 锐²

(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)¹ (上海新华控制工程有限公司 上海 200245)²

摘 要 输入通信量的行为特性对于 IP 骨干网节点的性能和设计有重要的影响。本文从 IP 骨干网络节点输入通信量角度出发,提出了一个基于 Pareto 和指数分布的混合通信量模型,其中数据包到达间隔为 Pareto 分布,包大小为指数分布。该模型克服了传统网络通信量模型中没有显式考虑数据包大小的缺点,从数据包级对网络通信量进行了精确的描述,从而能够更好地进行路由器结构设计和性能分析。仿真实验验证了我们模型的有效性。

关键词 路由器,输入通信量,重尾,自相似

A Pareto Model for the Traffic of IP Backbone Node

RAO Yun-Hua¹ CAO Yang¹ YANG Yan¹ WU Rui²

(School of Electronics Information, Wuhan University, Wuhan 430072)¹

(XinHua Control Engineering Co. Ltd., Shanghai 200245)²

Abstract The behavior of input traffic has a great influence on the design and performance of IP backbone node. In this paper, a mixed network traffic model is proposed based on Pareto and exponential distribution from the point of view of IP backbone router arrival traffic. In this model, packet arrival-interval obeys Pareto distribution and packet size obeys exponential distribution. This model overcomes the shortcoming of traditional network traffic model, which does not consider the packet size explicitly. It accurately describes the network traffic on the packet level, and is useful for the structure design and performance analysis of router. Simulation confirms the effective of this model.

Keywords Router, Input traffic, Heavy tail, Self-similar

1 介绍

网络通信量建模是网络设计和性能评估的基础。在网络排队系统分析中,通信量建模起源于电话网呼叫接入过程建模,多年以来都在这一基础上采用 Markov 模型对通信网性能进行描述。然而,研究发现通信量不仅具有短程相关性,还具有用 Markov 模型不能描述的自相似性(这里也就是长程相关性)。通信量的自相似性具有与短程相关完全不同的特性,对网络性能也具有不同的影响^[1,2]。

针对网络通信量中存在自相似性,目前已有很多学者对其进行描述,如 M/G/∞ 模型、基于混沌映射的模型以及基于 α 稳态分布的模型等^[3,4]。

但这些模型的缺点是没有针对 IP 骨干网,因为不同的研究目的和网络环境,网络通信量建模所要考虑的因素也有所不同。同时,对于网络节点而言,输入数据包性质和呼叫接入是不一样的,因为除到达过程以外每个包的大小也是随机的。这些模型或者没有考虑每一个到达包大小,而是以单位时间内的通信量来衡量,或者认为到达包为固定长度(如 ATM 中),所以,并不完全符合网络节点输入过程。

本文从 IP 骨干网络节点输入通信量角度出发,提出了一个基于 Pareto 和指数分布的混合通信量模型。数据包到达间隔为 Pareto 分布,包大小为指数分布。该模型克服了传统网络通信量模型中没有显式考虑数据包大小的缺点,从数据包级对网络通信量进行了精确的描述,从而能够更好地进行

路由器结构设计和性能分析。仿真实验验证了我们模型的有效性。

本文第 2 节介绍了网络通信量建模思想;第 3 节利用 Pareto 分布对 IP 骨干节点输入通信量进行了模型描述;第 4 节进行了仿真生成;第 5 节将我们的通信量模型应用于排队系统进行了系统性能分析;最后总结了全文的工作。

2 基于 Pareto 分布的输入通信量模型

从研究网络性能的角度来说,通信量建模与所要研究的对象有关。例如对于 TCP 端到端延迟的研究来说,我们主要考虑应用层上 TCP 通信量特性的相关因素有用户发起会话的行为、文件大小、round trip time、拥塞窗口和链接的持续时间等,而对于网络拓扑、路由策略以及网络物理介质等,虽然对端到端延迟具有影响的因素却因为太复杂和可以利用的信息极少无法得到定量结果而较少考虑。所以我们认为对于不同的研究目的和网络环境,网络通信量建模的方法和所要考虑的因素各不相同。

这里我们从所要研究问题的角度出发,主要考虑处于核心网络路由或交换节点的入口通信量的特点进行建模。

我们要分析的问题是输入网络通信量的自相似性和长程相关性对骨干网中的路由或交换节点的性能影响。虽然结构化模型可以得到与网络特性相关的参数,但是在 IP 层按照这样的思路却不实际,因为网络各层上的机制都会互相影响,并且网络动态变化剧烈,对于某一节点来说这样的模型会非常

^{*} 本文受国家自然科学基金重点项目子课题(60132030)和武汉市晨光计划(20055003059-27)资助。饶云华 博士,主要研究兴趣为无线传感器网络、多媒体通信和 VLSI 设计。曹 阳 教授,博士生导师,主要研究兴趣为网络与多媒体通信。

