

无线环境下具有实时约束的主动队列管理机制

裴畅姣 卢汉成* 洪佩琳

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系 合肥 230027)

摘要: 实时流业务的超期丢包率是衡量无线网络传输过程服务质量的常用参数,但是该参数并不能反映出具有不同重要度的数据包对视频质量的影响。该文将实时传输流的数据包重要度与超期丢包率结合,提出加权超期丢包率的概念,更加准确地描述丢包与视频质量的关系,在无线环境下提出基于数据包不同重要度的适用于实时约束流的主动队列管理算法,通过主动丢弃数据包以最小化服务过程中实时流的加权超期丢包率。仿真结果表明,相比于传统的队列管理算法和实时视频流滤波器算法,该超期数据包主动丢弃算法能够有效降低加权超期丢包率,提供更好的服务质量,提高大约0.5~1.5 dB的峰值信噪比(PSNR)增益。

关键词: 无线网络; 服务质量; 主动队列管理; 实时约束

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)05-1069-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01053

Deadline-constrained Active Queue Management Mechanism in Wireless Networks

Pei Chang-jiao Lu Han-cheng Hong Pei-lin

(Department of Electronic Engineering and Information Science,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The expired-time packet loss rate is a common parameter to measure the quality of service of transmission of deadline-constrained traffic in wireless networks. However, this parameter can not reflect the influence on the quality of service of video caused by the packets with different levels of importance. In this paper, the definition of the weighted expired-time packet loss rate is first introduced with the consideration of the importance of different kinds of packets, which describes the connection between the packet loss and quality of video more specifically. Based on the definition, an active queue management mechanism is proposed, which can be applied to deadline-constrained transmissions in wireless networks, and this mechanism, considering different levels of importance of video packets, drop packets actively to minimize the weighted expired-time packet loss rate during the service. Simulation results show that compared with the traditional queue management mechanism and real-time video filtering mechanism, the active packet discard mechanism can effectively reduce the weighted expired-time packet loss rate and improve the quality of service of video to about 0.5~1.5 dB Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) gain.

Key words: Wireless networks; Quality of service; Active queue management; Deadline-constrained

1 引言

在无线网络传输中,实时流业务是目前无线网络中承载流量的重要组成部分,其时延敏感性和无线网络的时变性给实时流业务的服务质量保证带来了很大挑战。和普通数据流业务相比,实时流业务在端到端的时延限制(deadline)、丢包率以及时延抖动等方面具有更高的服务质量需求,超过时延限制的数据包会被直接丢弃。因此,超期丢包率成为影

响实时流业务播放质量的重要因素。

主动队列管理是服务器对传输流进行资源管理的常用机制之一,传统的主动队列管理机制(例如随机早期检测算法^[1,2](Random Early Detection, RED))主要用于流量控制和拥塞控制,以队列长度为参数主动丢弃数据包,保证传输流的队列稳定^[3]。Wang 等人^[4]根据传输流的拥塞程度分析了数据包丢弃概率和队列长度的比例关系,Lin 等人^[5]提出了一种基于视频的不同类型数据包丢弃算法。但实时视频流不仅会由于缓冲区的长度约束而溢出丢包,还会由于时延限制而超期丢包,而传统的队列管理算法并没有考虑所承载业务的具体要求,对实时业

2012-08-17 收到, 2012-12-17 改回

国家自然科学基金(61170231)资助课题

*通信作者: 卢汉成 hclu@ustc.edu.cn

务的时间限制无相应处理,无法为实时业务提供较高的服务质量。

在实时视频传输流中,不同类型的帧具有不同的实时要求,对视频质量具有不同的失真影响^[6-8],这为提高服务质量带来了更大挑战。数据包的实时要求体现为有效时间,有效时间为零则视为超期并将其丢弃,这种基于有效时间的被动丢弃算法(Expired-time Packet Discard Mechanism, EPDM)虽然考虑到了数据包的实时要求,却忽略了数据包的重要度差异。Jun 等人^[9]提出了跨层滤波器算法(Cross-layer Filtering Mechanism, CFM),通过移除传输过程中的冗余帧来降低网络拥塞时视频帧的超期丢包率,考虑了数据包的重要度,但该算法中的即时反馈机制在多跳无线网络中很难实现。本文结合数据包对视频的不同失真影响,提出了加权超期丢包率的概念,并提出了一种实时业务的主动队列管理机制,通过在缓冲队列中有选择性地主动丢弃数据包,最小化加权超期丢包率,提高视频质量。仿真结果表明,该数据包丢弃机制能够有效地丢弃不同重要度的数据包,有效提高实时业务的服务质量。

