

支持变速率视频流传输的重协商优化算法

张晓瑜, 钟玉琢, 杨 品

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘 要: 针对变速率视频流在多个时间尺度上突发的性质, 本文提出了基于多级整形和多时间尺度带宽分配与准入的重协商优化算法. 算法通过视频源与边缘网关的重协商过程, 对进入网络的数据流进行包络, 提高数据流的控制性和预测性, 从而减少突发对网络所造成的破坏; 并且对中小规模的数据流复合的情况, 可以取得接近 VBR 流的复用增益.

关键词: 多时间尺度; 流量控制; 重协商

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2003) 05-0683-04

The Optimized Algorithm Characterizing Renegotiation for VBR Video Flows

ZHANG Xiao-yu; ZHONG Yu-zhuo; YANG Pin

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Aiming at the devastating multiple-time-scale burstiness of VBR (Variable Bit Rate) video flows, an optimized algorithm characterizing renegotiation which is based on multilevel regulator and multiple-time-scale bandwidth allocation and flow admission is presented. Through the renegotiation between video source and edge node of the network, video flows are properly enveloped before entering the network. The proposed algorithm enhances the capability of control and prediction on video flows, which significantly attenuates the impact caused by burstiness on network. For small and moderate aggregated flows, it could attain a multiplexing gain approximating the gain of unrestricted VBR flows.

Key words: multiple time scale; flow control; renegotiation

1 引言

在现今日益丰富的网络业务中, 变速率 (VBR-Variable Bit Rate) 视频流传输占据着越来越重要的地位. 变速率视频流是具有稳定视频质量的数据流, 它的一个显著特点是: 在多个时间尺度上, 即从毫秒级到秒级, 再到分级, 都会表现出速率的突发性^[1,2,3]. 视频流的这一特性对网络的最大影响是: 长时的突发性数据会占据大量的传送缓存空间, 导致大量的数据丢失, 甚至造成网络拥塞.

为避免视频流的突发性影响, 对进入网络的视频流根据网络资源的使用状况进行流量控制^[4,5]. 流量控制不仅可以达到对网络资源合理的利用和分配, 而且保证已有数据流的协定服务质量. 90年代初就已提出如图1所示的基于数据流的流量控制模型^[6].

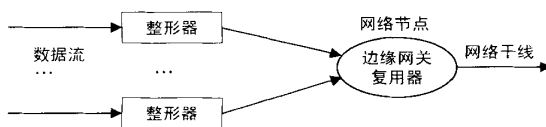


图1 整形后的数据流经过边缘网络节点进入网络

整形器实际上是对具有某种特征的数据流进行包络. 令牌漏桶 (,) 是较早提出的模型, 它要求数据流量 $A(t) < C \cdot t + B$. 这一模型适用于短相关模型, 但是对多时间尺度相关的数据流如视频流则偏差较大^[7]. 在这种情况下, 它要求增大带宽来适应视频流的长时突发性, 以保证低延迟和低丢失率. 但是这会耗费过多的带宽, 降低资源的利用率. E Knightly 等人提出了包含 n 对 (,) 漏桶的 (,) 模型 (可以看作是 n 个漏桶的级联), 该模型可以以凸函数的形式包络多时间尺度的数据流^[8]. 在此基础上, 进而提出了一个通用的确定性模型, 称 D-BIND (Deterministic Bounding Interval Dependent). D-BIND 采用一族速率—区间模型 $\{R_i, T_i\}_{i=1}^n$ 来描述数据特征, 其中 R_i 为在时间区间 T_i 的速率上限^[9].

以 D-BIND 作为整形器, H Zhang 和 E Knightly 提出了支持延迟敏感的 VBR 视频的重协商算法—RED-VBR 算法^[10]. 该算法的在线部分是通过阈值来检测速率变化, 从而进行重协商, 资源的利用率与阈值设置相关, 适应性较差. 此外, 准入算法是基于中心极限定理, 定理的满足条件是大量的流复合并且复合流的边缘分布满足正态分布, 不适用于非正态边缘分布的复合流 (少量或中等规模的复合流). 本文针对这两点, 并

收稿日期: 2002-03-04; 修回日期: 2002-12-28

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60273008); 973 项目 (No. G1999032704)

结合重协商恒速率(RCBR)算法^[1]中准入算法的优点,提出了支持变速率视频流传输的重协商优化算法.算法的优化性在于:(1)可以自适应地跟随视频流的多时间尺度(影响显著的时间尺度)的变化;(2)基于 Chernoff 估计,可以贴近数据流的边缘分布特性;从而算法在保证视频流的服务质量的同时,可以取得接近 VBR 流的复用增益.

