

基于 Kalman 滤波的无线流媒体自适应混合 FEC/ARQ 控制策略

白光伟¹ 靳勇² 张芃¹

(南京工业大学计算机科学与技术系 南京 210009)¹

(常熟理工学院计算机科学与工程学院 常熟 215500)²

摘要 提出了一种用于无线实时流媒体传输的数据链路层自适应混合 FEC/ARQ 控制策略,以显著提高接收方的播放质量。该策略采用跨层设计的方法,基于 Kalman 滤波器预测当前的网络状态,自适应地调整 FEC 参数 N 和 ARQ 参数 N_{\max} ;另一方面,在应用层采用自适应 FEC 策略,在视频源数据和冗余数据之间动态分配网络带宽。数学分析和仿真验证均表明,该策略能使接收方获得最大的可播放帧率,有效地提高了流媒体传输的可靠性和实时性。

关键词 无线实时流媒体,跨层设计,Kalman 滤波,自适应混合 FEC/ARQ,性能评价

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Kalman Filter-based Adaptive Hybrid FEC/ARQ Mechanism for Wireless Media Streaming

BAI Guang-wei¹ JIN Yong² ZHANG Peng¹

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)¹

(School of Computer Science & Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)²

Abstract This paper proposed an adaptive hybrid forward error correction (FEC)/automatic repeat request (ARQ) algorithm at the data link layer for wireless media streaming, in the hope that the media could make receivers to get high quality media streaming. The algorithm, based on cross-layer optimization design, predicts the packet loss rate using the Kalman filter, and adjusts the FEC parameter N and the ARQ parameter N_{\max} ; On the other hand, we used an adaptive FEC at the application layer to adjust the sending rate of MPEG video frame adaptively and allocate the network bandwidth resource between the MPEG video source data and the redundant data dynamically. Both the mathematical analysis and simulation demonstrate that the proposed mechanism can significantly improve quality of media streaming, in terms of playable frame rate, reliability and real-time performance on the receiving side.

Keywords Wireless real-time media streaming, Cross-layer design, Kalman filter, Adaptive hybrid FEC/ARQ, Performance evaluation

1 引言

通过无线移动网络实时传送包括视频和音频数据的多媒体信息,并为用户提供服务质量保障,是一个挑战性的问题,近年来引起了学术界的广泛关注。人们纷纷开展这方面的研究,并取得了一定的进展。Q. Zhang 等结合应用层、传输层和链路层各层情况,探讨了跨层的解决方法^[1]。S. Shah 在其博士论文中研究了如何通过目前的“尽力而为”(best-effort)的无线网络为多媒体应用提供最小吞吐量保证的问题,提出了一种带宽分配策略^[2]。文献[3]提出了一种基于二级反馈的两层自适应 QoS 保证方法,将应用层的最小流速率和最大帧错误率映射到传输层的最大端到端帧延迟的计算中。当信道状况发生变化时,传输层通知应用层快速调整发送速率或帧

错误率,达到调整端到端帧延迟的目的,满足流媒体应用对实时性的要求。文献 FEC 通过增加冗余数据来提高数据传输的可靠性,并且不会增加往返时延,但是传输冗余数据占用了额外的带宽。ARQ 不占用额外带宽,但是重传数据会增加往返时延,降低实时流媒体传输性能。而且,通过重传数据包来纠正该数据包内几个字节甚至几个比特的错误,效率太低。文献[4,5]则采用了混合 FEC/ARQ 方法,在使用 FEC 编码提供差错保护的同时,通过限制数据的重传次数来约束时延,获得了较好的传输质量。文献[6]在分析视频帧类型和依赖关系的基础上,提出了一种帧解码依赖模型,建立了在视频源数据和 FEC 冗余数据之间分配网络带宽资源的优化算法,该模型和算法可以有效地适应网络状态的变化,使接收端获得最大的可播放帧率。C. Barakat 等人分析了长 TCP 连接的无

到稿日期:2009-04-08 返修日期:2009-06-07 本文受国家自然科学基金项目(60673185),教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留[2007]1108号),2006年度江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人培养对象(苏教师[2007]2号),常熟理工学院青年教师科研启动基金项目(QZ0911)资助。

白光伟(1961—),男,博士,教授,CCF 会员,主要研究方向为网络体系结构和协议、MANETs、多媒体网络、网络系统性能分析和评价、QoS 等, E-mail: bai@njut.edu.cn;靳勇(1981—),男,硕士,助教,主要研究方向为无线多媒体网络性能分析、QoS、差错控制等;张芃(1965—),女,副教授,主要研究方向为差错控制、无线多媒体网络性能等。

