

无线视频流媒体异构接入的二维自适应流控模型研究^{*})

朱晓亮 杜旭 杨宗凯 程文青

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘要 TFRC(TCP-Friendly Rate Control)机制适用于视频流媒体 UDP 流传输的流控,它保证 UDP 流的吞吐量具备良好的 TCP 友好特征。异构用户接入也可以借助 TFRC 机制探测可用带宽,但其在无线信道中面临新的挑战。基于无线信道特征,本文提出一种无线流媒体接入二维自适应流控模型。该模型建立在丢包率(PLR, Packet Loss Ratio)、误码率(BER, Bit Error Ratio)统计的基础上,分别针对包长和帧速率进行二维调节。首先,基于 BER 统计来调整包长和发送间隔以提供稳定帧速率的流量;其次,根据 TFRC 方程,由 RTT(Round Trip Time)、RTO(Retransmission timeout)、PLR 等计算可用带宽,结合帧错误率(FER, Frame Error Ratio)作为帧速率调整指标。仿真结果验证了该模型的有效性。

关键词 无线流媒体, TCP 友好流控, 二维自适应模型, 服务质量

Research on 2D-Adaptive Rate Control Model for Streaming Media Distribution in Heterogeneous Wireless Access Environments

ZHU Xiao-Liang DU Xu YANG Zong-Kai GHENG Wen-Qing

(Dept. of Electronics & Information Eng., Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

Abstract The method of TFRC(TCP-Friendly Rate Control) adapts to rate control of video streaming transmitting by UDP stream, which can guarantee throughputs of UDP streams with well TCP-Friendly features. Furthermore, it can be adopted to detecting available bandwidth for heterogeneously accessing clients. However, this method is fraught with new challenges in wireless channels. According to features of wireless channels, this paper proposes a 2D-adaptive rate control model for streaming media distribution in heterogeneous wireless access environments. Based on statistics of PLR (packet loss ratio) and BER (Bit Error Ratio), 2D adjustment according to packet size and frame rate can be carried on. Firstly, packet size and transmission interval are regulated based on the statistics of BER to present throughputs with const frame rate. Secondly, according to TFRC equation, FER (Frame Error Ratio) and available bandwidth calculated by RTT (Round Trip Time), RTO (Retransmission timeout) and PLR estimations are adopted as indexes to regulate frame rate. Simulation results demonstrate effectiveness of proposed schemes.

Keywords Wireless streaming media, TFRC, 2D-Adaptive Model, QoS

1 引言

无线接入网络的研究进展已经为无线流媒体业务的引入铺平了道路。然而,无线流媒体传输必须面对解决异构带宽和高传输误码率、时变等问题的挑战^[1]。尤其是在无线信道上,信号常由于诸如外界冲击噪声和互调噪声等噪声干扰而损伤,造成信道误码率较高且随机变化^[2]。通常,光纤导向媒体的误码率小于 10^{-10} ,而无线电非导向媒体的误码率可达 10^{-3} ~ 10^{-4} ^[2]。因此,提供适合用户 QoS 要求的流速是无线流媒体接入流控一个关键问题。另外,由于流媒体业务的实时性要求,它一般采用 UDP 组包传输,而且具有高带宽需求,因此视频流媒体业务应用是网络的“杀手”^[1],传统网络 TCP 流量占统治地位的情况将发生逆转。众所周知,UDP 流量本身不具备流控能力,因此实现无线接入时,其与 TCP 流量的公平竞争将是无线流媒体接入流控的另一个关键问题。

目前,众多的学者针对以上问题提出了相应的解决方案,并已取得一些成果。其中, Sally Floyd 研究了实现 UDP 流的 TCP 友好性的 TFRC 机制^[3],但是在无线应用下面临新的挑战^[4,5]。Liu Jiangchuan 研究了视频多播条件下媒体适配问题,但是其整个方案并未针对无线信道的特点^[6]。张占军研究了无线多媒体网络中端到端自适应 QoS 保证策略,提出了误码率对于无线信道的影响与 QoS 自适应模型,但是该方法

