

大时间尺度上 MPEG4 视频流量 预测的自适应算法

刘亚伟 卢燕飞 冯玉珉

(北京交通大学电子信息工程学院多媒体实验室, 北京 100044)

摘要 为了保证用户的服务质量(QoS), 宽带分组网络需要进行动态带宽分配, 而视频流量预测在动态带宽分配中发挥着重要的作用。本文从自相关性、自相似性的 Hurst 参数两个方面, 阐明图像组(GOP)时间尺度上的流量能够体现原有视频帧序列的流量特性, 并在固定步长的 LMS 自适应算法(FSSA)的基础上提出了一种新的可变步长自适应算法(VSSA), 在 GOP 所表示的大时间尺度上预测 MPEG4 视频流量。大量的仿真实验结果表明, VSSA 算法可以明显地改善预测性能。

关键词 MPEG4 视频流量预测 GOP 序列 Hurst 参数 自适应算法

中图分类号: TN919.8 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)06-0773-06

Adaptive Algorithm for MPEG4 Video Traffic Prediction on Large Time Scale

LIU Ya-wei, LU Yan-fei, FENG Yu-min

(Multimedia Laboratory of Electronic & Information Engineering Institute, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract Dynamic bandwidth allocation is needed to guarantee quality of service, while video traffic prediction plays an important role in dynamic bandwidth allocation. In this paper, both autocorrelation and Hurst parameter of self-similarity are illustrated to show that traffic character of original frame sequence can be represented by traffic on the time scale of GOP. A new variable step size adaptive algorithm is also presented based on the fixed step size adaptive algorithm, which is used to predict MPEG4 video traffic on large time scale of GOP. And VSSA algorithm can improve performance of prediction significantly according to a number of simulations.

Keywords MPEG4 video traffic prediction, GOP sequence, Hurst parameter, adaptive algorithm

1 引言

多媒体视频即将成为宽带网络支持的主要业务之一, 宽带分组网络为了保证用户的服务质量(QoS), 对视频信息的传输时延和信元丢失率的要求是严格的, 若期望网络利用率达到较高的标准时, 这些要求就难以实现, 于是需要进行动态带宽分配, 而视频流量预测在动态带宽分配中发挥着重要的作

用。宽带分组网络的性能估计同样要求对实际的业务流量进行建模, MPEG 编码视频的广泛应用也对网络接入控制、流量控制、拥塞控制的设计提出了新的要求, 因此, 视频流量预测就显得尤为重要。

MPEG4 是 ISO/IEC 的活动图像专家组(MPEG)于 1998 年制定的视频编码标准, 其编码方式与码流都具有新的特点。本文从自相关性、自相似性的 Hurst 参数两个方面, 阐明原有的 3 类模型在预测 MPEG4 I 帧序列时存在缺陷, 而图像组(GOP)尺度上的流

基金项目: 国家自然科学基金项目(60472034)

收稿日期: 2003-07-25; 改回日期: 2004-12-23

第一作者简介: 刘亚伟(1977 ~), 男, 北京交通大学电子信息工程学院多媒体实验室博士研究生。主要研究方向为 IP 多媒体技术、视频信息处理及其网络应用等。E-mail: yw_liu@126.com

量能够体现原始帧序列的流量特性,于是提出一种新的预测 MPEG4 流量的方法,即在 GOP 所表示的大时间尺度上预测 MPEG4 视频流量,并在固定步长的 LMS 自适应算法(FSSA)的基础上提出了一种新的可变步长自适应算法(VSSA),根据预测误差的反馈动态改变步长的大小,大量的仿真实验结果说明,VSSA 算法可以有效地改善预测性能。

2 MPEG4 码流分析

MPEG4 期望达到目标之一就是在低比特率下的多媒体通信,具有交互性、可扩展性强等特点。MPEG4 视频码流是分层描述的,其完整的码流可以由几个视频序列(VS)组成,一个 VS 对应一个场景,场景由一个或多个音、视频对象(VO)组成,VO 在某一时刻表现为某一帧,特殊地,当视频对象的形状为矩形时,分别采用独立编码、运动补偿编码,生成通常的 I、P、B 帧。MPEG4 中面向对象的编码方法,明显提高了压缩效率,帧尺寸明显减小,MPEG1、MPEG2 标准中编码帧的尺寸与 MPEG4 中 GOP 的尺寸在相同的数量级上,于是,对于 MPEG4 预测 GOP 时间尺度上的流量是可行的。

