

基于限速的 Ad hoc 网络混合流拥塞控制研究

陈亮¹ 徐阳²

(南通大学计算机科学与技术学院 南通 226019)¹ (南通航运职业技术学院管理信息系 南通 226010)²

摘要 主动队列管理(AQM)的基础是 TCP 反馈机制,所以 AQM 在处理 UDP 与 TCP 混合流时无法控制 UDP 流量,导致非视频流影响视频 UDP 的传输质量。根据 TCP 拥塞窗口特性和混合流排队机制,推导了 Ad hoc 网络 TCP/UDP 的 AQM 模型,据此提出了一种基于 UDP 限速的 PI 主动队列管理算法。限速算法根据实际流速与设定流速之差,标记非视频 UDP 分组优先级并按从低到高的顺序丢弃分组。NS 仿真表明,与 PI 控制相比,新算法实现了非视频 UDP 的流量控制,提高了视频传输质量 0.98dB 的峰值信噪比。

关键词 无线自组网,拥塞控制,主动队列管理,视频流,服务质量

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.12.019

Research on Ad hoc Network Hybrid Flow Congestion Control Based on Rate-limiting

CHEN Liang¹ XU Yang²

(School of Computer Science and Technology, Nantong University, Nantong 226019, China)¹

(Manage Information Department, Nantong Shipping College, Nantong 226010, China)²

Abstract AQM (Active Queue Management) is based on TCP feedback mechanism, so it fails to control UDP flow when managing hybrid flow of TCP and UDP. At last non-video flow will influence video UDP transmission quality. Ad hoc network TCP/UDP AQM model was deduced based on TCP window principle and hybrid flow queuing mechanism. Then a PI (Proportional Integral) AQM algorithm based on UDP rate-limiting was proposed. The algorithm can mark priority of non-video UDP packet according to the difference between actual rate and committed rate. It will drop these packets from low to high priority order. NS simulation shows that compared with PI control, the new algorithm controls non-video UDP flow and improves video transmission quality to 0.98 dB Peak Signal to Noise Ratio (PSNR).

Keywords Ad hoc network, Congestion control, AQM, Video stream, Quality of service

1 引言

随着 Ad hoc 网络规模的扩大,其结构日趋复杂,除端对端的拥塞控制之外,还可在网络中间节点引入主动队列管理(Active Queue Management, AQM),通过动态管理并检测路由节点的队列长度预知可能发生的网络拥塞,并及时通知源端,使其提早采取措施,尽量避免严重的丢包,实现对网络拥塞的监测和控制。

近年来人们基于控制理论研究路由节点的 AQM^[1],以提高队列控制的健壮性和稳定性。文献[2]研究了 Ad hoc 网络 AQM 控制机制,建立了 Ad hoc 网络 TCP(Transmission Control Protocol)流 AQM 模型,为 AQM 设计提供了理论基础。文献[3]提出一种具有时间加权平方误差积分的 AQM,它对 UDP 流量具有较好的抗干扰能力;该文献尽管将 AQM 算法置于混合流场景中,但把 UDP(User Datagram Protocol)流量作为对 AQM 的干扰,没有探讨 UDP 传输性能。文献[4]在队列机制超时丢包方面做了有益的工作,但只分析了纯

UDP 流在队列机制下的超时丢包策略,而在实际网络环境中往往是混合流^[5]。文献[6]同样没有考虑 TCP 影响,只是在 UDP 环境下研究了丢包、预测比例积分及权重随机早期丢包 3 种队列算法的视频传输品质。文献[7]针对视频流特点,在优先级方面对 RED (Random Early Detection)算法做了改进,以保证高质量的视频传输。但文献[8]显示有线网络中应用的 RED 算法在 Ad hoc 网络中具有不公平性,而且 RED 算法对设置的参数也非常敏感,其在 Ad hoc 网络中的队列性能并不理想。文献[9]基于控制理论设计了一种视频流的速率控制协议,其本质是建立视频流传输的反馈控制机制。研究显示,基于反馈机制的速率控制获得了较好的视频传输效果,但有研究者^[10]提出真实网络环境中还存在大量非视频流,混合流会给速率控制协议的性能带来较大的不确定性。文献[11]建立了有基础设施无线网络 MPEG(Moving Pictures Experts Group)视频传输的实验体系,但没有涉及 Ad hoc 网络多跳视频传输。文献[12]利用在路由器上执行神经网络算法来区别丢弃视频分组,但没有考虑 Ad hoc 网络混合流情况。