本文的结构如下:第2节介绍实时流业务的服务质量参数,提出了加权超期丢包率的概念;第3节介绍系统模型;第4节提出基于数据包主动丢弃的实时流队列管理机制,并给出主动丢弃算法及其性能分析;第5节为仿真分析结果;第6节为结束语。

2 实时流业务服务质量参数

实时视频流经过视频编码得到多个视频帧,每帧在网络层传输时分为多个数据包进行传输。假设分割规则为每个数据包最多包含一个视频帧的数据;每个编码帧可以分割为多个网络数据包。

定义 1 视频传输流的数据包重要度 视频帧的数据包的重要度定义为所属帧的重要度,视频数据被编码成为周期性的图像组(Group of Pictures, GOP)结构,从图1中可以看出不同类型的帧之间的解码依赖关系,由于P帧和B帧的解码依赖于I帧,所以I帧的重要度最高,B帧丢失不会造成错误传播,重要性最低。文献[10]中给出了一种常用的视频帧数据的权重表达式,如式(1)所示。

$$w_n = \begin{cases} 1, & n \text{ 为 I 帧} \\ \frac{(N_P + 1 - m)}{(N_P + 1)}, & n \text{ 为 P 帧, } 1 \leq m \leq N_P \\ \frac{1}{(N_P + 1)(N_B + 1)}, & n \text{ 为 B 帧} \end{cases} \quad (1)$$

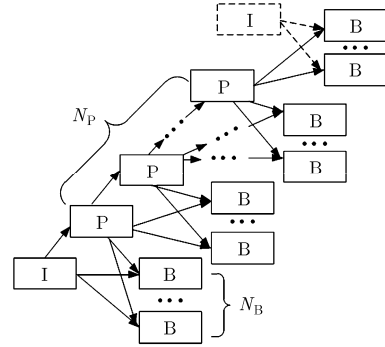


图1 通用GOP结构

其中 w_n 表示GOP中第 n 个帧的重要度, N_P 表示GOP中P帧的数目, N_B 表示GOP中B帧的数目, m 表示GOP结构中的第 m 个P帧, $1 \leq m \leq N_P$, P帧的重要度与其在GOP中的位置有关。

在实时流中,超过有效时间而被丢弃的数据包所占总的数据包比例即为超期丢包率,(Expired-time Packet Loss Rate, EPLR),表示数据包的有效时间对视频流的影响。由于不同重要度的数据包丢失对视频质量的影响不同,保证较低的超期丢包率并不等同于保证良好的视频质量。加权超期丢包率(Weighted Expired-time Packet Loss Rate, WEPLR)结合视频数据的不同重要度和超期丢包率,定义如下:

$$WEPLR = \frac{\sum_{n=1}^{N_{GOP}} w_n P_{D,n}}{\sum_{n=1}^{N_{GOP}} w_n} \quad (2)$$

其中 w_n 表示 GOP 中第 n 个帧的重要度, $1 \leq n \leq N_{GOP}$, N_{GOP} 表示 GOP 长度, $P_{D,n}$ 表示帧 n 的丢包数占视频流数据包总数的比例。WEPLR 是代表帧丢包率。

为了将加权超期丢包率与传统的传输流超期丢包率进行对比,定义帧的平均超期丢包率(Average Expired-time Packet Loss Rate, AEPLR)为

$$AEPLR = \frac{P_D}{N_{GOP}} \quad (3)$$

其中 P_D 表示视频流的总超期丢包率。

峰值信噪比(PSNR)是被广泛应用的一种衡量视频质量的计算方法,用来反映视频失真程度。图2中反映了AEPLR值相同时,不同的WEPLR与对应的PSNR之间的关系。可以看出,超期丢包率相同时,加权超期丢包率的不同直接影响视频质量的不同。

