

VBR 视频流多重分形建模

王升辉 裘正定

(北京交通大学信息所 北京 100044)

摘要 该文在小波域多重分形基础上,研究了基于 β 分布、点集(PM)分布的多重分形小波模型(MWM)的性能,并提出了一种具有更好的逼近性能的混合 PM- β 分布形式;同时,针对 VBR 视频流的 I, P, B 帧周期分布特性,充分利用异种帧相关性,建立了考虑帧间相关性的混合多重分形小波 VBR 视频流量模型 CMWM(Composite MWM)。仿真试验表明,与传统的短相关和长相关模型相比,具有多重分形特性的 CMWM 能更加精确地描述 MPEG 视频业务的统计特性和排队性能。

关键词 VBR, 多重分形, 视频源建模

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)06-1120-04

Multifractal Modeling of VBR Video Traffic

Wang Sheng-hui Qiu Zheng-ding

(Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract In this paper a new MultiFractal Model (MFM) of Variable Bit Rate (VBR) video traffic is proposed. It makes sure that the approaching performance of the new model (PM- β MFM) has better performance than β MFM and PM-MFM. Meanwhile, a new frame level VBR traffic model base on PM- β MFM is proposed, which is called Composite MWM(CMWM).CMWM considers the correlation structure of I, P, B frame size of VBR video traffic. Simulation result shows that CMCM can depict statistical feature and network performance more accurately than traditional SRD model and LRD model, Simulation result also shows multifractal feature is important in traffic modeling.

Key words VBR, Multifractal, Video traffic modeling

1 引言

建立变比特率(Variable Bit Rate, VBR)视频业务流数学模型的主要目的是要精确描述真实视频流量的基本特征,通过网络性能分析来提供更好的接入控制、网络资源分配与调度策略,在提高网络资源利用率的同时,保证用户的QOS需要。研究表明,VBR视频流量具有长相关性(LRD)^[1]。长相关性对排队性能有着非常重要的影响,目前,有关通信网络中视频源建模的研究都集中在刻画业务的长相关性上。由于具有自相似性质的分形模型具有天然的长相关特征,所以基于分形的模型已成为描述VBR视频流的重要模型,如FGN^[2], FARIMA^[3]等。其中,自相似性质由一个H(Hurst)参数刻画,当H参数取值在(0.5, 1)之间时,模型序列具有自相似性,Hurst参数值越大,表明自相似程度越高。然而,从分形过程的角度考虑,长相关性仅仅是分形行为的一个特征,H参数只能表示出一个分形过程的长期行为,在真实网络中,VBR视频业务的变化往往是非常复杂的,对这样一个复杂的分形过

程,其短期行为可能具有与长期行为不同的分形特征。就流量控制、平滑而言,了解短时间内视频流的快速变化要比了解其长相关特性更为重要。目前的研究表明,实际业务量并不是一个纯粹的自相似过程,其自相似性只在一定的时间刻度范围内有效,业务在小尺度上即短时间尺度表现为多重分形特性^[4]。因此,建立精确的VBR视频流模型,在各级尺度上精确描述VBR视频流的基本特性,将对网络性能评价产生重要作用。

多重分形为描述复杂业务量的局部结构提供了数学上的形式体系,用多重分形的方法估计VBR视频业务的自相似性、长相关性和突发性,并对其建模的研究,已经取得了一些进展^[5,6]。多重分形小波模型 (Multifractal Wavelet Model, MWM)由于其计算简单、能表述非高斯信号等优点,已成为时间序列分析和预测的重要工具,并逐渐应用在经济预测、网络流量分析等方面。因此,本文在多重分形模型基础上,详细分析了分形建模中极为重要的系数分布形式,在 β 分布、点集(Point Mass, PM)分布的基础上,提出了一种具有更好性能的混合PM- β 分布;针对VBR视频流的I, P, B帧周期分

布特性,充分利用异种帧相关性,建立了考虑帧间相关性的混合多重分形小波VBR视频流量模型CMWM (Composite MWM)。仿真结果表明,与传统的短相关和长相关模型相比,CMWM能更加精确地描述MPEG视频业务的统计特性和排队性能。