未考虑 TCP 友好性^[2]。以上研究考虑的侧重点不同且均未能综合考虑影响无线流媒体传输的两大主要特征事件—丢包和误码,来兼顾 QoS 和 TCP 友好性要求。结合以上研究成果的成功经验,本文提出了参考误码和丢包事件的端到端二维自适应流控模型。该模型提供了一种二维的流控方案:以传输时延和帧错误率作为 QoS 指标,其由包长和帧速率二维调整得到。由误码率模型^[2]发现无线信道误码特性影响可靠传输时延,进而可作为最佳包长的推算依据。另外,由可用传输速率结合帧错误率统计来调整帧速率并采用 TFRC 方程保证模型的 TCP 友好性。本文第 2 节提出并建立二维自适应速率调整模型;第 3 节为模拟实验和结果分析;最后对全文进行了总结。

2 二维自适应速率调整模型

2.1 二维自适应速率调整问题分析

流控一般包括基于端对端的方案和基于网络的方案两类。通常,端对端方案是运行在发送端和接收端,通过反馈机制来达到拥塞避免的效果。基于网络的方法,其目标是控制网络拥塞状况,重点在于降低网络传输时的数据损失和减小时延。这类方法可以分为链路层控制和 IP 层控制两类。然而在处理实时性流量时,效率不高,且易引发视频流媒体的误差扩展(Error propagation)问题。因此,端对端的机制成为首

^{*})国家自然科学基金(60302004)资助项目。朱晓亮 博士生;杜旭 博士,副教授;杨宗凯 教授,博士生导师;程文青 副教授。

选。TFRC 是一种基于方程的端对端拥塞控制机制,在有线网络中已经证明了 TCP 友好特性^[3]。同时,TFRC 可以提供较好的异构接入解决方案:通过 RTT、丢包率估计探测信道特征,可以选择合适的接收速率。TFRC 方程描述为^[3]:

$$R_{est} = \frac{f}{RTT \times \sqrt{\frac{2PLR}{3}} + RTO \times (3\sqrt{\frac{3PLR}{8}}) \times PLR \times (1 + 32PLR^2)} \quad (1)$$

式中 f 为以比特为单位的包长; R_{est} 为估计可用接收速率 (bps); RTT 为网络环回时间 (s); PLR 为丢包率; RTO 为重传超时 (s)。

可以认为,TFRC 是一种接收端主动的流控方法。当流媒体服务器需面对众多的用户时,TFRC 可以将复杂的统计任务分布在各用户端,因此适合视频多播应用。TFRC 的突出优点在于稳定网络前提下具有对发送速率的平滑功能,可在较大程度上避免拥塞,其吞吐量与 TCP 相比仅有较小的波动,因此具有较好的 TCP 友好性,而且对可用带宽的调整较为平缓、可以避免 TCP 针对单个丢包的速率调整。现有 TFRC 算法通常可采用两种方法调整速率:一是固定包长,变化发送帧速率;二是固定帧速率,调整包长和发送间隔。但是,在无线应用时,由于无线信道的时变特征给 RTT 和丢包率估计带来了一定的困难^[4,5]:首先由于 RTT 估计方法的滞后性,估计值的波动将使速率调整难以满足实时要求;同时,高误码信道特征使丢包率统计结果可能有误。因此,在无线环境下应用传统的 TFRC 方程,必须解决 RTT 实时估计和由信道误码与拥塞带来的丢包事件区分问题^[7,8]。另外,基于 TFRC 的速率调整方法基本考虑的是拥塞避免策略,而对如何保证时延和帧错误率等 QoS 指标考虑不多。为了解决这个问题,除了针对拥塞事件考虑 TFRC 策略外,需要针对影响无线流媒体传输性能的另一个主要因素——误码事件做详细分析,并在此基础上搭建新的自适应速率调整模型。

误码事件的主要标志 (BER 和 FER) 最终将影响可靠传输时延,而传输时延由传输速率和重传机制决定,传输速率调整又可分解为包长及帧速率二维调节。因此,二维自适应速率调整问题可归结为:结合误码和拥塞丢包事件的帧速率、包长的调整。

