

基于小波分析模型的 VBR 视频流的时延和抖动分析^{*}

王军元 白光伟 沈航 靳勇

(南京工业大学信息科学与工程学院计算机系 南京 210009)

摘要 近年来,网络实时流媒体获得了越来越广泛的应用,引起了学术界和工业界的广泛关注。然而实时多媒体对传输时延、时延抖动以及网络带宽有着很高的要求,这对于在不可靠的网络环境下提供服务质量保证无疑是一个重大的挑战。以小波分析模型为基础,对 VBR 实时视频流的时延以及时延抖动进行深入的研究。在此基础上,通过 Matlab 仿真的方法对视频流的时延和时延抖动进行定性的分析和研究。结果表明,当节点服务速率固定时,时延和时延抖动初始时随着缓存的增加而增大;但当缓存增加到一定程度时,VBR 视频流数据包的时延和时延抖动将趋于稳定。另外,通过实验还发现,当缓存固定时,随着服务速率的提高,VBR 视频流的时延和时延抖动都将急剧下降。这些研究结果有助于进一步深入了解 VBR 视频流的通信特性及其传输规律,为提高多媒体网络的性能奠定良好的基础。

关键词 流媒体,通信突发性,时延,抖动,多分辨率分析

Analytical Study of Delay and Jitter for VBR Media Streaming Based on the Wavelet Model

WANG Jun-yuan BAI Guang-wei SHEN Hang JIN Yong

(Dept. of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract Real-time media streaming has seen increased demand on the Internet in recent years, and has drawn tremendous attention from both academia and industry. Multimedia applications in real time have rigid requirements on bandwidth, delay and jitter, and especially identify significant challenges for providing QoS guarantees in lossy networks. This paper presents an analytical study of the delay and jitter for real-time media streaming using the wavelet model for VBR streams. On this basis, a series of Matlab simulation experiments are designed and conducted, and the results are qualitatively analyzed and investigated. Our study shows that the delay and jitter of the video traffic increase as the buffer size is increased, in case of fixed service rate of the nodes. However, they tend to be stable when the buffer size increases to a certain degree. In addition, we find that, with the increasing of the sending rate, the delay and jitter decrease sharply when the buffer is fixed. We believe that this work could contribute in understanding the characteristics of real-time video traffic and transmission process of VBR streams, in performance improvement of multimedia networks as well.

Keywords Media streaming, Traffic bursty, Delay, Jitter, Multi scale analysis

1 引言

随着 Internet 技术的飞速发展,视频业务流逐渐成为互联网中的主要数据流量,比较典型的就是在线电影、会议视频等视频流。实时多媒体数据的传输通常具有很高的网络带宽要求,尤其是实时视频流数据的传输,需要在较长的时间内传递连续的视频数据,并在接收方实时播放,具有严格的端到端时延和延迟抖动要求。目前广泛应用于低码率视频的压缩算法(如 MPEG)采用预测编码、运动补偿以及可变长编码等技术实现对视频流在时间和空间上的压缩,以便获得比较高的压缩率,但压缩后视频流是可变速率(VBR)的。通常,我们根据视频业务流的统计特性来建立相关的数学模型。但是,由于网络上传输视频流数据包是一个非常复杂的随机过程,我们经常仅仅考虑视频数据流的概率分布特性和自相关特性。Beran 等人的研究发现^[5],视频图像序列也存在自相似性和长相关性。据学术界的讨论,一致认为网络通讯量的长相关性对网络的排队性能会产生严重的影响,而目前关于自相似

通信量对网络性能的影响大部分都是关于非多媒体网络流量的丢包率、信道利用率等方面的。然而,世界在变化,网络在更新,网络上传输的数据流已经逐渐以多媒体数据流为主,其中又以视频数据流首当其冲。而这些视频流在传输过程中对网络的实时通信性能要求非常高,因此对这些视频流的建模以及时延、抖动分析也变得越来越重要。

