

基于半马尔科夫决策过程的视频传输拥塞控制算法

田波, 杨宜民, 蔡述庭

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090)

摘要: 针对传输控制协议(TCP, transmission control protocol)的拥塞控制算法未能满足视频传输质量要求的问题, 提出了一种基于半马尔科夫决策过程的视频传输拥塞控制算法。首先, 为克服目前基于峰值信噪比的视频质量评估方法实时性低的缺点, 设计了一种可在线运行的无参考视频质量评估方法。其次, 根据接收端视频质量的反馈, 采用半马尔科夫决策过程对拥塞控制进行建模, 并通过求解此模型得到拥塞控制参数的调整策略。仿真实验结果表明, 与目前典型的拥塞控制算法相比, 该算法不但具备更好的 TCP 友好性, 而且有效地提高了解码后视频序列的主观和客观质量。

关键词: 拥塞控制; 视频传输; 视频质量评估; 半马尔科夫决策过程

中图分类号: TN919.85

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)08-0154-08

Semi-Markov decision process based congestion control algorithm for video transmission

TIAN Bo, YANG Yi-min, CAI Shu-ting

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: Due to the problem that the congestion control algorithm of transmission control protocol (TCP) cannot meet the requirements of quality of experience for Internet video transmission, a semi-Markov decision process based congestion control algorithm for video transmission was proposed. First, in order to improve the accuracy of video quality assessment, an online operation no-reference video quality assessment was presented. Then, the congestion control problem was formulated as a semi-Markov decision process according to the feedback of video quality assessment, and the optimal parameters of congestion control were obtained by solving the semi-Markov decision process. Simulation results reveal that proposed algorithm achieves better subjective and objective video quality, and obtains well TCP-friendliness ratio, compared with the conventional congestion control algorithms.

Key words: congestion control; video transmission; video quality assessment; semi-Markov decision process

1 引言

随着网络及多媒体技术的进步, 视频传输成为基于传输控制协议/网际协议(TCP/IP, transmission control protocol/Internet protocol)的互联网中的一个重要应用。由于视频编码器普遍采用了预测编码和熵编码, 导致图像组(GOP, group of picture)内的帧存在复杂的依赖关系, 各帧之间也产生了固定的解码次序和严格的时延限制^[1]。对此, TCP 严格的重

传机制、加增乘减(AIMD, additive increase multiplicative decrease)的拥塞控制算法虽然能保证数据的可靠传输, 但不可避免地增加了时延及其抖动, 降低了视频传输的实时性, 不利于接收端获得稳定的视频播放质量^[2]。

针对视频传输的特点设计相应的拥塞控制算法, 已成为目前的一个重要研究方向。文献[3]以视频播放质量为约束条件, 采用马尔科夫决策过程(MDP, Markov decision process)设计了一种 TCP 友

收稿日期: 2013-12-06; 修回日期: 2014-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61201392)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61201392)

好的拥塞控制算法。尽管在较长的传输周期内提高了接收端视频的质量，但要求预先对视频帧进行分类处理，实现过于复杂。文献[4]以部分可观察 MDP 为工具对拥塞控制进行建模，虽然也考虑到了视频帧的特点，但缺乏对该算法 TCP 友好性的分析。文献[5~7]在拥塞控制算法中引入了模糊控制，在有效控制视频帧的发送速率的同时，最大化带宽利用率和 TCP 友好性。然而这些算法普遍存在实时性较低的不足。文献[8]提出了一种针对用户数据报协议的拥塞控制算法，带宽利用率高、实时性好，但没有解决 TCP 友好性的问题。文献[9]将编码后的视频数据划分为数据单元(DU, data unit)，采用 MDP 对 DU 的传输进行调度，在较长的传输周期内提高了视频传输的可靠性。但对于 DU 的选取，该算法并没有提供一种稳定而有效的方法。文献[10]应用顽健控制方法，提出了一种主动队列管理算法，保证了视频数据的稳定传输。然而该算法需部署于路由器中，应用较为困难。文献[11]从网络层的角度出发，对 TCP 和主动队列管理之间的关系进行深入的分析，设计了一种基于索引策略的拥塞控制算法，并采用 MDP 求解视频帧的调度策略，以确保应用层数据的平稳传输。由于需要路由器等网络设备的支持，应用受到一定的限制。

可以看出，目前针对视频传输的拥塞控制研究工作中存在以下不足：1) 在设计拥塞控制算法时，仅考虑公平性及播放质量的最大化，未能将视频的编解码特性融入到拥塞控制算法中；2) 目前性能较好的算法是将拥塞控制过程视为一个离散的有限状态 MDP，再求解拥塞控制参数，其主要特点是具备固定大小的状态持续时间，但这并不符合网络的实际情况；3) 对视频质量的评估以基于峰值信噪比(PSNR, peak signal noise ratio)的方法为主，但 PSNR 要在获得完整的原始视频的前提下才能进行计算，不利于在传输过程中进行在线计算，且 PSNR 与视频的实际播放质量并无必然联系。因此，设计一种客观、准确的可在线运行的视频质量评估方法，对提高拥塞控制算法的性能具有重要意义。

