

易错视频传输中基于带宽-失真代价最小化准则的部分重传算法

周树民^{1,2)} 李锦涛¹⁾ 张勇东¹⁾

¹⁾(中国科学院计算技术研究所 北京 100080)

²⁾(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518067)

摘 要 针对视频传输系统主要关注的两个因素:传输所用的总体带宽和终端最终的解码失真,提出带宽-失真(B-D)代价函数的概念,给出B-D关系定理及其证明.利用视频数据本身存在的时空相关的特点,进一步提出了基于最小化B-D代价的部分重传机制.实验结果及分析表明,相对于尽力而为ARQ机制,所提出的算法有如下几个特点:(1)在保持终端接收质量基本不变的前提下,能有效减少带宽(可达20%以上);(2)在低比特率情形下性能比高比特率下的性能要好,所以更适用于低比特应用;(3)对运动平缓和纹理平滑的视频序列更为有效.

关键词 带宽-失真代价函数;部分重传;视频传输;B-D函数

中图法分类号 TP391

Partial Retransmission Based on Minimal Bandwidth-Distortion Cost in Error Prone Video Delivery

ZHOU Shu-Min^{1,2)} LI Jin-Tao¹⁾ ZHANG Yong-Dong¹⁾

¹⁾(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²⁾(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518067)

Abstract There are two critical factors in error prone video transmission: the total usage of bandwidth and the distortion of reconstructed images at receiver side. Therefore, the concept of bandwidth-distortion(B-D) cost is proposed intuitively so as to evaluate a video transmission system more effectively. Further, B-D relationship is provided as a theorem, by which B-D cost function could be definitely made out. With these tools, a partial retransmission scheme based on minimal B-D cost is proposed based on the temporal and spatial correlation in video sequence. From the analytical analysis, it can be seen that B-D cost is more effective than bandwidth or distortion only when evaluating the performance of an error prone video transmission system. Besides, the proposed partial retransmission scheme can reduce the bandwidth usage effectively by the use of the temporal and spatial correlation in video sequence. Simulation results and discussions show that, compared to best effort ARQ scheme (BEARQ), the proposed scheme has the following features: (1) It can reduce the usage of bandwidth (maximally more than 20% on average) while keeping the quality of reconstructed images to be nearly unchanged; (2) It is preferable to be used in low bit rate since its B-D performance is better in low bit rate than in high bit rate; (3) Similarly, it is preferable for the sequence in which motion and texture is relatively slow and smooth since in the case, its B-D performance is better.

Keywords bandwidth-distortion cost; partial retransmission; video transmission; B-D relationship

1 引言

易错信道上视频传输是近年来视频界和通信界一个热点研究课题。目前易错信道主要包括无线网络和 Internet 网。前者出现错误的原因主要是由于无线信道衰落引起的突发数据错误, 后者出现数据丢失的原因主要在于网络拥塞引起的数据包丢失。无论是哪种网络, 在传输层来看, 统一表现为数据包丢失。因此, 为了克服由于网络拥塞或信道传输错误引起的数据包丢失, 需要采取高效的容错算法来保证视频数据的有效传输。

针对视频传输容错技术, 国内外研究者们做了大量的研究工作, 提出了许多有效的机制。文献[1]中对近年来容错算法做了系统全面的论述。该文中把容错分为两大类: (1) 由传统的错误控制机制拓展到视频领域的无失真错误恢复技术, 包括前向错误控制和自动反馈重发两类机制; (2) 解码端的后处理错误检测和恢复技术, 主要是根据视频本身的时空相关性来进行有失真的错误恢复。基于反馈的 ARQ 技术主要应用于尽早防止参考帧错误扩散^[2]和无线链路层以及传输层的错误控制^[3]。在 ARQ 和前向错误控制失效的情况下, 就需要在解码端根据视频本身时空相关性来进行错误检测和恢复。利用视频帧内时间相关性, 文献[4]提出基于相邻块最佳匹配的运动矢量恢复算法; 而根据空间相关性, 文献[5]中给出基于距离权重的简单帧内块恢复技术, 该算法复杂度低但性能不高; 文献[6]中给出了基于空间最大平滑的恢复方法, 该方法虽然能较好保持边缘连续, 但内部纹理不能很好恢复; 文献[5, 7-8]中给出能较好恢复纹理的方法。一般而言, 反馈重发 (ARQ) 需要耗费的信道资源 (包括重传带宽、重传延迟等) 要远远大于接收端后处理容错。而上述这些已有方法的主要设计思想就是在 ARQ 或者前向错误控制失效的情况下, 才考虑采用时间空间相关性来恢复丢失的视频数据。我们可以把这种设计方法称为尽力而为 ARQ + 错误恢复 (Best Effort ARQ + ER, 后文简作 BEARQ)。

从上面分析可知, 这种思想相当于先尽量采用资源耗费大但容错性能好的方法, 而后再采用资源耗费小但相对容错性能差的方法。对视频数据传输而言, 由于视频本身存在较大的时间-空间相关性, 所以在一个数据包传输出错的情况下, 有可能通过

适当的后处理技术恢复出相对无错情况下失真足够小的视频数据。在这种情况下, 如果按照已有方法的设计思想, 显然存在着较大的资源浪费, 使得信道吞吐率不高。本文提出一种新的设计思想, 即在一定带宽和允许延迟限制下, 对丢失数据包中的视频数据, 如果采用错误恢复技术能够得到满足要求的部分视频数据, 则在接收方的传输层将不对该部分数据进行重发, 而直接交由解码器进行错误恢复; 否则, 对不能有效恢复的视频数据再采用传统意义上的 BEARQ 机制。可以看出本文提出的设计思想是一种部分反馈重发机制。文献[9-10]中利用了部分重发 ARQ 来提高信道吞吐, 其中文献[9]是通过在数据流中插入错误检测码 (error detection code) 来实现部分重传, 而文献[10]则是通过利用卷积编码来实现数据的部分重传。从文献[9-10]的分析来看, 部分重传机制在吞吐性能上要优于 BEARQ。但对于视频数据的传输而言, 一方面传输本身需要考虑所耗用带宽的多少, 另一方面由于视频本身可以容忍一定程度的失真, 所以需要把这两个方面有效综合起来考虑, 而不是只考虑带宽或只考虑失真。在视频编码体系中把码率和失真结合起作为编码模式选择的评价依据称为 Rate-Distortion 编码优化控制。与此相对应, 为了把传输耗用的带宽和最后终端接收的图像失真结合起来考虑, 本文提出了一种新的评价手段, 即 Bandwidth-Distortion 代价 (B-D Cost)。这里不能沿用 R-D 的概念是因为对于传输所耗用的实际带宽和终端失真之间并不仅仅依赖于信源本身的 R-D 特性, 还和传输信道密切相关。该方法是在上述概念的基础上, 在一定带宽和允许延迟限制下, 接收端检测到传输出错时, 向发送端发送重传请求; 在发送端, 通过最小化 B-D Cost, 可以得到出错部分的错误恢复模式。而后将错误恢复模式与要重传的数据一起传送到接收端 (假定错误恢复模式可以无错传送到接收端); 最后在接收端, 根据接收到的错误恢复模式来对出错的数据进行恢复。仿真环境下的实验证明: 本文提出的算法相对于 BEARQ 机制在 B-D 性能上有明显的优势。对于带宽受限的易错视频传输, 本文提出的机制能够充分利用信源本身的时空冗余来节省带宽资源, 因而具有很强的实用价值。

本文第 2 节中首先引入 B-D Cost 的定义和说明, 而后从理论上给出 B-D 关系式, 在此基础上, 提出基于最小 B-D Cost 的错误恢复模式选择; 本文

第 3 节提出具体的基于错误模式选择的部分反馈重发机制;第 4 节针对影响所提算法 B-D 性能的各个主要因素,从不同角度对算法性能进行了实验分析;第 5 节对本文加以总结.