到稿日期:2014-03-14 返修日期:2014-06-23 本文受国家自然科学基金资助项目(61272424),江苏省高校自然科学基金研究项目(12KJB520015),江苏省交通科学研究计划项目(2012Y24-2),南通市科技计划项目(HL2013001, BK2012029, BK2012026, BK2012027)资助。

陈亮(1982-),男,博士,讲师,主要研究方向为无线自组网、网络拥塞控制;徐阳(1981-),男,硕士,讲师,主要研究方向为无线传感器网络。

综上,在 Ad hoc 网络应用场景中,存在 TCP 与 UDP 混合流量。这些流量执行不同的传输控制协议。另外即使同为 UDP 流量,其上层应用也可能不同,仅仅针对单一流量或应用的拥塞控制策略是不够的。在低带宽与队列缓存受限的 Ad hoc 网络中,研究如何保障用户关心的流量具有现实意义。目前 AQM 研究对象多为纯 TCP 流,其目标是保障 TCP 服务质量(Quality of Service, QoS),所以无法较好保护视频一类的 UDP 业务;而 UDP 视频传输研究又往往不考虑 AQM 机制中 TCP 业务流的干扰。因此,如何改进 AQM 以保障 Ad hoc 网络混合流中的视频传输,有待进一步研究。

本文根据 TCP 拥塞窗口变化原则及 TCP/UDP 混合流排队机制,推导了 Ad hoc 网络混合流 AQM 控制对象模型,进而提出一种基于 UDP 限速的比例积分(Proportional Integral, PI)主动队列管理算法。实验表明,新算法有效地控制了非视频 UDP 流量,较好地保障了混合流中 UDP 视频传输。

2 TCP/UDP 混合流 AQM 控制对象建模

变量说明:

t 为时间(秒);

C 为链路容量(分组/秒);

$q(t)$ 为队列长度(分组), q_0 为理想队列长度;

N 为负载(TCP 连接数);

$p(t)$ 为 TCP 分组丢弃概率;

$W(t)$ 为 TCP 拥塞窗口大小(分组); α 为常数($0 < \alpha < 1$);

RTT(Round Trip Time)为 TCP 往返时间(秒),下文简记为 $R(t)$;用下标 i 代表第 i 个 TCP 流,则其往返时间 $R_i(t) = D_i + q(t)/C$,其中 D_i 为固定的传播延时;

$B_i(t)$ 为第 i 个 TCP 流的发送速率, $B_i(t) = W_i(t)/R_i(t)$;

$fr(t)$ 为视频帧大小(分组),视频帧发送间隔为 int ,则视频 UDP 流发送速率为 $fr(t)/int$ (帧大小 $fr(t)$ 与帧发送间隔 int 均由视频 st 文件中视频帧编码决定);

非视频 UDP 流的应用层设定为静态比特率(Constants Bit Rate, CBR)服务,即非视频 UDP 流以恒定速率 $rate$ 发送;

$B'(t)$ 为视频 UDP 与非视频 UDP 合计发送速率,则 $B'(t) = fr(t)/int + rate$;

变量的数学期望 $E[\varphi]$ 简写为 $\bar{\varphi}$;

PSNR (Peak Signal to Noise Ratio)为峰值信噪比,是一种衡量视频质量的评价指标,用来反映视频失真程度。PSNR 值越大,表示目的图像与原始图像差距越小,画质越好。

2.1 TCP 拥塞窗口特性

假设:一个 $R(t)$ 中拥塞事件至多发生一次。

记时间区间 $(t, t+R(t))$ 内拥塞事件发生的次数为 $Y(t)$ 。丢弃概率 $p(t)$ 可代表拥塞事件发生的概率,因此拥塞事件次数 $Y(t)$ 可近似服从二项分布 $[W(t), p(t)]$,则 $Y(t)$ 的概率一般式为

$$P\{Y(t)=k\} = C_{W(t)}^k p^k(t) (1-p(t))^{W(t)-k}, k=0,1,\dots$$

根据 Ad hoc 网络 NS(Network Simulator)仿真,链路容量为 11Mb/s 而队长为 30 个分组时,其路由节点的 TCP 丢弃概率 $p(t)$ 约 10%, TCP 拥塞窗口值 $W(t)$ 平均值约 4 个分

