

基于 IP 突发信源模型数据包的定量计算研究

刘晏兵^{1,2}, 孙世新¹, 唐 红²

(1. 电子科技大学, 四川成都 610054; 2. 重庆邮电学院计算机系, 重庆 400065)

摘 要: 本文以 IP 突发信源 on/off 模型的单 IP 业务源的数据包生成特性分析为基础, 以队列缓冲配置和 IP 数据包丢失率、排队时延的计算为主要研究对象, 通过对多业务源排队系统的 IP 数据包排队时延进行深入的综合分析, 得出了一些新的 QoS 定量计算解析式, 这些解析式可用于计算 IP 交换路由器 QoS 参数。

关键词: IP 网络; 服务质量; IP 数据包; On/off 模型

中图分类号: TP393 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2003) 12A-2187-03

Based on the IP Packet Generation Characteristics for Single Source Under and on/off Source Model

LIU Yan-bing^{1,2}, SUN Shi-xin¹, TANG Hong²

(1. School of Computer Science, UEST of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

2. Chongqing University of Posts&Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: This paper mainly researches on the buffer allocation and IP packet data loss rate. Through deep and comprehensive analysis of the queuing delay of IP packet of multiple sources, this paper gives some new analytic formulas for computation of QoS. These results can also be applied to calculate the QoS parameter in IP switch router.

Key words: IP network; QoS; IP packet; On/off model

1 引言

近年来, IP 网络中的音频、视频等实时应用的急剧增长, 这些应用要求 IP 网络为它们提供一定的端到端服务质量 (QoS) 保证, 即希望使应用端到端的延时、IP 数据包丢失率等性能指标处于一定的范围^[1,6]. 为保证这些 IP 数据包的 QoS 要求, 必须解决如何在一定的资源条件下, 确定是否接纳新的 IP 数据包请求, 同时满足已进入系统的 IP 数据包的 QoS 要求, 即对其实施准入控制. 文献[3]的研究指出, 大量 IP 网络业务流具有突发性, 其自相似性是大量 on/off 信源叠加的结果. 这种 on/off 信源模型在研究中得到广泛的应用. 文献[4]在研究 IEEE802.11 无线局域网的 QoS 时, 也用它作为数据信号源. 该模型在近来的 IP 性能分析文献中也大量采用. 但是, 这些研究在用到突发信源时, 仅仅局限于仿真, 缺乏有效的理论方法. 笔者借鉴异步传输模式 (ATM) 统计行为的理论分析, 并用于 IP 网络环境下. 在假设 IP 数据包大小一致的基础上, 得到 IP 信源周期为 on/off 模型一些相关 QoS 的定量解析式. 这些解析式可用于 IP 交换路由器缓冲大小的设置计算、排队时延计算、带宽分配计算和溢出概率计算等. 这对我们自主开发高性能交换路由器具有参考意义.

2 IP 突发信源的数据包发送业务模型

本文采用经典的 on/off 模型来表 IP 信源发送模型, 如图 1 所示. 假设在一个周期 $T = T_{on} + T_{off}$ 中, 信源在 T_{on} 时间段内以速率 R 产生数据; 在 T_{off} 时间段内处于空闲状态, 即突发之间的静止时间, 二者交替形成更新过程. 信源流量描述器

(如业务分类器, 速率整形器) 参数有最大的突发长度 L ; IP 业务数据包最大的速率 P . 并且输出链路带宽为 C (队列在非空闲时, 每秒以 C 个 IP 数据包的速率减少), 队列容量为 B_r . 排队系统模型如图 2 所示. 则

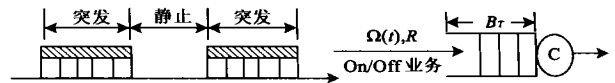


图 1 on/off 业务源模型

图 2 排队模型

$$T_{on} = \frac{L}{P - R}, \quad T_{off} = \frac{L}{R} \quad (1)$$

因而信源激活因子 $\omega_{\Omega} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{R}{P} \quad (2)$