3 系统模型

如图3所示,实时视频流在信源处编码后经过有线传输到达无线接入点,在无线接入点处缓冲排

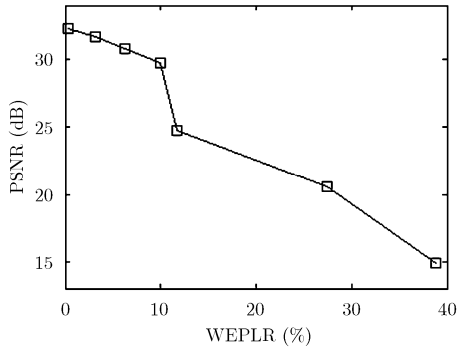


图 2 WEPLR 与 PSNR 的关系表示(视频序列为 Foreman 序列, 帧结构为 IBBPBBPBB, $P_d = 9\%$, AEPLR=1%)

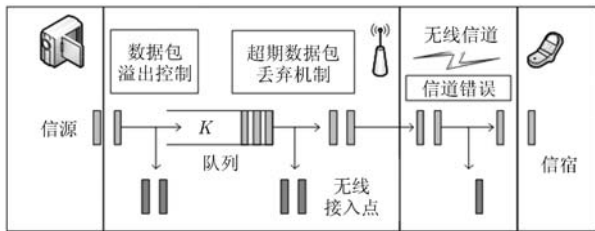


图 3 系统模型

队等待发送, 然后通过无线信道发送到接收节点进行解码播放。在无线接入点处的有限缓冲区, 溢出机制对队列满时的溢出数据包进行处理。超期数据包丢弃机制是对队列中数据包的有效时间进行管理和监督, 以控制在服务过程中的超期丢包比例。由于无线信道的时变性和视频业务的实时约束, 超期数据包丢弃机制直接影响用户端的视频质量。

假设传输信道是具有重传机制的无线信道, 重传最大次数为 N_r , 由文献[11]中的结论可以得到, 无线网络下数据包传输的服务时间概率密度函数为

$$b(t) = \mu_0 e^{-\mu_0 t} + \mu_0 \sum_{n_r=1}^{N_r} P_e^{n_r} \left(\frac{1}{n_r + 1} e^{\frac{\mu_0}{n_r+1} t} - \frac{1}{n_r} e^{\frac{\mu_0}{n_r} t} \right) \quad (4)$$

其中 μ_0 表示无线信道无重传时的平均服务速率, P_e 表示数据包错误率。假设队列的到达过程服从泊松分布, 服务时间的概率密度函数近似为指数分布^[11], 得到

$$\hat{b}(t) = \mu e^{-\mu t} \quad (5)$$

$$\text{其中 } \mu = \left[\int_0^\infty t b(t) dt \right]^{-1} = \mu_0 \frac{1 - P_e}{1 - P_e^{N_r+1}} \circ$$

数据包到达无线接入点后, 经排队等待阶段和无线信道发送阶段到达用户, 排队时间取决于缓冲区的排队长度, 发送时间即为无线信道服务时间, 由于无线信道的时变特性, 成功发送所需时间是随机变化的。缓冲队列使用 FCFS(First Come First Served)机制, 假设即时队列长度为 $l(t)$, $0 \leq l(t) \leq K$, 当 $l(t) = K$ 时缓冲区满, 溢出数据包则被丢

弃。每个排队的数据包 i 都维护一个实时状态向量: $(d_i(t), p_{i,s}(t))$, $d_i(t)$ 表示数据包 i 的剩余有效时间, $p_{i,s}(t)$ 表示当前该数据包 i 在有效时间 $d_i(t)$ 内发送成功的概率。