组。根据上文的 $Y(t)$ 概率一般式可得,一个 $R(t)$ 中,拥塞事件次数 $Y(t)$ 是 0 的概率为 66%, $Y(t)$ 是 1 的概率为 29%,则其在区间 $[0,1]$ 的总概率达到 95%。因此本文假设一个 $R(t)$ 中拥塞事件至多发生一次。

根据 TCP 拥塞窗口“加法增大乘法减小”(Additive Increase and Multiplicative Decrease, AIMD)原则,在拥塞避免阶段,只要分组都能被正确接收,每经过一个往返时间 $R(t)$, TCP 拥塞窗口增加 1(即 Additive Increase),而一旦有分组不能被正确接收就分为两种情况,第一是收到 3 个重复 ACK,则将拥塞窗口降为 1 值的 $(1-\alpha)$ (即 Multiplicative Decrease),第二是发生超时,则拥塞窗口直接降为 1。因此拥塞窗口的数学表达如下:

$W(t+R(t)) = W(t) + 1$ 拥塞避免

$W(t+R(t)) = (1-\alpha)W(t)$ 分组丢失 (3 Duplicate ACK)

$W(t+R(t)) = 1$ 分组丢失(计时器超时 Time-out)

根据以上 3 种拥塞窗口变化规律,其拥塞窗口值可统一写为:

$$W(t+R(t)) = (W(t) + 1)(1 - Y(t)) + (1 + (1 - \alpha)W(t))Y(t) \quad (1)$$

为转化微分形式,式(1)先写为

$$W(t+R(t)) - W(t) = \frac{R(t)}{R(t)} - \alpha W(t) Y(t) \quad (2)$$

设 $[0, t]$ 时间内拥塞造成的分组丢失数 $M(t)$ 服从丢失速率为 λ 的泊松分布,则

$$Y(t) = M(t+R(t)) - M(t) \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),再以微分形式表达

$$dW(t) = \frac{1}{R(t)} dt - \alpha W(t) d[M(t)] \quad (4)$$

拥塞窗口机制中一般取 α 为 0.5,由于 $R_i(t)$ 直接与队长 $q(t)$ 相关,对第 i 个 TCP 流有

$$dW_i(t) = \frac{dt}{R_i(q(t))} - \frac{1}{2} W_i(t) [dM(t)] \quad (5)$$

考虑 $E[g(x)dM] \approx E[g(x)]dE[M]$,式(5)为

$$dE[W_i(t)] = E\left[\frac{dt}{R_i(q(t))}\right] - \frac{1}{2} E[W_i(t)](dE[M(t)]) \quad (6)$$

由泊松过程性质 $E[M(t)] = \lambda t$,另外考虑 $E[f(x)] \approx f(E[x])$,代入式(6)得

$$dE[W_i(t)] = \frac{dt}{R_i(E[q(t)])} - \frac{1}{2} E[W_i(t)] \lambda dt \quad (7)$$

根据泊松过程定义,丢失速率

$\lambda = p(t - R_i(t)) B_i(t - R_i(t))$,整理得

$$\frac{d\bar{W}_i(t)}{dt} = \frac{1}{R_i(\bar{q}(t))} - \frac{1}{2} \bar{W}_i(t) [p(t - R_i(t))] \frac{\bar{W}_i(t - R_i(t))}{R_i(q(t - R_i(t)))} \quad (8)$$