2 多重分形小波模型 MFM

MFM采用Haar小波将业务流的多重分形特性和小波的多尺度分析联系起来,通过乘性因子在小波域内不断细化,在描述多重分形特性的同时保证业务流的非负性。假设一维离散时间序列 $X(t)$,选取一个小波函数 φ 和尺度函数 ψ ,则有

$$X(t) = \sum_k U_{J_0,k} \varphi_{J_0,k}(t) + \sum_{j=J_0}^{\infty} \sum_k W_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (1)$$

式中 $W_{j,k}$ 为小波系数, $U_{j,k}$ 为尺度系数; j 为尺度下标, j 越大,分析分辨率越高, J_0 为最粗略的尺度,分辨率最低。对于Haar小波,其尺度和小波系数可由以下迭代过程得到:

$$\left. \begin{aligned} U_{j-1,k} &= 2^{-1/2}(U_{j,2k} + U_{j,2k+1}) \\ W_{j-1,k} &= 2^{-1/2}(U_{j,2k} - U_{j,2k+1}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

如果给出了最粗糙一级的尺度系数 $U_{0,0}$ 和各阶小波系数 $W_{j,k}$,通过递归计算,最终可以得到尺度系数序列 $U_{n,k}$,从而得出合成的模型序列。MFM的主导思想就是利用一个乘性因子 $A_{j,k}$ 描述同一级的尺度函数与小波函数间的关系。在这里 $A_{j,k}$ 所起的作用与 $r_i^{(j)}$ 类似,定义: $W_{j,k} = A_{j,k} U_{j,k}$,则

$$\left. \begin{aligned} U_{j,k_j} &= 2^{-1/2} U_{0,0} \prod_{i=0}^{j-1} [1 + (-1)^{k_i} A_{j,k_j}] \\ W_{j,k_j} &= 2^{-1/2} A_{j,k_j} U_{0,0} \prod_{i=0}^{j-1} [1 + (-1)^{k_i} A_{j,k_j}] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $k_j = \sum_{i=0}^{j-1} k_i' 2^{j-1-i}$, k_i' 反映时移 k_j 向下传递的方向, $k_{j+1} = 2k_j + k_i'$,当 $k_i' = 1$ 时,向右传递,当 $k_i' = 0$ 时,向左传递。

在建立模型时,我们需要设定最粗尺度系数 $U_{0,0}$ 和每级上乘性系数 $A_{j,k}$ 的分布函数。输出信号的LRD特性通过各个尺度上的小波系数的能量衰减控制,输出信号的高阶矩和边缘分布通过尺度系数的矩函数控制。

由小波性质可知,信号的小波分解过程就是去相关过程,原始信号的相关性将体现在各级小波系数的方差上。通过近似控制各尺度上的小波系数的能量衰减来达到控制目标信号的相关性的目的。一种实现办法是在最粗尺度上给定一个能量基值,以后各尺度的小波系数能量按照一定比率 η_j 求得, η_j 定义为

$$\eta_j = \frac{E[W_{j-1,k}^2]}{E[W_{j,k}^2]} = \frac{2E[A_{j-1}^2]}{E[A_j^2](1 + E[A_{j-1}^2])} \quad (4)$$

其中最粗尺度上小波系数 $W_{0,0}$ 和尺度系数 $U_{0,0}$ 间能量比值为

$$E[A_{(0)}^2] = \frac{E[W_{0,0}^2]}{E[U_{0,0}^2]} \quad (5)$$

另外,模型序列的边缘分布可由尺度函数的各阶矩函数控制

$$\frac{E[U_{j-1,k}^q]}{E[U_{j,k}^q]} = 2^{q/2} E[(1 + A_{(j-1)})^q]^{-1} \quad (6)$$

3 混合分布多重分形模型(PM- β MFM)