假设当前队列数据包 i 的即时等待队列长度为 $l_i(t)$ ($0 \leq l_i(t) \leq K$) (包括正在发送的数据包) (若 $l_i(t) = K$ 则溢出丢弃, 若 $l_i(t) = 0$, 直接发送), 当前有效时间为 $d_i(t)$, 每个数据包的服务时间服从负指数分布, 那么数据包 i 服务结束所需时间 $T(l_i(t))$ 等于连续服务 $l_i(t)$ 个数据包的时间加上数据包 i 的服务时间, 服从 $(l_i(t) + 1)$ 阶爱尔兰分布, 满足:

$$p_{i,s}(t) = P\{T(l_i(t)) \leq d_i(t)\} = 1 - e^{-\mu d_i(t)} \sum_{j=0}^{l_i(t)} \frac{(\mu d_i(t))^j}{j!} \quad (6)$$

即为数据包 i 在等待队列长度为 $l_i(t)$, 有效时间为 $d_i(t)$ 时的发送成功概率。

由式(6)可以看出, $p_{i,s}(t)$ 是 $l_i(t)$ 的单调递减函数, 若 i 前面的等待数据包个数由于丢弃而减少, 那么 i 的发送成功概率变大, 但数据包的丢弃会降低视频质量, 且不同类型的数据包丢弃对视频质量的影响不同。为了描述排队队列中的各类型数据包丢弃对整个队列的影响, 定义排队队列的系统性能如下:

假设当前缓冲队列中的数据包集合为 V , 集合中每个数据包 i 的重要性为 w_i , 其等待队列长度为 $l_i(t)$, 有效时间为 $d_i(t)$, 发送成功的概率为 $p_{i,s}(t)$, 那么, 当前缓冲队列 V 的排队系统性能可以定义为

$$E = \sum_{i \in V} w_i \cdot p_{i,s}(t) \quad (7)$$

由大数定理可以得出, 当 $t \rightarrow \infty$, 最大化排队系统性能 E 等同于最小化排队系统的加权超期丢包率。

4 基于数据包主动丢弃的实时流队列管理机制

无线服务中的超期数据包丢弃是造成视频质量下降的主要原因, 被动丢弃机制并不能对传输流的实时约束进行有效处理。本文提出的超期数据包主动丢弃机制可以根据实时流数据包的不同重要度和不同时延限制, 有选择地主动丢弃数据包, 使加权超期丢包率达到最小, 提高视频传输质量。

假设实时传输流 f 的数据包集合为 V , 根据式(7)可得出流 f 的数据包队列性能为 E , 最大化流 f 的队列性能 E 相当于降低流 f 的加权超期丢包率。但在无线接入点处, 由于传输流的所有数据包的有效时间、服务时间等无法被服务器预知, 无法求出所有时刻流 f 的队列性能。因此, 本文提出一种在线的实时业务超期数据包丢弃算法(Active Expired-time Packet Discard Mechanism, AEPDM), 根据

当前无线接入点处的缓冲队列信息, 保证当前时刻的缓冲队列性能最大化。

每当新的数据包进入无线接入点的缓冲排队队列时(假设无溢出, 若溢出直接丢弃, 不进入队列), 则触发该丢弃算法进行计算。正在发送的数据包不会被主动丢弃。假设当新的数据包 m 进入排队系统后, 当前队列中的数据包长度为 $l_m(t)$, 当前的每个数据包的有效时间为 $d_1(t), d_2(t), \dots, d_{l_m(t)}(t)$, 我们用 $\pi = (x_1, x_2, \dots, x_{l_m(t)})$, $x_i \in \{0, 1\}$, $1 \leq i \leq l_m(t)$ 来表示当数据包 m 到达后采用超期数据包主动丢弃机制, 其中 x_i 为 0 表示丢弃, x_i 为 1 表示在队列中等待。那么该超期数据包丢弃机制的最佳丢包策略 $\pi^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_{l_m(t)}^*)$, $x_i^* \in \{0, 1\}$, $1 \leq i \leq l_m(t)$ 为下面最优化问题的最优解:

$$\left. \begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^{l_m(t)} w_i \cdot (1 - p_{i,s}(t)) \cdot x_i \\ & \text{s.t.} \\ & p_{i,s}(t) = 1 - e^{-\mu d_i(t)} \sum_{j=0}^{l_i(t)} \frac{(\mu d_i(t))^j}{j!}, \quad l_i(t) = \sum_{k=1}^i x_k \\ & x_i \in \{0, 1\}, \quad 1 \leq i \leq l_m(t) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