线网络传输特性,在此基础上提出了一种数据链路层混合 FEC/ARQ 控制机制。从无线链路不同的物理特性(包括时延、差错率)和 TCP 连接数等几方面对该混合机制进行性能分析与评价,研究表明该混合机制可以最大化 TCP 传输性能^[7]。Won Kim, Hyo-Jong Jang 和 Gye-Young Kim 三人提出了一种基于 Kalman 滤波器的 VBR 移动图像传输速度预测算法^[8],该算法通过检测镜头信息来掌握准确的视频数据镜头信息、突发镜头类型和渐变镜头类型;Kalman 滤波器利用以上信息可以精确地预测视频数据传输速率。实验分析表明,该算法预测精度在 96.2%~97.6%之间。

然而,上述成果仍然具有一定的局限性。文献[3]虽然采用跨层设计的方法,但只是把应用层的 QoS 约束映射到传输层,没有涉及数据链路层的情况。文献[2]则主要研究了无线网络动态的带宽分配策略,没有涉及流媒体传输的可靠性和实时性。而文献[4,5]都没有涉及带宽的动态分配问题。文献[6]提出的模型和算法既考虑了可靠性,也给出了带宽的动态分配方法,但没有考虑数据链路层状态对视频数据传输质量的影响。文献[7]则主要研究了应用于 TCP 通信的无线网络的数据链路层混合 FEC/ARQ 控制机制,但没有考虑到流媒体传输的可靠性和实时性。文献[8]使用 Kalman 滤波器预测 VBR 移动图像传输速度,没有考虑跨层设计以及网络带宽的动态分配。

由于无线信道具有高误码率的特性,无线网络的数据链路层多采用基于收方反馈的重传机制来保证数据传输的正确性。显然,数据链路层重传带来了传输时延的变化,导致了传输层端到端的时延、丢包率和 TCP 吞吐量的变化^[9],使可用带宽产生波动,从而影响了流媒体传输的质量。

本文在深入分析和研究实时流媒体通信源的特性、无线移动网络协议机制以及分层次的网络体系结构的特点的基础上,提出一种用于无线实时流媒体传输的基于预测的数据链路层自适应混合 FEC/ARQ 控制策略,以提高接收方的视频播放质量。此策略采用跨层设计的方法,基于 Kalman 滤波器预测当前的网络状态,自适应地调整前向纠错(FEC)参数 N 和自动重传请求(ARQ)参数 N_{\max} ;同时,在应用层采用自适应 FEC 策略,在视频源数据和冗余数据之间动态分配网络带宽;最后,从仿真实验和数学分析两个方面证明,此策略能使接收方获得最大的可播放帧率,有效地提高了流媒体传输的可靠性和实时性。

本文第 2 节提出一种基于 Kalman 滤波器的预测算法,并通过仿真实验验证其预测效果;第 3 节深入分析研究 FEC 自适应算法和 ARQ 自适应算法,从而得到自适应混合 FEC/ARQ 算法;第 4 节通过理论分析和仿真实验的对比,对算法进行性能分析和评价;最后总结全文,并提出下一步工作的一些设想。

2 Kalman 滤波器预测网络状态

为了实现自适应机制,必须选用一种方法或工具预测网络状态。由文献[10]可知,Kalman 滤波器具有如下主要特点:

1) 滤波的信号模型是由矩阵形式的状态方程和观测方程描述的;状态转移矩阵、观测矩阵可以是时变的;扰动噪声、观测噪声的方差阵可以是时变的。因此,Kalman 滤波器不仅

适用于平稳随机过程的状态估计,也适用于非平稳随机过程的状态估计;不仅适用于单参量的情况,也适用于矢量情况;

2) 由于滤波采用递推算法,因此其数据存储量少,运算量少,非常适用于实时处理系统;

3) 由于滤波的增益矩阵与观测矩阵无关,可以预先离线算出;求解增益矩阵时,要求一个矩阵的逆,此时其维数仅和观测矢量维数一致,通常比较小,从而减少了实时在线计算量。

基于以上特性,本文采用 Kalman 滤波器预测网络状态,并且进行速率平滑控制。本节首先定义 Kalman 滤波器的状态向量和状态转移矩阵,其次描述其预测算法,然后通过一系列的仿真对比实验验证该算法的预测效果。

2.1 Kalman 滤波器预测算法

用 Kalman 滤波器预测发包数和丢包数,从而求得丢包率 P 。具体定义和算法描述如下。

首先,定义用于 Kalman 滤波器的状态向量和状态转移矩阵:

$$s(t) = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \\ \ddot{q}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)定义了用于预测发包数的状态向量。其中, $q(t)$ 表示发送方发送数据包个数; $\dot{q}(t)$ 表示 $q(t)$ 随时间变化的一阶变分,即发包速度; $\ddot{q}(t)$ 表示 $q(t)$ 随时间变化的二阶变分,即发包加速度。

$$sL(t) = \begin{bmatrix} p(t) \\ \dot{p}(t) \\ \ddot{p}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)定义了用于预测丢包数的状态向量。其中, $p(t)$ 表示丢失数据包的个数; $\dot{p}(t)$ 表示 $p(t)$ 随时间变化的一阶变分,即丢包速度; $\ddot{p}(t)$ 表示 $p(t)$ 随时间变化的二阶变分,即丢包加速度。