首先考虑帧速率的确定问题。流媒体传输端到端传输延迟主要由缓冲延迟、分包延迟、排队延迟、信号发送延迟、差错延迟、组包延迟等组成。对于端对端流控机制而言,可控延迟包括缓冲区时延和传输时延,则端对端延迟简化为^[2]:

$$D = D_1 + D_2 \quad (2)$$

其中 D_1 为缓冲区时延, D_2 为传输时延。进一步简化,可忽略发送端缓冲区时延,则

$$D \approx D_2 \frac{R_s}{BW \cdot (1 - FER)} \quad (3)$$

其中, R_s 为多媒体流产生的速率 (bps); BW 为传输带宽,可由 R_{est} 代替。在文[2]工作的基础上,为简化分析,保证传输时延近似恒定,且假定发送流式媒体每帧为恒速率,帧速率为 $S(n)$,则得到

$$R_s \propto R_{est} \cdot (1 - FER) \quad (4)$$

又因 $R_s \propto S(n)$ (5)

最终得到 $S(n) \propto R_{est} \cdot (1 - PER)$ (6)

上式表明帧速率与带宽和正确传送帧率乘积成正比。这

样,通过接收速率和帧错误率统计可以得到帧速率的调节。

其次,考虑包长的确定问题。文[2]中已经得到以下结论: K 位数据包在误码率为 BER 的理想高斯无线信道上传输时,无差错概率为:

$$P_e = (1 - BER)^K \quad (7)$$

假设多媒体帧尺寸为 I 位,被拆分成 F 个包传输,于是每个包尺寸为 $f = I/F$;包头尺寸为 H ,基于最小传输时延准则得到最佳包长^[2]:

$$f_{opt} = \frac{2}{\ln(1 - BER)} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{4}{H \ln(1 - BER)}} \right] \quad (8)$$

最小时延

$$D_{min} = \frac{1}{(1 - BER)^{f_{opt}/H}} \cdot \frac{1 + H/f_{opt}}{BW} \quad (9)$$

式中,如果 f_{opt} 由当前包长代替,则等式可用来计算当前传输时延。在初始化时,将 BER 用缺省值 BER_{def} 代替,则初始化包长定义为:

$$f_0 = \frac{2}{\ln(1 - BER_{def})} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{4}{H \cdot \ln(1 - BER_{def})}} \right] \quad (10)$$

由(8)、(9)、(10)式,在保证可靠传输的前提下,最佳包长与信道的误码率相关,传输时延与包长和误码率相关。可见,为了保证最小传输时延,包长必须与信道误码特性相适应,即误码事件可作为包长调整的依据。

由以上分析提出二维自适应速率调整思想:即在包长和帧速率可调的基础上建立二维自适应调整模型。首先,包长的确定属于传输层反馈的范畴,接收端传输层基于最小传输延迟原则可以得到最佳包长并反馈发送端传输层。其次,在接收端应用层由带宽和帧错误率反馈帧速率。

2.2 自适应模型定义

基于以上分析,假定 M 个异构接入用户,每个用户的信道速率由信道容量公式所限定,发送端依据异构接入状况设定最大发送速率之和为 R_{max} ,则二维自适应速率调整模型可采用以下方法描述。

定义 1 定义用户 i 的异构接入速率 R 约束描述为:

$$\sum_{j=1}^T R_i(\pi_j) \leq \mu_i(\kappa_i), T \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^M \mu_i(\kappa_i) < R_{max} \quad (12)$$

即用户 i 的实际吞吐量小于信道可满足的最大 QoS 级别时所提供的吞吐量,且所有用户的最大可用速率之和小于发送端的最大信道容量 R_{max} 。式中 $\mu_i(\kappa_i)$ 表示用户无线信道可以保证的最大 QoS 级别 κ_i 对应的可用速率; T 表示统计时间段数目; $R_i(\pi_j)$ 表示第 j 个时间段保证的 QoS 级别 π_j 对应的可用速率; $i = 1, \dots, M$ 。

定义 2 视频流媒体传输的 QoS 约束描述为:

$$QOS_i(\pi_j) = (FER_i(j), d_i(j)) \quad (13)$$

第 j 个时间段保证的 QoS 级别 π_j 由传输时延 $d_i(j)$ 、帧错误率 $FER_i(j)$ 限定。

定义 3 自适应速率调整模型描述为异构接入速率在约束 1、2 的条件下由包长和帧速率共同保障:

$$-R_i^* = \{f_i^*(j), S_i^*(j) | QOS_i^*(j)\} \quad (14)$$

$$QOS_i^*(\pi_j) = \min\{FER_i(j)\} \cup \min\{d_i(j)\}$$

且 $FER_i(j) \leq FER_i^{TH}, d_i(j) \leq d_i^{TH}$ (15)