2 基于 B-D Cost 最小化的 错误恢复模式选择

本节中首先给出 B-D Cost 的定义,而后从理论分析的角度给出 B-D 模型,该模型是 R-D 模型在考虑了信道错误后的对偶模型,有着和 R-D 相近的形式.最后,结合所提出的模型和所给出的定义定理,给出基于最小化 B-D Cost 的错误恢复模式选择.

2.1 B-D Cost 定义以及 B-D 理论模型

一个视频传输系统,其性能主要从两个方面来衡量:吞吐效率^[10]和接收端重建失真.对吞吐效率,这里沿用文献[10]中对应的概念,但其形式表示改变如下:

$$\eta = \frac{r_s}{B_s} \quad (1)$$

这里 r_s 表示信源编码得到的比特, B_s 表示成功传输 r_s 比特信源数据实际耗用的带宽资源.

对一帧编码好的视频图像,其源编码比特已经确定,所以,式(1)中的吞吐效率将只取决于所耗用的带宽资源 B_s . 对接收端重建失真,由于在传输出错的情况下可能会采取重传和解码端后处理恢复的手段,最终的失真将依赖于信道本身.对于吞吐效率和接收端重建失真之间的关系,理论上我们可以得到如下几个关系式:

$$\eta \rightarrow 0 \Rightarrow d_t - d_s \rightarrow 0 \Leftrightarrow B_s \rightarrow \infty \Rightarrow d_t - d_s \rightarrow 0 \quad (2)$$

式中 d_t 表示最终终端接收的失真, d_s 表示源编码失真

$$\begin{cases} \Pr(B_{s,1} \leq B_{s,2} | d_{t,1} \geq d_{t,2}, p) \rightarrow 1 \\ \Pr(d_{t,1} \geq d_{t,2} | B_{s,1} \leq B_{s,2}, p) \rightarrow 1 \end{cases} \quad (3)$$

$\Pr(\cdot)$ 表示概率大小, p 为信道某时刻的平均丢包率.

式(2)说明了对于任意错误率小于 1 的信道,只要带宽资源(包含了允许延迟)足够大,终端就可实现无错接收.式(3)说明了在一定错误率 p 和一定传输机制前提下,终端接收失真和所耗用的带宽呈反向增长.

对于视频传输系统而言,优化的主要目标是吞

吐率尽可能高的同时使得终端失真尽可能小.而从上面两个方面的分析可以看出,这两个方面呈反比例增长.显然,只考虑其中任何一方都不能实现传输性能上的最优,因而需要提供一种新的评价方法来折衷它们二者的关系.综合以上分析,本文创造性提出了 Bandwidth-Distortion 代价函数来综合以上两个方面的因素来评价视频传输系统.

定义 1. 对于一帧编码好的图像,通过丢包率为 p 的信道,其 B-D Cost 定义为

$$J_{bd}(d_o, r_o, \omega) = (1-\omega)d_o + \omega r_o, \quad \omega \in [0, 1] \quad (4)$$

这里 d_o, r_o 含义如表 1 中所示. ω 是归一化比例权重,主要用来调节两部分因素数值上比例关系.

对定义 1 中的 $d_o - r_o$ (D-B) 关系,下面定理进一步给出其理论上的抽象.

定理 1 (B-D 理论模型). 对一帧编码后的图像,设其满足 Shannon 率失真理的比特和失真分别为 r, d . 经过丢失率为 p 的信道传输后,其理论上最终耗用带宽 r_o 和对应的接收端失真 d_o 有如下关系(我们称之为 B-D 关系):

$$d_o = \begin{cases} \alpha e^{-\beta r_o}, & p > 0, r_o < \left(\frac{p}{1-p} + 1 - p\right)r \\ d, & p = 0 \parallel r_o \geq \left(\frac{p}{1-p} + 1 - p\right)r \end{cases}, \quad (5)$$

$$\alpha = \sigma e^{(1-p)\beta r}, \quad \beta = \frac{1-p}{\gamma p}$$

这里 γ, σ 是与信源本身相关的统计量,对特定的视频图像,它们可以视作常量.

证明. 在理想编码情况下,对一帧编码后的图像失真为 d , 比特为 r , 则按照 Shannon 率失真公式有

$$r = \gamma \ln \frac{\sigma}{d}.$$

假设图像按照理想意义下的逐步精细编码方式编码^[11], 这里理想是指比特流按照率失真性能重要性进行从高到低排序,并且随处截断均满足理想率失真关系,即

$$r_i = \gamma \ln \frac{\sigma}{d_i}, \quad r_i \leq r,$$

d_i 是 r_i 比特解码后得到重建图像的失真

不失一般性,假设压缩后的图像数据按照相等大小的包进行发送,对某时刻的信道而言,每个包的丢包率为 p , 一个包的平均重传次数可以计算为

$$N_{avr} = \sum_{n=1}^{\infty} n(1-p)p^{n-1} = \frac{1}{1-p} \quad (6)$$

所以,我们可以得到如下关系式:

$$\begin{cases} r_o = r_g \frac{1}{1-p} + pr - r_g + (1-p)r = r_g \frac{p}{1-p} + r \\ r_g + (1-p)r = \gamma \ln \frac{\sigma}{d_o} \end{cases} \quad (7)$$

这里 r_g 是指出错的部分被正确重传到接收端的比特数.

当 $r_o \geq \frac{pr}{1-p} + (1-p)r$ 时,所有出错的比特都

实现了重传,所以终端接收失真等于编码端失真,否则,则按照式(7)中的两个关系式,即可得到 d_o 关于 r_o 的表达式(5). 证毕.

从上面的证明可以看出,定理 1 描述的是理想情况下通过易错信道传输压缩视频数据所耗用的带宽和终端接收失真之间的关系. 从中我们不难看出以下几点.

推论 1. 从 Shannon 率失真理论可知,信源失真和所用比特之间的关系是内在的,与具体的编码方法无关,即采用 FGS 编码的极限目标和采用非 FGS 编码的理论极限目标是一致的. 所以,尽管定理 1 的证明是以理想 FGS 为前提进行的,但其结论同样适用于其它类型的编码体制(例如非 FGS)在理想情况下的编码性能.

推论 2. 对于 B-D 代价函数,存在极小值.

推论 3. 考虑了信道传输错误之后的带宽-失真(B-D)关系和 Shannon 的率失真函数相比有类似的形式,但 B-D 中纳入了信道丢包率和信源编码所用的比特. 我们可以效仿基于 Shannon 率失真的 R-D 优化中乘数选取的类似方法,来得到代价函数中权重 w 的理论最优解.