因为发包数和丢包数的变化不是线性的,状态向量的定义中包含了二阶变分即加速度,见(1)和式(2)。因此,与只考虑一阶变分(速度)的状态向量相比,该定义可以更为准确地预测丢包率。另一个非常重要的定义是状态转移矩阵:

$$\Phi(\Delta t) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, Δt 是测量时间间隔。

网络状态随时间根据状态转移矩阵进行变化。因此,在 Δt 间隔内,根据发包数和丢包数可以计算 $t - \Delta t$ 时刻的发包速度和加速度以及丢包速度和加速度。根据 $t - \Delta t$ 时刻的发包速度和加速度以及丢包速度和加速度就可以求解 t 时刻发包状态和丢包状态的变化情况。用状态向量表示的多状态转移矩阵见式(4)和式(5):

$$\begin{aligned} q(t) &= q(t-\Delta t) + \dot{q}(t-\Delta t) \cdot \Delta t + \ddot{q}(t-\Delta t) \cdot \Delta t^2 \\ \dot{q}(t) &= \dot{q}(t-\Delta t) + \ddot{q}(t-\Delta t) \cdot \Delta t \\ \ddot{q}(t) &= \ddot{q}(t-\Delta t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} p(t) &= p(t-\Delta t) + \dot{p}(t-\Delta t) \cdot \Delta t + \ddot{p}(t-\Delta t) \cdot \Delta t^2 \\ \dot{p}(t) &= \dot{p}(t-\Delta t) + \ddot{p}(t-\Delta t) \cdot \Delta t \\ \ddot{p}(t) &= \ddot{p}(t-\Delta t) \end{aligned} \quad (5)$$

我们需要设计测量向量和观测矩阵,用以设计状态测量模型。测量向量表示网络状态向量之间可能的测量值的矩阵。发包数和丢包数作为测量向量的自变量。因此,测量向量可表示为式(6)和式(7):

$$z(t) = (q) \quad (6)$$

$$zL(t) = (p) \quad (7)$$

观测矩阵用于从状态向量中求解测量向量,因此根据状态向量和测量向量的定义,它可表示为式(8):

$$H(t) = (1, 0, 0) \quad (8)$$

根据 Kalman 滤波器的定义,预测算法包括 3 个阶段,即初始化、状态预测和测量值更新。初始化阶段,设置 Kalman 滤波器的结构并赋初值。状态预测阶段,从更新至 $t - \Delta t$ 时刻的状态向量预测出 t 时刻的状态向量,借此预测出状态转移。

2.2 Kalman 滤波器预测性能分析

为了对 Kalman 滤波器的预测性能进行分析和评价,本节设计了一系列的仿真实验。仿真工具采用 NS-2,通信源为视频文件“StarWars IV”^[11]的一个片断(特性参数详见本文第 4 节)。图 1 给出了 Kalman 滤波器预测值与 NS 仿真结果值随时间的变化情况。其中, X 轴是仿真实验运行时间(单位:s),图 1(a)中 Y 轴表示丢包个数,图 1(b)中 Y 轴表示丢包率。图 1(a)反映了丢包数的预测值与仿真结果的对比情况。当仿真值变化较平缓时(例如 1.77s 到 9.89s 之间)预测值比较理想,与仿真值的曲线比较接近,误差小于 0.5。但当仿真值变化较激烈时(例如 10.77s 到 13.49s 之间)预测值与仿真值误差较大,约为 1.3。图 1(b)是丢包率的预测值与仿真结果的对比图。预测值曲线与仿真值曲线非常接近。当真实值变化比较激烈时,预测值曲线与仿真值曲线误差小于 0.001。上述结果表明,使用 Kalman 滤波器预测实时流媒体传输过程中的网络状态是可行的。本节得到 *KalmanPredict*() 函数,利用当前丢包率 P_{cur} 预测下一时刻丢包率的值 P_{pre} ,并作为返回值返回。

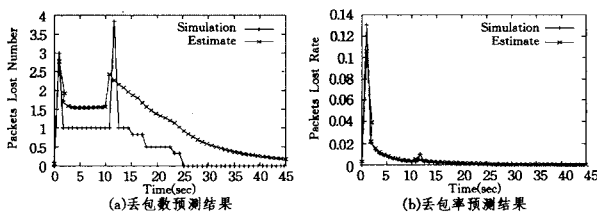


图 1 Kalman 滤波器预测值与仿真实验值对比

3 自适应混合 FEC/ARQ 控制策略

本节首先基于 Kalman 滤波器预测网络状态分析,研究 FEC 和 ARQ 自身的特性,分别得出 FEC 参数 N 以及 ARQ 参数 N_{max} 的变化规律;然后提出自适应的混合 FEC/ARQ 控制策略。