在MFM中,对模型性能具有决定性影响的就是 $U_{0,0}$ 与 $A_{j,k}$ 的分布。对于根尺度系数 $U_{0,0}$,其分布理论上应该严格为正,如果小波变换中有足够的尺度,同时 $U_{0,0}$ 的均值远大于方差时,则可以假定 $U_{0,0}$ 大致为高斯的,仅仅由均值和方差描述。而对于乘子 $A_{j,k}$,根据MFM模型性质,同一尺度下的乘子 $A_{j,k}$ 是独立同分布的,并且不同尺度上的乘子互不相关,因此乘子 $A_{j,k}$ 可由参数化的分布函数确定。为了保证建模过程中不出现负值,同时使模型具有一阶平稳性,应该保证 $A_{j,k}$ 是定义为在 $[-1,1]$ 上对称分布的随机变量,它的分布将直接影响到模型的性能。

由于区间 β 分布及点集(PM)分布满足这些条件并且具有计算简单、控制参数少等优点,人们分别使用了区间 $[-1,1]$ 上的 β 分布和点集分布来对MFM的乘子 $A_{j,k}$ 建模^[6,7]。但是,这样建模究竟是否合理?本文将通过试验进行分析。我们的试验视频(影片“星球大战”)来源于Berlin大学的MPEG-4视频迹(trace)数据库^[8],可通过其站点进行下载,这段视频采用MPEG-4压缩标准,单层编码,帧速率为30帧/秒,编码模式固定为IBBPBBPBB,量化参数固定为10,14,18,为低质量编码的码流。我们对本段视频进行了Haar小波分解并得到了不同尺度下乘子 $A_{j,k}$ 的统计特性。图1(a),(b),(c)分别表示尺度 j 为3,7,12时的 $A_{j,k}$ 归一化之后的分布直方图。通过分析可以发现,不同尺度上的 $A_{j,k}$ 的分布直方图形状有较大差别。在某些尺度上, $A_{j,k}$ 的分布具有尖峰特性($j=12$),这种尖峰无论 β 分布的参数取多少都不能正确拟合;同样在某些尺度上($j=7$),其分布形状用点集分布表示显然没有 β 分布精确。因此,单纯使用其中某种分布对所有尺度进行表示将极大地影响模型的精确性。为此,我们提出了一种新的混合分布建模方法,即PM- β MFM。

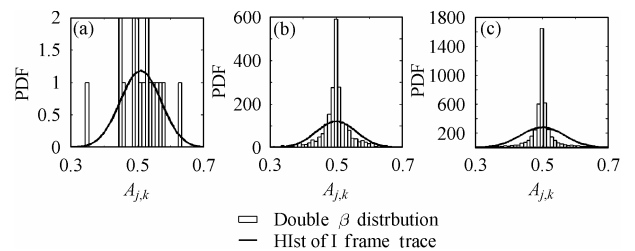


图1 (a)尺度就 $j=3$ 时 $A_{j,k}$ 的归一化分布 (b)尺度就 $j=7$ 时 $A_{j,k}$ 的归一化分布 (c)尺度就 $j=12$ 时 $A_{j,k}$ 的归一化分布
Fig.1 (a) Distribution of $A_{j,k}$ when scale $j=3$ (b) Distribution of $A_{j,k}$ when scale $j=7$ (c) Distribution of $A_{j,k}$ when scale $j=7$

为了确定在不同尺度上究竟采用哪种分布形式,我们使用了Kullback-Leiblar(KL)距离判别方法。KL距离通过计算两种分布间的互信息(也称交叉熵或相对熵)来判断两种分布的相似程度,对于两个离散分布, $p=\{p_1, \dots, p_n\}$ 和 $q=\{q_1, \dots, q_n\}$, KL距离定义为

$$KL(p, q) = \sum_i p_i \cdot \log_2(p_i / q_i) \quad (7)$$

如果分布是连续的,则把求和换成积分。在本文中,我们分别计算了不同尺度上实际乘子 $A_{j,k}$ 的分布直方图与 β 分布和点集分布的KL距离,如图2所示。在不同尺度上,我们选择KL距离最小的分布作为乘子 $A_{j,k}$ 最后的建模分布。遍历各尺度后,最终得到PM- β MFM混合分布模型, β 分布和PM分布的参数确定方法如下:

(1) 对称 β 分布 定义在 $[-1, 1]$ 上的对称 β 分布概率密度形式为

$$G_A(x) = \frac{(1+x)^{p-1}(1-x)^{p-1}}{B(p, p)2^{2p-1}} \quad (8)$$

其中 $B(\square, \square)$ 为 β 函数,当参数 p 较大时近似为高斯分布,则根据式(4) $\eta_j = 2P_j + 1/P_{j-1} + 1$, 假设 $A_{j,k}$ 服从在 $[-1, 1]$ 上的 β 对称分布, p_j 是第 j 尺度上的参数,则

$p_j = (\eta_j / 2)(p_{j-1} + 1) - 1/2$, 确定了各个尺度上的 p_j 后,即可得到相应尺度上的小波系数。

(2) 点集(PM)分布 PM分布形式为

$$\left. \begin{aligned} P[A=c] &= P[A=-c] = r \\ P[A=0] &= 1-2r, 0 \leq r, c \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

PM分布的方差 $\text{Var}(A) = 2rc^2$, 由于其分布形式的特殊性,可以得到

$$E\left[\left(\frac{1+A}{2}\right)^q\right] = 2^{-q}r((1-c)^q + (1+c)^q) + 2^{-q}(1-2r) \quad (10)$$

上式使得各个尺度系数的高阶矩函数可由参数 r 和 c 表示。 r 和 c 由序列各个尺度上的负一阶矩和二阶矩产生。

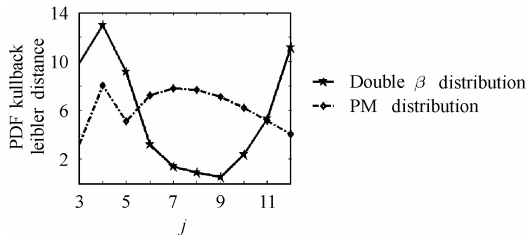


图2 不同尺度上 β 分布与PM分布拟合误差比较

Fig.2 Fitting error of β and PM distribution at different time scale

4 MPEG 视频业务流量建模

MPEG 压缩标准是一个分层模型,其中视频部分由大到小分为图组(GOP)、图(Picture)、图片(Slice)、宏块(Macro block)和块(Block)共 5 层,其中的术语“图”本文中称为“帧”。在MPEG4 视频流中,每个 GOP 由一个 I 帧开始,后面跟若干个 P 帧和 B 帧,目前绝大多数的帧级建模方法都是把这三种

类型的帧抽出来,然后分别对其进行建模^[4,5],本文采用的就是这种方法。

定义向量 $\mathbf{X} = [X_I, X_P, X_B]$, 其中 X_I , X_P 和 X_B 分别代表VBR视频流中的I, P, B帧序列,各种帧之间的互相关系数可表示为

$$\rho_{IP} = \frac{E[(X_I - \mu_I)(X_{P_{avg}} - \mu_{P_{avg}})]}{\sigma_I \sigma_{P_{avg}}}, \rho_{IB} = \frac{E[(X_I - \mu_I)(X_{B_{avg}} - \mu_{B_{avg}})]}{\sigma_I \sigma_{B_{avg}}}$$

$$\rho_{PB} = \frac{E[(X_{P_{avg}} - \mu_{P_{avg}})(X_{B_{avg}} - \mu_{B_{avg}})]}{\sigma_{P_{avg}} \sigma_{B_{avg}}}. \text{ 其中, } \mu_I \text{ 表示I帧序列}$$