2.1 自相关性

在考察某个平稳过程 $X = \{X_n; n = 1, 2, \dots\}$ 的自相关函数(ACF)时,遵循

$$r(k) = \frac{E[(X_n - \mu)(X_{n+k} - \mu)]}{\sigma^2} \quad (1)$$

其中, μ 和 σ^2 是 X 的均值和方差。如果自相关函数的无限和 $\sum_{k=0}^{\infty} r(k) < \infty$, 称过程 X 是短时相关(SRD)的;反之,如果其无限和趋于无穷,则称 X 是长时相关(LRD)的。对于视频帧尺寸序列构成的随机过程,诸多文献提出了不同的模型来模拟其自相关函数,如离散自回归过程(DAR(1))^[1],马尔科夫更新调制 TES 模型^[2],长时相关(LRD)或自相似模型^[3],M/G/ ∞ 输入过程^[4]等。根据其 ACF 的渐进方式不同,这些模型大致可以分为以下 3 类:

(1) 基于马氏链的模型, $r(k) \sim e^{-\beta k}$ ($\beta > 0$), ACF 是短时相关的;

(2) LRD 模型, $r(k) \sim k^{-\beta} = e^{-\beta \log k}$ ($\beta > 0$), ACF 长时相关;

(3) M/G/ ∞ 输入模型, $r(k) \sim e^{-\beta \sqrt{k}}$ ($\beta > 0$), 是 SRD 与 LRD 之间的折衷。

大多数情况下,这些模型可以很好地模拟 I 帧尺寸序列的 ACF,但是当 I 帧序列的 ACF 出现负值时,用上述 3 种函数原型进行最小二乘法拟合, β 值为复数,没有物理意义。原因在于,上述 3 类模型只能模拟 $r(k) > 0$ 情况下的 ACF,对于具有负值的 ACF,不能通过数值拟合的方法计算 β 值;本文针对这种情况进行了大量的仿真实验,在 26 组 MPEG4 压缩视频的流量数据中,有 11 组 I 帧尺寸序列的 ACF 出现负值,说明这种现象是普遍存在的,并不是个别的特例,于是上述模型不再适用,也即上述模型在预测此类 MPEG4 视频流量时存在缺陷。

另外,在压缩视频中,I 帧尺寸的起伏变化,往往意味着 P、B 帧尺寸也有相应的变化,于是预测 I 帧的尺寸对确定整个视频的流量具有一定的指导意义。对于不能利用上述相关模型预测 I 帧序列的情况而言,在较大的时间尺度上,如图像组(GOP),预测视频流量也是一种有效的方法。本文根据“Die Hard III”的 MPEG4 视频编码中 I 帧与 GOP 序列计算其自相关函数,如图 1 所示,因 I 帧 ACF 存在大量的负值,不能用上述的模型拟合,但 GOP 序列的 ACF 与之具有大致相同的衰减趋势。

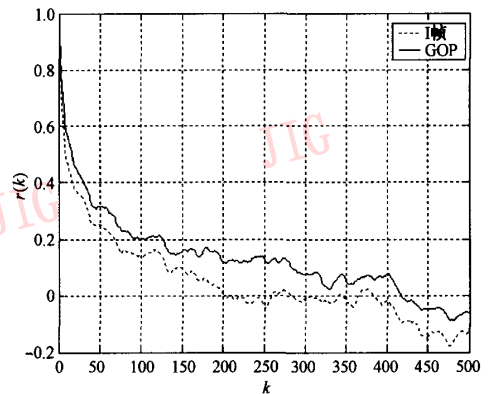


图 1 “Die Hard III” I 帧与 GOP 尺寸序列的自相关函数

Fig. 1 ACFs of I frame and GOP size in “Die Hard III”

表 1 列出了若干 MPEG4 视频的 I 帧与 GOP 尺寸序列互相关系数的计算结果,从中可以看出两者具有较强的相关性,因此在不能预测 I 帧的情况下,转而预测 GOP 序列的尺寸变化也能反映 MPEG4 视频流量的特性。

同时,大多数视频建模的方法都是按照规则先将原始序列分割,单独对各个子序列进行预测,然后再依据一定的方式组合起来,达到预测整个视频流量的目的;其中分割方式有多种,可以根据图像内容

