

文章编号: 1001-0920(2006)10-1153-06

## 无线视频通信中信道自适应差错控制策略的研究

温建伟, 戴琼海, 金以慧  
(清华大学 自动化系, 北京 100084)

**摘要:** 针对无线视频通信中现有的差错控制方法的缺点和局限性, 根据无线信道高误码率和高时变性的特点, 提出一种基于反馈的信道自适应差错控制策略。根据反馈信号预测未来信道的状态, 自适应地调整冗余信息值, 优化无线视频通信系统的传输效率, 使其在稳定性、功率消耗和传输效率之间达到有效的折衷。仿真结果表明, 该方法能有效地提高无线视频通信系统的传输效率, 尤其在无线信道误码率变化剧烈的情况下, 效果更加明显。

**关键词:** 视频编码; 无线视频通信; 差错控制; 反馈控制

**中图分类号:** TP18 **文献标识码:** A

## On Channel-adaptive Error Control Technique for Wireless Video Communication

WEN Jian-wei, DAI Qiong-hai, JIN Yi-hui

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: WEN Jian-wei, E-mail: wenjw02@mails.tsinghua.edu.cn)

**Abstract:** The important issues of error control for video transmission are discussed. An adaptive error resilient scheme in transport layer is presented for enhancing the robustness. To optimize the transmission efficiency with the limitation of bandwidth and power consumption, the error resilient scheme accounts for the characters of high error rate and time variability in wireless video delivery, adjusts the percentage of the redundancy in the transport packets adaptively, and performs the optimal tradeoffs between throughput, reliability and delay depending on the channel conditions. The simulation results show a significantly improved visual performance and transmission efficiency for the transmitted video over a variety of wireless channel conditions.

**Key words:** Video encoding; Wireless video delivery; Error control; Feedback control

### 1 引言

第 3 代无线网络(3G)标准的制定和采用,使得在无线信道上进行实时的视频通信成为可能<sup>[1]</sup>。无线视频传输中要面临 3 方面挑战,即压缩效率、功率分配和差错控制<sup>[2]</sup>。无线视频系统的设计即是考虑到上述 3 个问题的折衷。显然,对于高误码率的易错无线网络而言,差错控制的问题更为本质。与其他无线通信系统相同,无线视频传输中的一个根本问题是由于无线信道的噪声造成传输过程中信息的改变与丢失。而通常无线视频通信具有实时性的要求,这种差错会造成视频质量的严重下降,甚至导致通信

的中断<sup>[3]</sup>。因此,只有处理好无线视频传输中的差错控制问题,其余两个问题才能得到有效的解决。

为了处理多媒体传输中的差错问题,已经提出了很多有价值的方法<sup>[4]</sup>。究其本质而言,就是在编码器的波形编码、熵编码和传输编码等阶段加入一定数量的冗余信息,以利于解码器端的差错探测和差错隐藏。显然,这种冗余信息的引入必将会降低整体的编码效率,影响视频质量。视频质量、冗余信息与误码率之间的关系如图 1 所示。

处理传输差错的经典方法是前向差错纠正(FEC)技术。为了处理简便,FEC 的冗余量均参照

收稿日期: 2005-07-11; 修回日期: 2005-09-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60432030)。