的均值, P_{avg} 和 B_{avg} 分别代表以GOP为单位的P帧和B帧大小。由自回归模型基本定理有:

$$\begin{pmatrix} X_I(n+1) \\ X_P(n+1) \\ X_B(n+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \rho_{IP} & 0 & 0 \\ \rho_{IB} & \rho_{PB} & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_I(n) \\ X_P(n) \\ X_B(n) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_I(n+1) \\ X_P^*(n+1) \\ X_B^*(n+1) \end{pmatrix} \quad (11)$$

这里 X_I , X_P^* 和 X_B^* 分别为用PM- β MFM模型生成的序列,综合后,就得到了最终的CMFM模型序列。

5 模型分析

5.1 MFM 模型相关性检验

VBR视频流量具有多重分形特性^[4], 但又不具备严格意义上的自相似性, 本文以I帧序列的多重分形建模为例, 利用相关性结构检验来判定MFM模型的性能。

定义堆叠过程 $X^m(n) = \frac{1}{m}(X_{nm-m+1} + \dots + X_{nm}), n=1, 2, 3, \dots$,

计算 $X^m(n)$ 的 $\log_2(\text{var}(X^m(n))) - \log_2 m$ 图, 通过比较原始I帧序列和模型生成的序列的双对数坐标图, 研究模型逼近原始序列的程度, 从而定性地检验它们的自相关结构是否相同。由图3中可以发现, β -MFM, PM-MFM与原始I帧序列表现出的特征都比较相近, 说明二者的逼近能力都很好, 但进一步分析可以发现, 单一的 β 分布和PM分布不能在所有尺度上都精确描述乘子 $A_{j,k}$ 的统计分布, 这使得图中二者在某些尺度上的偏差较大, 即在某些局部范围内的逼近性能有较大误差。由于PM- β MFM模型对各阶小波系数分布估计进行了最小误差判决, 综合了前两种模型的优点, 因此具有较好的性能。试验也证明了这一点, 图4为PM- β MFM模型的相关性检验, 图5为3种模型与原始I帧序列的自相关函数比较。

5.2 排队性能分析

为了评价CMFM模型的排队性能, 我们在NS2(Network Simulator 2)^[9]上搭建了传输模型, 由两个节点和一个路由器组成。在此基础上我们进行了建模仿真并分析了试验数据。为了便于比较, 我们根据同一视频序列建立了经典的短相关模型AR2^[10]及长相关模型SRP-FGN^[11], 图6给出了信道利用率一定(70%)时缓冲区大小与丢包率的关系, 这里信道

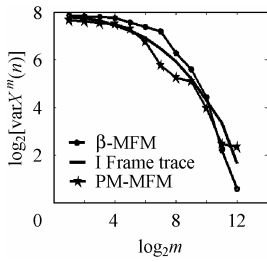


图3 不同分布的 $\log_2(\text{var}(X^m(n))) - \log_2 m$ 图
Fig.3 Figure of $\log_2(\text{var}(X^m(n))) - \log_2 m$

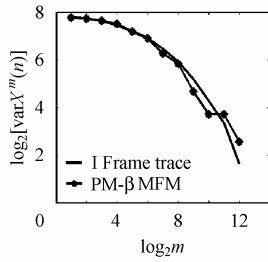


图4 PM- β 混合分布的 $\log_2(\text{var}(X^m(n))) - \log_2 m$ 图
Fig.4 $\log_2(\text{var}(X^m(n))) - \log_2 m$ of PM- β distribution

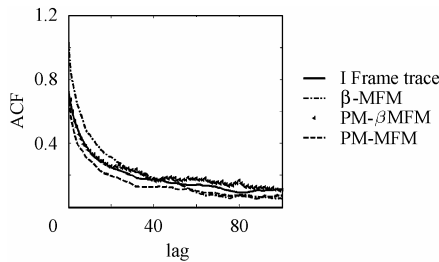


图5 自相关函数比较
Fig.5 Comparison of ACF

利用率定义为视频源平均速率与缓冲区输出速率的比值; 横坐标以 500 字节为单位; 图 7 给出了缓冲区队大小一定(15k Byte)时, 丢包率与信道利用率的关系。从图 6 可以看出, 当缓冲区逐渐增大时, 短相关的 AR2 模型的丢包率开始明显偏离原始视频序列, 与同时长相关模型的 SRP-FGN 相比, 描述出多重分形特性的 CMFM 模型更接近于原始视频, 图 7 同样说明了这一点。