本文基于小波分析模型对实时 VBR 视频流传输的端到端时延及其抖动进行深入的分析和研究。通过小波多分辨率分析的方法^[2],在尺度空间和小波空间分别建模。在尺度空间,采用 RAR(1)模型进行建模;在小波空间,采用 WIG 模型^[3,4]。在建模的过程中,我们采用电影“星球大战(star wars)”视频流的 GOP 序列。其 MPEG 视频压缩序列中一个 GOP 包含 12 个,排列顺序为 IBBPBBPBBPBB。通过 Haar 小波变换对视频流进行小波多分辨率分析,从而体现视频流的多重分形特性。本文研究结果表明,当处理器服务速率固定时,视频流的时延和时延抖动随缓存的增大而增大,直到缓存到达一定程度时,才稳定下来;而当缓存固定时,视频流的时

^{*} 基金项目:国家自然科学基金资助项目(项目编号:60673185)。王军元 研究生,主要研究领域包括多媒体视频流特性研究、网络流量的自相似特性研究等;白光伟 教授,博士后,主要研究领域包括网络体系结构和协议、无线移动 Internet、多媒体网络、网络系统性能分析、评价等。

延和时延抖动都随处理速率的增大而急剧减小。

本文第2节介绍本文的研究背景,并验证VBR视频流小波分析模型;第3节以背景模型为基础给出简单的排队模型;在此基础上,第4节依据排队模型对视频流的时延抖动缓存和服务速率的变化进行定性的分析和研究;最后总结全文。

2 研究背景

在对视频流进行时延抖动分析之前,我们有必要了解本文的基础——小波分析模型。随着多媒体流在网络通信中所占的比重越来越大,网络通信流也越来越体现出多重分形特性,已有越来越多的文献描述和刻画以多媒体流为主的网络流量的多重分形特性。小波具有天然尺度分析的能力,所以用小波分析来对网络流量进行建模的数学模型也层出不穷。文献[7]通过建立基于Gamma和小波的模型对城域网的流量进行刻画;文献[9]通过建立基于小波的多重分形模型来对网络流量进行多尺度排队分析;文献[10]也是采用小波变换来对网络流量进行多尺度的分析。

通过Harr小波变换对视频数据流的GOP序列进行多分辨率分析,得到视频流的尺度空间和小波空间,在尺度空间和小波空间对尺度系数和小波系数分别建立模型来产生模拟数据,再通过小波反变换即可生成模拟数据。本节将简要介绍小波分析模型并通过自相关系数和经验概率分布的比较对模拟数据进行简单的验证和分析。

2.1 尺度系数模型

文献[1]的研究表明,经过多分辨率分析得到的尺度系数基本服从Rayleigh分布。我们用一种符合Rayleigh分布的模型来建模。此处我们采用最简单的Rayleigh AR(1)模型。

由文献[6]可知,RAR(1)模型的定义为:

$$X_k = \rho \cdot X_{k-1} + \epsilon_k, 0 < \rho < 1$$

其中 ϵ_k 是一个与 X_k 相互独立的、服从Rayleigh分布的随机变量。

我们对 ϵ_k 使用双参数的Rayleigh分布,且其概率密度函数如下:

$$f(x) = \frac{2}{b} (x-a) e^{-(x-a)^2/b}, x > a$$

其中参数 a, b 估计值分别为:

$$\hat{a} = (1-\rho)m - \sqrt{b\pi}/2$$

$$\hat{b} = 4(1-\rho^2)v/(4-\pi)$$

m, v, ρ 分别为 $m = E(X), v = D(X)$,

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=2}^N (X_i - m)(X_{i-1} - m)}{\sum_{i=2}^N (X_{i-1} - m)^2}$$