作者简介: 温建伟(1980—),男,辽宁葫芦岛人,博士生,从事无线视频通信的研究;戴琼海(1964—),男,上海人,教授,从事数字媒体与宽带网络等研究。

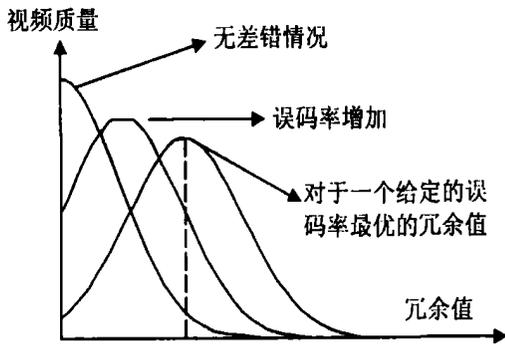


图 1 易错信道视频质量与冗余的关系

应用网络中最恶劣的条件设计。但由于无线网络误码率剧烈变化实时性强，冗余的数量会超乎想象，使 FEC 的效率受到了限制并大打折扣，系统的传输效率大大降低<sup>[6]</sup>。闭环差错控制技术如自动重传请求 (ARQ) 技术，则比 FEC 更有效率，并且在无线视频传输中得到了成功的应用。但是，损坏的数据帧的重传将会引入额外的延迟，这使其在实时会话或交互服务中的使用受到限制。作为一种折衷，可以将 FEC 与 ARQ 两种方法结合使用，限定重传的次数以满足时延的要求，即混合 ARQ/FEC 方法<sup>[5]</sup>。但该方法仍然受到 FEC 编码效率的限制，而且自动重传的次数也是预先固定的，不能根据信道条件应用的需求而适时调节，无线通信信道的差错也无法避免。

为了实现视频数据在无线网络的高效传输，本文提出一种信道自适应混合 ARQ/FEC 的差错控制框架。该框架基于编码器端简单的反馈信息，统计跟踪无线信道误码率，并对无线信道环境进行一步预测，自适应地优化冗余信息的大小，以达到无线视频通信系统在抗差错能力和传输效率之间的最优折衷。

## 2 基于反馈的信道自适应差错控制策略

由于无线信道的信号衰落、移动方式和移动节点本身的位置等影响，无线信道误码率较高且变化剧烈，很难为其建立一个标准的模型。在很多研究中，只是理想化地将信道假想为一个差错的生成器，将误码率作为刻画无线信道的主要参数。本文也是这样处理。首先，提出了信道自适应混合 ARQ/FEC

视频容错传输系统的整体结构框架；其次，分别对统计丢包率、估计信道误码率和优化冗余信息所占比例等功能模块的设计进行详尽的描述。

### 2.1 信道自适应混合 ARQ/FEC 的系统框架

对于一般的无线视频通信系统而言，主要考虑 3 部分的功能结构，即编码器、解码器和传输信道。图 2 给出了基于反馈的信道自适应混合 ARQ/FEC 容错控制机制的功能性结构。

由于一般的移动视频终端功率较小，且处理能力相对较弱，不适合在解码器端分配较多的任务。如图 2 所示，接收端只需要根据接收到的数据包状态进行差错探测，并根据得到的正确或错误的探测结果，将正确接收确认 (ACK) 信号和错误接收确认 (NACK) 信号通过后向信道反馈给发送端。

反馈信号 ACK 和 NACK 虽然较为简单，但其中蕴含了大量的信道信息。首先，ACK 标志着一个数据包被正确接收，NACK 标志着该数据包未得到正确接收；其次，通过统计一段时间间隔内的 ACK 和 NACK 所占的比重，可以得到在该段时间间隔内，无线视频通信系统在数据传输过程中的丢包率，它间接反应了该时段内无线信道的差错特性和工作状态；再次，编码器端发送一个数据包到该数据包的确认信息返回经历了一个回路时间，这个回路时间的大小可以表明在此过程中，无线通信信道是否发生了拥塞，以及当前设置的最大重传次数是否满足无线视频通信系统的延迟的要求。这些信息对于编码器估计信道状态、实时调整系统参数是非常宝贵的。

编码器端在收到接收端的反馈信号后，要进行一系列的处理，以尽可能准确快速地获得前一时段的信道信息，并且根据历史信息对未来时刻的信道状态进行估计。这种估计会指导编码器对信道的变化作出相应的反应，以尽可能提高无线信道的传输效率。如图 2 中所示，这些处理主要包括统计计算丢包率、估计信道误码率和优化传输层冗余信息所占的比例等。下面将详细介绍它们的工作流程。

