

基于混合预测模型的 VBR 流拥塞控制机制

李捷¹, 吕冰¹, 韩志杰^{1,2}

(1. 河南大学计算机与信息工程学院, 开封 475001; 2. 南京邮电大学计算机学院, 南京 210003)

摘要: 针对 VBR 多媒体流量的数字特征, 在混合网络流量预测模型的基础上, 结合小波分析和卡尔曼滤波, 提出一种多媒体流自适应带宽分配算法, 以合理分配网络带宽, 利用双重漏桶控制网络流量。在 NS 网络仿真平台上进行的仿真实验表明, 该算法能有效避免网络拥塞, 降低网络传输时延和数据丢包率, 提高带宽利用率。

关键词: 预测; 拥塞控制; 服务质量

VBR Traffic Congestion Control Mechanism Based on Hybrid Prediction Model

LI Jie¹, LV Bing¹, HAN Zhi-jie^{1,2}

(1. College of Computer & Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475001;

2. College of Computer, Nanjing University of Post & Telecommunication, Nanjing 210003)

【Abstract】 According to the characters of MPEG Variable Bit Rate(VBR) traffic, this paper proposes a new network traffic prediction model combined wavlet analysis and Kalman filter. A VBR traffic congestion management scheme based on the model is presented that is composed of Dual Leaky Bucket(DLB). Simulation on NS platform shows that the scheme can effectively avoid network congestion, reduces the time-delay of network transmission and the lose packet rate, and improves the bandwidth usage.

【Key words】 prediction; congestion control; QoS

1 概述

多媒体应用的视频流量已经成为宽带分组网中的主要流量, 在多种业务模式中, VBR(Variable Bit Rate)业务最具竞争力, 而提供实时VBR视频业务时, 要充分利用有限的资源(如带宽、缓存)并保证一定的QoS, 就需要有一种高效的拥塞控制策略。鉴于视频已经成为网络通信的主要组成部分, 为了提高网络业务质量, 建立精确的视频流量预测模型对于设计更好的缓冲区、更合理的动态带宽分配以及更高效的拥塞控制方案, 从而保证网络视频传输的稳定性、高性能和高效率起着重要作用^[1]。

传统的 MPEG VBR 流量管理方案采用基于模型参数的方法。MPEG 视频流量的复杂性使其难以建立精确的数学模型, 为了解决上述问题, 近年来提出了动态资源分配方法。与确定固定带宽的模型参数方法相比, 动态方法的优越性在于利用实时测量为每个用户调整带宽分配, 从而合理地利用了网络资源, 提高了网络传输效率。流量预测作为动态方法中最常用的技术, 预测的准确性和实时性与 QoS 密切相关。

近年来, VBR MPEG视频流量在线预测取得的进展主要有: 将递归最小二乘法和时滞神经网络的方法应用于JPEG和MPEG视频流量预测; 多复用MPEG视频流量预测的扩展递归最小二乘法; 基于最小均方的线性预测方案; 为了快速收敛提出的自适应小波预测方法等^[2]。在对上述方法研究的基础上, 本文根据文献[3]的小波和卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF)混合预测方法, 结合VBR网络流量的特殊性, 给出了针对VBR网络流量的预测模型, 并在此基础上提出了一个基于VBR流量预测的拥塞控制机制。其基本思想是网络节点利用基于混合预测的带宽估计算法预测网络拥塞状态, 在拥塞发生之前

向邻近的上游节点发送拥塞控制信息; 上游节点收到信息后, 运行双重漏桶(Dual Leaky Bucket, DLB)算法进行流量控制, 降低发送到下游节点的流量。在上述方案中, 由于拥塞控制在邻近节点之间直接进行, 并且在拥塞状态未发生之前进行, 因此响应时间短, 在网络节点尚未丢包之前进行拥塞控制, 降低了丢包率; 另外充分利用了上游节点保存网络资源, 因此, 能够有效提高网络带宽利用率。

2 MPEG VBR 拥塞控制机制模型

MPEG VBR 拥塞控制机制模型包括拥塞检测、拥塞控制协议、流量控制 3 个部分, 其中, 拥塞检测利用本地测量和带宽估计算法检测是否将要发生拥塞, 并向上报送拥塞控制协议; 拥塞控制协议根据拥塞检测的状态决定是否向上游节点发送拥塞控制报文; 当节点接收到下游节点发送的拥塞控制报文时, 运行双重漏桶, 进行流量控制, 降低向下游节点的发送流量。

3 改进后的拥塞控制机制

3.1 本地测量

为了进行带宽估计, 需要计算 MPEG VBR 流到达速率的均值和方差。这些速率的数字特征可通过测量多个时间间隔上 MPEG VBR 的最大到达速率得到。

设 $X(t_1, t_2)$ 表示一个 MPEG VBR 流在时间 $[t_1, t_2]$ 内到达

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60573141, 70271050); 国家“863”计划基金资助项目(2006AA01Z201)