2.2 小波系数模型

假设随机变量 x 的概率分布函数是 $F_x(x)$,若希望获得一组概率分布是 $F_y(y)$ 的随机变量,可以做如下变换:

$$y = F_y^{-1}(F_x(x))$$

那么随机变量 y 的概率分布就是 $F_y(y)$ 。

将上述方法应用于小波系数建模过程,就是

$$W_{j,k} = F_j^{-1}(N_j(x_{j,k}))$$

其中 F_j^{-1} 是第 j 级小波系数的经验概率分布函数的逆函数, N_j 是正态分布函数 $N(\mu_j, \sigma_j)$, μ_j 和 σ_j 分别是第 j 级小波系数的均值和标准差, $x_{j,k}$ 是服从 $N(\mu_j, \sigma_j)$ 分布的随机变量序列。

2.3 视频流数据生成和分析

2.3.1 模拟数据产生步骤

由2.1和2.2节中介绍的模型即可分别产生尺度空间和小波空间的模拟数据,则整体视频流模拟数据的具体产生过程如下:

1)确定小波多分辨率分析的级别数 n ,对真实数据做小波多分辨率分析,分解到第 n 级,得到1个尺度空间(第0级)和 n 个小波空间的系数($0 \sim n-1$ 级);

2)由真实数据的尺度系数计算RAR模型的参数,然后可以使用2.1节中的模型生成尺度系数 $U_{0,k}$;

3)估算各个尺度的小波系数的均值和标准差,以此产生正态分布序列 $x_{j,k}$,并用式 $W_{j,k} = F_j^{-1}(N_j(x_{j,k}))$ 修正生成各级小波系数 $W_{j,k}$;

4)利用小波反变换,得出仿真视频业务流,即

$$\hat{G}(t) = \sum_{k=0}^{2^n-1} U_{0,k} \phi_{0,k}(t) + \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} W_{j,k} \psi_{j,k}(t)$$

2.3.2 模拟数据验证分析

按照2.3.1节中步骤利用数学工具Matlab进行模拟,得出的模拟数据和真实数据的自相关系数图像以及经验概率统计图像比较,如图1和图2所示。

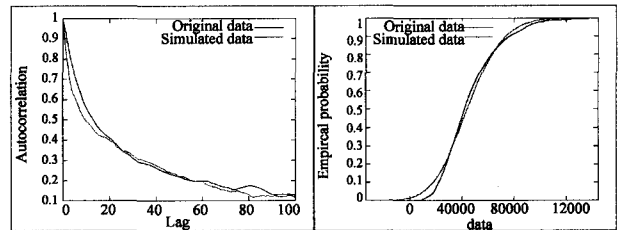


图1 模拟和真实数据自相关系数比较 图2 模拟和真实数据经验概率分布比较

在对上述结果进行分析以前,我们首先介绍一下自相似。网络的自相似^[11]性反映了网络流量在各个不同时间尺度上的结构相似性。自相似过程的定义如下:若一个连续时间过程 $Y = \{Y(t), t \geq 0\}$ 满足 $Y(t) \stackrel{d}{=} a^{-H} Y(at), t \geq 0, a > 0, 0 < H < 1$,则称 Y 为具有自相似参数 H 的自相似过程。在实际的网络模型中,衡量自相似过程的一个重要标量就是自相关系数 $r(k)$ 。

$$r(k) = E[(X_t - \mu)(X_{t+k} - \mu)] / E[(X_t - \mu)^2]$$

其中: X_t, X_{t+k} 为网络流量的随机序列。 $E[(X_t - \mu)(X_{t+k} - \mu)]$ 为 X_t 和 X_{t+k} 的协方差, $E[(X_t - \mu)^2]$ 为 X_t 的方差。

图1显示的是模拟数据和真实数据的自相关系数图像。其中 x 轴代表自相关系数的参数 k (以下称为自相关尺度), y 轴代表自相关系数,虚线表示模拟数据的自相关系数,实线表示原始数据的自相关系数。由此图可以看出,模拟数据在自相关尺度较小时与真实数据的自相关系数有微小的偏离,模拟数据的自相关系数小于真实数据的自相关系数。但随着自相关尺度的增大,模拟数据的自相关系数逐渐贴近实际数据的自相关系数。在 $k=80$ 左右时,模拟数据的自相关系数也小于真实数据的自相关系数。这种差别是细微的,因为模拟数据的产生过程是随机的,尽管它服从一定的分布。对于模拟的大量数据来说,这点变化是微小的,也是客观的、必然的,并不影响模拟数据的准确性。