针对上述不足，本文提出了一种基于半马尔科夫决策过程的视频传输拥塞控制(SMDPCC, semi-Markov decision process based congestion control) 算法。其特点在于：1) 结合视频图像编解码特性，采用半马尔科夫决策过程(SMDP, semi-Markov decision process)对网络拥塞建模。不要求随机过程在某

个状态的停留时间服从指数分布，这更符合视频传输的实际情况；2) 针对目前基于 PSNR 的视频质量评估方法的不足，设计了一种无参考视频质量评估方法，有利于对解码后视频的质量进行实时评估。

2 网络服务质量与视频传输

在“尽力而为”型基于 TCP/IP 的互联网中，视频传输易受分组丢失率、时延及其抖动等的影响。特别是大量的移动智能终端接入互联网后，这些设备上的视频传输受网络服务质量(QoS)的影响更为显著^[12]。为便于描述 QoS 与视频传输的关系，作如下定义。

定义 1 对任一已编码的视频数据流 V ，在时间段 t 内，当分组丢失率 $P_{\text{loss}} \leq \varpi$ ，解码后视频质量 Vq 的方差 γ 满足 $\gamma \leq \varepsilon$ 时，称 ϖ 为 V 的分组丢失容忍度。

定义 2 对任一已编码的视频数据流 V ，在时间段 t 内，当存在单向帧间预测或双向帧间预测模式时，任一 GOP 内 2 个存在依赖关系的帧 f_i 及 f_{i-1} ，到达接收端的时间间隔 $Intv(i, i-1)$ 应不大于 ψ ，则称 ψ 为 V 的解码期限。其中， $\psi \leq 1/v$ ， v 为帧率。

定义 3 对任一已编码的视频数据流 V ，在时间段 t 内，任一 GOP 内 2 个存在依赖关系的帧 f_i 与 f_{i-1} ，当时延抖动 $J_{i,i-1} \leq \theta$ 时解码后视频质量 Vq 的方差 $\gamma \leq \varepsilon$ ，则称 θ 为 V 的抖动容忍度。其中， $J_{i,i-1} = \text{abs}((r_{i-1} - s_{i-1}) - (r_i - s_i))$ 为时延抖动， r, s 分别为数据分组的接收与发送时间， $\text{abs}()$ 为取绝对值函数。

此外，一种新的拥塞控制算法必须与 TCP 的数据流公平地共享带宽，即是 TCP 友好的。为便于衡量本文算法的 TCP 友好性，定义 TCP 友好因子如下。

定义 4 当传输链路中存在 N 个采用其他拥塞控制算法的数据流和 K 个采用 TCP 的数据流时，在时间段 t 内，称 $F_{\text{TCP}} = (\sum_{i=1}^N T_i) / (\sum_{j=1}^K T_j)$ 为 TCP 友好因子，其中， T_i 和 T_j 分别为第 i 个采用其他拥塞控制算法的数据流和第 j 个采用 TCP 的数据流的平均吞吐量。

3 拥塞控制建模及求解

3.1 系统结构及视频质量评估方法

视频传输系统的结构如图 1 所示。

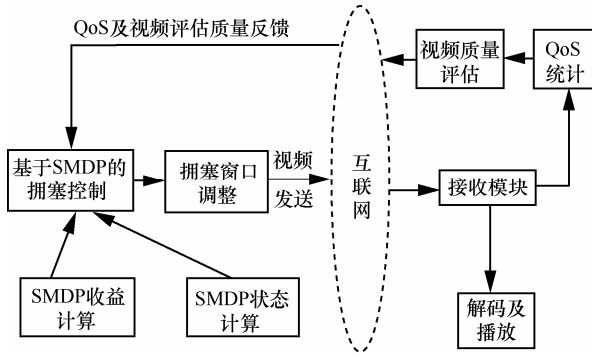


图 1 视频传输系统结构

基于接收端视频评估质量的反馈，视频发送端采用 SMDP 对拥塞控制过程建模。结合状态和收益计算，通过对模型的求解得到拥塞控制参数的调整策略，进而控制视频帧的发送速率，以确保数据的平稳传输。接收模块完成视频帧的缓冲与排序，然后进行解码及播放操作。QoS 统计模块完成对分组丢失率、时延及其抖动等网络服务质量参数的统计。在此基础上，视频质量评估模块对视频质量进行评估并反馈给发送端。

考虑到目前基于 PSNR 的评估方法并不适合对视频质量进行实时评估，通过对大量的实验结果进行研究，发现视频失真与发送速率的关系可用对数函数的形式进行描述^[13]，而与分组丢失率、时延等参数成反比例关系。在此基础上，进一步考虑时域复杂度、时延抖动等对视频传输的影响，提出以下无参考视频质量评估方法。

$$Vq = \frac{\sigma(C_1 + C_2 / D + C_3 \ln S_v)}{1 + C_4 P_{\text{loss}} + C_5 J^2} \quad (1)$$