可以看出, 该最优化问题的最优丢包策略能够使当前缓冲队列的队列系统性能最大, 加权超期丢包率达到最小。

新的数据包到达队列则启用该主动丢弃算法进行计算, 策略 $\pi = (x_1, x_2, \dots, x_{l_m(t)})$ 有 $2^{l_m(t)}$ 种选择。队列长度为 K 时该最优化问题的穷举算法的复杂度最大为 2^K , 本文提出一个复杂度较低的算法, 如表 1 所示。最差情况下, 复杂度为 $O(K^2)$ 。

该算法是贪心算法, 在每个数据包到达排队队

表 1 超期数据包的主动丢弃算法

<pre>//当新的数据包到达时启动该算法, 此时队列数据包集合为 V, 丢包策略//集合为 D, 是空集。 (1) 计算出当前排队系统有效数据包集合 V - D 的初始性能 E = E_max (2) For(缓冲区中的每一个数据包) (3) 求出如果丢弃数据包 i 后排队系统的性能 E_i (4) If E_i 大于初始性能 E_max (5) 将 E_i 值赋给 E_max (6) End If (7) End For //求出应该标记为丢弃的数据包 (8) If E_max 值被改变, 不等于 E (9) 标记数据包 i = arg max E_i 为丢弃, 加入丢包集合 D (10) 继续重复执行第(1)步, 直到 E_max 值不再改变, 算法结束。 (11) End If</pre>
--

列时, 对队列中所有数据包执行该算法, 基本思想是选择丢弃数据包集合 D 并不断地做贪心选择来扩充这个集合, 最终得出最佳丢包策略 π^* 。假设当前排队数据包集合为 V , 丢包集合为 D , 目前系统最大性能为 E , 该算法的贪心选择是从 $(V - D)$ 集合中选择能通过丢弃数据包使得系统性能变大的数据包 i , 将其加入丢包集合, 丢包集合变为 D' , 系统性能变为 E' , $E' = \max_{k \in (V-D)} E_k$, $E' > E$, 其中 E_k 表示 $(V - D)$ 集合中, 丢失数据包 k 后队列的系统性能。因此, 当前做出的贪心选择是不断接近于最佳的系统性能的选择, 是当前已知状态下的最好选择, 并且更接近最优解。

5 仿真结果与分析

仿真场景如图4所示, 视频流经过有线链路到达无线接入点, 然后通过无线网络被用户接收。在无线接入点处运行队列管理算法, 对数据包丢弃(包括超期数据包和溢出丢包)过程进行实时监控和处理, 在接收节点处对视频结果对比分析。视频仿真使用 h.264 的视频编解码器 JM^[12], GOP 结构为 IBBPBBPBB, 视频帧长为 300 帧, 编码速率为 30 帧/s, 每个数据包大小为 500 字节, 编码后 I 帧数据包有 263 个, P 帧数据包有 148 个, B 帧数据包有 221 个。无线接入点处数据包的到达过程服从泊松分布, 无线信道服务时间服从负指数分布, 数据包的剩余有效时间是从到达无线接入点到接收节点接收之间的时间, 由于数据包到达的随机性, 有效时间设置为随机值, 这里设置有效时间范围为 [10.87 ms, 108.70 ms]。

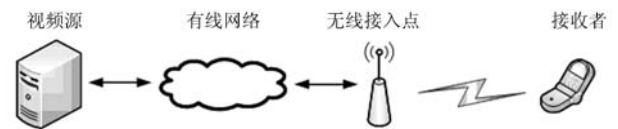


图4 仿真场景

仿真分为两个部分, 第1部分是队列管理算法 AEPDM, EPDM, RED 在不同的视频到达率、不同的信道条件和不同的缓冲区大小下分别对比, 第2部分是 AEPDM 和跨层滤波器算法 CFM^[9] 作对比, 比较视频流的失真程度。