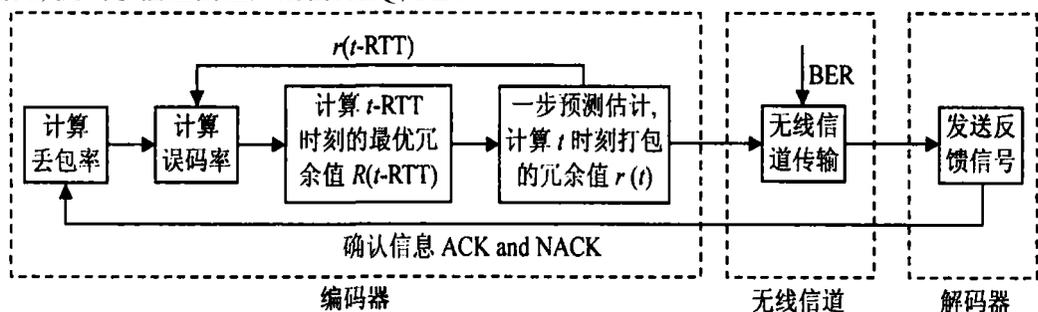


图 2 信道自适应混合 ARQ/FEC 容错框架功能性结构

## 2.2 信道自适应混合 ARQ/FEC 系统的工作原理

在具体介绍工作原理之前, 首先需要对误码和丢包作一个明确的定义。视频数据是以一个个数据包的形式在无线信道中传输的, 由于无线信道的噪声和外界环境的干扰, 数据在传输过程中会出现一些差错, 如单个比特差错和连续比特差错等。对于连续比特差错, 可以采用交织等技术避免, 这里不作考虑。单个比特差错的形式主要有比特丢失、比特翻转等。在传输层采用前向纠错编码(FEC), 在数据包中加入冗余数据。假定数据包的长度为  $N$ , 冗余数据的长度为  $R$ , 则可以纠正的错误个数为  $(R - 1)/2$ 。当差错数超过  $(R - 1)/2$  时, 则认为该数据包不能得到无损的恢复, 系统出现了数据包的丢失, 需要发送端重传该数据包。如果在有限的重传限制的范围内, 接收端没能正确接收到该数据包, 编码器会采用一定的差错隐藏技术, 对视频数据进行尽可能的恢复, 提高视频质量。

这里定义的丢包率是指在一段时间间隔内的统计平均值, 它与选取的反馈信息的样本数密切相关, 反映在一段时间内的丢包数与发送的总数据包数的百分比。显然统计的数据包数越多, 平均丢包率越稳定。丢包率是用来计算和估计无线信道的误码率的, 而系统需要的是当前的网络状态, 即误码率的瞬时值, 用平均丢包率进行计算来得到平均误码率, 然后, 用误码率的平均值来替代瞬时值。这就要求统计得到的丢包率应尽可能地贴近当前的网络状态, 因此, 用来统计的数据包不能太多, 而且应该是离当前时间最近的反馈信息。

为了获得更准确的丢包率, 需要将无线信道分成两个不同的状态, 即稳态和暂态。所谓稳态, 是指无线信道、移动终端和外界环境没有剧烈的变化, 无线信道的误码率没有剧烈的波动。实践观察表明, 稳态持续的时间较长, 系统运行稳定, 没有显著的质量波动, 无线视频通信系统多数时间处在一种稳态。所谓暂态, 是指无线信道的状态在两种稳态之间过渡的阶段。或者是移动终端运动变化剧烈, 或者是外界环境显著改变, 无线信道的误码率时变性很强, 通常, 这种状态不会持续很长时间。显然, 对于这两种不同的状态, 丢包率的统计应采用不同的方法, 以更好地反应当前的网络状态。

当无线信道处于稳态时, 无线信道的误码率相对平稳, 因此视频数据传输过程中的丢包率也相对平稳。显然, 为了更准确地反应新到的当前差错特性, 统计丢包率的数据包样本总数应该相对大一些。一般的方法是, 每收到一个新的反馈信息, 就将它加到已有的历史信息中, 得到一个新的丢包率平均值。