2.2 瓶颈节点混合流队列特性

第 i 个 TCP 流在稳态下,源端离散时刻的发送分组数 $\{A(k), k=0,1,2,\dots\}$, $a(k)$ 为离散间隔内发送分组数,则进入队列的分组为:

$$a(k) = A(k) - A(k-1)$$

由视频与非视频应用组成的 UDP 流在稳态下,源端离散时刻的发送分组数 $\{A'(k), k=0,1,2,\dots\}$, $a'(k)$ 为离散间隔

内发送数,则进入队列的分组为 $a'(k)=A'(k)-A'(k-1)$ 。

根据以上分析,由 Lindley 方程,队列长度的离散形式为 $q(k+1)=\max(q(k)+a(k+1)+a'(k+1)-C,0)$ (9)

将式(9)转化为连续时间上的队长函数

$$q(t+\Delta t)=\max(q(t)+a(t+\Delta t)+a'(t+\Delta t)-C,0) \quad (10)$$

对 TCP 流发送速率 $a(t+\Delta t)\approx\sum_{i=1}^N \overline{B}_i(t)\Delta t$,对 UDP 流发送速率 $a'(t+\Delta t)=B'(t)\Delta t$,将上述两式代入式(10),瓶颈节点混合流队列的微分形式为:

$$\frac{dq(t)}{dt}=-C+\sum_{i=1}^N \frac{\overline{W}_i(t)}{R_i(q(t))}+\frac{fr(t)}{int}+rate \quad (11)$$

2.3 控制对象建模

联立式(8)和式(11),略去数学期望符号,将方程右侧分别用符号 f 与 g 代表,TCP/UDP 混合流 AQM 控制对象微分模型如下:

$$\begin{cases} \frac{dW_i(t)}{dt}=\frac{1}{R_i(t)}-\frac{W_i(t)W_i(t-R_i(t))}{2R_i(t-R_i(t))} \\ [p(t-R_i(t))]=f \\ \frac{dq(t)}{dt}=-C+\sum_{i=1}^N \frac{W_i(t)}{R_i(t)}+\frac{fr(t)}{int}+rate=g \end{cases} \quad (12)$$

在稳定工作点附近,对式(12)用小扰动线性化处理,取 (W, q) 为状态, p 为输出,可求得平衡工作点,见如下 3 式:

$$f=0 \Rightarrow W_0^2(p_0)=2$$

$$g=0 \Rightarrow W_0=\frac{R_0(C-fr/int-rate)}{N}$$

$$R_0(t)=D+q_0/C$$

分别记 $W_R=W(t-R_0)$, $q_R=q(t-R_0)$, $p_R=p(t-R_0)$,对式(12)的函数形式 f 与 g ,在平衡工作点上分别求 f 和 g 的偏微,分别得

$$\frac{\partial f}{\partial W}=-\frac{W_0}{2R_0}p_0; \frac{\partial f}{\partial W_R}=-\frac{W_0}{2R_0}p_0;$$

$$\frac{\partial f}{\partial q}=-\frac{1}{R_0^2 C}; \frac{\partial f}{\partial q_R}=\frac{1}{R_0^2 C};$$

$$\frac{\partial g}{\partial q}=-\frac{C-fr/int-rate}{R_0 C}; \frac{\partial g}{\partial W}=\frac{N}{R_0}$$

对式(12)进行线性化,得

$$\begin{cases} \delta \dot{W}(t)=\frac{\partial f}{\partial W}\delta W(t)+\frac{\partial f}{\partial W_R}\delta W_R(t)+\frac{\partial f}{\partial q}\delta q(t)+ \\ \frac{\partial f}{\partial q_R}\delta q_R+\frac{\partial f}{\partial p_R}\delta p_R \\ \delta \dot{q}(t)=\frac{\partial g}{\partial W}\delta W(t)+\frac{\partial g}{\partial q}\delta q(t) \end{cases} \quad (13)$$

式中,变量用平衡工作点的值加增量表示,即 $\delta W=W-W_0$, $\delta q=q-q_0$, $\delta p=p-p_0$ 。

暂不考虑时延与队长的关系,假设其值固定为 $t-R_0$ 。

对式(13)进行拉氏变换,得

$$\begin{cases} s \cdot \delta W(s)=-\frac{N}{R_0^2 C}(1+e^{-sR_0})\delta W(s)-(1-e^{-sR_0})\frac{1}{R_0^2 C} \\ \delta q(s)-\frac{R_0 C^2}{2N^2}e^{-sR_0}\delta p(s) \\ s \cdot \delta q(s)=\frac{N}{R_0}\delta W(s)-\frac{C-fr/int-rate}{R_0 C}\delta q(s) \end{cases} \quad (14)$$