表 1 若干 MPEG4 视频流量数据 I 帧与 GOP 尺寸序列的互相关系数

Tab.1 Correlative coefficients of I frame and GOP for several MPEG4 traces

视频序列名称	I 帧与 GOP 序列的互相关系数
Alpinski	0.747 4
Die Hard III	0.750 7
Formular1	0.655
Jurassic Park I	0.777 9
Starship Troopers	0.693 7
Star War IV	0.641 9

的活动性分解,也可以根据场景的切换进行分解^[5]等;组合方式,有根据 GOP 模式将 I、P、B 子序列简单叠加而成,按照场景变化长度组合^[5],或利用 I、P、B 帧间的相关性及马氏链转移过程进行组合^[6];而基于 GOP 时间尺度的预测方式有利于模型的简化,只需进行一次预测过程,即可得到该时间尺度下 MPEG4 视频流的估计流量,避免了模型的复杂性。

2.2 自相似性

随机过程的自相似性规定如下:设 X 为平稳过程,其自相关函数 $r(k)$ 如式(1),若

$$r(k) \sim k^{-\beta}L(k), \quad k \rightarrow \infty \quad (2)$$

其中, $0 < \beta < 1$, 且 L 在 $k \rightarrow \infty$ 时是一个缓慢变化的函数。考虑一个聚合过程,

$$X^{(m)} = \{X_i^{(m)}\} = \{X_1^{(m)}, X_2^{(m)}, \dots\} \quad (3)$$

$$X_i^{(m)} = \frac{1}{m}(X_{im-m+1} + X_{im-m+2} + \dots + X_{im}) \quad (4)$$

$$i \in \mathbf{N}, m \in \mathbf{N}$$

当下式成立时,

$$\text{var}X^{(m)} = \sigma^2 m^{-\beta}, \text{且 } r^{(m)}(k) = r(k) \quad (5)$$

$$m \in \mathbf{N}, k \in \mathbf{N}$$

称 $X^{(m)}$ 为严格二阶自相似过程, $r^{(m)}(k)$ 为 $X^{(m)}$ 的自相关函数,而 $H = 1 - \beta/2$ ($0 < \beta < 1$) 是唯一描述一个过程自相似程度的参数,称为 Hurst 参数 (H 参数),通常 $1/2 < H < 1$ 。

视频流量被证明具有自相似性,其自相似程度越高, H 参数越大,估计 H 参数的方法有属于点估计的“方差-时间图表”法、R/S 分析法,属于区间估计的基于高斯过程的 Whittle 法等^[6],这里采用 R/S 分析法计算 MPEG4 视频数据的 H 参数。R/S 分析法从一系列观测值 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 中,定义

$$W_j = (X_1 + X_2 + \dots + X_j) - j\bar{X}(n) \quad (6)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n$$

其中, $\bar{X}(n)$ 为前 n 个观察值的算术平均值。若取

$S(n)$ 为观察值 X_1, X_2, \dots, X_n 的标准差,

$$R(n) = \max(0, W_1, W_2, \dots, W_n) - \min(0, W_1, W_2, \dots, W_n) \quad (7)$$

$$E[R(n)/S(n)] \approx n^H, n \rightarrow \infty \quad (8)$$

对于不同的 n 值,计算 $R(n)/S(n)$ 值,在对数坐标系中将 $R(n)/S(n)$ 作为 n 的函数描点,理想情况应该得到直线,通过最小二乘法回归计算出斜率值,即为 H 参数的估值。表 2 列出了本文利用 R/S 分析法估计若干 MPEG4 视频流量数据 H 参数的计算结果,也即采用 GOP 序列、视频帧尺寸序列分别进行估计 ($H_{\text{GOP}}, H_{\text{IPB}}$), 并加以比较。

表 2 若干 MPEG4 视频流量数据的自相似性 H 参数

Tab.2 Hurst parameters of several MPEG4 traces

视频序列名称	自相似性 H 参数	
	H_{GOP}	H_{IPB}
Alpinski	0.731 2	0.743 6
Die Hard III	0.774 5	0.783 4
Formular1	0.694 4	0.671 1
Jurassic Park I	0.750	0.763 3
Starship Troopers	0.758 7	0.749 6
Star War IV	0.760 9	0.760 3

从表 2 可以看出, GOP 数据的自相似性与原始数据的自相似性几乎一致,从自相似性的角度来看, GOP 序列不会改变原始帧所具有的自相似及突发性本质,预测 GOP 序列同预测视频帧的流量是等价的。