这种方法处理简便, 但随着样本数的不断增加, 会达到一种数据饱和, 即新的反馈信息对总的统计结果影响很小, 显然, 这不利于对无线信道状态的跟踪, 所以应限定统计样本的数量。一个改进的方法称为限定记忆法。采用最近收到的若干个反馈信息来统计丢包率, 每收到一个新的反馈信息时, 就用它替代样本中距离当前时间间隔最长的反馈数据, 得到新的丢包率。这样统计得到的丢包率相对准确, 更能反映当前的网络状态。至于具体采用多大的样本数量, 则与移动模式等实际应用环境有关。

当无线信道处于暂态时, 无线信道的误码率从一个统计值向另外一个统计值跃迁, 视频数据的丢包率会变化较大。这时, 限定记忆法使用的统计样本数量仍然相对较大, 不能快速地跟踪无线信道的状态变化。在发送端收到的所有反馈信息中, 最后收到的反馈信息显然最能反映当前的信道特性, 不妨称其为新息。为了增加新息在所有反馈信息中的权重, 使丢包率更贴近当前的信道状态, 使用相对较小的统计样本, 采用系统辨识中的经典方法——迭代的遗忘因子法来统计信道的丢包率。

为了得到及时准确的信道丢包率, 将信道分成稳态和暂态两种不同的状态是十分必要的。而如何判断当前的无线信道所处的状态, 以及如何在这两种状态之间自由切换而不引起系统的振荡, 则又是一个重要问题。这里采用一种预警机制, 使用丢包率的一个局部值作为状态变化的预警值。统计最近很少量的几个数据包的反馈信息, 检测其是否出现了显著异常。当局部统计值明显异常时, 说明无线视频通信系统的外界环境发生了显著的变化, 系统处于状态变化时期, 则将当前的信道状态改为暂态, 以改变当前的差错控制机制和统计丢包率的方法。进一步的细化, 暂态还可以分为上暂态和下暂态。所谓上暂态是指信道的状态由好变坏, 信道的误码率与丢包率由低变高; 所谓下暂态则是指信道的状态由坏变好, 信道的误码率与丢包率由高变低。这两种暂态与稳态之间相互转换的域值是不同的, 具体的取值与实际的系统密切相关。

在上一个功能模块中, 已经得到了信道丢包率的统计平均值。利用得到的丢包率和丢包率与信道误码率的统计关系, 采用一定的数值分析方法, 就可以得到信道误码率的一个统计平均值, 并以此近似信道的瞬时误码率。然而, 这时的误码率反映的是一个回路延迟之前的信道状态, 并不是信道未来的状态。根据这个误码率, 可以得到该延迟之前最优的冗余信息的数量。为了得到当前冗余信息的最优值, 应采用预测控制的思想对该最优值进行调整, 估计当

前冗余信息的最优值 对于稳态的情况, 这个最优值变化不大, 可以直接采用; 而对于暂态情况, 则需要在此基础上加入一定的偏移量 然后, 据此调整冗余信息的数量, 对视频数据打包传输

### 3 算法的形式化及参数分析

为了对上述算法进行更为清楚详尽的阐释, 对每一个步骤给出了形式化的描述 首先, 对一些基本概念、符号进行简单的定义 令  $ber$  和  $per$  分别表示无线信道的误码率和丢包率, 令  $N$  表示数据包的总长度,  $r$  表示一个数据包中的冗余信息的长度 则当一个数据包中错误比特的数量超过  $r/2$  时, 则认为该数据包在传输中发生了错误, 由接收端向发送端发送 NACK 信号, 请求发送端重传该数据包; 否则, 认为该数据包被正确接受, 由接收端向发送端发送 ACK 信号, 确认该数据包已经正确到达 当数据包发生错误时, 如果重传次数没有超过最大重传次数的限制, 则等待发送端重传该数据包, 否则解码器采用一系列的技术进行差错隐藏 当给定  $ber$  时,  $per$  可以使用下面的关系式得到:

$$per = 1 - \prod_{i=0}^{\lfloor r/2 \rfloor} C_N^i (ber)^i \cdot (1 - ber)^{N-i} \quad (1)$$