AEPDM: 数据包重要度根据式(1)赋值, 超期数据包包括排队等待阶段采用该算法主动丢弃的数据包以及排队等待阶段和在信道的发送过程中由于有效时间为 0 而被迫丢弃的数据包, 当队列满时数据包溢出丢弃; EPDM: 数据包重要度相同, 在排队

等待阶段和信道发送过程中，有效时间降为0就将该数据包超期丢弃，队列满时数据包溢出丢弃；RED：数据包重要度相同，超期丢弃机制与EPDM相同，溢出丢弃机制^[1]为：当队列长度为最大值 MAX_{th} 时数据包溢出丢弃，队列长度为 MIN_{th} 值时数据包进入排队队列，队列长度为 $[MIN_{th}, MAX_{th}]$ 范围时，以概率 p 丢弃，这里设置 $MAX_{th} = K, MIN_{th} = (2/3)K, p = \frac{l - MIN_{th}}{MAX_{th} - MIN_{th}}$ ，其中 l 为当前队列长度。

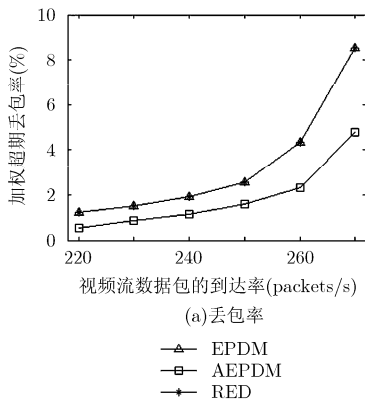
不同的视频流到达率：对比不同输入流拥塞程度下队列管理算法的性能。仿真参数为： $\mu_0 = 400$ packets/s, $P_e = 0.27, K = 50$ packets。从图5可以看到，当无线信道模型相同且有效时间分布相同时，输入流到达率越大，拥塞程度增大，数据包通过服务器到达接收节点的时间增大，加权超期丢包率变大，视频质量下降。由于缓冲区长度较大，缓冲队列无溢出，因此RED算法和EPDM算法结果相同。而AEPDM算法在不同拥塞程度下都可以有效地降低加权超期丢包率，提供更好的服务质量。

不同的信道条件：对比不同的无线信道环境下3种队列管理算法的性能。仿真参数为： $\lambda = 250$

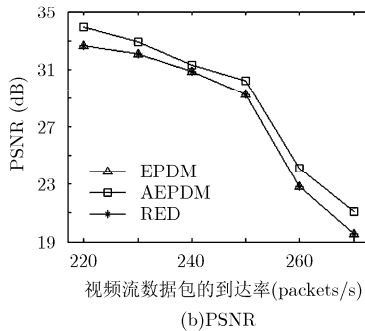
packets/s, $\mu_0 = 400$ packets/s, $K = 50$ packets。图6是无线信道变化时3种数据包丢弃算法下视频流的加权超期丢包率和PSNR值对比。无线信道条件变差，数据包发送成功所需时间变长，加权超期丢包率变大，视频质量下降。可以看到，与RED算法和EPDM算法相比，AEPDM可以为实时流提供更好的服务质量。

不同的缓冲区大小：缓冲区长度较小时，传输流丢包包括溢出丢包和超期丢包。仿真参数为： $\lambda = 250$ packets/s, $\mu_0 = 400$ packets/s, $P_e = 0.27$ 。从图7可以看出，当缓冲区变大时，加权溢出丢包率减小，平均排队时间变长，加权超期丢包率变大，当缓冲区继续变大，溢出丢包数减小为0，超期丢包数趋于稳定，缓冲区大小增加不会影响超期丢包。从总丢包率看，比起EPDM, RED算法在合适缓冲区大小下可降低加权超期丢包率，但AEPDM算法优于其他两种算法，可得到更低的加权超期丢包率。图8表示 $K = 17$ 时3种算法的视频质量对比。

第2部分，对比AEPDM算法和CFM算法。假设视频发送端到无线接入点之间经过多跳有线网络，相邻两跳之间的传播时延相同，CFM算法在解码端识别出冗余帧并反馈给编码端，从而移除传输中的