3 自适应算法

自适应最小均方误差算法不需要任何有关被预测视频的先验统计特性,适合于在线实时预测,而且具有预测器阶数不随着压缩视频持续时间长短而变化的优点。本文采用该方案在大时间尺度即 GOP 上预测 MPEG4 视频流量,基于最小均方误差(LMS)归一化算法提出一种新的可变步长自适应算法(VSSA),并通过仿真,与固定步长算法(FSSA)相比较,改善效果明显。

3.1 固定步长自适应算法(FSSA)

自适应滤波或系统辨识问题都是通过调整一系列的加权系数,来达到跟踪特定信号的目的。 k 步预测器是根据信号 $x(n)$ 当前值及以往 k 个值的线性组合来估计 $x(n+k)$ 的值,一个 p 阶的预测器具有以下形式:

$$\hat{x}(n+k) = \sum_{l=0}^{p-1} w(l)x(n-l) \quad (9)$$

其中, $w(l)$ ($l=0, 1, 2, \dots, p-1$) 是预测滤波器的系数, 假如

$$W = [w(0), w(1), \dots, w(p-1)]^T \quad (10)$$

$$X(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-p+1)]^T \quad (11)$$

则预测误差为

$$e(n) = x(n+k) - \hat{x}(n+k) = x(n+k) - W^T X(n) \quad (12)$$

均方误差意义上的最优线性预测器应该使均方误差的数学期望 $\xi = E\{e^2(n)\}$ 取得最小值。最小均方误差(LMS)自适应算法是一种梯度搜索算法, 预测系数 W 是随时间变化的, 其调节过程依赖于误差 $\{e(n)\}$ 的反馈, $X(n)$ 、 W 的定义如式(10)、式(11), 则算法描述如下^[7]:

(1) 预测过程开始时, 取预测系数的初始估计值 $W(0)$;

(2) 对每一个新的数据点, 用下式更新 W 的取值:

$$W(n+1) = W(n) + \delta e(n) X(n) \quad (13)$$

其中, δ 是常数, 称为步长;

(3) 根据式(9)、式(12), 计算下一点预测数据及预测误差;

步长 δ 的选择必须在调节误差与收敛速度之间作出折衷, 这里将步长 δ 恒定的算法称为固定步长自适应算法(FSSA)。由于在时刻 n , 观测值 $x(n+k)$ 不存在, 无法计算 $e(n)$, 故用 $e(n-k)$ 代替 $e(n)$ 进行迭代; 为了减小算法对步长的敏感性, 进行归一化操作, 若 $0 < \delta < 2$, 采用一步线性预测器, 其预测系数 W 更新方程为

$$W(n+1) = W(n) + \frac{\delta e(n) X(n)}{\|X(n)\|^2} \quad (14)$$

其中, $\|X(n)\|^2 = X(n)^T X(n)$ 。

3.2 可变步长自适应算法(VSSA)

为了克服 FSSA 算法的缺陷, 需要动态调整步长的取值, 将预测误差按一定的比例引入到步长调整算法中, 误差增大时, 步长也变大, 快速对信号的变化做出响应, 有试图减小误差的趋势; 反之, 误差较小时, 步长也相应减小, 削弱算法收敛后产生的振荡。但是由于 MPEG4 视频流量的 GOP 序列突发性强, 瞬间预测误差很大, 文献[8]中的算法容易引起步长剧烈起伏, 导致算法的不稳定, 于是提出一种新的步长调整算法, 结合 FSSA 算法自适应地预测 MPEG4 大时间尺度上的流量, 改善了预测效果。

VSSA 算法利用误差反馈调整步长, 方式如下:

$$\delta'_{n+1} = \alpha \sum_{k=0}^{m-1} \beta_k \delta_{n-k} + \gamma \left| \frac{e(n)}{x(n+1)} \right| \quad (15)$$