图2显示的是模拟数据和真实数据的经验概率分布图像。其中 x 轴代表数据, y 轴代表数据序列的经验概率,虚线

表示模拟数据的经验概率,实线表示真实数据的经验概率。由图可以看出,模拟数据经验概率分布曲线 x 轴上的数据一直延伸到负数,也就是说在产生的模拟数据中存在着负数,这是因为模拟过程中采用计算机随机产生的模拟数据来代替真实数据,难免会与实际数据有一定的误差。但是从图中我们可以明显看出,随着数据的增大,模拟数据的经验概率逐渐和真实数据的经验概率相等。从某种意义上我们可以说,这种误差是可忽略的,对模拟出的全局通信量没有任何的影响。以上分析证实,此小波模型能够较好地模拟真实视频数据流。

3 排队分析

通过第 2 节的验证分析,我们知道此背景小波模型能够较好地模拟原始数据,准确地反映原始数据的各种特性。本节将在此基础上,对模型进行进一步的处理,得出缓存排队系统的队列长度及其存储概率。

这里,我们所用的通信量就是模拟产生的视频流:

$$G(t) = \sum_{k=0}^{2^n-1} U_{0,k} \phi_{0,k}(t) + \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^{2^j-1} W_{j,k} \psi_{j,k}(t)$$

其中,尺度系数和小波系数分别通过 2.1 和 2.2 节中的模型得到。在本文中,我们假设排队系统的缓冲区大小为 K ,数据发送速率为 C ,服务策略为先进先出(FIFO: first-in-first-out)。

3.1 排队存储过程

首先假设有一个容量无限的缓冲区,令 Q 表示 t 时刻的缓冲区长度且 $Q(0)=0$, $G(t)$ 是 $[0, t]$ 时间内流入缓冲区的业务流,那么 $[0, t]$ 时间间隔内缓冲池中通信量队列长度为:

$$Q = \sup_{t \geq 0} (G(t) - Ct)$$

由于视频数据流具有很强的多重分形特性,因此这里我们利用多尺度分析的方法对模拟数据流进行排队分析。可得, t 时刻队列长度为:

$$Q_s = \sup_{s \geq 1} (G^{(s)} - Cs)$$

其中 s 是时间尺度, $G^{(s)}$ 是尺度 s 下的累计业务流,即 $G^{(s)} = \sum_{j=0}^{s-1} G(t+j)$ 。

在式 $Q_s = \sup_{s \geq 1} (G^{(s)} - Cs)$ 中,时间尺度 s 是连续的,但是在离散小波变换框架下我们只能得到二进制时间尺度,即 $s=2^j, j=0, 1, \dots, n$ 。因此该式在本文的模型下可表示为:

$$Q_j = \sup_{j \in \{0, \dots, n\}} (G^{(2^j)} - C2^j)$$

其中 $G^{(2^j)}(k) = \int_{k2^j}^{(k+1)2^j} G(t) dt$ 。

因为经过小波分析处理后的数据显示出明显的分频特性,且经过多分辨率分析后的不同尺度空间的时间也变得不具体,只能用时间尺度代替。所以,这里我们取用尺度空间和小波空间里具有代表意义的数字作为输入通信量,因此特做如下定义:

$$X_i = \begin{cases} U_{0,0}, & i=0 \\ -2^{(i-1)/2} W_{i-1, 2^{i-1}-1}, & \text{其他} \end{cases}$$

设 $S_i = X_0 + X_1 + \dots + X_{i-1}, 1 \leq i \leq n$, 则有累计通信量 $G_j = 2^{-j} \sum_{i=0}^j X_i = 2^{-j} S_j$ 。这里的输入通信量和时间尺度都只具有代表意义,所以我们这里所做的时延抖动分析都是定性的,旨在对各项指标的发展趋势加以分析。