即在保证第 j 个时间段获取最优的 QoS 级别 $QOS_i^*(\pi_j)$ 的条件下调整得到最优包长 $f_i^*(j)$ 和最优帧速率 $S_i^*(j)$,最

终得到最优异构接入(发送)速率。其中, $QoS^*(\pi_i)$ 表示在必须满足传输时延和帧错误率分别小于门限 FER^{TH} 和 d^{TH} 的情况下求得两指标的最小化。

2.3 自适应参数求解

由以上分析,二维自适应速率调整模型将 QoS 指标映射到传输时延和帧错误率保障,进而通过包长和帧速率二维调整得到。在求解自适应参数时,由于用户得到的 QoS 保障预先限定在某个范围,因此若假定初始化 QoS 级别为最优解,则自适应参数求解问题将转换为尽力保证初始化 QoS 级别的要求下对包长和帧速率按 QoS 误差来调整。下面仅考虑单用户接入情况并省略下标 i ,得到二维自适应速率调整模型(见图 1)。

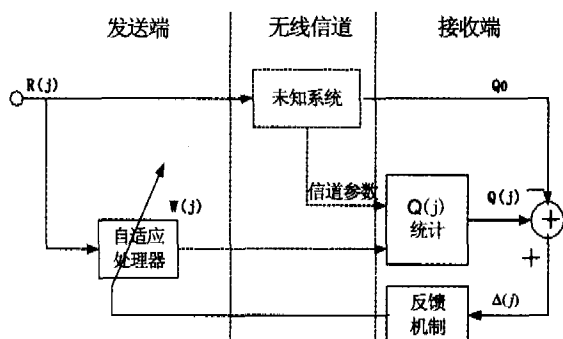


图 1 自适应速率调整模型

考虑可操作因素,引入 $Q(j)$ 为接收 QoS 矢量

$$Q(j) = \begin{pmatrix} \ln(R_{est} \cdot (1 - FER(j))) \\ \ln(d(j)) \end{pmatrix} \quad (16)$$

式中 $FER(j)$ 表示接收端当前帧错误率, $d(j)$ 表示传输时延,由式(9)得到。预设 QoS 参数矢量为

$$Q_0 = \begin{pmatrix} \ln(BW_0 \cdot (1 - FER_0)) \\ \ln d_0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

式中 BW_0 为预订带宽, FER_0 表示最大允许帧错误率, d_0 表示最大允许时延。

如图 1,假设发送矢量

$$R(j) = \begin{pmatrix} s(j) \\ f(j) \end{pmatrix} \quad (18)$$

式中 $S(j)$ 表示当前发送帧速率, $f(j)$ 表示当前发送包长。

权系数矢量

$$W(j) = (\alpha(j) \quad \beta(j)) \quad (19)$$

式中, $\alpha(j), \beta(j)$ 分别表示相应的帧速率、包长调整比例因子。则 QoS 误差矩阵:

$$\Delta(j) = \begin{pmatrix} \Delta_p(j) \\ \Delta_d(j) \end{pmatrix} = Q(j) - Q_0 \quad (20)$$

由于 $Q(j)$ 的统计受到无线信道误码和拥塞事件的影响,因此最终信道的波动将反映在 $\Delta(j)$ 上。由式(10)、(4)得到:

$$\alpha(j) \approx e^{\beta(j)} \quad (21)$$

$$\beta(j) \approx \left(1 + \frac{\Delta_d(j)}{\ln d_0}\right) \cdot \frac{\ln(1 - BER_{def})}{\ln(1 - BER(j))} \quad (22)$$