多业务源 on/off 模型是单业务源的叠加^[2,7], 多业务源流量的悲观情况时各业务源可能同时产生数据, 即 IP 数据包产生突发事件并发进行. 此时 IP 数据包组的业务与单 on/off 信源具有相同的业务特性, 具有相同的 T_{on} 与 T_{off} , 唯一不同的是在 IP 数据包激活期间 T_{on} 的 IP 数据包到达率为单业务信源模型的 N 倍, 即 NR . 对多业务源模型的流量乐观情况是 IP 业务信源组的每一个信源的数据产生开始时间均匀的分布在每个信源周期 $[0, T]$ 内. 在乐观情况下, 根据 T_{on} 的长度特性又可分为 2 种情况^[7]: (1) 一个信源激活期的结束时刻正好有一个源激活期的开始, 即满足 $T_{on} = (mT)/N (0 < m < N)$, 信源组的 IP 数据包到达速率恒为 mR ; (2) 当 IP 数据包的激活时间 T_{on} 不为 (T/N) 的整数倍时, 即 $mT/N < T_{on} < (m + 1)T/N$, 信源组业务到达过程形成了交替更新过程, 在这种情况下

信源组同时激活的信源个数交替为 m 和 $(m+1)$, 它们各自激活时间分别为 $t_m = mT/N$ 和 $t_{m+1} = (m+1)T/N$, 到达率为 mR 和 $(m+1)R$.

3 IP 数据包的定量计算分析

首先考虑单业务源单队列情况, 然后在此基础上根据信源叠加性对多业务源 on/off 模型的一些 QoS 参数进行分析.

3.1 单业务源单队列情况

3.1.1 吞吐率计算

IP 业务为单 on/off 源单队列的情形如图 2. 假设 D_{on} 、 D_{off} 分别是每一个周期 T 内队列缓冲器和输出链路使用、空闲时间, D_{on}/D_{off} 和 T_{on}/T_{off} 的对照关系如图 3 所示. 由排队论知, 当系统达到稳定状态时一个周期 T 内到达的数据包和被输出链路传输的数据包相等, 则 $D_{on} + D_{off} = T$. 从图 3 可以看出队列缓冲器中的 IP 数据包达到最多时刻到被置空的时间为 $D_{on} - T_{on}$, 设 b 是在一个周期 T 内队列缓冲器积累的最大的 IP 数据包个数. 那么

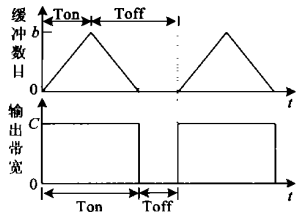


图 3 D_{on}/D_{off} 和 T_{on}/T_{off} 的对照关系

$$D_{on} = T_{on} + \frac{b}{C} \quad D_{off} = T_{off} - \frac{b}{C} \quad (3)$$

队列缓冲器和输出链路的利用因子 ω (吞吐率) 为

$$\omega = \frac{D_{on}}{D_{on} + D_{off}} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} + \frac{b}{C} \cdot \frac{1}{T_{on} + T_{off}} = \omega_{on} + \frac{b}{C} \cdot \frac{1}{T} \quad (4)$$

重要的是, 由式(4)可见, 这里 $\omega \geq \omega_{on}$, 因此

$$b = L - \frac{L(C-R)}{P-R} \quad (5)$$

由式(5)可知, $b \leq L$. 其中 b 线性地随着输出链路带宽 C 的增加而减少, 这很好地与实际吻合.