复杂且难以描述真实的网络通信量状况,例如如果利用 ON/OFF 模型来描述各个不同源的通信量,然后整个的通信量模型通过 ON/OFF 源的叠加来得到,但是为了得到通信量的长程相关特性,却需要将该模型无限叠加^[6],所以对于要定量地考察节点处的性能,这一模型是不适合的。

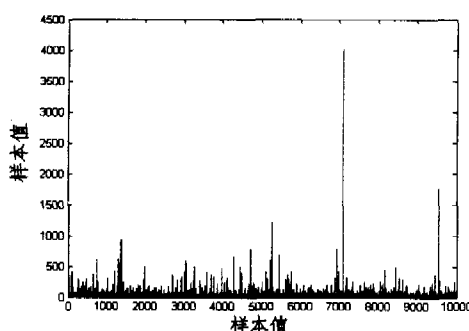
从网络节点的角度来看,进入路由器或交换机的 IP 包的大小和到达时间间隔这两个统计参数对排队系统性能直接产生影响,所以从通信量的这两个参数出发来讨论输入通信量的统计特性,从建模的角度来说就是采用行为模型的方法。

Matthew T. Lucas 等^[8]的研究表明在 WAN 上节点处的 IP 包大小并不是长程相关,而是短程相关,这可能是因为不同信源的通信量在节点处复用后改变了原有数据包大小分布的重尾属性;另外, D. Manjunath 等^[9]研究了变长包交换性能中指出到达交换结构的 IP 包长度为指数分布,所以我们在这里采用指数分布来拟合骨干网中到达路由器和交换节点的 IP 包的长度分布特性。

对于数据包之间的到达间隔时间分布, K. S. Meier-Hellstern^[10]在研究了 ISDN 网络的通信量后指出包到达时间间隔和某一状态中连续包发送数目为重尾分布; Leland^[3]研究了以太网的通信量指出单位时间内到达的包数量为自相似的; Tak Kushida^[7]用实验研究表明在 Internet 中端到端包到达时间为重尾分布;另外 D. Manjunath 等^[9]研究了变长包交换性能中也指出包间到达间隔时间为自相似的,所以我们也采用重尾分布(如 Pareto 分布)来描述骨干 IP 网中路由器和交换节点的 IP 包到达时间间隔的统计性质,这一分布能够充分体现这一现象的统计特性,同时该分布模型的参数较少并且容易理解,便于理论分析表达。

在这里,我们可以通过前面的讨论看到包到达间隔时间和包大小的分布互相独立,这一性质也可以从 ON/OFF 模型看出来。

令 X 为一个随机过程,其累积分布函数为 $F(x) = P(X \leq x)$,如果其余累积分布函数 $\overline{F}(x) = 1 - F(x) = P[X > x]$ 满足



(a) 分布图

$$\overline{F}(x) \sim cx^{-a}, 0 < a < 2 \quad (1)$$

其中 c 为正常数, a 称为尾指数或形状参数,则 $F(x)$ 为重尾分布^[3] (heavy-tailed distribution)。重尾分布的拖尾衰减渐近为双曲线,而与重尾分布相对应的是轻尾分布如指数分布和高斯分布,其具有指数衰减的拖尾。

最简单的重尾分布是 Pareto 分布,其在所有取值范围内服从幂函数规律,其概率分布密度函数为:

$$f(x) = ak^a x^{-a-1}, 0 < k \leq x \quad (2)$$

其中 $0 < a < 2$ 为形状参数, k 表示随机变量 x 最小的取值。

基于以上分析,我们用一个泊松 Pareto 混合分布模型来描述 IP 骨干网节点输入通信量特征。该模型为平稳随机过程,数据包到达时间间隔为 Pareto 分布,数据包长度为指数分布。这里因为考虑的是数据包输入过程,因此,我们把该过程描述为固定输入速率和指数分布时间的过程。整个过程可描述为一个 On/Off 过程,其中 on 时间服从指数分布,固定输入数据速率, off 时间内服从 Pareto 分布。On/off 过程独立同分布严格交替发生。由于该过程的到达间隔和数据输入持续时间分别为 Pareto 和 Poisson 分布,我们称该模型为 PPMP (Pareto Poisson Mixed Process)。