3.1 自适应 FEC 算法

3.1.1 Reed-Solomon 编码

Reed-Solomon 编码是前向纠错编码 FEC 中的一种,可用于有损信道的数据传输,它通过增加冗余数据来提高数据传输的可靠性。Reed-Solomon 编码^[12]通过定义在有限域上生成的多项式进行纠错,定义为 $RS(N, K)$,其中 N 为编码后的全部符号数量, K 表示原始信息符号的数量,而 $N - K$ 表示

编码后产生的冗余信息符号数量^[13]。RS 编码最大可以纠正 $N - K$ 个错误。当经过网络传输后,如果有任意 K 个或更多的数据包被正确接收,那么就可以从中恢复出原始的 K 个数据包。 K/N 称为编码率,表明了冗余数据的多少。很显然, K/N 越小,则纠错能力越强。RS 编码具有延迟短、纠错能力强的优点,已经被广泛用于网络通信。

当 N, K 确定时,可由式(9)计算出全部数据的正确接收概率 $P(N, K)$:

$$P(N, K) = \sum_{l=K}^N \binom{N}{l} (1-p)^l p^{N-l} \quad (9)$$

其中, p 为当前的平均丢包率。

3.1.2 FEC 自适应算法设计

在数据链路层使用 FEC 来提高数据传输的可靠性,会消耗一定的网络带宽,从而降低传输视频源数据可获得的有效吞吐量。如果在传输过程中总是给冗余数据分配固定的带宽,当网络状态较好时,可能会因为 FEC 使用了过多的带宽而造成资源的浪费;当网络状态较差时,又会因为提供的纠错能力不足而降低数据的可靠性。因此,在传输无线流媒体时,要能够根据网络状态的变化自适应地动态调整 FEC 冗余数据。

自适应前向纠错 FEC 可以表述如下:对于不同的丢包率 P ,求解一个 FEC 参数 N ,使得该状态下 GOP 可用带宽达到最大,在 P 与 N 之间建立一一对应关系(这里假定网络带宽资源充裕)。

在本文后面的分析和实验中,假定视频帧的生成速度为 30 帧/s,相当于 1s 发送两个 GOP。

图 2 给出了丢包率 P 分别为 0.01, 0.05, 0.1 和 0.25 时 MPEG 视频序列 GOP 可用带宽随 FEC 参数 N 的变化情况(假定网络带宽资源充裕)。其中 X 轴表示 FEC 参数 N , Y 轴为 GOP 可用带宽(单位:Mbps),即一个 GOP 允许使用的网络带宽。

仔细分析图 2 中 GOP 可用带宽与 FEC 参数 N 之间的依赖关系可以发现,对于不同的丢包率, FEC 参数 N 都有一个对应的值,使得可用带宽达到最大。对于不同的网络状态, FEC 通过自适应地调整参数 N ,使 GOP 可用带宽始终保持最大。另外,图 2(b)表明,当 $K=30$ 时,添加冗余码至 60 后,可用带宽才有明显增加,而且可用带宽最大值比 $K=6$ 时要小。例如 $K=6, P=0.01$ 时,可用带宽最大值为 55.24Mbps;而 $K=30, P=0.01$ 时,可用带宽最大值为 48.17 Mbps。因此,对于 FEC 而言,增加 K 值并不能有效地增加可用带宽,而且 K 值过大反而会增加 FEC 编码的运算量和计算复杂度,从而影响实时流媒体传输。因此在本文中, K 取值为 6。综上,本节得到 *FEC_adap*() 函数。该函数把 Kalman 滤波器预测得到的丢包率 P_{pre} 作为输入值,求出与之对应的 FEC 参数 N 值并作为返回值返回。

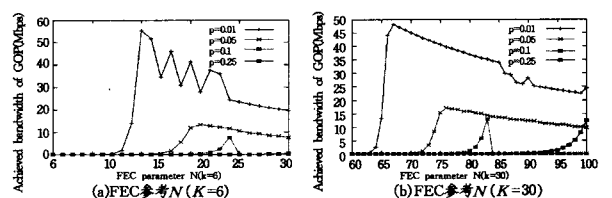


图 2 GOP 可用带宽

3.2 自适应 ARQ 算法

传统的自动重传请求 ARQ, 不考虑媒体的实时播放要求, 因为数据丢失或出错所造成的数据重传会超过视频帧的解码和播放时限要求而最终被接收方丢弃。因此, 无线流媒体的传输要能够根据网络状态的变化动态地调整 ARQ 的最大重传次数 N_{max} 。