则根据式(14)转换的控制框图如图 1 所示。

对图 1 中的结构进行简化,忽略高频性能的影响,近似 $e^{-sR_0}=1$,则 Ad hoc 网络 TCP/UDP 混合流的 AQM 控制系统结构如图 2 所示,其中右侧虚线框中的部分为被控对象特

性,左侧的点虚线框中的部分为混合队列控制器。另外,图 2 中丢弃概率为 p ,队列长度为 q ,理想队列为 q_0 , $P_0(s)=\frac{C^2/(2N)}{(s+2N/(CR_0^2))[s+(C-fr/int-rate)/CR_0]}$ 。

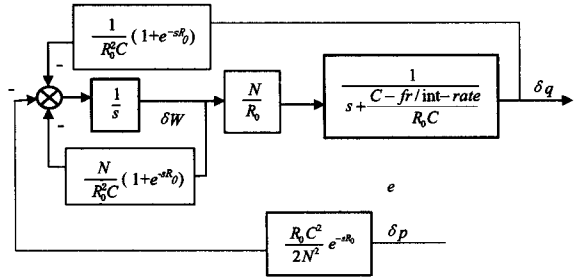


图 1 线性化 TCP/UDP 控制对象连接方框图

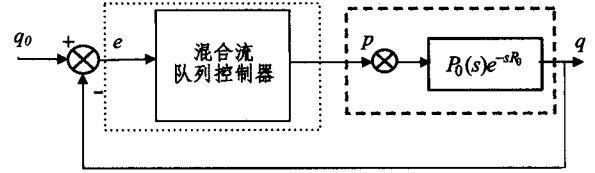


图 2 队列控制系统结构图

3 基于限速的混合流 AQM 设计

3.1 队列丢弃算法

选择比例积分(PD)控制作为队列控制算法,其基本思想是丢弃概率与队列误差及队列误差在时间上的积分成正比,丢弃概率表达式为

$$p(t)=k_p[e(t)+\frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt] \quad (15)$$

其中,丢弃概率 $p(t)$ 作为控制器输出信号,队列误差信号 $e(t)=q(t)-q_0$,控制器参数 $T_i=k_p/k_i$ 。从式(15)可见,单纯 PI 控制 AQM 的丢弃概率仅取决于队列信息,对处理混合流拥塞是不利的。

3.2 非视频 UDP 流限速算法

TCP 方面,AQM 基于 TCP 反馈机制来实现 TCP 流量调节,面对 UDP 这类非连接、无需反馈确认的流量,AQM 只能丢弃有关分组,却无法让 UDP 源端减小发送。随着拥塞加剧,队列机制一旦丢弃 TCP 分组,就迫使 TCP 流减小发送,而带宽却被 UDP 流(如以恒定速率发送的 CBR 业务)所占,最终导致 TCP 与 UDP 的公平性问题。

UDP 方面,面向非连接的 UDP 协议没有应答、重传机制及发送窗口拥塞算法,如果路由器只依据队列长度信息进行分组丢弃,将对承载视频信息的 UDP 流量不利。丢失的视频分组使得接收端无法正确解码某些画面帧,从而导致画质受损。所以,有必要另外考虑 UDP 流的拥塞控制问题,设计有别于 TCP 流丢弃且较为合理的 UDP 丢弃算法。

根据以上分析,为保护视频 UDP 流与 TCP 流量,本文考虑对非视频 UDP 流进行限速。其具体限速策略为:如果实际速率 $rate$ 小于或等于约定信息速率(Committed Information Rate, CIR),标注分组为高权限(high);如果实际速率 $rate$ 大于 CIR,但小于或等于峰值信息速率(Peak Information Rate, PIR),以概率 p_0 标注分组为中权限(middle),以 $(1-p_0)$ 标注分组为高权限;如果实际速率 $rate$ 大于 PIR,以概率 p_1 标注分组为低权限(low),以 p_2 标注分组为中权限,以 $(1-p_1-$