这样, 冗余信息最优值可通过以下方程得到:

$$r_{opt} = \min \{ r \mid per \leq perobj \} \quad (2)$$

其中:  $perobj$  表示无线信道丢包率的期望值, 这与允许的系统延迟、移动终端的功率和处理能力等有关 期望值越大, 说明允许的系统延迟越大, 移动终端的功率和处理能力越强, 无线视频通信系统中实际的平均重传次数越大 令  $t_{avgobj}$  表示系统期望的平均重传次数, 则有下面关系:

$$t_{avgobj} = \frac{perobj}{1 - perobj} \quad (3)$$

在 3G 网络上进行视频传输时, 编码器根据接收端的反馈信息计算信道丢包率的统计平均值, 用  $perobs$  表示 对于稳态情况, 采用限定记忆法计算丢包率, 即

$$perobs(n - rtt_n) = \frac{1}{S} \sum_{i=0}^{s-1} m(n - rtt_n - i) \quad (4)$$

其中:  $n$  表示当前时刻;  $rtt_n$  表示一个回路时间内传输的数据包个数;  $S$  表示用于统计计算的数据包样本的数量;  $m(i)$  表示第  $i$  个时刻传输的数据包反馈信息, 值为 1 代表 NACK, 表明数据包在传输过程中发生了差错; 值为 0 代表 ACK, 表明数据包被正确接收 用相对较少的数据包样本值  $s$  替代  $S$ , 则方程 (4) 可以用来计算状态预警值,  $s$  越小, 表示系统对无线信道状态的改变越敏感, 同时在无线信道受到

一个扰动时, 系统的振荡也越激烈 当局部丢包率统计值, 即预警值超过预先设定的改变状态的域值时, 则认为无线信道的状态发生了改变, 系统的状态也将发生相应的改变  $tsh_{su}$  和  $tsh_{sd}$  分别表示从稳态变换到上暂态和下暂态的域值,  $tsh_{us}$  和  $tsh_{ds}$  分别表示从上暂态和下暂态变换到稳态的域值 为了防止系统的振荡, 采用过量控制的思想,  $tsh_{us}$  和  $tsh_{su}$ ,  $tsh_{ds}$  和  $tsh_{sd}$  的取值并不相同

对于暂态情况, 采用迭代遗忘因子法计算丢包率

$$\begin{aligned} perobs(n - rtt_n) = & \\ & (perobs(n - rtt_n - 1) \times \beta + \\ & \frac{1}{s} m(n - rtt_n)) \times \frac{1}{1 + \beta} \end{aligned} \quad (5)$$

迭代的初始值按下式设置:

$$\begin{aligned} perobs(n - rtt_n) = & \\ & (perobs(n - rtt_n - s) \times \beta + \\ & \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} m(n - rtt_n - i) \cdot \beta^i) \times \frac{1 - \beta}{1 - \beta^{s+1}} \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $\beta$  表示遗忘因子, 通常在 0.95 ~ 1 之间取值, 且  $\beta$  的值决定系统对信道误码率变化的跟踪步长,  $\beta$  越大, 跟踪的步长也越大

根据观测到的丢包率  $perobs$  和丢包率与误码率之间的关系式 (1), 采用数值分析法, 得到无线信道的平均误码率  $berobs$  根据关系式 (2) 得到第  $n - rtt_n$  时刻系统的最优冗余信息值  $r_{opt}(n - rtt_n)$ .