显然,推论 1 在理论上是显然成立的,推论 2 可以通过将 B-D Cost 对 r_o 或者 d_o 求导得到证明. 下面我们着重考虑一下最后一点(推论 3)的证明.

证明. 在一定带宽资源限制和一定信道丢包率下,我们要让终端接收失真最小化,即 $\min_{\Delta(r_g)} (d_o) | r_o \leq B_s, \Delta(r_g)$ 表示成功重传的比特 r_g 所含信息量大小,这里假设一帧传输后总体出错比特为 r_e , 则有 $r_g \leq r_e$. 显然该问题可以利用类似 R-D 分析的方法求解,即令

$$\lambda_{ec} = \frac{w}{1-w} \quad (8)$$

则上述最小化问题可以归结为求解下式的极值点:

$$J = d_o + \lambda_{ec} (r_o - B_s) \quad (9)$$

将式(5)代入式(8),利用 Lagrange 乘数优化,可得

$$\lambda_{ec} = \alpha \beta e^{-\beta B_s} \quad (10)$$

显然对于一定的带宽资源限制和信道丢包率前提下, λ_{ec} 是唯一确定的. 由此也就证明了推论 3 成立.

2.2 基于最小 B-D Cost 的错误恢复模式选择

从上一节论述可知,在一定带宽资源 B_s 限制下,理论上可以得到的最优终端重建质量 d_o 和所耗带宽 r_o 满足定理 1. 对实际的视频编码和传输,定理 1 的结论只能作为一个理想的极限目标来逼近. 本节就是要利用上节中得到的 B-D 优化中 Lagrange 乘数模型来作为 B-D Cost 中的权重,进一步结合实际的视频传输系统来给出基于最小 B-D Cost 的错误恢复模式选择算法.

在目前存在的视频编码国际标准中,编解码都是以宏块(16×16)为基本单元. 在易错环境中传输视频数据,为了提高视频传输的鲁棒性,往往要把一帧图像划分为多个 slice. 每个 slice 包含若干宏块,各个 slice 之间可以独立解码. 此外,考虑到由于网络拥塞引起的包丢失特征表现为突发错误^[12],即在网络拥塞期间出现连续丢包. 可以通过适当的交织方式对一帧图像内的 slice 进行传送来保证相邻 slice 不会同时丢失^[5].

目前存在着许多解码端后处理错误恢复算法^[4-8],这些算法在错误恢复性能和复杂度上各不相同. 设一帧图像由 L 行, C 列宏块组成. 针对其中任意一种给定的恢复算法,假设出错宏块 $MB(i, j)$ 恢复后的宏块为 $MB_{ec}(i, j)$, 则错误恢复失真定义为

$$\begin{aligned} d_{ec}(i, j) &= \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N (MB_{ec}(i, j, n, m) - \\ &MB(i, j, n, m))^2, \\ 0 &\leq i \leq L-1, 0 \leq j \leq C-1 \end{aligned} \quad (11)$$

这里 $N=16$ 为宏块大小, $d_{ec}(i, j)$ 为出错宏块的错误恢复失真.

设宏块 $MB(i, j)$ 编码重建后的失真为 $d(i, j)$, 则一般情况下有 $d_{ec}(i, j) \geq d(i, j)$ 成立.

为了分析方便,我们做如下假定:(1)图像大小为 $L \times C$ 个宏块,每个宏块行构成一个 slice,则一帧图像划分为 L 个 slice;(2)如果某个宏块需要重传,则假定全部重传其编码所用的比特;(3)假定重传和传输中传输层包大小均相同,重传的时候所有需要重传的数据尽量在同一包中传输. 表 1 引入一些符号及其含义,这将在后面的分析中用到.

表 1 一些符号的定义和说明

符号	含义
\mathbf{D}	$\mathbf{D}=(d(0,0),d(0,1),\dots,d(i,j),\dots,d(L-1,C-1))$ 为 $L \times C$ 维编码失真向量
\mathbf{R}	$\mathbf{R}=(r(0,0),r(0,1),\dots,r(i,j),\dots,r(L-1,C-1))$ 为编码所用比特 $L \times C$ 维向量
$d(i,j)$	宏块 (i,j) 编码端失真
$r(i,j)$	宏块 (i,j) 编码所用比特数
\mathbf{D}_{ec}	$\mathbf{D}_{ec}=(d_{ec}(0,0),d_{ec}(0,1),\dots,d_{ec}(i,j),\dots,d_{ec}(L-1,C-1))$ 为 $L \times C$ 维错误恢复失真向量
\mathbf{E}_r	$\mathbf{E}_r=(e(0,0),e(0,1),\dots,e(i,j),\dots,e(L-1,C-1))$ 为发送端接收到的错误向量
$e(i,j)$	二值变量,1 表示宏块 (i,j) 出错,0 表示无错
\mathbf{M}	$\mathbf{M}=(m(0,0),m(0,1),\dots,m(i,j),\dots,m(L-1,C-1))$ 为发送端判决的错误恢复模式向量
$m(i,j)$	二值变量,1 表示宏块 (i,j) 采用反馈重发模式,0 表示采用后处理恢复模式或无错
\mathbf{I}	$\mathbf{I}=(1,1,1,1,1,1,\dots,1,1,1,1,\dots,1,1,1)$ 为 $L \times C$ 维向量,其各个分量都为 1
r_{mod}	对稀疏矩阵 \mathbf{M} 的每个 $m(i,j)=1$ 位置编码需要的比特数
r_o	包含了重传比特和错误恢复模式信息后一帧图像需要的总体带宽资源
d_o	考虑了错误恢复失真和编码失真的最终终端整体失真

设对每个宏块的平均重传次数为 N_{avr} ,则有

$$r_o = \mathbf{R}\mathbf{I}^T + (N_{avr}\mathbf{R} + r_{mod}\mathbf{I})\mathbf{M}^T \quad (12)$$

$$d_o = \mathbf{D}\mathbf{I}^T + (\mathbf{D}_{ec} - \mathbf{D})(\mathbf{E}_r^T - \mathbf{M}^T) \quad (13)$$

其中平均重传次数可以根据式(6)得到。

在一定带宽和延迟限制下,对不同的 \mathbf{M} ,我们要解决的 B-D Cost 最小化问题可以描述如下:

$$\min_{\mathbf{M} \in 2^{E_r}} [J = (1 - \omega_{ec})d_o + \omega_{ec}r_o] \mid r_o \leq B_s, \omega_{ec} \in [0, 1] \quad (14)$$

其中 ω_{ec} 是权重系数, $B_s = T_{max}B_w$, B_w 为当前有效带宽,最大允许延迟为 T_{max} . 显然 B_s 是包含了重传所占带宽的等效带宽限制。

将式(12),(13)代入式(14),可得

$$J = (1 - \omega_{ec})(\mathbf{D}\mathbf{I}^T + (\mathbf{D}_{ec} - \mathbf{D})(\mathbf{E}_r^T - \mathbf{M}^T)) + \omega_{ec}(\mathbf{R}\mathbf{I}^T + (N_{avr}\mathbf{R} + r_{pos}\mathbf{I})\mathbf{M}^T) \quad (15)$$