p_2)标注分组为高权限。当即将发生严重拥塞时,瓶颈节点队列中的分组逐渐增加,则节点开始根据权限高低丢弃分组,首先丢弃低权限分组,其次丢弃中权限分组,最后丢弃高权限分组。限速核心伪码如下:

```

If (rate<=CIR)
    mark high;
Else if (rate>CIR and rate<=PIR)
    { p0=abs[(rate-CIR)/rate];
    p0 mark middle;
    (1-p0) mark high; }
Else if (rate>PIR)
    { p1=abs[(rate-PIR)/rate];
    p2=abs[(PIR-CIR)/rate];
    p1 mark low;
    p2 mark middle;
    (1-p1-p2) mark high; }

```

可见,限速算法通过对非视频 UDP 流量进行限制,既可保护 UDP 流中的视频应用服务,又可减少对 TCP 流的冲击,以达到维护丢弃行为公平性的目的。

4 NS 仿真

Ad hoc 网络节点 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{N+2}$ 通过瓶颈节点 G 向目标节点 D_2 发送数据,其中 S_1 至 S_N 发送 TCP 流到 D_2 ,其应用层运行 FTP 服务,而 S_{N+1} 则发送 UDP 流到 D_2 ,其应用层运行视频服务,视频画面组(Group of Pictures, GOP)结构为 IBBPBBPBB(I 为内部编码帧, P 为前向预测帧, B 为双向内插帧), S_{N+2} 发送 UDP 流到 D_2 ,其应用层运行 CBR 服务,拓扑结构如图 3 所示。Ad hoc 网络参数设置为:所有节点链路容量默认为 11 Mb/s,即 $C=10742\text{packets/s}$ ($1024\text{Byte}/\text{packet}$), $N=5$,仿真总时间 100 秒。瓶颈节点 G 接口队列长度为 50 Packets,其混合流队列特性见第 2 节推导框图,主动队列管理 PI 控制器参数 $k_p=0.02, k_i=0.01$,理想队列长度设为 30 Packets。

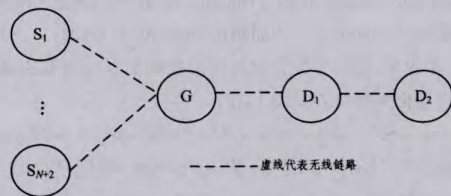


图 3 Ad hoc 网络拓扑结构

仿真 1 混合业务流下 PI 算法的影响

在 5 秒时有 5 个 FTP 业务源启动(S_1 至 S_5 均发送到 D_2),在 10 秒时 S_6 有 1 个 CBR 应用源启动,在 72 秒时 S_7 有 1 个视频业务源启动,瓶颈节点 G 上使用 PI 队列算法,队长如图 4 所示。由于无法处理 UDP 应用带来的冲击,其队列震荡较大。

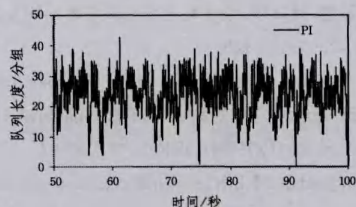


图 4 混合业务流下的 PI 队列长度

仿真 2 混合业务流对 PI 限速算法的影响

仿真 2 使用 PI 限速算法, $CIR=0.5\text{Mb/s}, PIR=0.7\text{Mb/s}$,其余与仿真 1 配置一致,队列长度曲线如图 5 所示,非视频 UDP 流的吞吐量限速曲线如图 6 所示。可见,限速算法可以将非视频 UDP 吞吐量限制在设定区间内。因此相较单纯 PI 算法,PI 限速算法能有效控制混合流队列,其动态性能优于 PI 算法。

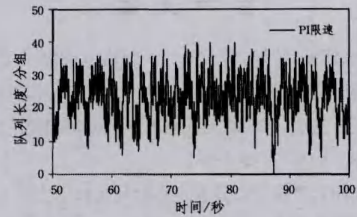


图 5 混合业务流下的 PI 限速队列长度

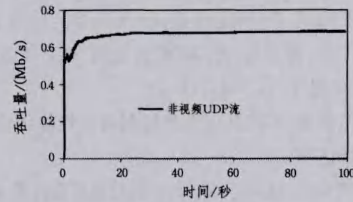


图 6 混合业务流下的非视频 CBR 流吞吐量

根据以上仿真实验,在节点 D_2 上对接收的视频文件进行分析处理,最终获得不同队列策略下的传输视频 yuv 文件,可以利用播放器展示视频图像,对比如图 7 所示。