自适应自动重传请求 ARQ 可以表述如下: 假设 R_{cur} 表示 GOP 可用带宽 (单位: Mbps)。 T_e 表示端到端时延 (单位: 秒)。在不同的网络状态下, 对于 ARQ 参数 N_{max} 需要在 R_{cur} 和 T_e 之间寻找一个最优点, 使得无线流媒体性能最好。

图 3 给出当 $K=6, N=10$ 时 ARQ 参数最大重传次数 N_{max} 在丢包率 P 分别为 0.05, 0.1 和 0.25 时对 GOP 可用带宽和端到端时延的影响。图 3(a) 表明对不同的丢包率, 可用带宽随着 N_{max} 增加而线性减小, 丢包率越大下降速度越快。图 3(b) 表明对不同的丢包率, 端到端时延随着 N_{max} 增加而增大, 当 N_{max} 增加到一定值时, 端到端时延不再增加。例如, 若 $P=0.25$, 当 $N_{max}=4$ 时端到端时延为 0.065085s, 此后不再变化, 而且丢包率不同, 对应的该值也不同。综上, 可以把端到端时延达到最大时对应的 N_{max} 值作为当前网络状态下最大重传次数。本节得到 $ARQ_{adap}()$ 函数。该函数把 Kalman 滤波器预测得到的丢包率 P_{pre} 作为输入, 求出与之对应的 ARQ 参数值 N_{max} 并作为返回值返回。

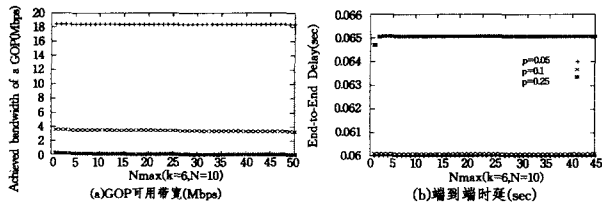


图 3 ARQ 参数 $N_{max}, K=6, N=10$

3.3 自适应混合 FEC/ARQ 控制策略

上面的分析表明, FEC 通过增加冗余数据来提高数据传输的可靠性, 并且不会增加往返时延。但是传输冗余数据占用了额外的带宽。ARQ 不占用额外带宽, 但重传数据会增加往返时延, 降低了实时流媒体传输性能。而且, 通过重传数据包来纠正该数据包内几个字节甚至几个比特的错误, 效率太低。研究表明, ARQ 的大时延导致的部分重传数据包不但没有增加系统容错能力, 反而占用了有限的信道带宽, 从而影响视频图像质量^[9]。基于 FEC 和 ARQ 各自的优缺点以及 FEC 和 ARQ 自身所具有的特性, 本节提出一种基于预测的数据链路层自适应混合 FEC/ARQ 控制策略, 并应用于无线实时流媒体传输。

3.3.1 自适应混合 FEC/ARQ 分层模型

如图 4 所示, 发送方在应用层对视频源数据采用自适应 FEC 算法编码^[6], 视频源数据帧被封装成大小为 S 的数据包。根据 RFC3580^[14], 数据包的最大长度设为 1500 字节。因此一个 IP 数据包可以被封装为一个数据链路层数据帧。在这种情况下, 丢包率 P 就等于丢帧率 (数据链路层数据帧的丢失概率) P_f 。在数据链路层, 一个数据帧被进一步分割为 K 个链路层传输单元, 记为 LL Transmission Units。这 K 个 LL Transmission Units 经过 FEC 编码后生成 $N(N > K)$ 个数据。在网络传输过程中受传输错误的影响, 接收方只能正确接收 k 个 LL Transmission Units, 但只要 $k \geq K$, 就可以

恢复出 K 个 LL Transmission Units; 若 $k < K$, 则启用 ARQ 机制重传缺失的 LL Transmission Units, 以确保 $k \geq K$, 进而重组该数据链路层数据帧。

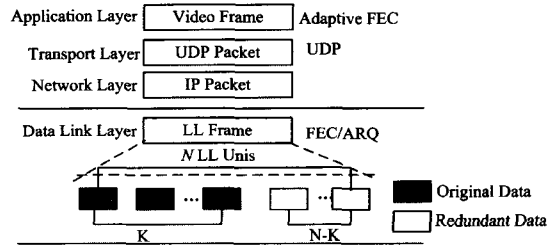


图 4 自适应混合 FEC/ARQ 控制策略分层模型

3.3.2 自适应混合 FEC/ARQ 算法设计

在分析 Kalman 滤波器预测网络状态、FEC 自适应算法和 ARQ 自适应算法的基础上, 本节提出一种基于预测的数据链路层自适应混合 FEC/ARQ 控制策略。基于无线流媒体的通过程, 本控制策略在发送方和接收方的具体流程如图 5 所示。