分析式(15),若 $\omega_{ec} = 0$,此时只考虑终端图像失真. 令 J 最小化,可得 $\mathbf{E}_r = \mathbf{M}$,即全部重发出错的数据. 若 $\omega_{ec} = 1$,则只考虑所耗用的整体带宽(吞吐),令 J 最小化,可得 $\mathbf{M} = \mathbf{I} - \mathbf{I}$,即对所有出错的数据都不重发而只进行解码端后处理恢复. 显然,这两种边界情况正对应目前尽力而为 ARQ+ER 中采用的策略. 即对 BEARQ 策略,其错误恢复模式策略可表示如下:

$$m(i,j) = \begin{cases} 1, & \sum_{i \times C + j = 0}^t r_o(i,j) \leq B_s - \sum_{i \times C + j = t}^{L \times C - 1} r(i,j) \\ 0, & \sum_{i \times C + j = 0}^t r_o(i,j) > B_s - \sum_{i \times C + j = t}^{L \times C - 1} r(i,j) \end{cases} \quad (16)$$

如果带宽(包括允许的延迟)资源足够丰富,则 BEARQ 终端可以实现无错接收. 而如果带宽和允许延迟很小,则此时 BEARQ 将不使用重传而只是

采用接收端错误恢复,此时终端接收性能最差。

对式(15)而言,其最小化的一个充分必要条件是每个宏块都满足 B-D Cost 最小化. 对于其中的权重系数,我们令其满足式(8),则针对每一个出错宏块,基于最小带宽-失真代价的出错模式选择如下:

$$m(i,j) = \{k \mid \min_{k \in MSET} (d(k,i,j) + \lambda_{ec}r(k,i,j))\}, \\ k = 0, 1; d(0,i,j) = d_{ec}(i,j), d(1,i,j) = d(i,j), \\ r(1,i,j) = (N_{avr} + 1)r(i,j) + r_{pos}, r(0,i,j) = r(i,j) \quad (17)$$

不失一般性,这里假设模式只有两种,即重传模式和接收端后处理恢复模式,分别对应 $k=1$ 和 0. 显然,相对于式(16)来说,式(17)的模式选择从 B-D 性能来看更为合理有效. 一般情况下,式(17)的模式选择要在 B-D 性能上优于式(16). 只有在式(16)中的重传次序近似满足了 B-D Cost 从小到大非减排序,其性能才可能与式(17)相同。

3 基于最小化 B-D Cost 错误恢复模式选择的部分反馈重发

基于上文的错误恢复模式选择,本节将进一步给出具体的反馈重发机制实现. 其中涉及到两个主要问题:一是确定适当的后处理错误恢复算法,二是如何对恢复模式矩阵 \mathbf{M} 进行高效的编码,使其耗用的带宽尽可能少. 下面我们分别就这两个方面进行方案的具体设计。

3.1 后处理恢复算法方案设计

一帧图像编码后经过易错信道发送到接收端,根据编码帧类型的不同,接收端应当采取不同的后处理恢复算法. 对 I 帧而言,可以采取文献[5-8]中的算法来进行恢复. 对 P 帧而言,文献[4]中的基于

BMA 的运动矢量恢复算法简单易行, 实际中应用最广泛. 本文的主旨是为了说明基于最小化 B-D Cost 的错误恢复模式选择相对于现有 BEARQ 机制在性能上的提高. 所以, 具体采用什么样的错误恢复模式, 不会影响本文算法的有效性. 但对具体性能来看, 采用恢复效果好的算法更有利于本文所提机制的性能提高. 一般而言, 后处理算法恢复效果越好, 其复杂度相对也要越高. 综合考虑已有恢复算法的复杂度和恢复性能, 对 I 帧, 选取了性能相对比较差但复杂度最低的距离加权错误恢复^[5]和性能较好但复杂度相对较高的多方向表决恢复^[7]两种机制, 对 P 和 B 帧, 采用计算简单的平均相邻运动矢量技术和文献[4]中的出错运动矢量恢复技术两种机制. 这样, 对于错误恢复方案就有 4 种不同的设计, 如表 2 所示.

表 2 错误恢复方案说明

方案编号	方案描述
1	I 帧采用距离加权, P, B 采用简单平均相邻运动矢量
2	I 帧采用距离加权, P, B 采用 BNM 运动矢量恢复
3	I 帧采用多方向表决, P, B 采用简单平均相邻运动矢量
4	I 帧采用多方向表决, P, B 采用 BNM 运动矢量恢复

由于错误恢复跟 slice 的划分和打包方式密切相关. 这里沿用上文提到的几个关于 slice 划分的假定(一行宏块一个 slice, 多个 slice 不能位于同一包中).

设第 $k+1$ 行宏块构成 slice 记为 $slice(k)$, $0 \leq k < L$, 其中的宏块用 $MB(k, i)$ 表示, $0 \leq i < C$.

(I) 在单个(隔离)slice 丢失的情况下, 则对于宏块 $MB(k, i)$, 其空间相邻宏块分布情况如图 1 所示.

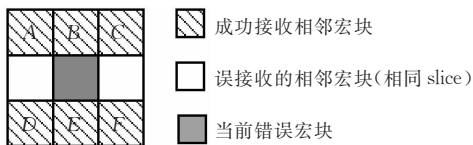


图 1 出错宏块错误恢复时可能用到的相邻宏块

图 1 中 $A \sim F$ 为可能存在的相邻宏块(和当前 slice 和当前宏块的位置相关). 利用这些正确接收到相邻宏块, 若当前为 I 帧, 即可对当前宏块进行距离加权恢复或者多方向表决恢复; 若当前为 P 或者 B 帧, 则可利用以上这些块(inter 编码块)的运动矢量平均来估计当前块的运动矢量, 从而从参考帧中恢复出相应宏块, 也可利用 BMA 来在相应参考帧中搜索来得到运动矢量, 进而恢复当前出错宏块. 之后, 由式(11)得到当前出错宏块对应的恢复失真 $d_{ec}(k, i)$. 根据式(4)计算采用重发模式和后处理恢

复模式下的 B-D 代价, 之后由式(17)判定当前宏块的错误恢复模式.

(II) 在连续 2 个或以上的 slice 同时出错的情况下, 重传一部分 slice, 使得重传后不存在相邻两个 slice 同时出错. 算法描述如下:

假设连续出错 slice 区域的起始 slice 为 $slice(k)$, 终止为 $slice(k+X)$, $X \geq 1$. 若 $k=0$ 则重传 $slice(k), slice(k+2) \dots, slice(k+X-1)$ (X 为奇数) 或 $slice(k+X-2)$ (X 为偶数). 若 $k>0$, 则重传 $slice(k+1), slice(k+3), \dots, slice(k+X-1)$ (X 为偶数) 或 $slice(k+X-2)$ (X 为奇数).

在进行了如上重传后, 则满足(I)中无连续 slice 出错的情况, 即可利用(I)的规则, 去进一步决定剩下宏块的恢复模式.