其中， D 、 S_v 、 P_{loss} 、 J 分别为时延、视频发送速率、分组丢失率及时延抖动， Vq 为视频质量。 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 为常数，其值在实验中采用基于线性回归的方法求得^[14]。 σ 为视频的时域复杂度^[15]，表示为 $\sigma = Qp(aR + b)$ ，其中， Qp 与 R 分别为量化参数和码率。

从式(1)可知，与传统的基于 PSNR 的方法相比，上述视频质量评估方法计算量较小，无需原始视频序列，便于在线计算。此外，该方法考虑了视频的时域复杂度，避免了目前典型的无参考视频质量评估方法中复杂的视觉敏感度及失真分析，其有效性也在仿真实验中得到了验证。

3.2 视频失真的计算

拥塞控制算法在确保 TCP 友好性的同时，以优

化接收端解码后视频的质量为目标。考虑到网络 QoS 对视频传输的影响，各 GOP 传输后失真的期望值可表示为

$$U_{\text{distortion}} = A\omega \sum_{i=1}^{G_{\text{len}}} (I(\text{Intv}(i, i-1) > \psi) + I(J_{i, i-1} > \theta)) \quad (2)$$

其中， $I(\cdot)$ 为指示函数，即 (\cdot) 中的表达式为真时函数值为 1，否则为 0。 G_{len} 为一个 GOP 中的帧数， $A \in [0, 1]$ ，表示接收端视频的失真率，由式(3)计算。

$$A = 1 / (1 + ae^{Vq}) \quad (3)$$

其中， a 为常数， e 为自然对数的底数。在采用拥塞窗口调整策略 $\xi(f(Q_{\text{rec}}), g(Q_{\text{rec}}))$ 的情况下，视频序列的平均失真可表示为

$$E_{\text{distortion}}(\xi(f(Q_{\text{rec}}), g(Q_{\text{rec}}))) = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L A_j \omega_j \sum_{i=1}^{G_{\text{len}}} (I(\text{Intv}(i, i-1) > \psi) + I(J_{i, i-1} > \theta)) \quad (4)$$

其中， L 为视频序列所包含的 GOP 的数量。

3.3 拥塞控制建模

在式(3)与式(4)的基础上，采用 SMDP 对拥塞控制过程建模。SMDP 的优点在于：1) SMDP 具有非时齐性质，即每步可选执行的执行时间不一定相同，进入下个状态的时间间隔也并不一致，这更符合实际的数据传输过程；2) 由于每个状态的持续时间并不局限于服从指数分布，SMDP 能根据视频质量反馈合理地调整拥塞控制参数，获得更优的视频传输质量。

SMDPCC 算法在每一个 GOP 开始传输时调整拥塞控制参数，直到此 GOP 所有数据传输结束。相应的拥塞控制参数调整表示为

$$\begin{cases} cwnd = cwnd + f(Q_{\text{rec}}) \\ \omega = \omega + g(Q_{\text{rec}}) \end{cases} \quad (5)$$

其中， $cwnd$ 为拥塞窗口， ω 为慢启动阈值。 $f(Q_{\text{rec}})$ 、 $g(Q_{\text{rec}})$ 分别为前后 2 个 GOP 所对应的拥塞控制参数的差值。 Q_{rec} 为解码后视频的质量，即

$$Q_{\text{rec}} = \begin{cases} 1, & Vq > \eta \\ 0, & Vq \leq \eta \end{cases} \quad (6)$$

其中， η 为常量。此外，为便于衡量各 GOP 在接收端的完整程度，定义 ρ_i 为第 i 个 GOP 在接收端的可解码度，即 $\rho_i = \{\omega - P_{\text{loss}}, \psi - \text{Intv}(i, i-1), \theta - J_{i, i-1}\}$ ，且 $i = 1, 2, \dots, L$ 。

基于以上分析，以拥塞控制参数 $(cwnd, \omega)$ 为对

象，以最小化视频失真为目标，以时长 $t = G_{\text{len}} / v$ 对视频帧的传输过程进行离散化。考虑各状态的集合、状态间的转移概率、动作集以及各个决策点之间的转移时间和收益，得到以五元组 M 表示的 SMDP 模型 $M = (S, A, P(s_i, s_j), F_j(s_i, a_i), R(s_i, a_i))$ 。

1) 状态集 S 。 S 由系统所有可能的状态构成，对于每一个状态 $s_i = \{Q_{\text{rec},i}, \rho_i, \text{BoR}_i\} \in S$ ， $i = 1, 2, \dots, n$ 。 BoR_i 为带宽占有率，表示为

$$\text{BoR}_i = \frac{R_i}{Bw_{i-1}} \quad (7)$$

其中， Bw_i 是 t_i 时刻的带宽，由式(8)递推而得。

$$Bw_i = \frac{\delta_i R T T_i Bw_{i-1} + L_i}{\delta_i R T T_i + (t_i - t_{i-1})} \quad (8)$$