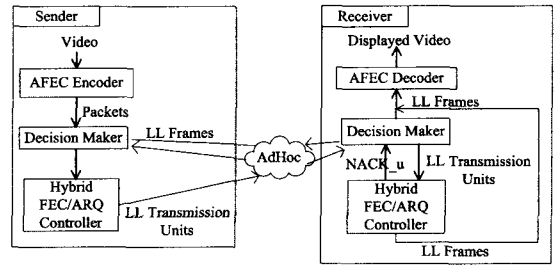


图 5 自适应混合 FEC/ARQ 结构图

基于 Kalman 滤波的无线流媒体自适应链路层混合 FEC/ARQ 控制策略算法描述如下。

Step1 在发送方, 视频源数据帧由应用层的 AFEC 编码器采用自适应 FEC 算法编码。

Step2 在数据链路层封装为链路层数据帧, 发送方 Decision Maker 判断当前的链路层数据帧 (LL Frame) 是否丢失。

Step3 如果未丢失, 则将该链路层数据帧发送出去; 如果丢失, 即收到一个 NACK, 则启动发送方 Hybrid FEC/ARQ Controller。

Step4 由 Kalman 滤波器预测下一时刻的丢包率, 然后启用自适应链路层 FEC 机制, 将链路层该数据帧分割为 K 个链路层传输单元 (LL Transmission Units) 并添加 $N-K$ 个冗余码编码成 N 个链路层传输单元, 最后发送 N 个链路层传输单元; 如果收到 $NACK_u$ ($NACK_u$ 用于统计待重传链路层传输单元个数), 则启用自适应链路层 ARQ 机制重传 $NACK_u$ 个缺失的链路层传输单元, 使接收方能正确解码并重组丢失的链路层数据帧。

Step5 接收方收到的数据首先送至接收方分流器 Decision Maker, 判断收到的数据是链路层数据帧还是链路层传输单元。

Step6 如果是链路层数据帧, 则直接送至上层, 由应用层的 AFEC 解码器进行解码, 得到可播放的视频源数据帧。如果是链路层传输单元, 则启动接收方 Hybrid FEC/ARQ Controller。接收方 Hybrid FEC/ARQ Controller 判断收到的

链路层传输单元个数 N_{LLu} (N_{LLu} 表示接收方收到的属于同一个链路层数据帧的链路层传输单元的个数) 是否大于等于 K (K 表示将链路层数据帧分割成 K 个链路层传输单元)。如果大于等于 K , 则进行解码并重组链路层数据帧, 然后发送至上层, 由应用层的 AFEC 解码器进行解码, 得到可播放的视频源数据帧; 如果小于 K , 则求出 $NACK_u$ ($NACK_u = K - N_{LLu}$) 并发送至分流器 Decision Maker, 分流器 Decision Maker 把 $NACK_u$ 反馈给发送方。

发送方和接收方 Hybrid FEC/ARQ Controller 流程图分别如图 6 和图 7 所示。

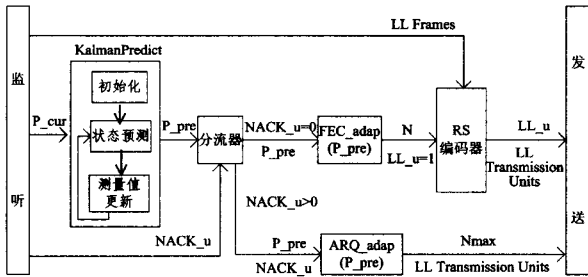


图 6 发送方 Hybrid FEC/ARQ Controller 流程图

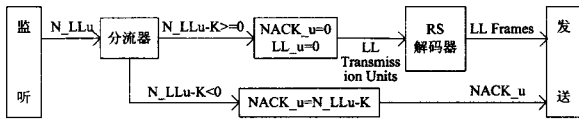


图 7 接收方 Hybrid FEC/ARQ Controller 流程图

4 算法性能分析和评价

本节通过 NS 仿真的方法对上文提出的自适应混合 FEC/ARQ 控制策略进行性能分析。数据源为电影星球大战 (StarWarsIV) 的一个片断^[1], 视频编码格式为 MPEG-4 (GOP 模式: IBBPBB PBBPBB), 其余各参数取值如表 1 所列。其中, N_F , N_P 分别表示 GOP 中帧的数量和 P 帧个数, 而 S_I , S_P 和 S_B 分别表示 I 帧、P 帧和 B 帧大小。