本文其余部分组织如下:下一节具体讲述算法实现,第三节是算法的实验评价,最后作出结论.

2 支持变速率视频流传输的重协商优化算法

重协商算法的要点是何时重协商,以及协商时应申请或分配的资源.一般来说,当视频内容发生变化时,视频数据流的长时均速率也发生变化,此时应进行重协商.重协商的时间间隔为几秒以上,相对于数据流而言,由重协商带来的额外负载所造成的网络开销比较小.重协商时,源向网络申请需要的带宽,若网络允许,则重新分配带宽;若网络不允许,则源应调整参数,使发送速率限制在原来分配的带宽之内.后一种情况称重协商失败.新的数据流进入网络的基准是:保证所有已准入的数据流的重协商失败概率低于一个阈值.

重协商算法实际是对 VBR 视频流分段包络,网络预留协商后包络的带宽,但它不是绝对的资源预留,而是多个包络的 VBR 流统计复用,从而得到带宽复用增益.包络后的增益会小于完全的 VBR 流复用,但是其收益是保证了流的服务质量.

2.1 视频流模型

视频流的两个显著特点是:多时间尺度的变化性和边缘分布的副指数分布性(具体表现为视频流有很强的低频分量)^[3].视频流的这两个特性可以用 SRP(space-time renewal process)模型来描述:SRP 模型将视频流场景聚类,形成一个马尔可夫链的四个状态空间 $\{S, M, L, XL\}$,分别表示由低至高的四种水平的均速率.每个状态空间的持续时间满足副指数分布.当处于任一状态时,用一个独立的随机过程描述短时间的变化,即每个场景的速率变化, $X(i) = \{X_i(i), t = 0\}$, $i \in \{S, M, L, XL\}$.图 2 表示了 SRP 模型的一个样本.各状态的水平均速率的选取可以从已有视频流中抽取的统计值.

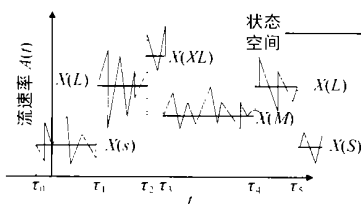


图 2 多时间尺度的视频流模型

在以往的研究中,数据流模型采用单一时间尺度的短相关模型,一个简单的令牌漏桶就可以对数据流进行包络.但是视频流对网络冲击的关键在于它的多时间尺度的突发性.因此,在设计整形算法和准入算法时,采用具有典型视频流特性的 SRP 模型.

2.2 支持变速率视频流的重协商优化算法

根据 SRP 模型,可以对视频流进行二个层次的整形包络.第一个层次是短时间的数据包络,这里直接采用一个二级令牌漏桶整形器.它不仅可以描述短时场景内容的突发性,也可以描述由于编码算法引起的帧与帧之间的数据量波动.第二

个层次反映视频流所处的状态,它是协商所限制的进入网络的长时均速率水平.

2.2.1 多级整形算法

针对视频流数据,整形器应具备可以包络多时间尺度数据流的功能.图 3 表示的是一个二级令牌漏桶整形器,它要求 $\rho_1 < \rho_2, \rho_1 > \rho_2$,其中 ρ_1 表示令牌速率, ρ_2 表示漏桶容量.当 $\rho_2 t + \rho_2 < \rho_1 t + \rho_1$ 时,起作用的是第二级漏桶,即数据流 $A(t) \leq \rho_2 t + \rho_2$;反之,当 $\rho_1 t + \rho_1 < \rho_2 t + \rho_2$ 时,起作用的是第一级漏桶, $A(t) \leq \rho_1 t + \rho_1$.包络曲线如图 4 所示.由此可见,第二级漏桶限制了短时的突发数据,第一级漏桶限制长时数据.若级联了多个漏桶,则在多个时间尺度上包络数据流^[6].