对于稳态的情况, 误码率的变化较小, 稳定在一个数值附近, 因此可认为  $r_{opt}(n - rtt_n)$  仍是当前要传输的数据包冗余信息的最优值, 即

$$r(n) = r_{opt}(n - rtt_n) \quad (7)$$

然而, 对于暂态的情况, 无线信道的误码率随时间剧烈变化 这种延迟的因素必须要考虑在内, 需要对  $r_{opt}(n - rtt_n)$  进行一定的调整以得到  $r(n)$

$$r(n) = r_{opt}(n - rtt_n) + (r_{opt}(n - rtt_n) - r(n - rtt_n)) / 2 \quad (8)$$

为了反映无线视频通信系统中数据重传的影响, 定义表示传输效率的参数  $\gamma$ , 它是传输的有效数据与所有传输数据的比值

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} (N - R_i)}{N n_p + \sum_{i=1}^{n_p} t_i} \quad (9)$$

其中:  $n_p$  表示需要传输的数据包的总数,  $t_i$  表示第  $i$  个数据包的重传次数,  $t_{max}$  表示无线视频通信系统允

许的最大重传次数,  $N$  表示一个数据包的长度,  $R_i$  表示第  $i$  个数据包的冗余信息的长度 在平均重传次数一定的情况下, 传输效率  $\gamma$  是重要的衡量指标

### 4 仿真实验

#### 4.1 仿真环境与仿真结果

在一些研究中, 提出了用于无线视频传输的测试条件<sup>[7]</sup>. 这个通用的条件测试定义了 6 种不同的典型情况, 包括 3G 移动网络上的分组交换会话服务和分组交换流服务. 其相应的码率、数据长度、误码率和移动速度等如表 1 所示

表 1 误码模式

	码率 / (kbit/s)	数据长度 / s	误码率	移动速度 / (km/h)	应用
1	64	60	9.3e-3	3	Streaming
2	64	60	2.9e-3	3	Streaming
3	64	180	5.1e-4	3	Conversational
4	64	180	1.7e-4	50	Conversational
5	128	180	5.0e-4	3	Conversational
6	128	180	2.0e-4	50	Conversational

据此, 假定无线环境在模式 1 和模式 2 之间转变, 相应的平均误码率在 9.3e-3 和 2.9e-3 之间变化. 并对提出的算法进行仿真, 参数设定如下:  $N = 255$  字节,  $n_p = 6000$ ,  $t_{max} = 5$ ,  $S = 1000$ ,  $s = 100$ ,  $\beta = 0.95$ ,  $perobj = 0.05$ ,  $tsh_{su} = 2.5 perobj$ ,  $tsh_{us} = perobj$ ,  $tsh_{sd} = 0$ ,  $tsh_{ds} = 1.5 perobj$ . 根据给定的无线信道的误码率变化趋势和本算法的相关定义, 传输层的最优冗余信息值应在 20 字节和 50 字节之间变化

对于传统的 ARQ/FEC 方法, 冗余信息值是固定的, 当取值超过最大最优值 50 字节值和低于最小最优值 20 字节时, 传输效率低下, 会影响视频传输. 当取值为 36 字节时, 效果最好. 整个传输过程中, 每个数据包的平均重传次数是 0.122 次, 丢失 24 个数据帧, 传输效率为 76.56%. 仿真结果如图 3 所示

对于本文提出的信道自适应 ARQ/FEC 方法, 整个传输过程中, 每个数据包的平均重传次数是 0.053 次, 丢失 2 个数据帧, 每个数据包中的冗余信息平均占用 28.497 字节, 传输效率达到 82.70%. 仿真结果如图 4 所示

#### 4.2 与理论最优值及前人方法的比较

对于理想的与误码率变化完全匹配的理论最优值, 无线视频通信系统的传输效率能达到 88.63%. 在未知信道误码率的情况下, 采用传统的 ARQ/FEC 方法, 传输效率最高能够达到 76.56%, 但丢帧数量较多.