3.1.2 队列缓冲容量计算

一个排队系统所需最小缓冲容量以防止系统有数据包丢失. 为了估计队列缓冲的容量, 我们可以参考文献[7]用一种简化的方法进行估计. 由于单 IP 业务源要么激活, 要么空闲. 为避免 IP 数据包丢失, 队列容量 B_T 和输出链路容量 C 须满足以下 2 个不等式:

$$RT_{on} \leq B_T + CT_{on} \quad (6)$$

$$RT_{on} \leq CT \quad (7)$$

式(6)主要用于保证在每周期的激活状态时间 T_{on} 内, 系统能容纳所产生的所有 IP 数据包, 式(7)保证在一个周期 (T) 内输出链路能传递所有本周期产生的 IP 数据包. 由式(7)保证系统稳定的最低条件, 即 $C = R/T$ 时, 根据式(6)队列缓冲的容量应满足, $B_T \geq RT_{on} - CT_{on} = RT_{on} - R/T$ (8)

3.2 多业务源单队列情况

假设有 N 个 IP 业务源, 每个业务源具有完全相同的业务特性参数: T_{on} , T_{off} 以及到达率 R , 并且输出链路带宽为 C , 队列缓冲容量为 B_T .

3.2.1 队列缓冲大小计算

为了得到队列缓冲大小的极限设置, 我们只需考虑悲观情况, N 个 IP 业务源同时动作 (即同时激活, 同时空闲). 为避

免 IP 数据包丢失, 根据单业务源单队列推导的结论, 这里的输入数据包速度为 NR , 要保证无 IP 数据包丢失而且保证系统稳定的最低条件, 队列缓冲的容量应满足,

$$B_T \geq NRT_{on} - NR/T \quad (9)$$

3.2.2 IP 数据包丢失概率和平均排队时延计算

下面把文献[3, 7]对 ATM 的概率分析方法用于 IP 网络环境, 并加以排队时延推导. 在悲观情况下, 根据排队系统模型可知, IP 业务源在激活状态时间 T_{on} 内系统所传输的 IP 数据包数为: $C^{(on)} = \min\{C, NR\} \cdot T_{on}$; 在 T_{off} 时间段内输出链路能传输的 IP 数据包, 可表示为: $C^{(off)} = \min\{B_T, NRT_{on} - C^{(on)}, CT_{off}\}$. 因此排队系统的 IP 数据包丢失的概率表示为

$$P_{data\ loss} = 1 - (C^{(on)} + C^{(off)}) / (NRT_{on}) \quad (10)$$

在悲观情况下, IP 突发信源在 on 周期平均到达的 IP 数据包数目为 NRT_{on} , IP 数据包的到达时间间隔 $1/(NR)$, 离去时间为 $1/C$.

下面我们考虑 2 种情况:

(1) 数据包到达的时间大于离去的时间 即 $1/(NR) > 1/C$, 第 i 个 ($1 \leq i \leq NRT_{on}$) 达到的数据包等待的时延为 $T_i = (i-1)/C^{[9]}$, 平均等待时延为

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^{NRT_{on}} T_i}{NRT_{on}} = \frac{(NRT_{on}-1) \cdot C}{2} \quad (11)$$

而传输队列缓冲器中积累的 b 个 IP 数据包 (b 由公式(5)里的 R 换为 NR 得到) 需要 (最大) 的时间:

$$T_s = \frac{b}{C} = \frac{L}{C} \cdot \frac{P-C}{P-NR} \quad (12)$$

则每一个 IP 数据包的平均排队等待时延可以表示为

$$T_{delay} = T_p + T_s = \frac{(NRT_{on}-1) \cdot C}{2} + \frac{L}{C} \cdot \frac{P-C}{P-NR} \quad (13)$$

(2) 数据包到达的时间小于离去的时间 即 $1/(NR) \leq 1/C$, 第 i 个 ($1 \leq i \leq NRT_{on}$) 达到的数据包等待的时延为 $T_i = (i-1)[1/C - 1/(NR)]^{[9]}$, 平均等待时延为

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^{NRT_{on}} T_i}{NRT_{on}} = \frac{NRT_{on}-1}{2} \times \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{NR} \right) \quad (14)$$

同样, 传输队列缓冲器中积累的 b 个 IP 数据包需要的时间 T_s , 则每一个 IP 数据包的平均排队等待时延可以表示为

$$T_{delay} = T_p + T_s = \frac{NRT_{on}-1}{2} \times \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{NR} \right) + \frac{L}{C} \cdot \frac{P-C}{P-NR} \quad (15)$$

从解析式(13)、(15)表明, 平均排队等待时延随着 IP 信源数目 N 和到达率 R 的增加而增大, 随着输出带宽 C 的增加而减少, 恰好与实际吻合.