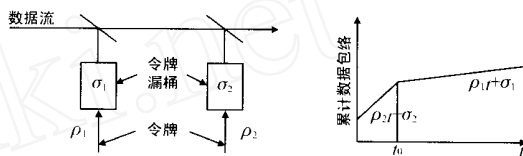


图 3 二级令牌漏桶整形器 图 4 二级令牌漏桶模型包络曲线

2.2.2 重协商优化算法

图 5 是重协商优化算法的基本框架.数据流在进入网络前首先被一个二级令牌漏桶整形,整形器的初始参数 (ρ_1, ρ_2) 、 (ρ_2, ρ_2) 由源与网络协商决定.模型如图 3 所示.进入整形器的数据被一个检测模块采样并计算此窗口内的数据包络曲线,由于视频流的长相关性(包络曲线变化缓慢),可以用当前窗口的包络曲线预测下一个窗口的包络曲线,以此向网络重协商所需的带宽.窗口大小为 3 个 GOP(Group of Pictures 图组),每个 GOP 又构成一个子窗口.二级令牌漏桶实际是对子窗口进行包络整形.每个窗口的长时速率均值用于计算数据流所处的状态 $Level, Level \in \{S, M, L, XL\}$.当重协商优化算法进入稳定阶段时,是对视频数据流分段包络,见图 2.重协商时带宽资源申请算法见表 1.

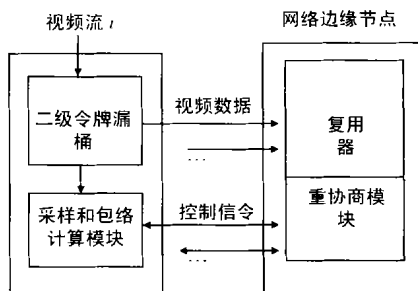


图 5 重协商优化算法框架

重协商的最短间隔(=检测窗口)是 3 组 GOP(Group of Pictures),间隔时间在秒级以上.选择的间隔越长,抖动越小,但算法对数据流变化的灵敏性就越差,另外由于采用的是包络算法,冗余的带宽也越多.在抖动性、灵敏性和带宽使用率这三个条件的权衡下,选择间隔的大小为 3 组 GOP.参数 $(\rho_2 > \rho_1)$ 用于调节预留资源的占有程度,使预留资源略大于计算值,以避免数据流的瞬时突发性.整形器的参数根据当前及过去的流量状况计算求得.

表 1 重协商时带宽资源申请算法

```

for (k=0; k < Video_end; k++)
{
    计算连续 3 组 GOP 时间内的二级令牌漏桶参数 f(i, j), i=1,2, j=1,2,3;
    (i, j)_max = { max_{j=1,2,3} { f_1 }, max_{j=1,2,3} { f_2 }, max_{j=1,2,3} { f_3 } };
    if ((i, j)_max > oldMax) {
        oldMax = (i, j)_max;
        Re negotiate ((i, j)_max * x);
    }
    计算 3 组 GOP 总和时间内多级令牌漏桶的第一对参数 (o, o);
    Level = i | min_{j=1,2,3} { f_j };
    if (Level < oldLevel) {
        report ((o, o));
        oldMax = (i, j)_max;
        Re negotiate ((i, j)_max * x);
        oldLevel = Level;
    }
    else if (Level > oldLevel) {
        report ((o, o));
        oldLevel = Level;
    }
}

```

2.3 准入算法

准入条件是保证所有准入的数据流的重协商失败概率低于一个阈值. 设申请的总带宽为 $R, R = \sum_{j=1}^n R_j, j=1, 2, \dots, n$ 为总流数. 设链路带宽为 C , 视频流处于任一状态的概率为 $k, k=1, 2, 3, 4$, 分别代表 $\{S, M, L, XL\}$ 四个状态. 重协商失