表 1 参数设置

参数	值
仿真时间	50s
拓扑大小	800m * 800m
移动节点数目	50
通信源	MPEG-4 video
数据包大小	1500bytes
传输协议	UDP
路由协议	DSR
MAC 协议	IEEE802.11
移动节点停止时间	0sec
移动模型	Random waypoint
会唔个数	1
最大移动速度	10m/s
T	0.01s
N_F	15
N_P	4
S_I	20bytes
S_P	12bytes
S_B	3bytes
Δt	0.9s

图 8 给出了基于 Kalman 滤波器预测的数据链路层自适应混合 FEC/ARQ 控制策略与仿真实验结果在丢包率、端到端时延和最大可解码帧数等几个方面的性能比较。该控制策略是基于 Kalman 滤波器预测丢包率, 因此可以自适应调整

FEC 参数 N , 改善流媒体传输质量, 使得丢包率明显降低 (如图 8(a) 所示)。滤波器预测功能的实现, 能够很好地解决由于反馈报文丢失所造成的发送速率波动问题。该控制策略对于丢包率较高的网络环境能提供更为可靠的服务。

从图 8(b) 可以清楚看到仿真实验统计得到的端到端时延在 0.04s 上下浮动, 而且抖动激烈。通过观察自适应混合差错控制策略的分析结果可知, 混合差错控制策略中的 ARQ 根据当前的网络状态自适应调整参数 N_{max} , 避免了不必要的数据重传, 使得端到端时延明显下降, 其变化趋于平缓且小于 0.02s。因此, 在无线信道质量较好的情况下, 自适应调整 ARQ 参数 N_{max} , 可以有效地提高无线流媒体传输的实时性并减少时延抖动。从图 8(c) 的对比结果可以看出, 在 0~16s 之间, 因为丢包率较高, 使得接收方根本无法解码, 致使可解码帧数为 0; 使用该自适应混合差错控制策略可以有效地降低丢包率, 提高网络的吞吐量, 使得发送一个 GOP 的可用带宽大大增加, 从而提高接收方的可解码帧数。表明本文的方法在相同的网络条件下可以显著提高 GOP 中的可解码帧数量。这说明该控制策略是有效的, 能根据当前的网络状态确定最优的数据发送模式。

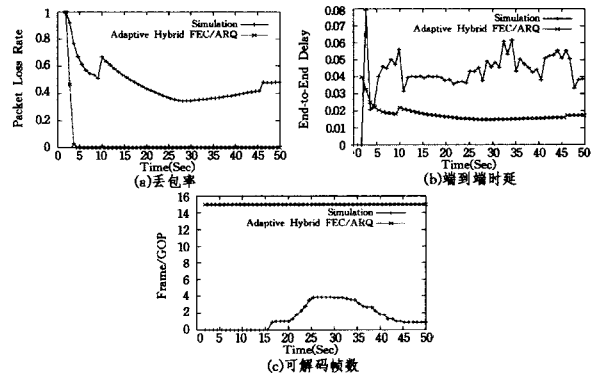


图 8 仿真实验与自适应混合 FEC/ARQ 流媒体性能分析

结束语 无线传输的固有特性使得在无线环境下为实时流媒体应用提供 QoS 保证面临更多的挑战。针对无线流媒体传输, 本文提出了一种基于预测的数据链路层自适应混合 FEC/ARQ 控制策略。该策略基于 Kalman 滤波器预测当前的网络状态, 在网络带宽资源充裕的假定下, 自适应地调整 FEC 参数 N 和 ARQ 参数 N_{max} , 获得最大的可播放帧率; 同时, 在应用层采用自适应 FEC 策略, 动态地调整视频帧的发送类型和速率, 在视频源数据和冗余数据之间动态分配网络带宽。数学分析与仿真实验证明, 该策略能够适应无线网络状态的变化, 有效提高了流媒体传输的可靠性和实时性。下一步的工作是进一步优化 Kalman 滤波器模型, 提高丢包率预测的准确性和实时性。另一方面, 进一步优化发送方和接收方的各功能模块及其算法, 降低自适应混合控制策略总体计算复杂度, 以提高其工作效率。

参考文献

- [1] Zhang Q, Zhu W, Zhang Y Q. A Cross-Layer QoS-support Framework for Multimedia Delivery over Wireless Internet [J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, Special Issue on Cross Layer Design for Communications and Signal Processing Systems, 2005(1): 207-219

(下转第 111 页)