最终可根据 $\Delta(j)$ 建立误差和权系数的映射来调整权系数,从而实现二维自适应速率调整。

2.4 自适应算法

由以上分析,由于帧速率的调整与包长息息相关,因此二维自适应调整可以分为两步实现,传输层包长调整和应用层帧速率调整。即首先确定包长是否需要调整,然后以此为基

准来调整帧速率。自适应算法包括发送端和接收端两部分。其中,发送端主要完成 RTT 估计应答;多媒体包发送;自适应速率和包长调整。接收端主要完成 RTT 估计请求;开环或者闭环 RTT 估计;丢包率、误码率估计;信道参数检测;自适应调整信息反馈等。

首先,根据上节模型分析设定三类包结构:

RTT 包用于 RTT 估计。发送端用于反馈 RTT 接收信息和处理时延及发送时戳;接收端用于发起 RTT 估计请求。同时再添加包序号字段,用于 ACK。

自适应包用于对等应用层和对等传输层之间,由接收端向发送端传输自适应反馈信息。在本模型中,自适应包有两种:(1)在传输层之间的传输自适应包;(2)在应用层之间的应用自适应包。应用层自适应包用于接收端通知发送端当前可用的帧速率的调整因子;传输层自适应包用于接收端通知发送端由无线信道决定的最佳包长的调整因子。自适应包结构由三部分组成:标识、类别和数据。其中,标识标明自适应包是属于应用层还是传输层;类别标识发送端还是接收端;数据根据类别字段分别为包长或者可用速率调整因子。

多媒体包用于传输数据,本模型采用 RTP 封装,采用标准 RTP 帧格式,这里不再赘述。

接收端算法步骤如下:

- (1) 在初始化阶段主要完成 RTT 闭环估计基准,建立并探测带宽。初始化完成后,根据设定间隔完成 RTT 动态监测并统计帧错误率;
- (2) 接收端接收数据并检查多媒体数据包的包头中的差错检测码,计算出误码率,并计算最小时延,调整包长;
- (3) 若丢包事件发生,根据 TFRC 方程重新计算可用速率;
- (4) 根据步骤 1、2、3 判断是否需要反馈。若需要,则反馈。

发送端算法步骤如下:

- (1) 定时多播反馈 RTT 请求和 ACK 信息;
- (2) 接收自适应调整反馈信息,并做相应调整;速率调整一般为帧速率调整;包长调整是在帧速固定基础上调整包长和发送间隔;
- (3) 发送端按序发送视频多媒体数据包。

自适应算法关键为 RTT、丢包率、帧错误率估计。其中,基于无线信道特征,RTT 估计和 PLR 统计是该模型实现的难点,至于 RTO 估计可采用四倍的 RTT 估计值来近似得到。

2.5 RTT 实时估计算法

为了适应无线信道的实时变化,理论上应该增加 RTT 估计的频度,但是过多的反馈包在网络拥塞时会加剧信道状况的恶化,特别是应用于视频多播的场合时。因此,必须考虑在不增加过多的反馈包的前提下实现 RTT 的实时估计。Liu Jiangchuan 提出的一种混合 RTT 估计方案较好地解决了上述问题^[8]。该方案采用开环和闭环 RTT 估计等两种方法来实现 RTT 的实时估计。其中开环估计频度较高,且不需要接收端发送过多的请求,而闭环估计方法提供了低频度、高精度的估计基准值。闭环估计与 RTT 定义的方法相吻合,若接收端发送一个 RTT 请求包,即被视为请求闭环 RTT 估计。为了减少反馈,发送端采用批处理的方式,即按固定的间隔按多播方式发送反馈包,每一用户均可接收。但接收列表将标明上次发送请求的用户名单,仅该用户可以执行闭环

RTT 估计,其余用户则执行开环 RTT 估计。

假定本地时间 t_k^l ,接收端接收到一个 RTT 反馈包,且该用户在接收列表中,发送端时戳 t_s^l ,接收端更新闭环 RTT 估计值 \hat{RTT}_{close} 。

$$\hat{RTT}_{close} = t_k^l - t_k^s - t^{delay} \quad (23)$$

式中 t_k^l 为 RTT 请求包发送时间, t_k^s 为发送端延时反馈时戳:

$$t^{delay} = t + T_{SR} - t^{arrive} \quad (24)$$

其中, $[t, t + T_{SR}]$ 为发送时间槽, t^{arrive} 为发送端接收到请求包的时间戳。

在本地时间 $t'_R (> t_k^l)$, 用户接收到一个新的反馈包, 时戳为 t'_S 。若用户不在接收列表中, 则开环 RTT 估计值 \hat{RTT}_{open} 为

$$\hat{RTT}_{open} \approx 2 \left[t'_R - \left(t_k^l - \frac{\hat{RTT}_{close}}{2} + t'_S - t_s^l \right) \right] \quad (25)$$