其中, $0 < \alpha < 1, \gamma > 0, \sum_{k=0}^{m-1} \beta_k = 1$,

$$\delta_{n+1} = \begin{cases} \delta_{\max} & \delta'_{n+1} > \delta_{\max} \\ \delta_{\min} & \delta'_{n+1} < \delta_{\min} \\ \delta'_{n+1} & \text{其他情况} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $0 < \delta_{\min} < \delta_{\max}$;

$$W(n+1) = W(n) + \frac{\delta_{n+1} e(n-1) X(n-1)}{\|X(n-1)\|^2} \quad (17)$$

由式(15)可以看出, 步长 δ 总为正值, 随误差大小而变化, 能够兼顾预测系数 W 过度调节的程度和算法收敛速度, 而使用相对误差有利于避免因 GOP 序列的较大突发, 而造成的步长振荡; 参数 α 必须在 $(0, 1)$ 区间中选择, 保证步长的指数衰减, 经过大量的仿真, α 的典型值为 $0.97 \sim 0.99$; γ 值通常很小, 一般在 10^{-3} 数量级左右。

4 仿真结果

采用 6 组 MPEG4 视频流量数据进行预测仿真, 视频数据中 GOP 的编码模式为 $M=3, N=12$, 于是能够生成 GOP 序列, 分别用 FSSA 和 VSSA 两种算法对其进行预测, 比较两者的异同及改善程度。根据 Akaike 信息准则, 两种算法均采用 $p=12$ 阶、一步线性预测器, VSSA 算法中 $m=p$, 而 $\alpha, \beta, \gamma, \delta_{\min}, \delta_{\max}$ 在上节给出的范围内进行选择, 以期达到最佳的预测性能。在做性能分析时, 采用 $SNR^{-1} = \sum e^2(n) / \sum x^2(n)$, 即预测误差的平方和与输入 GOP 序列平方和的比值, 作为反映算法预测准确程度的度量。

图 2 是“Die Hard III”的 GOP 序列采用 FSSA 算法, 在不同步长时预测的情况, 从图中可见步长变化时, 预测性能会随之变化, 这也从另一个侧面说明, 可变步长算法由于步长选择的实时性、灵活性将会取得比 FSSA 优越的预测性能。图 3 是“Die Hard III”GOP 序列采用 VSSA 算法预测流量时自适应步长的变化情况, 从图中可见加入预测误差的反馈后, 步长将实时进行调整。图 4 是“Die Hard III”在 GOP 时间尺度上实际流量与预测流量的比较, 从图中可见虽然仍存在一定的误差, 但 VSSA、FSSA 算法比较而言, 采用 VSSA 算法预测的曲线与实际情况的吻合程度较好。理想情况下, 残留的预测误差应