作者简介: 李捷(1975-), 男, 副教授、博士, 主研方向: 计算机网络及其 QoS; 吕冰, 高级试验师; 韩志杰, 助教、博士研究生

收稿日期: 2008-04-10 **E-mail:** jsjt9@henu.edu.cn

的通信量。将时间分为 M 个时间窗口，每个窗口含有 T 个长度为 τ 的时隙。假设当前时间是 t ，对在此之前的第 k 个时间窗口，MPEG VBR 流在时间间隔上的最大到达速率为

$$V = \frac{1}{k\tau} \max_{0 \leq i \leq T-k} X[t-mT+i\tau, t-mT+(i+k)\tau]$$

其中， $k=1,2,\dots,T, m=1,2,\dots,M$ 。

3.2 带宽估计

初始MPEG VBR网络流量预测模型^[3]建立网流量预测模

$$P_L(t) = B(t) + v(t) \quad (1)$$

其中， $P_L(t)$ 表示网络流量总量； $v(t)$ 表示随机变化部分，具有统计特征，为Gaussian白噪声； $B(t)$ 表示网络流量平稳部分。 $B(t) = \mu + \sigma\sqrt{-\ln(2\pi) - 2\ln\gamma}$ ，其中， $\sigma^2 = \sum_{j=1}^7 P_j(\sigma^2 + \tilde{\mu}_j^2) - \mu^2$ ；

$\mu = \sum_{j=1}^7 P_j \tilde{\mu}$ ； P_j 为MPEG中GOP序列的第 j 部分； γ 为数据流量丢包率。

对式(1)按照文献[3]的方法进行小波变换，可得 KF 方程：

$$\begin{cases} X(k) = \Phi(k, k-1)X(k-1) + J(k) \\ Z(k) = C(k)X(k) + V(k) \end{cases} \quad (2)$$

其中，转移阵 $\Phi(k, k-1)$ 为 $I_{N \times N}$ ， I 为单位矩阵； $J(k), V(k)$ 分别为白噪声模型； $X(k) = \begin{bmatrix} WB \\ WA \end{bmatrix}$ ； $Z(k)$ 表示 k 周期内顺序所得测量值序列 $z(k_1), z(k_2), \dots, z(k_N)$ 的集合，记为

$$\begin{aligned} Z(k) &= [z(k_1), z(k_2), \dots, z(k_N)]^T \\ Z_1^k &= [Z^T(1), Z^T(2), \dots, Z^T(k)] \end{aligned}$$

其中， Z_1^k 表示 $1, 2, \dots, k$ 周期内所有时刻的测量值序列集合。

带宽估计算法描述如下：

步骤 1 建立测量方程和状态方程(式(2))。

步骤 2 获得初值 \hat{X}, P_0, K_0 。

步骤 3 在第 $(k-1)$ 周期：

(1)获得 $\hat{X}(k-1|k-1), P(k-1|k-1)$ 。

(2)计算 $\hat{X}(k|k-1), P(k-1|k-1)$ ，其中，

$$\hat{X}(k|k-1) = E\{X(k) | Z_1^{k-1}\}$$

$$P(k|k-1) = E\{[X(k) - \hat{X}(k|k-1)][X(k) - \hat{X}(k|k-1)]^T\}$$

(3)对 $\hat{X}(k|k-1)$ 小波重构，获得可 k 周期 $S(k)$ 的预测值：

$$\hat{S}(k|k-1) = E\{S(k) | Z_1^{k-1}\}$$

步骤 4 在第 (k) 周期内，依次取得 $Z(k)$ 的值。将 k 赋值为 1，循环递增至 n ，在每一个循环内，进行如下计算：

(1)用 $z(k_i)$ 对 $\hat{X}_e(k|k_1, k_2, \dots, k_{i-1})$ 进行更新，得到状态 $X(k)$ 基于 Z_1^{k-1} 和观测信息 $z(k_1), z(k_2), \dots, z(k_i)$ 的估计值和相应的估计误差协方差阵：

$$\hat{X}_e(k|k_1, k_2, \dots, k_i) = E\{X(k) | Z_1^{k-1}, z(k_1), z(k_2), \dots, z(k_i)\}$$

$$P_e(k|k_1, k_2, \dots, k_i) = E\{\tilde{X}(k|k_1, k_2, \dots, k_i)\tilde{X}^T(k|k_1, k_2, \dots, k_i)\}$$