3.2 队列存储概率

如果缓冲区的容量有限,且溢出阈值为 K ,若设缓冲区的溢出概率为 $\epsilon = P(Q > K)$,则我们所关心的缓冲区中队列的存储过程 Q 的存储概率为 $1-\epsilon$ 。

在多尺度分析的情况下,设 $E_i = \{Q_i < K + C2^i\}$,那么我

们有

$$P(Q_i > K) = 1 - P(Q_i < K) = 1 - P(\bigcap_{i=0}^n E_i)$$

$$P(Q_i > K) \approx 1 - \prod_{i=0}^n P(E_i)$$

则:

$$1 - \epsilon = 1 - P(Q_i > K) = \prod_{i=0}^n P(E_i)$$

这样,多尺度排队分析的关键就是在各个时间尺度上求 $P(E_i)$,即 $P\{Q_i < K + C2^i\}$ 。

通过以上分析,网络缓存的输入通信量及其存储概率便一目了然。这为我们在第 4 节中仿真模拟视频流的时延和抖动提供了理论基础。

4 视频流的时延、时延抖动仿真分析

网络上传输的视频流的时延和时延抖动是评价网络性能的重要指标,也能够较准确地反映网络上客户端接受服务的质量。文献[8]以 FBM(分形布朗运动)模型为基础来分析网络数据流的时延及时延抖动。本节利用缓冲区中队列的存储过程 Q 及其分布概率来求输入视频流通信量的时延和抖动并对其进行分析。

由文献[1]可知:

$$P(E_i) = \begin{cases} Ra(K_i), & i=0 \\ \Phi_{\mu, \sigma}(K_i - a) - \frac{c_3 e^{-\frac{c_2}{2\sigma_3^2}}}{\sigma} \Phi_{c_1, c_3}(K_i - a) \end{cases}$$

其中 $Ra(K_i) = \int_a^{K_i} f(x) dx$, $f(x)$ 为 Rayleigh 概率密度函数; $\Phi_{\mu, \sigma}(\cdot)$ 是均值为 μ 、方差为 σ 的正态分布函数。其他参数为

$$\mu = -\sum_{j=0}^{i-1} 2^{j/2} \mu_j, \sigma = \sqrt{\sum_{j=0}^{i-1} 2^j \sigma_j^2}, c_1 = \frac{b\mu + 2\sigma^2(k_i - a)}{b + 2\sigma^2},$$

$$c_2 = c_1 - \left(\frac{b\mu + 2\sigma^2(k_i - a)}{b + 2\sigma^2} \right)^2, c_3 = \sqrt{\frac{b\sigma^2}{b + 2\sigma^2}}$$

μ_j 和 σ_j 分别为第 j 级小波系数的均值和标准差。

有了 $P(E_i)$,我们便可顺利求出队列中输入通信量的存储概率。

我们知道,如果系统缓存是有限的,且自相似输入排队系统的服务策略是 FIFO 时,新到达的数据在系统中的等待时间必然是当前系统中等待服务的数据量都被服务的时间,所以数据在排队系统中的等待时间为 $T_d = \frac{Q}{C}$ 。根据上节得出的 Q 的概率分布函数就可以得到时延 T_d 的均值和方差,即通信量的时延和时延抖动分别为

$$E[T_d] = E\left[\frac{Q}{C}\right] = \frac{1}{C} E[Q] = \frac{1}{C} \sum_{i=0}^n G_i (1 - P(Q > K))$$

$$= \frac{1}{C} \sum_{i=0}^n G_i \left(\prod_{j=0}^i P(E_j) \right)$$

$$D[T_d] = E[T_d^2] - (E[T_d])^2 = [E(Q^2) - E(Q)^2] / C^2$$

设原始视频流和模拟产生的模拟视频流分别输入到一个 FIFO 的有限缓冲区,在此基础上对时延和抖动进行计算,并通过图表来分析它们的变化趋势进行比较。为此我们设计了两组实验:第一组,固定缓冲器的服务速率 C ,分析、研究缓冲器容量 K 的变化对输入通信量的时延和时延抖动的影响;第二组,固定缓冲器容量 K ,计算随发送速率 C 变化的输入通信量的时延和时延抖动并绘制图表进行比较。鉴于视频数据流的数据量很大,这里我们分别设固定的服务速率 $C=111750$,固定的缓冲区容量 $K=446659$ 。利用数学工具 Matlab 进行仿真可得出我们需要的实验结果。