在乐观情况下, 业务源在时间段 t_m 有 m 个业务源同时激活和 t_{m+1} 时间段 t_{m+1} 有 $m+1$ 个业务源同时激活. 设 $R^{(m)}$ 、 $R^{(m+1)}$ 分别表示在时间段 t_m 和 t_{m+1} 到达的 IP 数据包数目, 即 $R^{(m)} = mRt_m$, $R^{(m+1)} = (m+1)Rt_{m+1}$, 那么在一个 on/off 周期 T 内到达的 IP 数据包总数目为 $R^{(T)} = R^{(m)} + R^{(m+1)} = mRt_m + (m+1)Rt_{m+1}$.

而此时可以分为 3 种情况给以考虑.

(1) 当 $C \geq (m+1)R$ 时 输出链路在整个 $t_m + t_{m+1}$ 周期内将以速率 C 传输完达到队列缓冲的所有数据包(这时 $b=0$), 所以, 稳态下数据包丢失概率为 $P_{\text{data loss}} = 0$.

由于 $b=0$, 有 $T_s = 0$. 那么每一个周期到达批量数据包的第 i 个($1 \leq i \leq R^{(T)}$)到达的数据包排队等待的时延为 $T_i = (i-1)/C$, 则每一个 IP 数据包的平均等待时延 T_{delay} 表示为

$$T_{\text{delay}} = T_p = \sum_{i=1}^{R^{(T)}} T_i / R^{(T)} = \frac{(R^{(T)} - 1) \cdot C}{2} \quad (16)$$

(2) 当 $C < mR$ 时 输出链路在整个 $t_m + t_{m+1}$ 周期内都将将以速率 C 传输 IP 数据包, 此时排队系统的 IP 数据包丢失概率可以表示为

$$P_{\text{data loss}} = 1 - C(t_m + t_{m+1}) / R^{(T)} \quad (17)$$

由 $C < mR$ 知, $1/C > 1/(mR) > 1/[(m+1)R]$. 即在整个 $t_m + t_{m+1}$ 周期内的到达时间小于离去时间, 由上面式(14)、(15)的结论, 每一个数据包平均排队时延为

$$T_{\text{delay}} = T_p + T_s = [(R^{(t)} - 1)/2] \times (\frac{1}{C} - \frac{1}{mR}) + \frac{L}{C} \cdot \frac{P-C}{P-R} \quad (18)$$

(3) 当 $(m+1)R \geq C \geq mR$ 时 根据排队系统平衡原则, 在 $t_m + t_{m+1}$ 时间段内系统传输的 IP 数据包数可以计算如下^[7]:

$$C^{(m+1)} = \min\{C, (m+1)R\} t_{m+1} \quad (19)$$

$$C^{(m)} = \min\{C t_m, B_T + R^{(m)}, R^{(T)} - C^{(m+1)}\} \quad (20)$$

故在排队系统稳态情况下, IP 数据包丢失概率为

$$P_{\text{data loss}} = 1 - (C^{(m+1)} + C^{(m)}) / R^{(T)} \quad (21)$$

下面考虑每一个 IP 数据包的平均排队等待时延, 需要分段进行分析. 在 t_m 时间段数据包到达的时间 $1/(mR)$ 大于离去的时间 $1/C$; 在 t_{m+1} 时间段数据包到达的时间 $1/[(m+1)R]$ 小于离去的时间 $1/C$. 于是根据式(11)、(14)知, 每一个 IP 数据包平均时延为

$$\begin{aligned} T_{\text{delay}} &= T_p + T_s \\ &= \frac{\sum_{i=1}^{R^{(m)}} [(i-1)/C] + \sum_{i=1}^{R^{(m+1)}} (i-1)[\frac{1}{C} - \frac{1}{(m+1)R}]}{R^{(T)}} + T_s \\ &= \frac{[R^{(T)}]^2 - R^{(T)} - 2R^{(m)}R^{(m+1)} - C t_{m+1}(R^{(m+1)} - 1)}{2CR^{(T)}} \\ &\quad + T_s \end{aligned} \quad (22)$$

其中 T_s 由公式(12)得到.