R_i 为第 i 个时间段内视频数据的发送速率， t_i 为第 i 个 ACK 到达的时间， L_i 与 $R T T_i$ 分别为第 i 个数据分组的大小和往返时间， δ_i 为调整因子，用来控制观测时间。

2) 动作集 A 。 $a_i = \{f(Q_{\text{rec},i}), g(Q_{\text{rec},i})\} \in A$ ，相应的调整策略可表示为 $\xi_i(f(Q_{\text{rec},i}), g(Q_{\text{rec},i}))$ 。

3) 状态转移概率 $P(s_j | s_i, a_i)$ 。表示系统处于状态 s_i 、执行动作 a_i 时转移到状态 s_j 的概率，即

$$P(s_j | s_i, a_i) = P((Q_{\text{rec},j}, \rho_j, \text{BoR}_j) | (Q_{\text{rec},i}, \rho_i, \text{BoR}_i), a_i)$$

事实上，在实际的视频传输过程中，状态中各元素的转换概率是互相独立的^[16]，故有

$$P(s_j | s_i, a_i) = P(Q_{\text{rec},j} | Q_{\text{rec},i}, a_i) P(\rho_j | \rho_i, a_i) P(\text{BoR}_j | \text{BoR}_i, a_i) \quad (9)$$

4) 转移时间 $F_j(s_i, a_i)$ 。 $F_j(s_i, a_i)$ 表示系统处于状态 s_i ，执行动作 a_i 时转换到状态 s_j 时所需时间，其大小受到编码码率、可用带宽、视频帧的大小等因素的影响，具体为 $F_j(s_i, a_i) = vb / R$ ，其中， b 为视频帧的大小。

5) 收益 $R(s_i, a_i)$ 。基于系统状态及相应的动作，可得到收益 $R(s_i, a_i)$ 为

$$R(s_i, a_i) = 1 / E_{\text{distortion}}(\xi_i(f(Q_{\text{rec},i}), g(Q_{\text{rec},i}))) \quad (10)$$

本质上， SMDPCC 算法通过在每个决策点选择相应的拥塞控制参数调整策略，使接收端解码后视频的平均失真最小化。此外，由式(9)、式(10)可知，给定当前网络服务质量及接收端反馈的 Vq ，可

计算出 $R(s_i, a_i)$ 的值。最后， SMDP 的值函数如下。

$$V^\pi(S) = R(s_i, a_i) + \gamma \sum_{s_j \in S} P^{\pi(s_i)}(s_i, s_j) V^\pi(s_j) \quad (11)$$

其中， γ 为折扣因子， π 为策略。事实上，式(11)是一个迭代过程，其最终求解出的策略可表示为

$$\pi'(S) = \arg \max(R(s_i, a_i) + \gamma \sum_{s_j \in S} P^{a_i}(s_i, s_j) V(s_j)) \quad (12)$$

3.4 算法描述

对于 SMDP，一般采用基于动态规划的方法进行求解。对此，为提高算法的实时性，改进文献[4]中的基于在线学习的求解算法，定义按式(13)进行更新的状态-值函数 $G(a_i, s_i)$ ，为

$$G(a_{i-1}, s_{i-1}) = \kappa_i G(a_{i-1}, s_{i-1}) + (1 - \kappa_i)(U_{\text{distortion}} + \gamma G(a_i, s_i)) \quad (13)$$

其中， κ_i 为学习速度因子，取值为 $1/i$ 。

最后，得到 SMDPCC 算法的描述如下：

1) 初始化 $G(a_i, s_i) = 0$ ， $i = 1$ ；

2) 初始化 A ， S ， $U_{\text{distortion}} = 0$ 及 $G(a_i, s_i) = 0$ ；

3) 执行 $S^{\text{prev}} = S$ ， $A^{\text{prev}} = A$ ，从接收端获得新的状态值后，按式(13)计算 $G(a_{i-1}, s_{i-1})$ 并按式 $a_i = \arg \max G(a_i, s_i)$ 计算 a_i 的值，再计算

$$G(A^{\text{prev}}, S^{\text{prev}}) = \kappa_i G(A^{\text{prev}}, S^{\text{prev}}) + (1 - \kappa_i)(U_{\text{distortion}} + \gamma G(A, S)) \quad (14)$$

4) 根据步骤 3) 中计算出的动作 a_i ，按式(5)调整拥塞控制参数 $cwnd$ 和 ω ，发送视频数据，并根据式(2)、式(3)调整 $U_{\text{distortion}}$ 的值，最后执行 $i = i + 1$ ；

5) 判断视频数据是否发送完毕，如所有 GOP 发送完毕，则转向步骤 6)，否则转向步骤 3)；

6) 结束。

4 仿真实验结果及分析

由于在实际的网络中难以精确而又重复地实现不同 QoS 的网络传输环境，为验证 SMDPCC 算法的性能，在网络仿真软件 OPNET Modeler 14.5 中建立了视频传输仿真系统。其拓扑结构采用典型的哑铃状结构，如图 2 所示。在相同的网络环境下将本文的算法和 TCP reno 及文献[3]中的拥塞控制算法 MTCC 进行对比。测试的视频序列采用 BUS 等 7 个视频序列，CIF 格式(352×288)。编解码器采