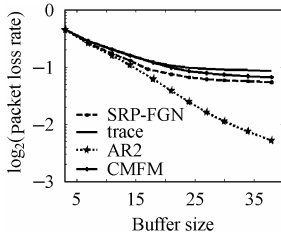


图6 信道利用率70%时缓冲区大小与丢包率的关系
Fig.6 Relationship of buffer size and packet loss rate

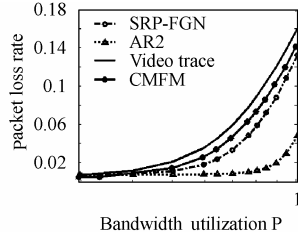


图7 缓冲区队大小一定(15k Byte)时丢包率与信道利用率的关系
Fig.7 Relationship of bandwidth utilization and packet loss rate

6 结论

本文在小波域多重分形基础上, 研究了基于 β 分布、点集(Point Mass)分布的 MWM 模型性能, 并提出了一种具有更好的逼近性能的混合 PM- β 多重分形小波模型(PM- β MFW); 同时, 针对 VBR 视频流的 I, P, B 帧周期分布特性,

充分利用异种帧相关性, 建立了考虑帧间相关性的混合多重分形小波模型 CMWM(Composite MWM), 仿真试验表明, 与传统的短相关和长相关模型相比, CMWM 能更加精确地描述 MPEG 视频业务的统计特性和排队性能, 进而进一步证明了 VBR 视频流量的多重分形特性对排队性能的影响。

参考文献

- [1] Garrett M, Willinger W. Analysis, modelling and generation of self-similar VBR video traffic. Proc. SIGCOMM'94 Conf., London, UK, September 1994, Vol. 24: 269-280.
- [2] Erramilli A, Narayan O, Willinger W. Experimental queuing analysis with long-range dependent packet traffic. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 1996, 4(2): 209-223.
- [3] Huang C, Devetsikiotis M, Lambadaris I, Kaye A R. Fast simulation for self-similar traffic in ATM networks. Proc. IEEE ICC, Seattle, June 1995: 438-444.
- [4] Feldmann A, Gilbert A C, Willinger W. Data networks as cascades: Investigating the multifractal nature of internet WAN traffic. Proc. ACM/Sigcomm 98, Vancouver, Canada, 1998, vol. 38: 42-55.
- [5] Gao Jianbo, Rubin I. Multifractal analysis and modelling of VBR video traffic. *Electronics Letters*, 2000, 36(3): 278-279.
- [6] Hong Fei, Wu Zhimei. Multifractal analysis and model of the MPEG-4 video traffic. IEEE 2003 International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC 2003), Phoenix, Arizona, U.S.A. April 9-11, 2003: 463-467.
- [7] Riedi R H, Crouse M S, Ribeiro V J, Baraniuk R G. A multifractal wavelet model with application to network traffic. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1999, 45(4): 992-1018.
- [8] Seeling P, Reisslein M, Kulapala B. Network performance evaluation using frame size and quality traces of single-layer and two-layer video: A tutorial. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. Third Quarter 2004, 6(2): 58-78.
- [9] LBL, Xerox PARC, UCB and USC/ISI, Network Simulator-ns (version2) IEEE, www.isi.edu/nsnam/ns
- [10] Xu Shugong, Huang Zailu. A gamma autoregressive video model on ATM networks. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 1998, 8(2): 138-142.
- [11] Liew C H, Kodikara C, Kondoz A M. Modelling of MPEG-4 encoded VBR video traffic, *Electronics Letters* 2004, 40(5): 355-357.

王升辉: 男, 1979年生, 博士生, 从事视频编码与传输、网络流量分析等方面的研究。
裘正定: 男, 1944年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为信号与信息处理、多媒体通信及 IP 网络技术。