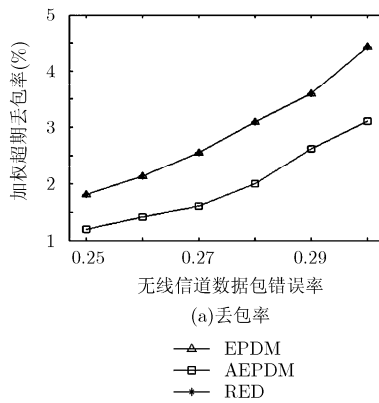


(a)丢包率

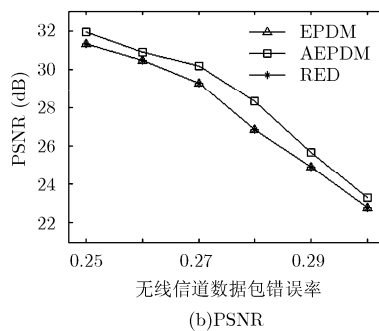


(b)PSNR

图5 不同视频包到达率下加权超期丢包率和视频平均PSNR值

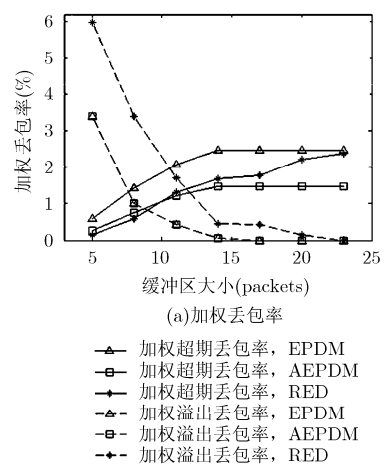


(a)丢包率

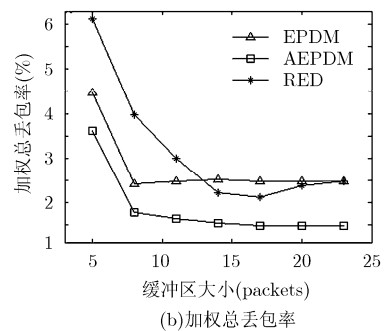


(b)PSNR

图6 不同信道条件下加权超期丢包率和视频平均PSNR值



(a)加权丢包率



(b)加权总丢包率

图7 不同缓冲区大小的加权超期丢包率，加权溢出丢包率，加权总丢包率



图8 缓冲区大小 $K=17$, 3种丢弃算法的视频帧和PSNR

所有冗余帧，并且在网络拥塞时 I 帧优先传输。图 9(a)中是不同的视频流到达率下 AEPDM, CFM 和 EPDM 的对比，仿真参数为： $\mu_0 = 400$ packets/s, $P_e = 0.26$, $K = 50$ packets，视频源端经过一跳有线链路到达无线接入点。可以看到，比起 EPDM 算法，CFM 算法可以有效缓解网络拥塞情况，提高视频流的服务质量，但是性能低于具有预测处理的 AEPDM 算法。

图 9(b)是在多跳无线网络环境下 3 种方法的对比，仿真参数为： $\lambda = 260$ packets/s, $\mu_0 = 400$ packets/s, $P_e = 0.26$, $K = 50$ packets，相邻两跳之间的时延为 5 ms，每增加一跳，数据包的有效时

间就增加一跳的时延。可以看到，CFM 算法中，有线链路跳数的增加削弱了解码端对编码端的反馈作用，编码端接收到解码端反馈时检测到的冗余减少，对网络拥塞的处理能力降低，服务质量降低，而 EPDM 和 AEPDM 算法在跳数增加时，性能基本稳定，算法处理能力与跳数无关。

6 结束语

本文主要研究无线接入点处实时流业务的主动队列管理机制，结合流中数据包的不同重要度，提出加权超期丢包率的概念，并提出了超期数据包的在线主动丢弃机制，最小化当前队列的加权超期丢