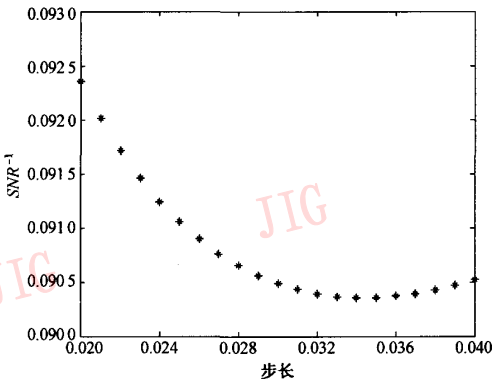


图 2 “Die Hard III”采用 FSSA 算法
在不同步长时的预测性能

Fig. 2 Predication performance of “Die Hard III”
with different steps using FSSA

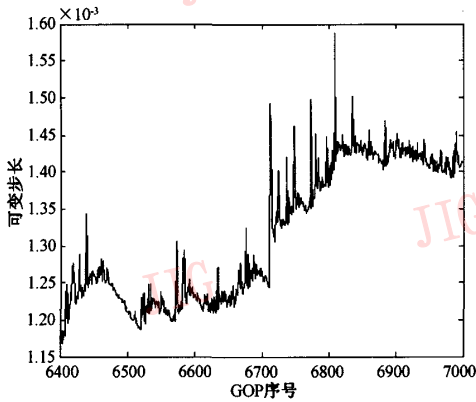


图 3 “Die Hard III”采用 VSSA 算法
计算过程中步长的变化情况

Fig. 3 Variable step of “Die Hard III”
in the predication using VSSA

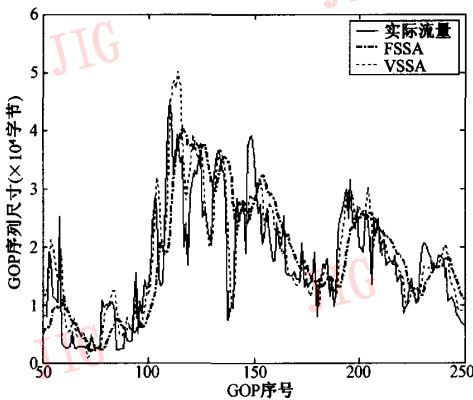


图 4 “Die Hard III”采用 VSSA 算法
实际流量与预测流量的比较

Fig. 4 Comparison of predicted and real traffic
in “Die Hard III” using VSSA

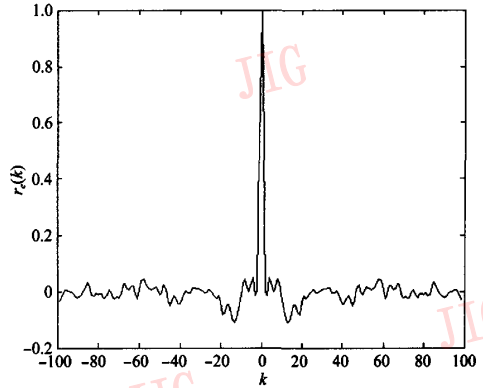


图 5 “Die Hard III”采用 VSSA 算法
预测误差的自相关函数

Fig. 5 ACF of prediction error in “Die Hard III” using VSSA

该是均值为 0 的高斯白噪声。图 5 中是“Die Hard III”利用 VSSA 算法后预测误差的自相关函数,成尖峰脉冲的形状,于是可以近似地将预测后的残留误差看作是白噪声。表 3 中列举了各组视频流量数据分别采用 FSSA、VSSA 算法进行预测时的结果,并计算了 VSSA 与 FSSA 相比,对预测性能的改进量,对表中数据的分析可以看出,应用 VSSA 算法比 FSSA 算法预测性能有明显改善,更利于视频流量的实时、在线预测。

表 3 若干 MPEG4 视频流量数据采用 FSSA、
VSSA 算法时的预测性能比较

Tab. 3 Comparison of prediction performance of several
MPEG4 traces using FSSA and VSSA

视频序列名称	FSSA (SNR^{-1})	VSSA (SNR^{-1})	改进量(%)
Alpinski	0.0864	0.0776	10
Die Hard III	0.0903	0.0828	8.3
Formular1	0.0661	0.0564	15
Jurassic Park I	0.0715	0.0672	6
StarshipTroopers	0.0814	0.0734	10
Star War IV	0.1042	0.0937	10

5 结 论

本文描述了 MPEG4 视频码流的组成和特点,并从自相关性、自相似性的 Hurst 参数两个方面,阐明在 GOP 所表示的大时间尺度上预测流量,能够体现原始帧序列的流量特性,在大时间尺度下的流量预测自适应算法是一种新的可变步长自适应算法(VSSA),根据预测误差的反馈动态改变步长的大

小,可以明显地改善预测性能。该算法不需要任何有关被预测视频的先验统计特性,适合于在线实时预测,也可以用于网络性能估计、动态带宽分配、接入控制、流量控制、拥塞控制的设计等。

参考文献 (References)

- 1 Heyman D P, Lakshman T V. Source models for VBR broadcast-video traffic[J]. IEEE Transactions on Networking, 1996, 4(1): 40~48.
- 2 Melamed B, Pendarakis D E. Modeling full-length VBR video using Markov-Renewal-Modulated TES models [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(5):600~611.
- 3 Garrett M W, Willinger W Analysis. Modeling and Generation of Self-Similar VBR Video Traffic [A]. In: Proceedings of ACM SIGCOMM'94[C], London, United Kingdom, 1994: 269~280.
- 4 Krunz M M, Makowski A M. Modeling video traffic using $M/G/\infty$ input process; a compromise between markovian and LRD models [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1998, 16(5): 733~748.
- 5 Liu Derong, Ender I Sára, Wei Sun. Nested auto-regressive progress for MPEG-encoded video traffic modeling[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11(2): 169~183.
- 6 Nikolaos D Doulamis, Anastasios D Doulamis, George E Konstantoulakis, et al. Efficient modeling of VBR MPEG-1 coded video sources [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2000, 10(1): 93~112.
- 7 Abdelnaser Mohammad Adas. Using adaptive linear prediction to support real-time VBR video under RCBR network service model[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1998, 16(5): 635~644.
- 8 Raymond H Kwong, Edward W Johnston. A variable step size LMS algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Procession, 1992, 40(7):1633~1642.