- verlay Architecture for Interest Management of Massively Multiplayer Online Games[C]//Proc. of the International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video, Washington, ACM, 2005; 99-104
- [3] Christoph N, Nicolas P, Matteo V, et al. Challenges in Peer-to-Peer Gaming[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(1): 79-82
- [4] Zhou Jin, Tang Li, Li Kai, et al. A Low Latency Peer to Peer Approach for Massively Multiplayer Games[M]. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2006; 120-131
- [5] Baughman N E, Liberatore M, Levine B N. Cheat-proof payout for centralized and distributed online games[C] // Proc. of Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Anchorage; IEEE, 2001, 15(1): 104-113
- [6] Chris G D, Daniel Z, Virginia L, et al. Low latency and cheat-proof event ordering for peer-to-peer games[C]//Proc. of the 14th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video. Cork; ACM, June 2004; 134-139
- [7] Corman A B, Douglas S, Schachte P, et al. A Secure Event Agreement (SEA) protocol for peer-to-peer games[C]//Proc. of the First International Conference on Availability, Reliability and Security. IEEE Computer Society, 2006; 34-41
- [8] Chan M C, Hu Shun Y, Jiang J R. An Efficient and Secure Event Signature (EASES) Protocol for Peer-to-Peer Massively Multiplayer Online Games[J]. Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2007, 52(9): 1037-1046
- [9] Knutsson B, Lu Honghui, Xu Wei, et al. Peer-to-Peer Support for Massively Multiplayer Games[C] // Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. 2004; 96-107
- [10] Iimura T, Hazeyama H, Kadobayashi Y. Zoned Federation of Game Servers; a Peer-to-Peer Approach to Scalable Multi-player Online Games[C] // Proc. of 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Network and System Support for Games. ACM, 2004; 116-120
- [11] Cecin F R, Martins M G. FreeMMG; a hybrid peer-to-peer and client-server model for massively multiplayer games[C] // Proc. of 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Network and System Support for Games. Portland; ACM, 2004; 172-172
- [12] Douglas S, Tanin E, Harwood A. Enabling massively multiplayer online gaming applications on a p2p architecture[C]//Proc. of the International Conference on Information and Automation. Colombo; IEEE, 2005; 7-12
- [13] Rowstron A, Druschel P. Pastry: Scalable, decentralized object location and routing for large-scale peer-to-peer systems[R]. LNCS-2218 In Penn CIS Tech Report. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2004; 329-351
- [14] 石祥滨, 王越, 李强. 一种适合 P2P MMOG 的移动代理迁移策略[J]. 计算机工程, 2008, 34(4): 146-148
- [15] 石祥滨, 杜玲, 邢元胜. 基于 P2P 的 MMOG 中动态负载均衡算法[J]. 计算机工程, 2007, 33(16): 86-87, 91

(上接第 98 页)

- [2] Shah S. Dynamic Channel-aware Bandwidth Management in IEEE 802. 11 Networks [D]. Urbana-Champaign, USA; University of Illinois, September 2005
- [3] Zhang Z J. Guaranteeing End-to-End Adaptive QoS in Wireless Multimedia Networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(8): 1064-1073
- [4] Subramanian V, Kalyanaraman S, et al. Hybrid Packet FEC and Retransmission-based Erasure Recovery Mechanisms (HARQ) for Lossy Networks; Analysis and Design[C]//Proc. of Wireless Systems: Advanced Research and Development (WISARD). Bangalore, India (Invited paper), January 2007
- [5] Azouzi R E, Peyre T, Benslimane A. Optimal design of hybrid FEC/ARQ schemes for real-time applications in wireless networks[C]//Proc. of the 2nd Workshop on Wireless Multimedia Networking and Performance Modeling (WMuNeP). Terromolinos, Spain, 2006; 11-18
- [6] Mei Z. An Adaptive Forward Error Correction Algorithm for Streaming Video[J]. Journal of Software, 2004, 15(9): 1405-1412
- [7] Barakat C, Fawal A A. Analysis of link-level hybrid FEC/ARQ for wireless links and long-lived TCP traffic [J]. Performance Evaluation (Elsevier), 2004, 57(4): 453-476
- [8] Kim W, Jang H J, Kim G Y. Transmission Rate Prediction of VBR Motion Image Using the Kalman Filter[C] // Proc. of Workshop on Information Systems Information Technologies (ISIT). Seattle, Washington, USA, 2006; 106-113
- [9] 陈云鹏, 张培仁, 高修峰. 无线视频的一种码率控制方法[J]. 通信学报, 2006, 27(3): 94-98
- [10] Jing Z R, Yang Y, et al. Signal detection and estimation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004
- [11] StarWarsIV[EB/OL]. www. tkn. tu-berlin. de/research/trace/ltvt. html
- [12] Cai J F, Chen C W, Zhang Q. An FEC - based Error Control Scheme for Wireless MPEG-4 Video Transmission[C] // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2000). Chicago, USA, 2000; 1243-1247
- [13] Johanson M. Adaptive Forward Error Correction for Real-time Internet Video[C]//Proc. of the 13th Packet Video Workshop. Nantes, France, 2003
- [14] RFC3580. IEEE 802. 1X Remote Authentication Dial in User Service (RADIUS) Usage Guidelines[S]. 2003