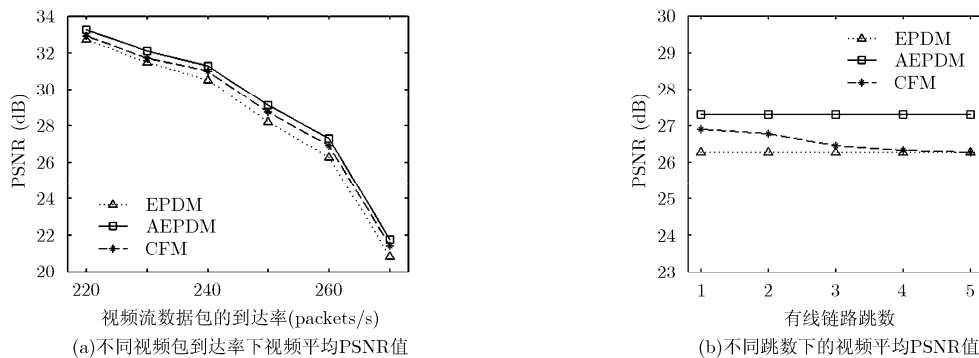


图9 AEPDM, CFM 与 EPDM 的 PSNR 对比

包率, 进而提高了传输视频的质量, 约 0.5~1.5 dB 的 PSNR 增益。下一步, 本文还需要考虑变比特率的实时视频流的服务时间的变化情况, 使得主动丢弃机制适用于更广的范围。

参考文献

- [1] Floyd S and Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1993, 1(4): 397-413.
 - [2] 刘伟彦, 孙雁飞, 等. 一种参数自适应的主动队列管理算法—自适应 BLUE[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(2): 462-466.
Liu Wei-yan, Sun Yan-fei, *et al.*. An adaptive active queue management algorithm—self-adaptive BLUE[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(2): 462-466.
 - [3] Kim Jong-hwan, Yoon Hyun-soo, and Yeom Ikjun. Active queue management for flow fairness and stable queue length[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2011, 22(4): 571-579.
 - [4] Wang C G, Li B, Hou Y T, *et al.*. LRED: a robust active queue management scheme based on packet loss ratio[C]. INFOCOM'04, Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Hong Kong, China, Mar. 7-11, 2004: 1-12.
 - [5] Lin T L, Shin J, *et al.*. Packet dropping for widely varying bit reduction rates using a network-based packet loss visibility model[C]. Data Compression Conference (DCC), Snowbird, UT, USA, Mar. 24-26, 2010: 445-454.
 - [6] Wang Y X, Lin T L, *et al.*. Network-based model for video packet importance considering both compression artifacts and packet losses[C]. GLOBECOM 2010, 2010 IEEE Global Telecommunications Conference, Miami, Florida, USA, Dec. 6-10, 2010: 1-5.
 - [7] Fu F W and Van der Schaar M. Structural solutions for dynamic scheduling in wireless multimedia transmission[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, 22(5): 727-739.
 - [8] Lin C H, Ke C H, *et al.*. The packet loss effect on MPEG video transmission in wireless networks[C]. AINA 2006, 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Vienna, Austria, Apr. 18-20, 2006: 565-572.
 - [9] Liu J. Hard-deadline-based frame filtering mechanism supporting the delivery of real-time video streams[C]. 2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Shanghai, China, Apr. 10-15, 2011: 85-90.
 - [10] Lou C and Qiu L. QoS-aware scheduling and resource allocation for video streams in e-MBMS towards LTE-A system[C]. Vehicular Technology Conference (VTC Fall), San Francisco, USA, Sep. 5-8, 2011: 1-5.
 - [11] Bobarshad H, Van der Schaar M, *et al.*. Analytical modeling for delay-sensitive video over WLAN[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2012, 14(2): 401-414.
 - [12] Karsten Stühring. MPEG-4 and H.264 Video Traces for Network. <http://iphome.hhi.de/suehring/tml/>. 2012.3.
- 裴畅姣: 女, 1988年生, 硕士生, 研究方向为无线环境下延迟约束的资源控制机制。
卢汉成: 男, 1977年生, 副教授, 主要研究方向为下一代移动互联网下的路由机制。
洪佩琳: 女, 1961年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为下一代网络体系结构与网络安全。