第一组实验结果如图 3、图 4 所示。

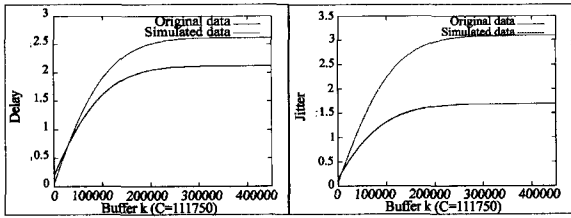


图3 缓冲器容量对端到端时延的影响 图4 缓冲器容量对端到端时延抖动的影响

图3所示为端到端时延随缓存的变化情况,其中 x 轴代表网络缓存, y 轴代表视频流数据包的时延。虚线、实线分别代表模拟、真实数据的时延变化。从图中我们可以看出,在服务速率固定的情况下时延随缓存的变化趋势。在缓存增加初期,随着缓存的增加,时延随之增加,但当缓存增加到一定程度时,数据流的时延趋于稳定。

图4描述的是端到端时延抖动随缓存的变化情况,其中 x 轴代表网络缓存, y 轴代表视频流数据包的时延抖动,虚线、实线分别代表模拟、真实数据的时延抖动变化。可以看出,当服务速率固定时,二者的时延抖动都随着网络缓存的增大而增大。但当缓存增加到一定程度时,VBR视频流数据包的抖动将达到某一平稳值。这是因为,VBR视频流比普通网络通信数据流具有更强的长相关性和突发性。在缓存较小时,系统不能吸收其突发性,时延以及时延抖动便随之增加。但当缓存达到一定值时,这种突发性便被很好地稳定和吸收,从而使通信量的时延和抖动稳定下来。

在第二组实验中,我们对时延和时延抖动做了微小的处理。从抖动的公式上看,当处理速率为0时,视频流的时延及时延抖动都应该是无限的,这影响了视图比较的效果,所以我们在实际操作上去掉了这个无穷数值(结果见图5)。

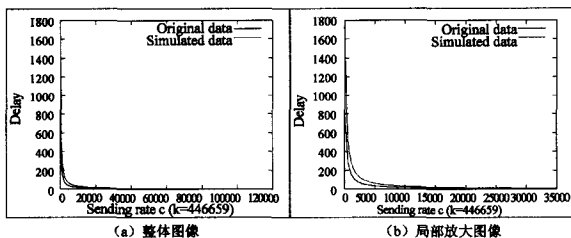


图5 服务速率对端到端时延的影响

图5所示为端到端时延随发送速率变化的整体和局部图像,其中 x 轴代表缓冲器的服务速率, y 轴代表视频数据流的时延,虚线、实线分别表示模拟数据和真实数据的时延变化。由图我们可以看出,随着发送速率的增大,视频数据流的时延迅速降低。从局部放大图像中,我们可以清楚地看到,对于某一特定的服务速率,模拟数据的时延大于真实数据的时延。