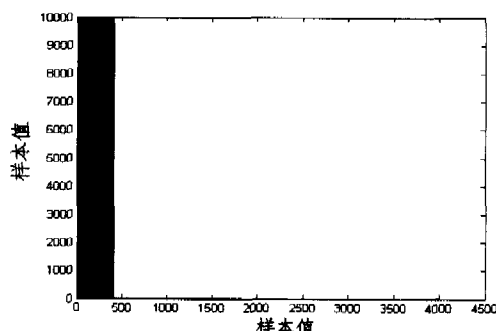
3 基于 Pareto 分布模型的输入通信量拟合

对于骨干 IP 网中路由器和交换节点的 IP 网络通信量的统计特性,我们通过上面的分析知道在 Internet 中到达间隔时间分布为重尾分布,包大小的统计特性用短程相关的指数分布来拟合,下面我们根据上面讨论得出的网络通信量分布模型来合成该随机过程相应的通信量。

拟合过程主要分为:

- (1) 随机数生成;
- (2) 随机向量的抽样。

根据上面的序列结果生成 PPMP 序列,其结果如图 1 所示。从图 1(a)中我们可以很容易地看出具有重尾分布特性的通信量中大量较小的样本值和少量较大的样本值同时存在,说明了通信量中数据到达的猝发性极强,这也可以从图 1(b)的直方图更加清楚地看出来。



(b) 直方图

图 1 PPMP 模型的合成数据 ($\alpha=1.6, k=10, \lambda=64$)

4 在排队系统中的性能分析

根据上面的输入通信量模型,我们采用蒙特卡罗仿真方法,采用离散事件驱动仿真了 PPMP 模型输入时对排队系统丢包率以及排队延迟的影响。

排队系统 G/D/1 为单服务台,输入数据包时,如果服务台为空就接受服务,输出为单链路,输出速率固定,时间与包

大小有关;如果服务台忙,就进入等待队列,如果队列已满,就丢弃该包,否则进入等待队列;服务策略为先来先服务。各个包的服务时间相互独立。

实验结果如图 2 和 3 所示。从图 2 中可以看出随着缓存的增大,延迟急剧增大,当增大到一定程度时便保持较为稳定的状态。同时,可以看出,随着 α 减小,通信量的突发性越强,

(下转第 53 页)

移动速率给误帧率带来的影响。对于中等的 10m/s 速度,使用 100 字节的业务流时,误帧率为 3.6%;而当业务流长度为 2000 字节时,误帧率达到 20% 以上。这说明 2000 字节的数据长度对于 10m/s 以上的速度是不合适的,而使用基于帧的接收模型将得不到该结论。结合图 1 和图 2 可以看到,对于 1m/s 的慢速移动环境、2000 字节的 MAC 帧长,使用基于 bit 的模型得到的误帧率为基于帧的模型的 2 倍,对于 10m/s 的中等速度为 7 倍,30m/s 的快速速度为 20 倍。

结束语 目前现有的网络仿真软件对无线信道尤其是移动衰落信道支持较弱。本文指出,目前基于帧的模型不能有效地体现无线 Ad Hoc 网络的移动特性,因而提出了基于 bit 的信号接收模型,该模型可以反应信道在帧内的变化。该模型与现有的网络仿真软件结合,可以有效地仿真移动衰落信道下的无线 Ad Hoc 网络。

仿真结果表明,在基于 bit 的信号接收模型下,随着速度的增加,误帧率急剧增加,并且帧越长,误帧率越高。仿真结果意味着当前提出的基于帧的模型而设计的发送功率控制的^[8]、自适应速率的^[9]、多用户分集^[10]的等各种交叉层的无线 Ad Hoc 网络协议在实际中可能并不合适,尤其是在信道

变化较快的场合,协议的设计需要考虑信道在帧内的变化(如基于信道预测的、自适应帧长协议),并可以参考本文提出的基于 bit 的模型进行协议有效性仿真验证。

参 考 文 献

- 1 Ilyas M. The handbook of Ad Hoc wireless networks[EO/BI]. CRC PRESS <http://www.crcpress.com>, 2003
- 2 glomosim simulator; <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim>
- 3 ns-2 simulator; <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- 4 Rappaport T S. Wireless Communications: Principles and Practice [M]. Upper Saddle River NJ: Prentice-Hall Inc, 1996
- 5 Punnoose J, Nikitin V, Stancil D. Efficient Simulation of Ricean Fading within a Packet Simulator[A]. Vehicular Technology Conference, 2000
- 6 Part11: Wireless LAN medium access control(MAC)and physical layer(PHY)specifications[S]. IEEE 802.11 Working Group, 1999
- 7 Jakes W C. Microwave Mobile Communications[M]. IEEE Press, Wiley Interscience, 1994
- 8 Jung E, Vaidya N. A Power Control MAC Protocol for Ad Hoc Networks[A]. In: Proc. ACM MobiCom'02, Atlanta USA, Sep 2002
- 9 Sadeghi B. Opportunistic Media Access for Multirate Ad Hoc Networks[A]. In: Proc. ACM MobiCom'02, Atlanta USA, Sep 2002
- 10 Wang J, Zhai H. Opportunistic Media Access Control and Rate Adaptation for Wireless Ad hoc Networks[A]. In: Proc. IEEE ICC'04, 2004