4 仿真实验结果

为了验证上述推导的解析式结论, 我们在 IP 环境下通过计算机仿真软件平台仿真, 拓扑结构如图 4 所示. 主要参数为: IP 信源采用 5 个 on/off 的汇聚模型, on 周期满足指数分布, IP 数据包大小为 1000 字节.

仿真时信源 S_1 到 S_5 向服务器 S 上传数据, 我们在交换路由器 R_1 处采集数据, 仿真结果如图 5 和图 6 所示. 在 IP 网络环境下的实际仿真结果介于悲观情况和乐观情况公式结果之间, 而仿真平均队列时延和解析公式计算结果悲观情况下基本吻合且二者随到达率 R 的增大而增加.

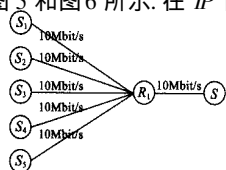


图 4 仿真拓扑结构

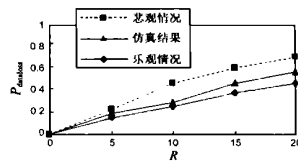


图 5 多业务源单队列数据包丢失情况

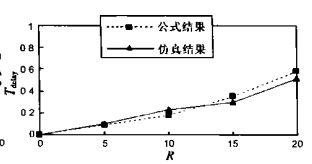


图 6 多业务源单队列数据包平均排队时延

5 结论

本文通过对 IP 业务源 on/off 模型的排队系统进行研究, 借鉴异步传输模式(ATM)的统计特性理论分析, 以考虑 IP 数据包丢失为基准, 推导出队列平均等待时延的解析式, 得出一些 QoS 参数的定量结论, 这对改善数据流准入机制、提高 IP 网络综合性能和网络收益具有重要作用. 在“宽带 IP QoS 排队算法设计”研究项目中, 我们应用了这些结论根据丢包概率配置队列最大门阈值, 后面工作需更进一步进行的是多层 IP QoS 参数的计算等.

参考文献:

- [1] Lee H, Nemoto Y. Providing the statistical QoS objectives in high-speed networks[J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1997, 29(16): 1919-1931.
- [2] Kraimeche B. Multiplexing of video and data sources in an ATM access network[J]. Comp. Comm, 2001, 24: 889-897.
- [3] JAdon T, Harle D. Performance comparison of peak rate and bursty traffic specification and allocation policer functions[A]. Proceedings of Singapore ICCS[C]. Singapore, 1995(2): 525-529.
- [4] Anastasi G, Lenzini L. QoS provided by the IEEE 802.11 wireless LAN to advanced data applications: A simulation analysis[J]. Wireless Networks, 2000, (6): 99-108.
- [5] ZHENG L. Enhanced timed round-robin traffic control schemes for ATM networks[A]. Proceedings of the 21st IEEE conference on Local computer networks[C]. Boston, USA: IEEE, 1999. 249-258.
- [6] 傅晓明, 张尧学. 一种用于提供 QoS 保证的准入控制方法[J]. 电子学报, 2000, 28(10): 82-85.
- [7] 陈文云, 胡家骏. 基于 ON/OFF 信源模型的信元丢失分析[J]. 数字通信, 2000, 27(1): 15-18.
- [8] 戴礼森, 洪佩琳. 高速信元交换调度算法研究[J]. 电子学报, 2000, 28(5): 96-98.
- [9] 周亚建, 李建东. 突发信源的排队分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2002, 29(1): 1-5.

作者简介:



刘宴兵 男, 1971 年生于四川省遂宁市, 2001 年在北京邮电大学获硕士学位, 取得 Cisco 网络技术教员资格, 现为电子科技大学博士研究生, 主要研究方向为网络计算和宽带网络性能分析.

孙世新 男, 1942 年生于湖北省孝感市, 教授, 博士生导师.