对典型的包传输网络信道, 其包丢失分布呈 burst 型. 所以在发送端传输层打包的时候可以通过交织 slice 打包发送的方式, 使得连续相邻 2 个或以上 slice 丢失的概率很小. 所以大部分情况下, 错误恢复均能按照(I)来进行, 进而保证了重传是按照 B-D 优化的方式进行的. 只有少部分情形会出现连续相邻 slice 同时丢失, 这种情况下由于恢复错误区域内部的 slice 造成的失真很大, 即使根据 B-D Cost 来选择恢复模式, 基本上内部 slice 均要选择重传. 所以在第 2 种情形下, 我们采用(II)中的机制.

3.2 错误恢复模式矩阵的编码方案

在计算了出错部分的对应错误恢复失真后, 通过比较 B-D Cost 即可确定出出错部分需要重传的部分宏块, 即对应矩阵 M 中为 1 的元素位置. 为了尽量减少模式矩阵所占用的比特, 本文设计如下编码策略:

(1) 设当前帧划分为 L 个 slice, 则根据接收端接收情况(NACK/ACK 的个数)来决定当前需要传输的 M 矩阵覆盖的图像区域, 并将这些区域以宏块顺序从小到大(raster scan)排成连续区域.

(2) 如果一个 slice 需要整体重传(比如出现多个连续 slice 同时丢失的情况), 则该部分不予在模式矩阵 M 中标出. 因为此时接收端可以根据出错情况知道发送端要全部重发的 slice.

(3) 对不需要整体重传的 slice, 经过模式判决后标注模式矩阵 M . 目前在本文只考虑两种模式, 即重传模式和后处理恢复模式. 由于本文方案中一行宏块为一个 slice, 所以模式矩阵本身长度较小, 为了简便起见, 直接对模式结果进行传输, 即对第 k 个 slice, 有

$$bin(i) = m(k, i) \quad (18)$$

这里 $bin(i)$ 代表当前模式矩阵二进制串的第 i 位.

3.3 部分反馈重发机制设计

确立了后处理错误恢复方案和模式矩阵的编码后,结合 H.26L 的容错平台^[13],在 TML90^① 上按

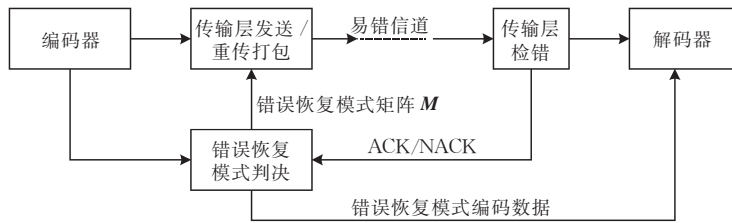


图 2 基于最小 B-D Cost 的部分反馈重发机制

(1) 对编码器设置为每个宏块行一个 slice, 为了实现简单, 采用顺序打包的方式将 slice 打包成传输层 RTP+UDP 包, 这样在高丢失率的情形下会导致多个连续 slice 丢失. UDP 包大小的选取是根据一个 slice 的编码后平均耗用比特来确定, 具体和图像分辨率、量化参数以及编码复杂度相关. 这样的设计是为了尽量能让一个 UDP 包包含且只包含一个 slice, 便于相邻 slice 之间的相互隔离.

(2) 将打包后的数据作为信道模拟器输入. 这样, 在输出端根据出错 Pattern, 得到 slice 一级的错误 Pattern (相当于解码端向编码端发送 NACK/ACK).

(3) 将此错误 Pattern 作为编码器端错误恢复模式判决的输入, 根据式(17)来进行模式判决, 之后将模式判决矩阵按照前面所述的编码规则编码后独立传输 (假定其为可靠传输).

(4) 如果有需要重传的原始码流数据, 则转(3). 注意, 本文实验为了分析方便, 在一个帧的所有 slice 没有完成发送 (包括需要的重传) 之前, 假定下一帧不被发送.

(5) 解码端根据错误恢复模式矩阵以及接收到的重传数据对当前 slice 进行错误恢复.

4 实验结果及其分析

根据上文的论述, 我们不难得到如下 4 个对本文算法性能产生影响的主要因素: (1) 由于错误恢复效果的好坏, 跟视频图像中出错区域的纹理和运动有密切的关系. 所以, 文中提出的最小 B-D Cost 算法性能, 同出错部分的视频图像内容特征密切相关; (2) 从 B-D Cost 的计算公式来看, 丢包率 p 也会直接影响到算法的性能; (3) 压缩后视频流本身的码率和失真也是 B-D Cost 的重要计算依据, 不同码率下的视频流在 B-D 性能上也会呈现出不同的特性; (4) 不同的错误恢复算法, 其恢复效果也不同, 显然,

照本文的设计思想提出基于 B-D Cost 的部分反馈重发机制, 其原理框图如图 2 所示. 具体的算法机制描述如下:

这也会对本文所提机制的性能产生影响. 所以, 本文的实验也将从这 4 个方面对本文算法的性能做评估. 此外, 为了更好地说明本文算法的性能, 实验中还对比了基于终端失真的选择重传和本文算法的 B-D 性能.

为了评估方便, 不失一般性, 本文实验中假设最大重传次数为 1. 从上文的分析可知, 允许重传次数越多, 则对同样的终端接收失真而言, BEARQ 机制从 B-D 性能来看也就会越差, 而本文算法相对于 BEARQ 的 B-D 性能提高也就越明显. 此外, 假设每个 slice 只包含一行宏块, 所有测试序列均为 QCIF, 30Hz. 编码器其它配置如表 3 所示. 这里运动估计模式只假定采用 $P16 \times 16$ 的模式, 这样做的目的是为了在运动矢量恢复的时候易于计算. 为了比较不同序列间算法性能的差异, 本文选取运动较为剧烈的 foreman, 运动较为平缓的 akiyo 和纹理比较复杂 mobile 序列来评价算法性能. 为了尽量模拟真实网络上的丢包环境, 本文对不同丢包率下本文算法的评估中采用了文献[14]中的包丢失测试文件, 该文件是在 VCEG 规定的标准测试环境亦即文献[15]中推荐使用的模拟真实网络的包丢失测试文件. 它是在真实主干网络上的测试结果.

表 3 编码器配置

项	配置
参考帧	1
R-D 优化	On
参考代码版本	TML 9.0
块模式选择	$P16 \times 16$, P_SKIP, INTRA4×4, INTRA16×16
运动估计精度	1/4 像素

我们在实验中选用了对应丢包率 3%, 5%, 10% 和 20% 的错误模式文件. 由式(5)可知, 终端接收失真信道带宽的分段函数, 当带宽增加到满足一定值时候, 终端失真将不再变化. 为了分析的方便, 本文只针对当前可用带宽大于等于临界点情况, 在

① H. 26L Test Model Software, Version 9.0, December 2001. ftp://ftp3.itu.ch/video

B-D 性能上和主观重建效果上来对比所提的方案和尽力而为 ARQ 的性能, 对于可用带宽小于临界带宽的情形, 也有类似的结论. 这里的临界带宽记为

$$B_{\text{critical}} = \left(\frac{p}{1-p} + 1 - p \right) r \quad (19)$$

这里 r 代表实际码流比特率.