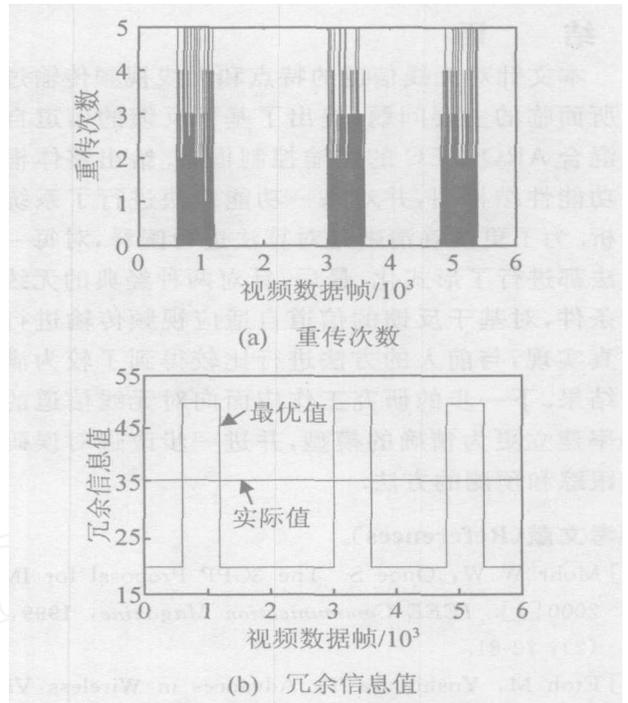


图 3 传统 ARQ/FEC 方法中每个数据帧的重传次数和冗余信息值

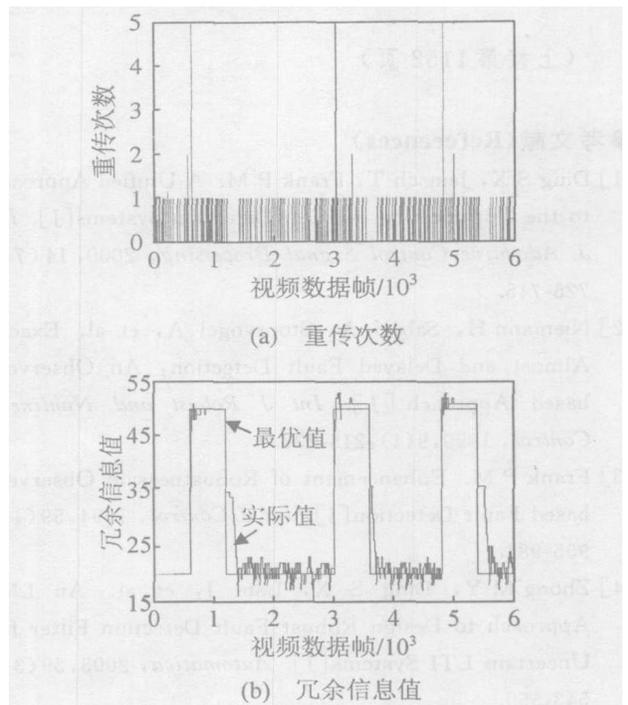


图 4 信道自适应 ARQ/FEC 方法中每个数据帧的重传次数和冗余信息值

与前人的方法比较, 在不可获得网络先验知识的情况下, 信道自适应混合 ARQ/FEC 差错控制框架有以下两个突出优点: 1) 能够保证无线视频服务的连贯与顺畅, 不会由于突然出现的环境改变而导致连接中断; 2) 在对网络条件一无所知的情况下, 通过学习实现传输效率的优化, 节约网络资源

## 5 结 语

本文针对无线信道的特点和无线视频传输过程中所面临的主要问题,提出了基于反馈的信道自适应混合ARQ/FEC的传输控制框架,给出整体框架的功能性结构图,并对每一功能模块进行了系统的分析.为了更准确清晰地对算法进行阐释,对每一步算法都进行了形式化.最后,针对两种经典的无线信道条件,对基于反馈的信道自适应视频传输进行了仿真实验,与前人的方法进行比较得到了较为满意的结果.下一步的研究工作应面向对无线信道的误码率建立更为精确的模型,并进一步改进对误码率的跟踪和预测的方法.