败概率近似等于申请的总带宽大于链路带宽的概率, 即:

$$p = P[R > C]$$

上式可以由 Chernoff 估计来计算其上限^[11]:

$$L_e(r) = \log \sum_{k=1}^K \exp(C_k \cdot r)$$

$$L_e^*(\mu) = \max_{r>0} [\mu r - L_e(r)]$$

$$p \leq \exp(-L_e^*(C/n) \cdot n)$$

由此, 只要 $\exp(-L_e^*(C/n) \cdot n)$ 小于重协商失败概率阈值即可. k 的计算是在边缘网关处统计各个状态出现的频率. C_k 为处于各个状态时所需的有效带宽, 这里不需要是最大的包络带宽, 因为处于任一状态, 流与流之间仍有复合增益, 可以取等价带宽 (Equivalent Bandwidth). 等价带宽的取值越大, 可准入的流越少, 资源利用率会越低.

3 算法的实验评价

实验平台采用 ns2 平台^[11], 实验模型如图 1, 模块结构见图 5. 在边缘准入节点后设置一个接收节点接收所有数据. 源数据流是星球大战 MPEG1 编码电影流, 每秒 24 帧, 每帧以 200 字节打包, 在帧与帧的间隔时间内均匀发送. 各个数据流仅是起始时间不同, ns 设定运行时间为 100 分钟. 准入模块对由整形模块报告的长时均速率参数进行统计, 计算数据流所处各个状态的概率. 实验取四个状态的中心均值速率分别为 (0.024Mb/s, 0.144Mb/s, 0.36Mb/s, 0.6Mb/s).

首先比较没有经过包络限制的 VBR 流复用所需的平均每流最大带宽与包络整形器申请的平均每流最大带宽, 两者的丢失率均为 0. 接收节点对不受包络限制的 VBR 流统计所需带宽时, 取 1 秒内平均值. 包络整形器申请的带宽也在 1 秒内计算, 取申请值是计算值的 ($=1.5$) 倍. 从图 6 可见, 单一视频流时的申请带宽约为实际带宽的 1.5 倍. 当复用的数据流数目超过 4 时, 两者就十分接近, 这表示重协商的 VBR 流可以取得接近不受限制的 VBR 流的复用增益.

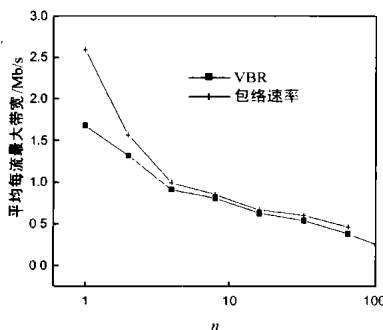


图 6 不受包络限制的 VBR 流速率与重协商 VBR 流包络速率比较. n 表示数据流数目流的重协商失败概率

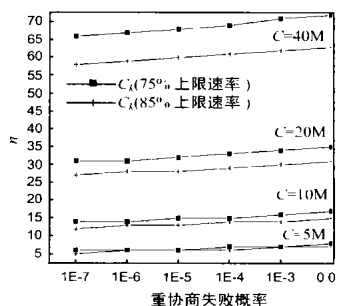


图 7 不同有效带宽下, 重协商数据流的准入控制比较. 由上至下的带宽分别是 40M, 20M, 10M, 5M

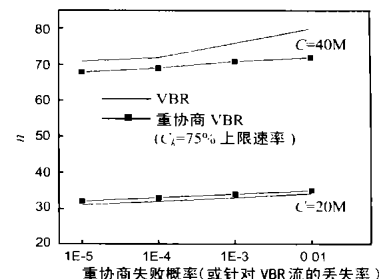


图 8 不受包络限制的 VBR 流的丢失率与重协商 VBR 流的丢失率比较

其次是在一定的复用链路带宽下, 比较取不同有效带宽 C_k 在不同失败概率下准入的数据流数目, 见图 7. 其中, 75% (85%) 上限速率表示所取的等价速率为各个状态上限速率的 75%

(85%). 在带宽为 5M 和 10M 时, 二者非常接近; 在 20M 和 40M 带宽时, 以 75% 上限速率准入的流数目高于以 85% 上限速率准入. 这是因为高带宽时, VBR 流的复用增益提高, 平均每流