对于错误恢复模式矩阵, 本文采用式(18)来对编码, 由于只存在错误恢复和重传两种模式, 所以, 对每个宏块而言只需要 1bit 即可代表模式信息. 通过得到每帧的错误恢复模式矩阵, 可以得到其所用的带宽和最终的终端接收质量. 对尽力而为 ARQ, 假定其重传是按照码流时间顺序进行的. 也即在满足带宽和延迟的条件下, 按照出错 slice 内的宏块扫描顺序进行次序重传.

最后要说明的一点就是下文实验中 B-D 性能的评估只是针对出错的 slice 来统计, 正确传输的 slice 不计入 B-D 结果中, B-D 性能参数可由式(12), (13)两式得到.

4.1 不同丢包 Pattern 情况下本文算法 B-D 性能与尽力而为 ARQ 机制对比

对 foreman 测试序列取 100 帧 (900 个 slice), 对每帧假设其出错 slice 有且只有 k 个而且位于相

同的位置 (即同样的错误 Pattern), 不失一般性, 我们不考虑出现连续相邻 slice 出错的情况 (如果有可以采用 3.3 节中的方法使得变为不相邻). 错误恢复算法采用表 2 中的方案 2. 分别在量化参数等于 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 下进行测试. 并且假定网络带宽大于由式(19)所得的临界带宽. 测试中对 $k=1$ 出错进行了测试, 对 $k=1$ 有 9 种错误 Pattern. 此时丢包率 $p=1/9$. 这里我们列出四个具有代表性的 slice Pattern 来说明出错视频内容对本文算法的影响.

图 3 中分别设定每一帧的第 i 个 slice 出错, 由于通过实验发现, 需要重传的宏块在整个出错 slice 中的比例要比进行接收端重建的比例大, 也就是说, 一个 slice 全部重传的比例要比一个 slice 全部采用错误恢复的几率大. 为此, 如果一个 slice 需要全部重传则无附加数据需要传输. 否则, 每个 slice 要附加 11bits 的模式信息. 对于尽力而为 ARQ 算法 (BEARQ), 其终端失真即为编码端失真; 对本文所提算法, 其终端失真是根据模式选择信息而得到的终端重建. 从图 3 中我们可以看出, 本文所提算法相对于 BEARQ 算法, (1) 在 B-D 性能上的提高和出错的视频数据本身有较大的关系, 由于 foreman 序列中 slice1 对应的部分纹理相对比较单一, 运动相对比较平缓, 所以图 3(b) 对应 B-D 性能提高最大,

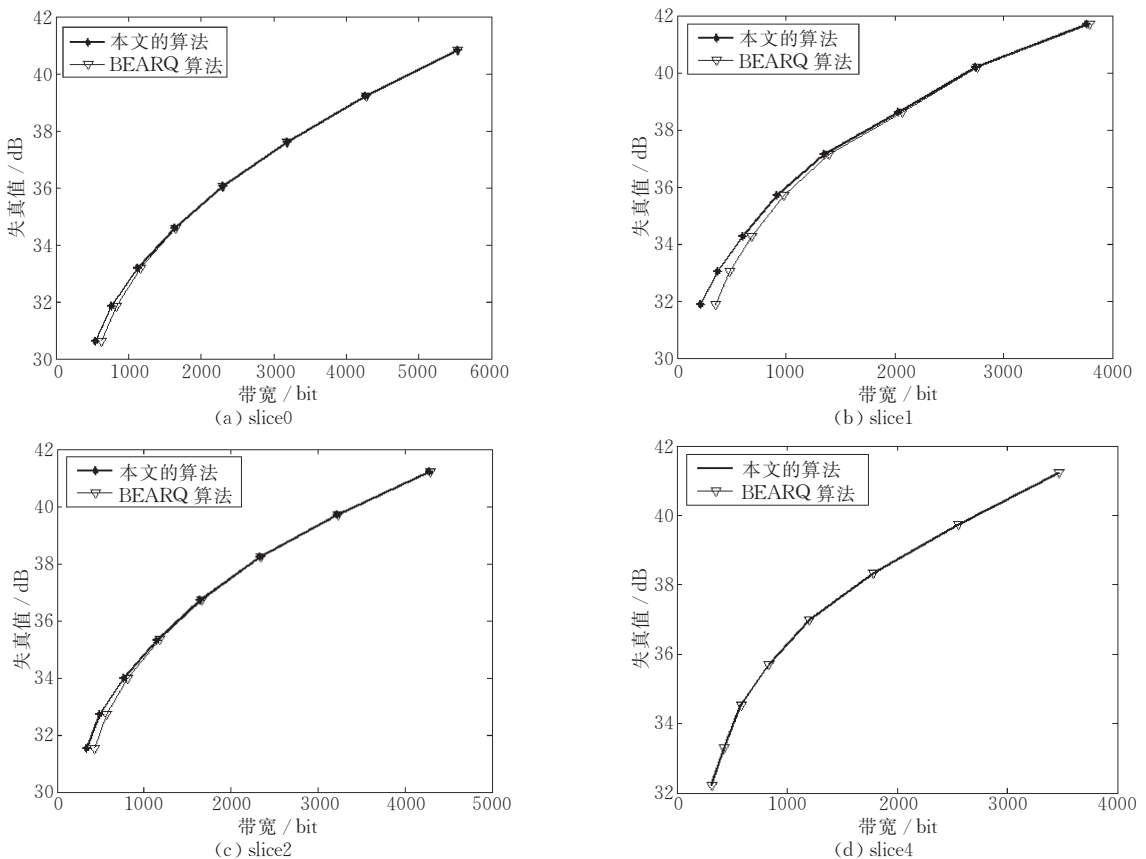


图 3 不同丢包内容对本文所提算法性能的影响

而对于 slice4(图 3(a),(d))而言,其对应的区域纹理较为复杂,所以,在不同 QP 下测试,模式选取均为重发,其性能和 BEARQ 基本相同;(2)视频帧本身码率大小也会在一定程度上影响算法 B-D 性能,图 3(b)和(c)中显示,在比特率低(QP 大)的情况下,算法的 B-D 性能提高会更显著一些,这是因为一般而言,模式选择为接收端恢复的宏块其本身编码比特较小(由于它可以通过错误恢复的方式来由相邻区域较好重建出来),在比特率低的情况下,这些宏块所用比特在整体出错 slice 所用比特中所占比例显然要比高比特率的要高,从而本文算法的 B-D 性能提高就会显著,而在带宽高的情况下,情况正好相反;(3)对大部分纹理和运动适中的情况

(如图 3(a),(c)),性能提高不是很显著,因为对于经过模式判决后需要进行接收端错误恢复的宏块来说,由于它本身编码所用的 bit 就比同 slice 中其它 slice 的要小,所以对于整个出错的 slice 而言,这样情况 B-D 性能提高甚微.图 4 和图 5 是本文算法和 BEARQ 的终端恢复图像主观质量对比.这里分别列出了 slice1(图 4)出错和 slice0(图 5)出错两种情形下第 23 帧在 QP=20 情形下的重建效果.从其中可以看出,所提算法中选择采用错误恢复模式的宏块其主观重建效果和 BEARQ 情形下基本保持不变(PSNR 上相差不超过 0.1dB).