(2)对 $\hat{X}_e(k|k_i)$ 进行小波重构可得 $S(k)$ 基于 Z_1^{k-1} 和观测信息的 $z(k_1), z(k_2), \dots, z(k_i)$ 估计值：

$$\hat{S}(k|k_1, k_2, \dots, k_i) = E\{S(k) | Z_1^{k-1}, z(k_1), z(k_2), \dots, z(k_i)\}$$

由此实现基于 Z_1^{k-1} 和观测信息 $z(k_1), z(k_2), \dots, z(k_i)$ 对 $s(k_l)$ ($l=i+1, i+2, \dots, N$) 进行预报，计算公式如下：

$$\hat{s}(k_l|k_1, k_2, \dots, k_i) = E\{s(k_l) | Z_1^{k-1}, z(k_1), z(k_2), \dots, z(k_i)\} \quad (3)$$

其中， $l=i+1, i+2, \dots, N$ 。

$$\tilde{X}(k|k_1, k_2, \dots, k_i) = X(k) - \hat{X}_e(k|k_1, k_2, \dots, k_i) \quad (4)$$

其中， $1 \leq i \leq N$ 。

步骤 5 根据步骤 3 和步骤 4，最终获得状态 $X(k)$ 基于 Z_1^k 的估计值和相应的估计误差协方差阵：

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}_e(k|k_N) = E\{X(k) | Z_1^k\}$$

$$P(k|k) = P_e(k|k_N)$$

及 $S(k)$ 基于 Z_1^k 的估计值： $\hat{S}(k|k) = \hat{S}(k|k_N)$ 。

步骤 6 重复步骤 3~步骤 5，直到处理完所有周期。

3.3 流量整形

针对MPEG VBR数据流随机性强^[4]的特点，利用文献[5]的DLB方法对所有MPEG VBR流量在经过节点时进行整形。DLB由令牌桶和漏桶组成，其结构如图 1 所示。

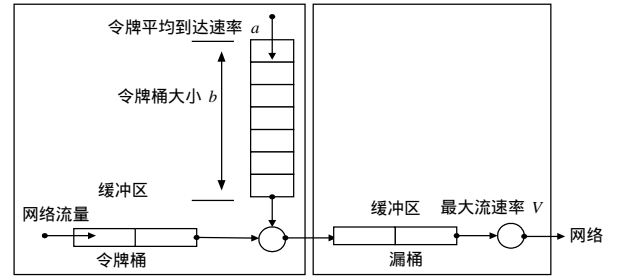


图 1 双重漏桶

当流量到达令牌桶时，如果桶中的令牌总量大于到达的通信量，通信量被允许进入漏桶；否则，通信量存储在缓冲区中等待令牌。令牌以网络接入平均速率 a 产生，令牌桶的大小(即网络允许的突发长度)为 b 。当令牌桶满时，新产生的令牌被丢弃。漏桶用来保证输出的通信量不会超过网络允许的峰值速率 V 。设 $f(\tau)$ 为流量限制函数，它是非负和非递减函数，且 $\beta(t+\tau) - \beta(t) \leq f(\tau) \forall t, \tau > 0$ ， $\beta(t)$ 为 t 时刻的网络流量，则 $f(\tau)$ 经过 DLB 之后，存在

$$f(\tau) = \min\{V\tau, b + a\tau\} \forall \tau > 0 \quad (5)$$

4 仿真实验

仿真实验在 NS2.26 网络仿真平台下利用 NS2.26 提供的 MPEG VBR 数据流进行，具体仿真拓扑图如图 2 所示。

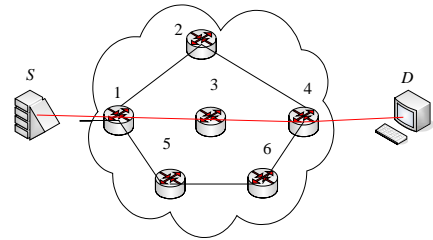


图 2 仿真拓扑

仿真参数如下：

网络流量设置	VBR		
链路连接个数	200~400		
流量流向	从节点 S 向节点 D		
传输层设置	TCP 连接		
链路具体设置	链路	带宽/(Mb·s ⁻¹)	延迟/ms
	S-1,1-3,3-4,4-D	10	5
	1-2,2-4	6	7
	1-5,5-6,5-4	5	7

链路 S-D 针对带宽利用率的仿真结果如图 3 所示。

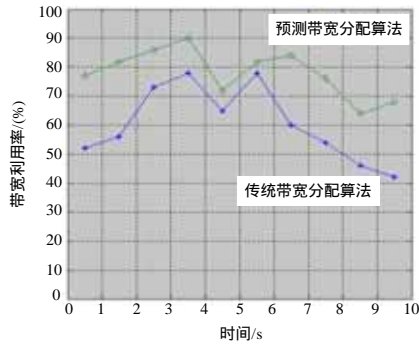


图 3 带宽利用率

针对 MPEG VBR 流量的传输时延要求,通过仿真计算了链路 S-D 的平均传输时延,仿真时间为 10 s, MPEG VBR 流从 200 个连接增加到 400 个连接,平均链路延迟如图 4 所示。