RTT 估计具体步骤如下:

- (1) 接收端按固定较长间隔发送 RTT 估计请求;
- (2) 发送端接收到请求命令, 按固定时间间隔依次回复, 回复采用多播方式;
- (3) 接收端接收到属于自己的回复, 则完成闭环 RTT 估计。否则, 若已经存在闭环 RTT 估计值, 则执行开环 RTT 估计。

2.6 帧错误率和丢包率估计方法

为了分析拥塞丢包和无线信道误码性能, 常采用两阶 Gilbert 模型(见图 2)描述, 它们分别表示了无线信道状态和拥塞丢包状态转移。

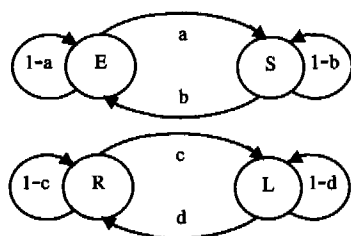


图 2 描述误码和拥塞丢包事件的 Gilbert 模型

如图 2 所示, S 和 E 分别表示成功和错误接收状态; R 和 L 表示拥塞丢包状态和非拥塞状态; a、b、c、d 分别表示状态转移概率, 则 FER 和 PLR 可以分别由下列公式估算^[8]:

$$FER = \frac{b}{a+b} \quad (26)$$

$$PLR = \frac{c}{c+d} \quad (27)$$

其中 FER 统计较为容易, 仅需估计 a 和 b 即可, 公式如下:

$$\hat{a} = \frac{n_{ES}}{n_E}, \hat{d} = \frac{n_{SE}}{n_S} \quad (28)$$

式中 n_{SE} 和 n_{ES} 分别表示成功接收到错误接收状态及相反的状态变化的次数。

为了计算 PLR, c 和 d 由下列公式得到:

$$\hat{a} = \frac{n_{RL}}{n_R}, \hat{d} = \frac{n_{LR}}{n_L} \quad (29)$$

n_{RL} 和 n_{LR} 是统计 PLR 的关键, 分别表示拥塞到非拥塞状态及相反的状态变化的次数。由文^[8]按下列步骤统计分别得到 n_{RL} 和 n_{LR} , 然后统计 PLR:

- (1) 假定在相邻成功接收包间隔内已经发生 n-1 个错误

包、m 个丢包, 则在错误包和成功接收包间隔内存在 n 个间隔, 表示为: a_1, a_2, \dots, a_n , 选择最大的时间间隔 a_{max} 。

- (2) 定义整形变量 X, 且

$$X = \lfloor m \cdot a_{max} / \sum_{i=1}^n a_i + 0.5 \rfloor \quad (30)$$

- (3) 将 X 个丢失包分配到时间间隔 a_{max} 内, 并移除 a_{max} 。

(4) 重复步骤 1~3, 直到所有丢包事件均完成重新分配, 则执行 5。

- (5) 计算 n_{LR} 和 n_{RL} 。

- (6) 计算 PLR。

3 实验及讨论

为验证算法的有效性, 在 NS2.26 下搭建了模拟实验环境, 包长、帧速率采用上述模型自适应调整。视频流数据包传输采用 UDP 协议, 视频数据包的包头 H 采用 IPv6 标准。参照文^[2]采用模拟无线传输干扰程序, 使部分数据包出错或丢失。模拟传输路径的误码率 BER 在 $10^{-3} \sim 10^{-7}$ 之间变化, 同时假定视频数据采集速率为 10~30 帧/秒。具体指标见表 1。

表 1 实验参数

参数	含义	数值
BER	误码率	$10^{-7} \sim 10^{-3}$
BER _{def}	缺省误码率	10^{-5}
FER TH	帧错误率阈值	1%
d TH	延迟阈值	50ms
I	帧尺寸	50kb
H	包头	320b
BW	带宽	1.5Mbps
FER	帧错误率	0~10%
PLR	丢包率	0~3%
S	帧速率	10~30 帧/秒