对本文算法,图 6 和图 7 中受损 slice 的模式选择以及 B-D 性能如表 4 所示.



图 4 重建结果 1



图 5 重建结果 2

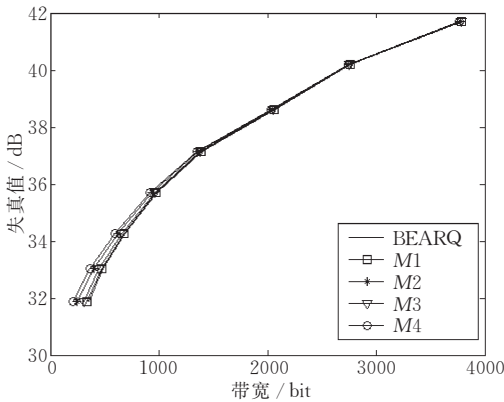


图 6 不同错误恢复算法对 B-D 性能的影响

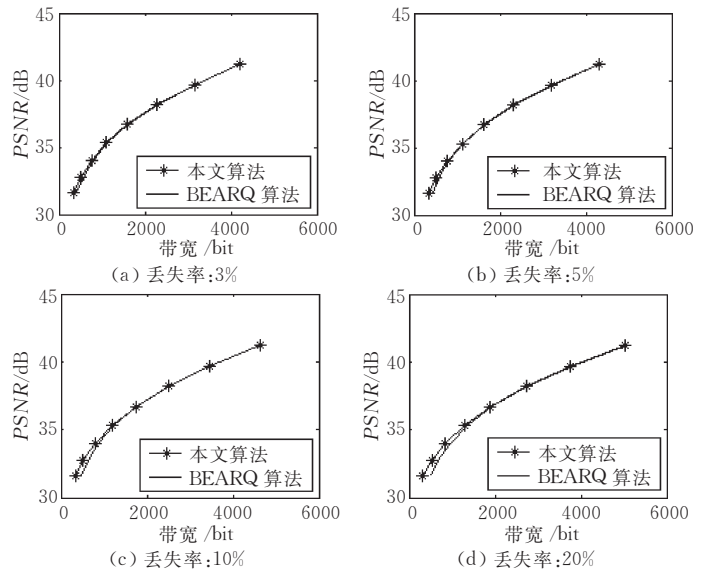


图 7 不同丢包率下本文算法和 BEARQ 的 B-D 性能对比

表 4 不同出错 Pattern 下 B-D 性能对比

错误模式	附加信息	D(本文算法)	总体带宽/bit(本文算法)	D(BEARQ)	总体带宽/bit(BEARQ)
slice 1	00000011111	32.80	508	32.81	524
slice 0	10010011111	32.01	511	32.01	526

从表 4 可以看出,采用了本文所提算法后,相比 BEARQ,能够在确保重建质量基本保持不变的情况下降低重传的带宽。

4.2 不同错误恢复算法对本文所提算法性能的影响

对 foreman 序列,在错误 Pattern 为 slice1 出错的情况下,其它实验条件同(1),对表 2 中的 4 种方案分别进行 B-D 性能测试.测试的 B-D 性能结果对比如图 6 所示.图 6 中 M1~M4 表示表 2 中的 4 种不同错误恢复算法组合方法.从图 6 可以看出:(1)不同错误恢复算法对 B-D 性能有较大影响,算法恢复效果越有效,则应用本文所提机制后 B-D 性能提高也就越大;(2)对 inter 帧恢复算法的改进要比对 intra 帧错误恢复算法改进获得的 B-D 增益大,这是因为码流中 intra 帧比例远远小于 inter 帧(GOP 大小为 50 帧);(3)采用不同错误恢复算法,主要影响到所用带宽的大小,而其终端恢复性能基本不受具体错误恢复算法的影响,这是因为本文算法框架通过 B-D 性能制约了错误恢复模式选择,只有在当前错误恢复算法能够获得失真足够小的恢复时,才会选择采用错误恢复,否则模式即为重传,所以,即使一种恢复效果很差的算法,采用了本文的机制之后,所导致的是需要的带宽增加,而不是恢复效果的降低。

4.3 不同丢包率情形下本文算法和尽力而为 ARQ 性能对比

采用文献[15]中的错误 Pattern 文件,量化参数设定为 8,10,12,14,16,18,20,22,在不同错误率下的性能测试如下.注意这里我们只是针对出错的 slice 进行平均性能统计,对于正确传输的 slice 不计入统计结果之内.此外,如果一个 slice 完全需要重传,则其 B-D 性能将和 BEARQ 完全一致.测试从两个方面进行,首先对不同丢包率条件下本文算法相对于 BEARQ B-D 性能提高做了测试,其实验结果如图 7 所示.从图 7 中可以看出:(1)随着错误率增加,本文算法对 B-D 性能的提高呈缓慢增长趋势,而不是与错误率成比例增长,这是因为在本文实验中用到的几个包丢失 Pattern 文件,在错误率增加的时候,相应连续 slice 丢失的情形也会增加,而由 3.4 节中的部分反馈重发机制的设计可知,这样情形下,为了保证接收端能够实现无连续相邻 slice

丢失,需要无条件对一些丢失的 slice 进行全部重发,从而使得性能提高受到限制;(2)在不同错误率情形下,本文算法的平均 B-D 性能都明显高于 BEARQ.另外,为了比较不同错误率对本文算法 B-D 性能的影响,进一步对不同错误率下本文算法结果的 B-D 性能做了比较,结果如图 8 所示.从图 8 中可以看出:(1)随着丢包率增加,B-D 性能呈下降趋势;(2)比特率较低的情况下,比特率增加对本文算法 B-D 性能的影响较小,这是因为在低比特率情况下本文所提机制 B-D 的性能提高较为显著。

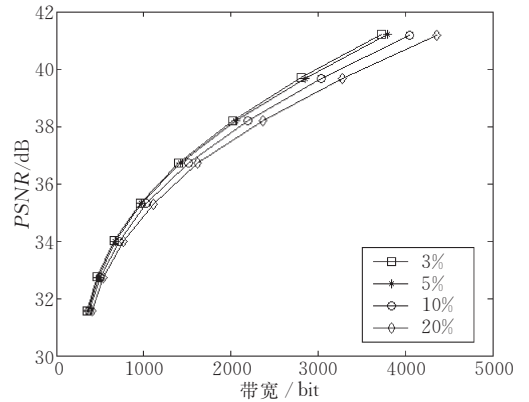


图 8 不同丢包率下本文算法 B-D 性能对比

4.4 不同测试序列之间本文算法和尽力而为 ARQ 性能对比

以上针对同一测试序列 foreman,对本文算法性能从不同角度给予了分析.为了更全面地评价本文算法的性能,我们进一步用不同测试序列在同样丢包率情况下对本文算法进行性能测试.考虑到影响本文算法性能的包括序列的纹理复杂程度以及运动剧烈程度,所以我们这里利用了运动较为剧烈但纹理相对较单一的 foreman 序列,纹理复杂程度较高的 mobile 以及运动程度较低的 akiyo 序列作为评测序列.为了更好地反映不同序列对本文算法的影响,我们这里引入重发率的概念来评价当前序列采用本文算法时需要选择重发模式的宏块比例,定义式如下:

$$\rho = \frac{\sum_{i=0}^{N_{MB}-1} m(i)}{N_{MB}}, \quad m(\cdot) \in \{0, 1\} \quad (20)$$

这里 $m(i)$ 代表第 i 个出错宏块的错误恢复模式, N_{MB} 为总体出错宏块个数.显然,从式(20)的定义式我们可以看出,重发率越高,则本文算法相对于

BEARQ 其 B-D 性能提高程度也就越小,所以我们可以以此为测量基准,对 3 个不同特性的序列进行测试.表 5 是对这 3 个测试序列在 $QP=14,16,20,22$,丢包率为 3%的情况下前 100 帧做的统计,其中出错 slice 个数为 24,则出错宏块总数为 $24 \times 11 = 264$.令 $N_{MB} = 264$,则根据模式判决结果,即可得到对重发率的统计.