所需带宽降低,以 85% 上限速率准入实际是提高平均每流的资源占用率,更好的保证流的服务质量,但是整体的带宽利用率降低,因此,小规模视频流复用时,可以采用高比率的上限速率准入;复用流数目增加时,可以相应降低有效带宽。

最后比较重协商 VBR 流 ($C_k = 75\%$ 上限速率) 失败概率与不受包络限制的 VBR 流丢失率,如图 8 所示。在 20M 允许带宽下,两者可以相比拟。在 40M 允许带宽下,不受包络限制的 VBR 流的复用率随着丢失率阈值的扩大而提高。但是两者对数据流的服务质量影响不同。不受包络限制的 VBR 流主要在复用器处突发性丢失,丢失会影响所有准入数据流的服务质量,甚至导致质量的急剧下降;重协商数据流则将少量丢失控制在网络边缘(整形器处),同时让源保持原有的发送速率,重协商虽然失败,但仍可以使各数据流维持一个可以控制的视频质量。

4 结论

本文针对中小规模的 VBR 视频流,提出了重协商优化算法。对具有显著多时间尺度突发特性的 VBR 视频流,算法通过重协商实现了分段的 VBR 数据的流量成形,并且根据分段信息进行准入控制。实验表明复用后的重协商数据流不仅取得接近 VBR 数据流的复用增益,也同时保证视频流的协定服务质量。

参考文献:

- [1] M Grossglauser, S keshav, D Tse. RCBR: A simple and efficient service for multiple time-scale traffic [J]. IEEE/ ACM Trans, Networking, 1997, 5(6): 741 - 755.
- [2] J Beran, R Sherman, M S Taqqu, W Willinger. Long-range dependence in variable bit-rate video traffic [J]. IEEE Trans. Commun, 1995, 43(2/3/4): 1566 - 1579.
- [3] P Jelenkovic, A Lazar, N Semet. The effect of multiple time scales and subexponentiality in MEG video streams on queuing behavior [J]. IEEE JSAC, 1997, 15(6): 1052 - 1071.
- [4] L Breslau, E W Knightly, S Shenker, I Stoica, H Zhang. Endpoint admission control: architectural issues and performance [A]. ACM SIGCOMM 2000 [C]. Stockholm, 2000. 57 - 69.
- [5] C Setinkaya, V Kanodia, E W Knightly. Scalable services via egress admission control [J]. IEEE Trans, Multimedia, 2001, 3(1): 68 - 91.
- [6] A Alwalid, D Mitra, R Wentworth. A new approach for allocating buffers and bandwidth to heterogeneous, regulated traffic in an ATM node [J]. IEEE JSAC, 1995, 3(6): 1115 - 1127.
- [7] M Schwartz. Broadband Integrated Networks [M]. New Jersey: Prentice Hall, Inc. a Simon Schuster Company, 1996. 147 - 176.
- [8] D Wrege, E Knightly, H Zhang, J Liebeherr. Deterministic delay bounds for VBR video in packet-switching networks: Fundamental limits and practical tradeoffs [J]. IEEE/ ACM Trans, Networking, 1996, 4(3): 352 - 362.
- [9] E W Knightly, H Zhang. D-BIND: An accurate traffic model for providing qoS guarantees to VBR traffic [J]. IEEE/ ACM Trans, Networking, 1997, 5(2): 219 - 231.
- [10] H Zhang, E W Knightly. RED-VBR: A renegotiation-based approach to support delay-sensitive VBR video [J]. ACM Multimedia Syst. J, 1997, 5(3): 164 - 176.
- [11] UCB/LBNL/ VINT Network Simulator, ns, URL. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> [Z].

作者简介:



张晓瑜 女, 1975 年 10 月生于广东省广州市, 现为北京清华大学计算机系人机交互与媒体集成所博士生, 主要研究兴趣是: 多媒体网络与应用, 视频流化技术。

钟玉琢 男, 1938 年 5 月生于辽宁省沈阳市, 现任清华大学计算机系教授, 博士生导师, 研究方向是: 多媒体计算机技术, 多媒体数据压缩编码, 流化技术, 数字家电网络控制平台。

杨品 男, 1936 年 3 月生于四川省仪陇市, 现任清华大学计算机系教授, 研究方向是: 多媒体计算机技术, 微型计算机接口技术。