用 JM 18.4, 码率初始值为 256 kbit/s, 编码结构为 IBBPBBP, 编码帧率为 25 帧/s, GOP 大小为 16。在 OPNET 环境下使用 C 语言实现 SMDPCC 算法。节点 1 运行 SMDPCC 算法发送视频帧至节点 8, 节点 2 运行 MTCC 算法发送视频帧至节点 7, 节点 3、4 分别生成 4 个速率范围为 1.5~3 Mbit/s 的 TCP 连接分别向节点 5、6、7、8 发送数据分组, 以模拟流量大小可控的背景数据流。网络传输时延设为 40 ms。路由器 Router1 与 Router 2 中采用随机早期检测 (RED, random early detection) 队列管理算法。在接收端分别采用 BVQM 和 PSNR_VFD 计算解码后视频的主观质量和 PSNR。

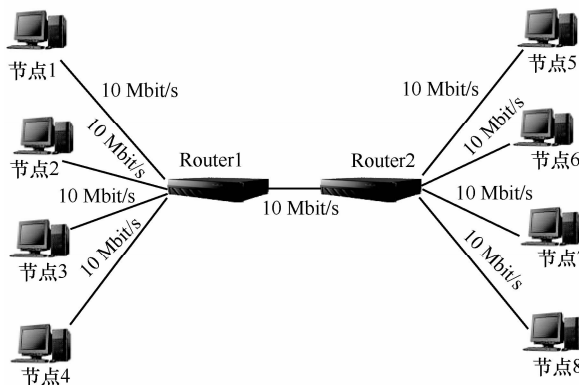
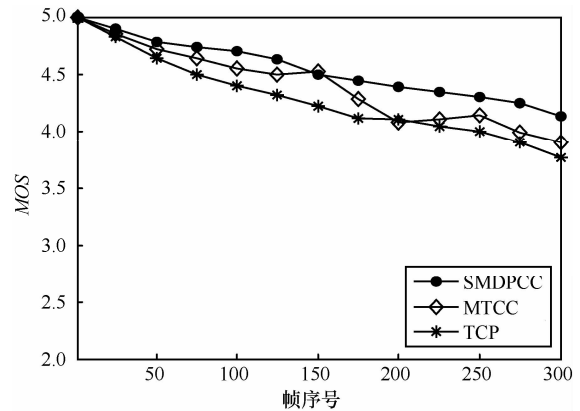


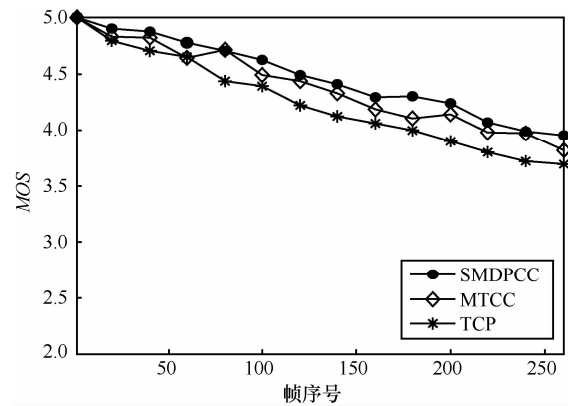
图 2 视频传输仿真系统的拓扑结构

设置视频帧的解码期限 $\psi = 400$ ms, 折扣因子 γ 取 0.1, 以加快算法的收敛速度^[17]。其他相关参数由实验得出, 分别为 $\theta = 0.2$ s, $\bar{\omega} = 0.12$, $C_1 = 2.3$, $C_2 = 4$, $C_3 = 2.7$, $C_4 = 3.1$, $C_5 = 4.2$ 。将 BVQM 中得到视频主观质量 VQM 转换为 MOS 值, 转换方法为^[18]: $MOS = 5 - 4VQM$ 。为提高不同拥塞控制算法性能比较的准确性, 接收端不采用任何错误掩盖算法。

图 3 显示了相同的网络传输环境下, 使用 3 种不同的拥塞控制算法传输画面运动较为平缓的视频序列“CONTAINER”与运动较为剧烈的视频序列“FOOTBALL”时, 解码后视频帧对应的 MOS 值。可以看出, 采用 SMDPCC 算法时, 解码后视频帧的 MOS 值更大, 表明 SMDPCC 算法有效地保证了解码视频的主观质量, 具备更好的用户体验。这是因为 SMDPCC 算法以最小化视频失真为目标, 优化了拥塞控制参数的选取, 从而在与其他拥塞控制算法共存的网络环境下, 提供了更好的视频传输服务。