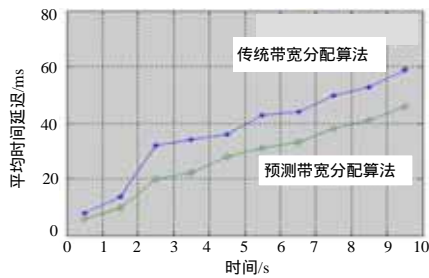


图 4 平均时间延迟

由图 3 可以看出,与传统的带宽分配算法相比,因为有效利用了剩余带宽资源,所以预测带宽自适应算法明显提高了整个链路的带宽利用率。由图 4 可以看出,本带宽自适应分配算法能够有效降低网络传输时延。

5 结束语

本文基于预测模型提出了一个新的 MPEG VBR 数据流分配算法,并在 NS 平台中通过仿真实验验证,结果表明本算法与传统的带宽分配算法相比,能够根据 MPEG VBR 流量的变化特征,自适应地分配链路带宽,保证链路的传输实时性和可靠性,支持 QoS 和负载均衡,有效地提高了带宽利用率,具备可行性和实用性。

参考文献

- [1] Farshchian M. Optimal Error Protection for Realtime Image and Video Transmission[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(10): 780-783.
- [2] Yoo S J. Efficient Traffic Prediction Scheme for Realtime VBR/MPEG Video Transmission over Highspeed Networks[J]. IEEE Trans. on Broadcasting, 2002, 48(1): 10-18.
- [3] 李捷, 刘瑞新. 一种基于混合模型的实时网络流量预测算法[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(5): 806-812.
- [4] Centinkaya C, Knightly E. Scalable Services via Egress Admission Control[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM'00. Tel Aviv, Israel: IEEE Press, 2000: 69-81.
- [5] 庞斌, 邵怀荣, 高文. 区分服务网络基于测量的接纳控制方案的设计与应用[J]. 计算机学报, 2000, 26(3): 257-263.

(上接第 33 页)

- [6] Cimatti A, Roveri M. Conformant Planning via Symbolic Model Checking[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2000, 13(1): 305-338.
- [7] Bryce D, Kambhampati S, Smith D E. Planning in Belief Space with a Labelled Uncertainty Graph[C]//Proceedings of AAAI Workshop on Learning and Planning in Markov Processes-advances and Challenges. [S. l.]: AAAI Press, 2004.
- [8] Cushing W, Bryce D. State Agnostic Planning Graphs and Their Application to Belief Space Planning[C]//Proceedings of the 20th National Conference on Artificial Intelligence and the 17th Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference. [S. l.]: AAAI Press, 2005: 1131-1138.
- [9] Hoffmann J, Brafman R I. Conformant Planning via Heuristic Forward Search: A New Approach[J]. Artificial Intelligence, 2006, 170(6): 507-541.
- [10] Rintanen J. Constructing Conditional Plans by a Theorem-prover[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 1999, 10(1): 323-352.
- [11] Palacios H, Geffner H. Mapping Conformant Planning into SAT Through Compilation and Projection[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming. Berlin, Germany: [s. n.], 2005: 311-320.
- [12] Palacios H, Geffner H. Compiling Uncertainty Away: Solving

Conformant Planning Problems Using a Classical Planner (Sometimes)[C]//Proceedings of the 21st National Conference on Artificial Intelligence. New York, USA: [s. n.], 2006.

- [13] Palacios H, Geffner H. From Conformant into Classical Planning: Efficient Translations That May be Complete Tool[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Automated Planning and Scheduling. [S. l.]: Springer, 2007.
- [14] Morales A R, Tu P H, Son T C. An Extension to Conformant Planning Using Logic Programming[C]//Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence. [S. l.]: AAAI Press, 2007: 1991-1996.
- [15] Jonsson A. The Role of Macros in Tractable Planning over Causal Graphs[C]//Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence. [S. l.]: AAAI Press, 2007: 1936-1941.
- [16] Geffner H. The Causal Graph Heuristic is the Additive Heuristic Plus Context[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Automated Planning and Scheduling Workshop on Heuristics for Domain-independent Planning. New York, USA: [s. n.], 2007.
- [17] Keyder E, Geffner H. Set-additive and TSP Heuristics for Planning with Action Costs and Soft Goals[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Automated Planning and Scheduling Workshop on Heuristics for Domain-independent Planning. New York, USA: [s. n.], 2007.