### 参考文献(References)

- [1] Mohr W W, Onoe S. The 3GPP Proposal for MT-2000 [J]. *IEEE Communication Magazine*, 1999, 37(2): 72-81.
- [2] Etoh M, Yoshimura T. Advances in Wireless Video Delivery [J]. *Proc IEEE*, 2005, 93(1): 111-122.
- [3] Zhang Q, Zhu W, Zhang Y. Channel-adaptive Resource Allocation for Scalable Video Transmission over 3G Wireless Network [J]. *IEEE Trans on Circuits System Video Technology*, 2004, 14(8): 1049-1063.
- [4] Wang Y, Zhu Q F. Error Control and Concealment for Video Communication: A Review [J]. *Proc IEEE*, 1998, 86(5): 974-997.
- [5] Zhang Q, Kassam S A. Hybrid ARQ with Selective Combining for Fading Channels [J]. *IEEE J Select Areas Communication*, 1999, 17(5): 867-880.
- [6] Girod B, Faber N. Feedback-based Error Control for Mobile Video Transmission [J]. *IEEE Proc*, 1999, 87(10): 1707-1723.
- [7] Stockhammer T, Hannuksela M M, Wiegand T. H. 264/AVC in Wireless Environments [J]. *IEEE Trans on Circuits System Video Technology*, 2003, 13(7): 657-673.

(上接第 1152 页)

### 参考文献(References)

- [1] Ding S X, Jeansch T, Frank P M. A Unified Approach to the Optimization of Fault Detection Systems [J]. *Int J Adaptive Control Signal Processing*, 2000, 14(7): 725-745.
- [2] Niemann H, Saberi A, Stoorvogel A, et al. Exact, Almost and Delayed Fault Detection: An Observer-based Approach [J]. *Int J Robust and Nonlinear Control*, 1999, 9(4): 215-238.
- [3] Frank P M. Enhancement of Robustness in Observer-based Fault Detection [J]. *Int J Control*, 1994, 59(4): 955-981.
- [4] Zhong M Y, Ding S X, Lam J, et al. An LMI Approach to Design Robust Fault Detection Filter for Uncertain LTI Systems [J]. *Automatica*, 2003, 39(3): 543-550.
- [5] Nobrega E G, Abdalla M O, Grigoriadis K M. LMI-based Filter Design for Fault Detection and Isolation [A]. *Proc of the 39th Conf on Decision and Control [C]*. Australia, 2000: 4329-4334.
- [6] Frank P M, Ding S X. Survey of Robust Residual Generation and Evaluation Methods in Observer-based Fault Detection Systems [J]. *J of Process Control*, 1997, 7(6): 403-424.
- [7] Wu F, Grigoriadis K M. LPV Systems with Parameter-varying Time-delays: Analysis and Control [J]. *Automatica*, 2001, 37(2): 221-229.
- [8] Zhang X P, Tsiostras P, Knospe C. Stability Analysis of LPV Time-delayed Systems [J]. *Int J of Control*, 2002, 75(7): 538-558.
- [9] 郑连伟, 郭立山, 刘晓平. 一类线性参数变化时滞系统的  $H_\infty$  控制 [J]. *控制与决策*, 2001, 16(5): 595-598. (Zheng L W, Guo L S, Liu X P.  $H_\infty$  Control for a Class of Linear Parameter-varying Systems with Time-delay [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(5): 595-598.)
- [10] Apkarian P, Adams R J. Advanced Gain-scheduling Techniques for Uncertain Systems [J]. *IEEE Trans on Control System Technology*, 1998, 6(1): 21-32.
- [11] Apkarian P, Tuan H D, Bernussou J. Continuous-time Analysis, Eigenstructure Assignment, and  $H_2$  Synthesis with Enhanced Linear Matrix Inequalities (LMI) Characterizations [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(12): 1941-1946.