(a) CONTAINER 序列



(b) FOOTBALL 序列

图 3 采用不同算法时对应帧的 MOS 值

图 4 为视频帧的解码期限 $\psi \in (50$ ms, 400 ms) 时, 接收端视频帧完好率的对比。可见, SMDPCC 算法的帧完好率优于其他 2 种算法, 表明 SMDPCC 算法能充分考虑到分组丢失、抖动容忍度及解码期限等对视频失真的影响, 在 QoS 动态变化的网络环境下顽健性更强。图 5 为各 RTT 对应的拥塞窗口大小。从图 5 可知, SMDPCC 算法的 $cwnd$ 变化较为平缓, 且 $cwnd$ 的平均值显著高于其他 2 种算法。这表明该算法不但使视频数据的传输更平稳, 而且有效提高了带宽利用率。图 6 为播放时延对应的 PSNR 平均值。不难看出, SMDPCC 算法的曲线更加平滑, 表明随着播放时延的提高, 视频客观质量也稳步提升。图 7 与图 8 为发送端的发送速率对比。可以看出, SMDPCC 算法的发送速率优于其他 2 种算法。事实上, 发送速率也代表了该数据流的吞吐量。由此可见, 同样的网络传输环境下, SMDPCC 算法可获得更好的吞吐量, 进一步保证了接收端解码后视频的质量。