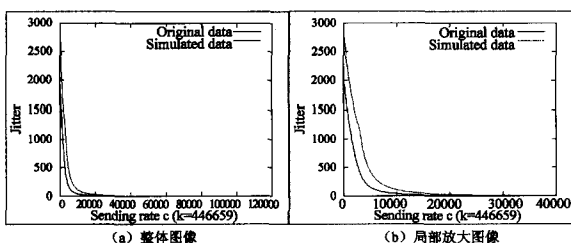


图6 发送速率对端到端时延抖动的影响

图6显示的是端到端时延抖动随发送速率变化的整体和局部图像,其中 x 轴代表缓冲器的服务速率, y 轴代表视频数

据流的时延抖动。虚线和实线分别表示模拟数据和真实数据的时延抖动变化。从图中我们可以直观的看出,当缓存固定时,随着服务速率的提高,VBR视频流的时延抖动急剧下降。同样,在局部放大图中,我们可以看到对于某一特定的发送速率,模拟数据的抖动大于真实数据的抖动。

综合图1和图2中出现的模拟数据和真实数据的自相关系数和经验概率的差别,我们认为这种模拟、真实数据时延和时延抖动的局部差异是由模拟数据的随机性造成的。虽然模拟数据能够较准确地反映真实数据,但通过计算机模拟产生的数据毕竟有一定的随机性,其微小的差别也会体现在其时延和时延抖动上,只是这种影响是细微的。另外,我们综合观察图3、图4,可以发现通信量的时延和时延抖动随缓冲器的容量变化是缓慢的,而其随缓冲器的服务速率的变化却是急剧的。这说明缓冲器的服务速率变化对通信量的时延和时延抖动的影响要远大于缓冲器的容量变化对其的影响,说明提高网络传输带宽或网络设备的服务速率对提高网络通信的性能有事半功倍的效果。

结束语 本文以小波分析模型为理论基础利用数学工具Matlab对视频流进行了模拟,并进一步通过推导、仿真得出了视频数据流的端到端时延和时延抖动随缓冲器容量和服务速率的变化规律,最后给出了这种规律的定性分析。仿真实验结果表明,视频数据流的时延和时延抖动在缓冲器服务速率固定时先随缓冲器容量的增大而增大,而后趋于平稳,而其在缓冲器容量固定时随服务速率的增大却急剧下降。这符合网络通信的一般规律。通过了解视频流在网络传输中的端到端时延和时延抖动随缓冲器的容量和服务速率的变化规律,我们更加深刻地认识到视频流在网络传输过程中受网络缓存器容量和服务速率的影响程度,这为我们了解网络多媒体流的通信规律提供了参考,也为进一步定量分析多媒体视频流,确定具体的网络设备临界值提供了方向。

参考文献

- [1] 龙图景,李春文,等.基于瑞利分布的VBR视频流的小波模型[J].电子学报,2005,4(4):638-642
- [2] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition; the wavelet representation[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674-693
- [3] Ma Sheng, Ji Chuanyi. Modeling video traffic in the wavelet domain[A]//Proc. of IEEE INFOCOM 1998[C]. San Francisco, USA, 1998: 201-208
- [4] Girma D, et al. Online video traffic modeling with wavelet transform[J]. IEEE Electronics Letters, 2000, 36(16): 1368-1370
- [5] Beran J, Sherman R, Taqqu M S, et al. Long-range dependence invariable-bit-rate video traffic. IEEE Trans. on Comm., 1995, 43(3): 1566-1579
- [6] 张西红,龚传信,张数京.一种新的VBRMPEG标准视频业务源模型及其特性研究[A]//2000年中国博士后学术大会论文(计算机与信息分册)[C].北京:科学出版社,2000: 48-52
- [7] 苏广文,高德远,樊晓桢,等.基于Gamma分布和小波的城域网流量仿真模型[J].计算机工程与应用,2007,43(7): 144-148
- [8] 饶云华.自相似网络通信量及高速路由结构性性能研究[D].华中科技大学,2004
- [9] 洪飞,吴志美.基于小波的多重分形业务排队分析[J].计算机研究与发展,2004,41(6): 930-933
- [10] 丛锁,韩良秀,刘岩,等.基于离散小波变换的网络流量多重分形模型[J].通信学报,2003,24(5): 43-48
- [11] Leland W, Taqqu M, Willinger W, et al. On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version)[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1994, 2(1): 1-15