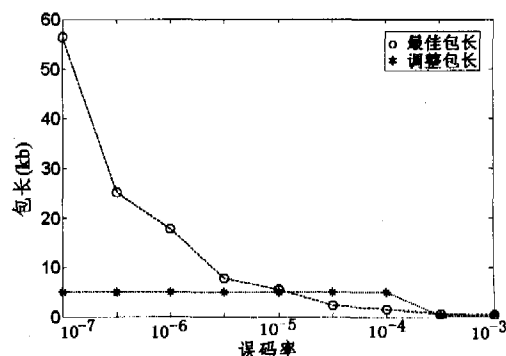


图 3 不同误码率的包长调整比较

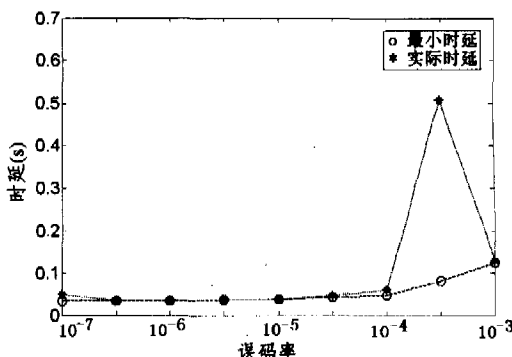


图 4 不同误码率的传输时延比较

首先, 初始包长选定 5kbit, 初始带宽 1.5Mbps, 初始帧速

率 30 帧/秒, 误码率按 $10^{-7} \sim 10^{-3}$ 依次变化, 并假定帧速率不变。自适应调整包长。图 3、图 4 比较了依据式(8)、(9)得到的最优包长、最小时延和依据本文模型得到的包长调整结果、传输时延。

由图 3、图 4 可见, 本文的包长调整的策略尽管没有取得最佳包长, 但包长的调整相对较平滑, 基本符合时延要求。在误码率较小情况下, 可保证传输时延小于门限; 在误码率较高 ($10^{-4} \sim 10^{-3}$) 的情况下, 也基本按最佳包长的规律变化。相比之下, 固定帧速率调整包长的 TFRC 机制不具备对信道误码率的自适应能力。

其次, 假定带宽 1.5Mbps, 初始帧速率 30 帧/秒, 帧错误率按 0~10% 依次变化时, 自适应调整帧速率结果如图 5 所示。由式(3), 当带宽固定, 帧速率与帧正确率近似成正比。因此, 通过帧速率调整可以改善帧错误率, 如图 6 所示。

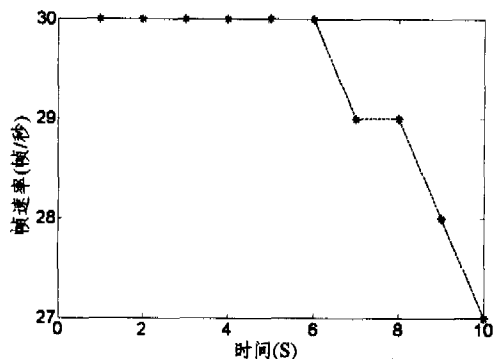


图 5 不同帧错误率下帧速率调整结果

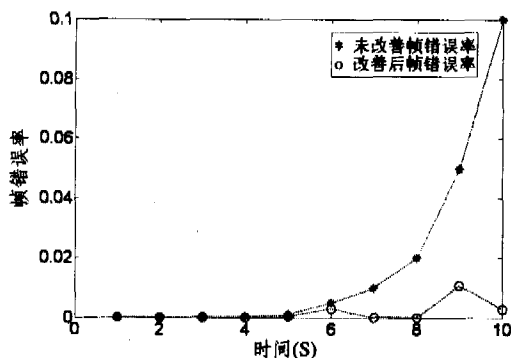


图 6 帧错误率改善结果比较

第三, 模拟无线信道的误码率、丢包率和帧错误率等按表 1 给定范围随机变化, 经 20s 发包间隔, 比较二维模型的调整方法与固定包长的纯 TFRC 帧速率调整方法的传输时延(见图 7), 并评估该模型的 TCP 友好性(见图 8)。