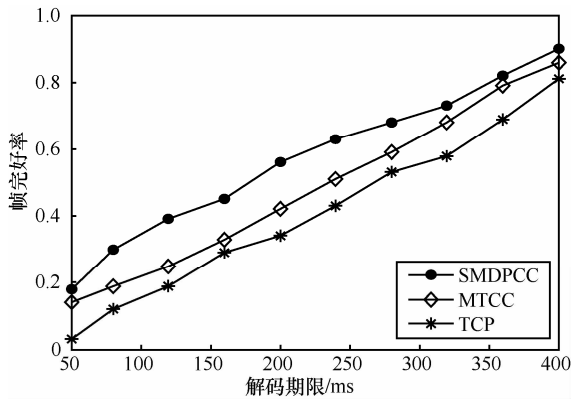


图 4 各算法的帧完好率

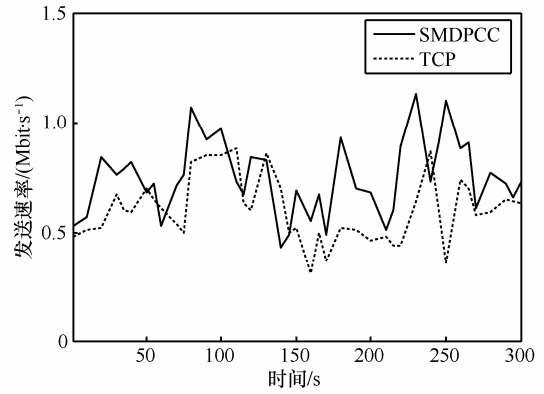


图 8 SMDPCC 与 TCP 算法发送速率对比

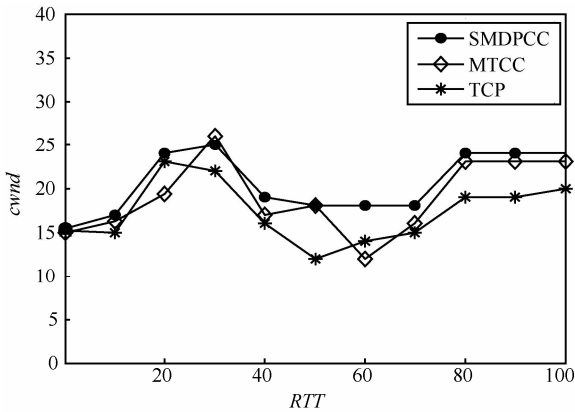


图 5 RTT 对应的拥塞窗口大小

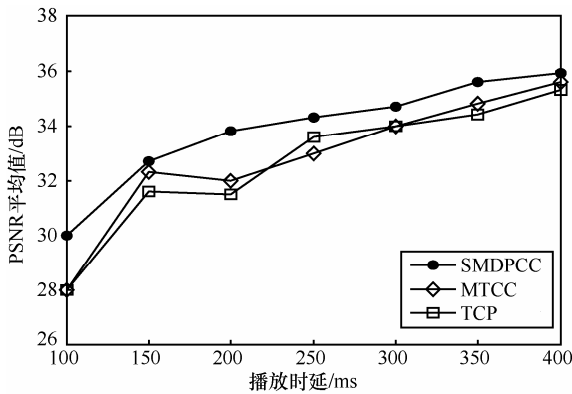


图 6 播放时延对应的 PSNR 平均值

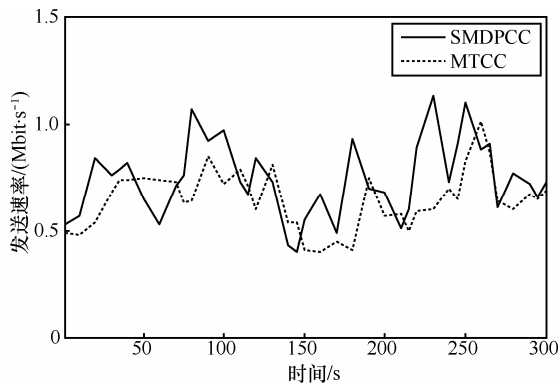


图 7 SMDPCC 与 MTCC 算法发送速率对比

图 9 为视频序列 CONTAINER 的第 100 帧 (241 kbit/s)和 FOOTBALL 的第 70 帧(292 kbit/s)解码后的主观质量。这些帧的运动信息较多，纹理结构复杂，比较有代表性。可见，SMDPCC 算法对视频图像中快速运动区域（手臂、腿部等）及纹理、边缘等细节信息保留得较为完整，清晰度较高，表明该算法由于在拥塞控制中考虑到了视频序列的解码期限与分组丢失容忍度，可完整解码的帧更多，从而获得了更好的视频质量，这也与图 6~图 8 中的实验结果是一致的。

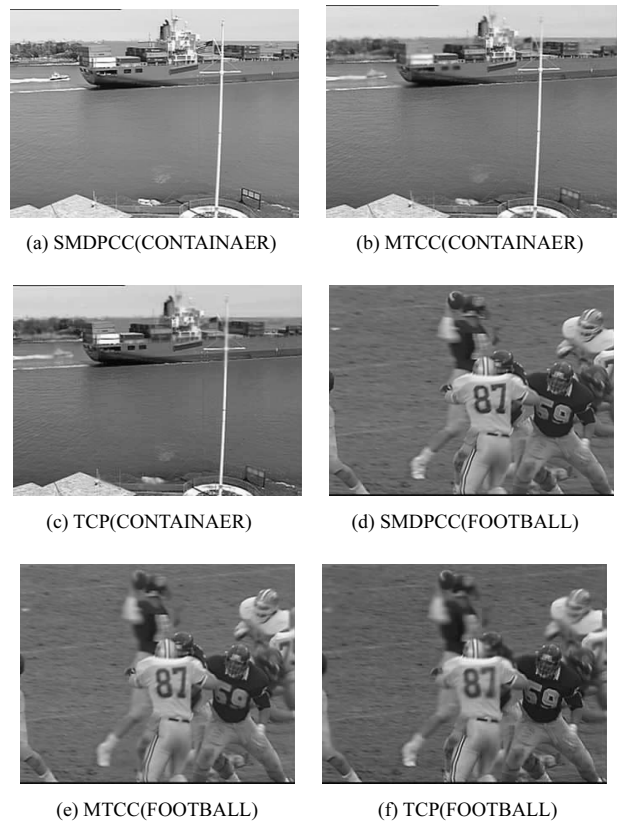


图 9 不同算法的视频主观质量对比

表 1 和表 2 分别为各算法在相同的网络传输环境下分别传输不同视频序列 5 次时,得到的 MOS 平均值和 PSNR 平均值。可以看出,采用 SMDPCC 算法时,视频序列的 MOS 平均值比 MTCC 算法提高了 0.129,比 TCP 提高了 0.312,PSNR 平均值较 MTCC 算法提高了 0.483 3 dB,较 TCP 提高了 1.049 dB。表 3 显示了 SMDPCC 与 MTCC 算法在传输不同视频序列时的 TCP 友好因子,不难看出,与 MTCC 相比,SMDPCC 算法的具有更好的 TCP 友好性。

表 1 各算法对应的视频序列 MOS 平均值

视频序列	SMDPCC	MTCC	TCP
BUS	4.582	4.471	4.398
AKIYO	4.551	4.429	4.375
CONTAINER	4.542	4.410	4.293
FOREMAN	4.527	4.387	4.316
SALESMAN	4.513	4.409	4.261
CARPHONE	4.477	4.321	3.894
FOOTBALL	4.463	4.327	3.933
平均值	4.522	4.393	4.210

表 2 各算法对应的视频序列 PSNR 平均值/dB

视频序列	SMDPCC	MTCC	TCP
BUS	35.134 9	35.039 1	34.284 4
AKIYO	34.941 6	34.483 4	33.405 5
CONTAINER	33.781 9	33.549 2	32.573 8
FOREMAN	34.498 1	34.536 1	33.872 9
SALESMAN	33.762 2	32.7128	32.419 4
CARPHONE	34.439 0	33.461 9	33.321 1
FOOTBALL	34.291 2	33.683 1	33.628 6
平均值	34.407 0	33.923 7	33.358 0

表 3 不同算法的 TCP 友好因子平均值

视频序列	SMDPCC	MTCC
BUS	2.31	2.43
AKIYO	2.26	2.49
CONTAINER	2.29	2.41
FOREMAN	2.14	2.47
SALESMAN	2.19	2.51
CARPHONE	2.07	2.48
FOOTBALL	1.97	2.32
平均值	2.18	2.44