(上接第 28 页)

延迟也增大,但相差并不太大。从图 3 中看出, α 的不同对于丢包率的影响在缓存较大时并不很大,当缓存较大,丢包率变得平稳;而当缓存较小时,缓存的增加会极大地降低丢包率。

仿真得到的这些性能结果对于骨干网节点的设计具有指导意义。

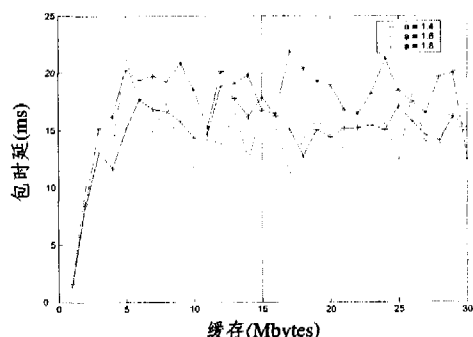


图 2 对排队延迟的影响

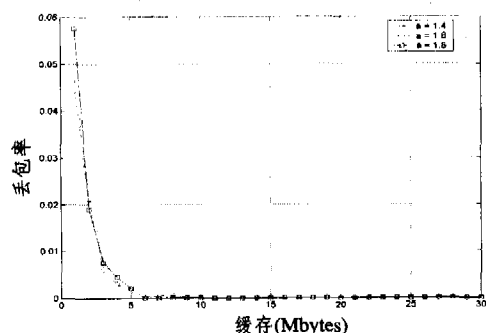


图 3 对丢包率的影响

结论 本文提出了一个描述 IP 骨干网节点输入通信量的 Pareto 泊松混合过程(PPMP)模型,该模型能较好地反映输入通信量的自相似性质。同时,通过对排队系统性能的仿真研究表明,不同自相似参数下,对于系统的延迟和丢包率有

不同的影响,尤其是在缓存较小时,其区别尤其明显。这说明当通信量中有长程相关性质时,由于通信量在很长时间尺度上都具有相关性,因此增加缓存只是使丢包率以 Weibull 分布非常缓慢地下降,所以缓存的继续增加对于长程相关通信量来说不能改善排队系统的性能,这一点与已有的理论结果吻合。

由于通信量中的重尾性是网络中普遍存在的性质,因此本文提出的模型在网络设计和网络性能分析中都非常具有意义和价值。

参 考 文 献

- 1 Shao S-K, Tsai M-G, Tsao H-W, Sreedevi P, Wu J. Performance analysis of feedback type WDM optical routers under asynchronous and variable packet length self similar traffic. In: Workshop on High Performance Switching and Routing, 2004. 282~286
- 2 Watagodakumbura C, Jennings A, Shenoy N. Absolute effects of aggregation of self-similar traffic on quality of service parameters. In: Intl. Symposium on Control, Communications and Signal Processing, 2004. 511~514
- 3 Park K, Willinger W. Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation. New York: Wiley-Interscience, 2000
- 4 Min G, Ould-Khaoua M. A Performance Model for Wormhole-Switched Interconnection Networks under Self-Similar Traffic. IEEE Trans. Computers, 2004, 53(5): 601~613
- 5 Leland W, Taqqu M, Willinger W, et al. On the self-similar nature of Ethernet traffic. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1993, 23(4): 183~193
- 6 Jacquet P. Analytic information theory in service of queueing with aggregated exponential on/off arrivals. In: Proc. 25th Conf. on Communication, Control and Computing, Allerton, IEEE, 1996. 242~251
- 7 Kushida T, Shibata Y. Empirical study of inter-arrival packet times and packet losses. In: Proc. of the 22nd Intl. Conf. on Distributed Computing Systems Workshops, Vienna: IEEE Computer Society, 2002. 233~238
- 8 Lucas M T, Wrege D E, Dempsey B J, et al. Statistical Characterization of Wide-Area IP Traffic. In: Proc. of the 6th Intl. Conf. on Computer Communications and Networks, IEEE, 1997. 442~447
- 9 Manjunath D, Sikdar B. Input queued switches for variable length packets: analysis for Poisson and self-similar traffic. Computer Communications, 2002, 25(6): 590~610
- 10 Meier-Hellstern K S, Wirth P E, Yan Y L, et al. Traffic models for ISDN data users: office automation application. in: Teletraffic and Datatraffic in a Period of Change. In: Proc. of the 13th ITC, North Holland: ITC, 1991. 167~192