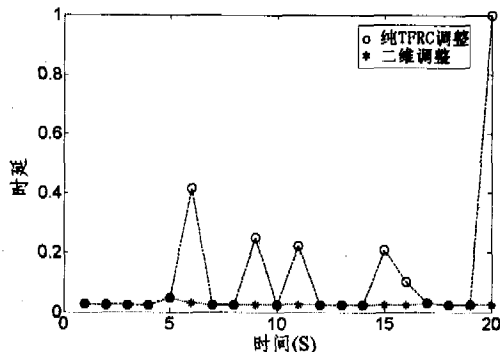


图 7 与纯 TFRC 流控传输时延比较

如图 7 所示, 固定包长的纯 TFRC 帧速率调整方法尽管可以达到带宽自适应的目的, 但得到的传输时延难以满足门限要求, 而二维模型则具备了保证传输时延的能力。图 8 中比较了采用该模型流量与 TCP 流量, 发现两者流量均值大致相当, 因此该模型具备良好的 TCP 友好性。综合以上分析, 在无线流媒体接入流控时, 采用二维自适应调整策略与应用单纯的 TFRC 调整策略相比, 对于误码和网络拥塞事件具备更好的健壮性和有效性。

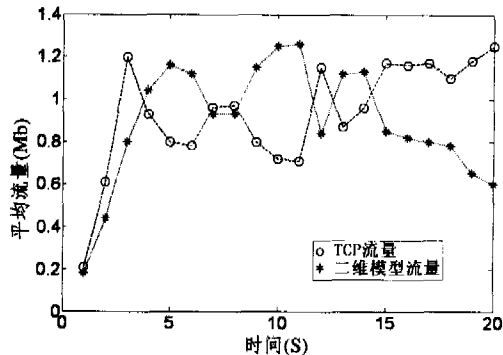


图 8 TCP 友好性比较

结论 仿真实验表明, 二维自适应调整具备了对误码和丢包事件的自适应调整能力。该模型有效地保证了无线接入流媒体业务的服务质量, 且可行、可靠。该模型的主要特征简要地概括为二层反馈、二维自适应调整。二层反馈包括应用层帧速率调整比例因子反馈和传输层包长调整比例因子反馈。二维自适应调整是发送端根据二层反馈进行包长、帧速率的二维调整。首先, 接收端根据计算当前传输时延和帧错误率来选择反馈包长、帧速率或者两者; 其次, 发送端根据反馈调整发送参数。下一步研究工作将结合无线多径接入的流控模型展开。

参考文献

- 1 Ding Gang, Ghafoor H, Bhargava B. Error Resilient Video Transmission over Wireless Networks. In: Proceeding of IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded Systems, Hakodate, Hokkaido, Japan, 2003. 31~35
- 2 张占军. 无线多媒体网络中端到端自适应 QoS 保证. 计算机学报, 2004, 27(8): 1064~1073
- 3 Floyd S, Handley M, Padhye J, et al. Equation-based congestion control for unicast applications. Proceeding of SIGCOMM, 2000, 30(4): 43~56
- 4 Nahrstedt K, Chen K. Limitations of Equation-based Congestion Control in Mobile Ad hoc Networks. In: Proceeding of 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, Hachioji, Tokyo, Japan, 2004. 756~761
- 5 Velev G, Hakenberg R, Rey J, et al. TCP-friendly streaming in next generation wireless networks. In: Proceeding of IEEE CCNC, Las Vegas, Nevada USA, 2004. 181~186
- 6 Liu Jiangchuan, Li Bo, Zhang Ya-Qin. An end-to-end adaptation protocol for layered video multicast using optimal rate allocation. IEEE Multimedia Transactions, 2004, 6(1): 87~102
- 7 Arya V, Turetli T. Accurate and explicit differentiation of wireless and congestion losses. In: Proceeding of IEEE 23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, Providence, RI, USA, 2003. 877~882
- 8 Yang Fan, Zhang Qian, Zhu Wenwu, et al. End-to-end TCP-friendly streaming protocol and bit allocation for scalable video over wireless. IEEE Internet Selected Areas in Communications Journal, 2004, 22(4): 777~790