5 结束语

本文在分析目前拥塞控制算法优缺点的基础上,提出了一种基于半马尔科夫决策过程的视频传输拥塞控制算法。首先,设计了一种实时性较强的无参考视频质量评估方法。然后根据接收端视频质量反馈,将拥塞控制视为具备马尔科夫性质的离散过程,以最小化视频平均失真为目标,采用半马尔科夫决策过程对拥塞控制过程建模,进而求解出拥塞控制参数的调整策略,保证了视频数据的可靠传输。OPNET Modeler 中的仿真实验结果表明,与目前典型的拥塞控制算法相比,该算法不但是 TCP 友好的,而且有效地提升了解码后视频的主观与客观质量。在本文研究的基础上,考虑到移动智能终端的普及与网络异构性的增强,下一步的研究为在无线多跳网络的环境下,针对可分级视频编码的特点完善相应的拥塞控制算法,以提高可分级视频编码传输的可靠性。

参考文献:

- [1] YOUNG H J, YOONSIK C. Resource-aware and quality-fair video-streaming using multiple adaptive TCP connections[J]. Computers and Electrical Engineering, 2010, 36(2):702-716.
- [2] KYUNG H K, KWANG M J, CHUL H K, *et al.* A transmission control SCTP for real-time multimedia streaming[J]. Computer Networks, 2010, 54(4):1418-1425.
- [3] HSIEN P S, MIHAELA V D S. A quality-centric TCP-friendly congestion control for multimedia transmission[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2012, 14(3):896-905.
- [4] OUSSAMA H, HSIEN P S, MIHAELA V D S, *et al.* Online learning based congestion control for adaptive multimedia transmission[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(6):1460-1468.
- [5] EMMANUEL J, MARTIN F, GHANBARI M. Fuzzy-logic congestion control of transcoded video streaming without packet loss feedback[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18(3):387-393.
- [6] EMMANUEL A J, MARTIN F, CHRISTIAN W, *et al.* Interval type-2 fuzzy logic congestion control for video streaming across IP networks[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2009,17(5):1123-1138.
- [7] JENG C V C, FU C C, MICHAEL J T, *et al.* Improving network congestion: a RED-based fuzzy PID approach[J]. Computer Standards and Interfaces, 2012, 34(5):426-438.
- [8] JOY R, SAJEEB S, SYED F H. A new congestion control algorithm for datagram congestion control protocol (DCCP) based real-time multimedia applications[A]. 7th International Conference on Electrical and Computer Engineering[C]. Dhaka, Bangladesh, 2012. 533-536
- [9] FU F W, MIHAELA V D S. Structural solutions for dynamic scheduling in wireless multimedia transmission[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(5):727-737.

- [10] ZHOU C, HE J W, CHEN Q W. A robust active queue management scheme for network congestion control[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2013, 39(1):285-293.
- [11] AYRACHENKOV K, AYESTA U, DONCEL J, *et al.* Congestion control of TCP flows in Internet routers by means of index policy[J]. *Computer Networks*, 2013, 57(17):3463-3478.
- [12] 秦晓芳, 杨大成, 张欣. 新的基于 SR-SW-HARQ 的低时延视频传输方案[J]. *通信学报*, 2009, 30(1):19-24.
QIN X F, YANG D C, ZHANG X. Novel low-delay video transmission scheme based on SR-SW-HARQ[J]. *Journal on Communications*, 2009, 30(1):19-24.
- [13] WANG B, JIM K, PRASHANT S, *et al.* Multimedia streaming via TCP: an analytic performance study[J]. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, 2008, 4(2): 1602- 1621.
- [14] CAI L, SHEN X M, PAN J P, *et al.* Performance analysis of TCP-friendly AIMD algorithm for multimedia applications[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2005, 7(2):339-355.
- [15] 刘河潮, 常义林, 元辉. 一种网络分组丢失的无参考视频质量评估方法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(2):37-43.
LIU H C, CHANG Y L, YUAN H, *et al.* No-reference video quality assessment over IP network based on packet loss[J]. *Journal of Xi Dian University*, 2012, 39(2):37-43.
- [16] ZHU L, YU F R, NING B, *et al.* Cross-layer design for video transmissions in metro passenger information systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(3):1171-1181.
- [17] MICHELE C W, LI C, JASLEEN K, *et al.* Generalized stochastic performance models for loss-based congestion control[J]. *Computer Communications*, 2010, 33(4):513-525.
- [18] MARGARET H P, STEPHEN W. An objective method for combining multiple subjective data sets[A]. *SPIE Visual Communications and*

Image Processing Conference[C]. Lugarno, Switzerland, 2003. 583-587.

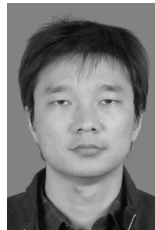
作者简介:



田波 (1978-), 男, 湖南怀化人, 广东工业大学博士生、讲师, 主要研究方向为视频编码及传输、机器视觉。



杨宜民 (1945-), 男, 广东普宁人, 广东工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为机器视觉与模式识别、智能控制技术。



蔡述庭 (1979-), 男, 湖南益阳人, 广东工业大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为分布式视频编码及传输、机器视觉。