图 7 视频对比图

仿真实验相关结果如表 1 所列,PI 限速算法在平均队长(队列静态性能)、延时指标上均优于 PI 算法。由于额外的 CBR 应用存在,PI 算法只能单纯丢包,无法控制 CBR 应用减少流量,这给队列管理增加了难度,导致队列动态性能比 PI 限速算法差。而 PI 限速算法可以有效控制 CBR 应用,限速缓解了拥塞,PI 限速算法在丢弃概率方面均优于 PI 算法。较低的视频 UDP 丢失率,使得 PI 限速算法的画质参数 PSNR 高于 PI 算法 0.98dB。另外,由于限速避免了严重的拥塞,非视频 UDP 与 TCP 的丢包率也分别下降了 15.7% 和 1.86%,较低的 TCP 丢失率说明 TCP 流量也受到了保护,维护了 TCP 与 UDP 间的公平性。表 1 的数据对比说明限速机制在 AQM 队列管理方面具有较好的效果。当然,目前限速标准是根据经验设定,如何自适应地限速是下一步研究的方向。

表 1 PI 及 PI 限速算法性能比较

	PI	PI 限速
平均队长/pac	24.0	22.5
平均延时/s	0.26	0.25
最大延时/s	0.59	0.56
视频 UDP 丢失概率%	10.20	8.65
非视频 UDP 丢失概率%	42.1	26.4
TCP 丢失概率%	10.0	8.14
PSNR/dB	30.62	31.60

结束语 本文设计了一种针对 Ad hoc 网络 TCP/UDP 混合流的 PI 限速队列控制器。该算法能针对非视频 UDP 业务流进行限速。仿真结果表明,在 Ad hoc 网络中,PI 限速算法比 PI 算法提高了 0.98dB 的峰值信噪比。基于限速的 AQM 控制器在保证 UDP 视频传输质量的同时,能够把混合流队列维持在更稳定的状态,兼顾了混合流的总体性能。

参考文献

[1] 张永敏,徐伟强,黄炯,等. Ad hoc 网络节能型功率控制与拥塞控制的跨层优化[J]. 软件学报,2013,24(4):900-914

[2] 陈亮,张宏. 基于 TCP 的无线自组网 AQM 建模[J]. 控制理论与应用,2011,28(7):956-962

[3] 汪浩,李晓明,严伟,等. 具有最小时间加权平方误差积分的主动队列管理算法 ISTE-PI[J]. 计算机学报,2012,35(5):951-963

[4] 裴杨姣,卢汉成,洪佩琳. 无线环境下具有实时约束的主动队列管理机制[J]. 电子与信息学报,2013,35(5):1069-1075

[5] 朱海婷,丁伟,缪丽华,等. UDP 流量对 TCP 往返延迟的影响[J]. 通信学报,2013,34(1):19-29

[6] 蔡小玲,范新丽. 不同队列管理机制对多媒体传输品质的影响[J]. 计算机应用,2009,29(12):24-26

[7] 杨巧宁,胡友山,赵淑清,等. 基于实时媒体服务质量的主动拥塞控制[C]//第十九届中国(天津)'2005IT、网络、信息技术、电

子、仪器仪表创新学术会议论文集. 天津:中国电子学会,2005:179-186

[8] Xu Kai-xin, Mario G, Qi Lan-tao, et al. TCP Unfairness in Ad hoc Wireless Networks and a Neighborhood RED Solution[J]. Wireless Networks,2005,11(4):383-399

[9] Huang Ying-song, Mao Shi-wen, Scott M. A Control Theoretic Approach to Rate Control for Streaming Videos[J]. IEEE transactions on multimedia,2009,11(6):1072-1081

[10] Hu Wu-hua, Xiao Gao-xi. Comments on A Control-Theoretic Approach to Rate Control for Streaming Videos [DB/OL]. [2013-12]. <https://docs.google.com/file/d/0B28hHvcfCxgUb2lXVTNjaW16T2M/edit?usp=sharing&pli=1>

[11] Ke Chin-heng, Shieh Ce-kuen, Hwang Wen-shyang, et al. An Evaluation Framework for More Realistic Simulations of MPEG Video Transmission[J]. Journal of Information Science and Engineering,2008,24(2):425-440

[12] Santos C, Ribeiro E, Pedroso C. The application of neural networks to improve the quality of Experience of video transmission over IP networks[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2014,27(1):137-147

[13] 张瑶,吴逸伦,彭伟. 基于用户身份认证的网络服务质量保障模型[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版,2014,28(3):116-121

(上接第 81 页)

作就是估计 Givens 变换矩阵中旋转的角度参数。鉴于本文针对的是时间结构信号盲源分离问题,所以以多步时延协方差矩阵的联合近似对角化为目标函数,构造了一个非线性无约束优化问题,由于拟牛顿法中的 BFGS 算法对该非线性无约束优化问题具有超线性收敛速度,且收敛性较好,因此本文随后利用 BFGS 算法来求解该优化问题,估计出旋转的角度参数。最后通过真实语音混合信号的分离实验验证了本文提出的分离算法的有效性。

参考文献

[1] Koldovsky Z, Tichavsky P. Time-domain blind separation of audio sources on the basis of a complete ICA decomposition of an observation space [J]. Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on,2011,19(2):406

[2] Gao Jing-bo, Zhu Xu, Lin Hai, et al. Independent component analysis based semi-blind I/Q imbalance compensation for MIMO OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2010,9(3):914

[3] Gao Jing-bo, Zhu Xu, Nandi A K. Independent component analysis for multiple-input multiple-output wireless communication systems [J]. Signal Processing,2011,91(4):607

[4] Kleinstueber M, Shen H. Blind source separation with compressively sensed linear mixtures [J]. Signal Processing Letters, IEEE,2012,19(2):107

[5] Xie Sheng-li, Yang Liu, Yang Jun-mei, et al. Time-frequency approach to underdetermined blind source separation [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems,2012,23(2):306

[6] Tong L, Soon VC, Huang Yih-fang, et al. AMUSE: A new blind

identification algorithm [C] // Circuits and Systems. New Orleans, LA; IEEE,1990:1784-1787

[7] Belouchrani A, Abed-Meraim K, Cardoso J F, et al. A blind source separation technique using second-order statistics [J]. IEEE Transactions on Signal Processing,1997,45(2):434

[8] Rutledge D N, Jouan-Rimbaud Bouveresse D. Independent Components Analysis with the JADE algorithm [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry,2013,50:22

[9] Wang Jian-gong, Shen Yue-hong, Li Hui, et al. A Separation Algorithm for Sources with Temporal Structure Only Using Second-order Statistics [J]. Radioengineering,2013,22(3):861

[10] 汤影,李建平. 利用参数表示任意维数正交矩阵的 ICA 新算法 [J]. 自动化学报,2008,34(1):31

[11] Watkins D S. Fundamentals of Matrix Computations (Second Edition) [M]. New York: John Wiley & Sons,2002:192-194

[12] Langlois D, Chartier S, Gosselin D. An introduction to independent component analysis: InfoMax and FastICA algorithm [J]. Tutorials in Quantitative Methods for Psychology,2010,6(1):31

[13] 曹军宏,韦灼彬,高屹,等. 基于量子遗传算法的盲源分离时延优选 [J]. 计算机工程,2012,38(11):170

[14] Hyvarinen A. Independence Component Analysis [M]. New York: John Wiley & Sons,2001:342-344

[15] 解可新,韩健,林友联. 最优化方法(修订版) [M]. 天津:天津大学出版社,2004:114-123

[16] Falie D, David L. Correlation coefficient based on independent component analysis [C] // 2012 9th International Conference on Communications (COMM). IEEE,2012:59-62

[17] Bach F R, Jordan M I. Kernel independent component analysis [J]. The Journal of Machine Learning Research,2003,3:1