表 5 不同序列重发率比较

序列	重发率(%)			
	$QP=14$	$QP=16$	$QP=20$	$QP=22$
Foreman	92.0	89.4	87.9	85.6
Akiyo	15.6	16.3	12.1	9.1
Mobile	97.3	98.5	97.3	94.7

从表 5 中可以看出:(1)对同一序列,不同 QP (也就是不同码流率)下重发率不同, QP 越大,则其重发率呈下降趋势,这和前面实验中在低比特率情形下性能好这一结果相吻合;(2)对不同序列,重发率之间存在着很大的差别,这也意味着在相对于 BEARQ 算法,本文算法在 B-D 性能上的提高,不同特性的序列之间存在着较大的差别.为了进一步验证第 2 个实验结论,进一步针对该测试结果下的 B-D 性能做统计分析,结果如图 9~图 11 所示.

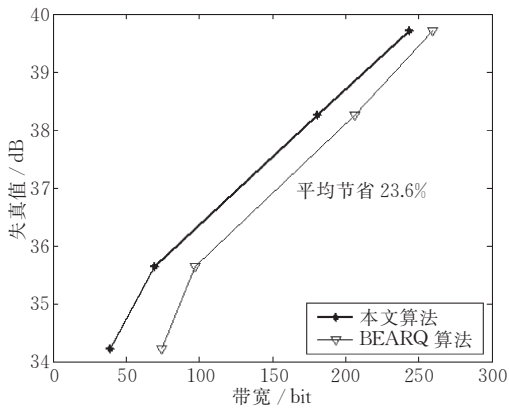


图 9 Akiyo 序列 B-D 性能测试

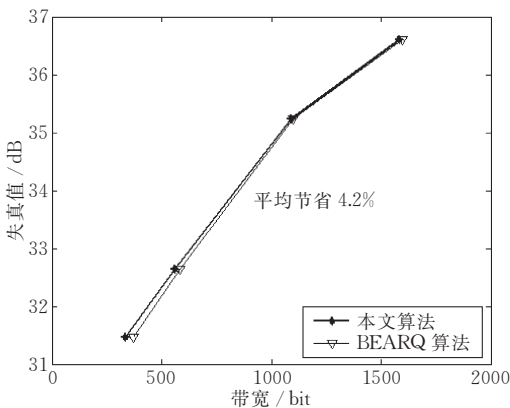


图 10 Foreman 序列 B-D 性能

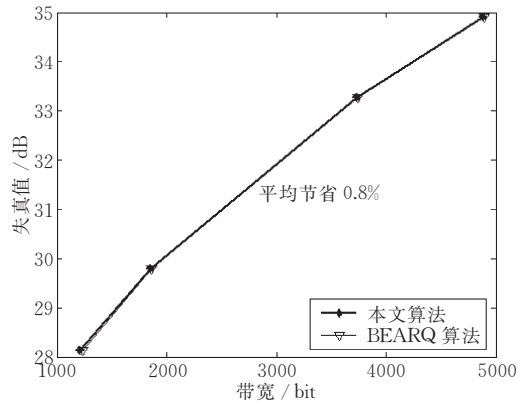


图 11 Mobile 序列 B-D 性能

从图 9~图 11 对比可以看出,对于运动程度很低且纹理相对平缓的 akiyo 序列来说,相对尽力而为 ARQ 机制,本文算法在 3%的丢包情形下可以节省 20%以上的带宽.而对运动较为剧烈的 foreman 序列来说,则只能节省 4%的带宽.对纹理很复杂的 Mobile 序列,本文算法相对于 BEARQ,带宽仅节省不到 1%.从表 5 的重发率和图 9~图 11 的对应关系不难看出,重发率越高,则对应 B-D 性能的改善程度就越低.

4.5 本文算法和选择性重传 ARQ 的 B-D 性能对比

对选择性重传算法,目前常用的做法是根据每个数据包丢失引起的失真来确定传输的优先级^[16],也即根据 d_0 来确定重传优先级.实验中我们选取 Foreman 序列,在错误率为 5%的情况下,采用表 2 中方案一恢复算法进行测试,量化参数选取 16,18,20,22.测试结果如图 12 所示.从图中的测试结果可以看出,本文算法在 B-D 性能上要略优于选择性重传,这是因为选择性重传并没有按照 B-D 代价函数来确定优先级,而是按照失真来确定重传的优先级.在重传带宽相差较多但失真相差较小的情况下,这会导致 B-D 性能的下降.

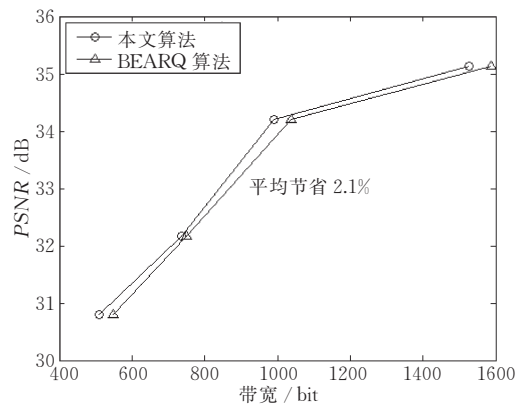


图 12 本文算法和选择性重传 ARQ(SARQ)B-D 性能对比

5 结 论

针对易错环境下视频传输的效率评价, 本文提出了 B-D Cost 的概念, 在此基础上给出了 B-D 函数的定义和证明. 之后, 针对易错视频传输中 BEARQ 机制在 B-D 性能上的不足, 提出了基于最小化 B-D Cost 的部分重传机制. 本文的主要贡献在于: (1) 提出了一种新的评价视频传输性能的准则, 即 B-D 代价函数; (2) 给出了 B-D 的解析关系及其理论证明, 在此基础上得到了 B-D Cost 中权重系数选取的理论解析表达; (3) 以 B-D Cost 为错误恢复模式的选取准则, 提出并设计了基于最小化 B-D Cost 的部分重传机制, 该机制相对于 BEARQ 和基于终端失真的选择性重传, 在 B-D 性能上有显著提高.

针对影响 B-D 性能的几个主要因素, 本文对所提算法从各个角度进行性能测试和评价. 从实验结果可以看出, 本文算法相对于 BEARQ, 在保证终端接收质量基本不变的情况下, 能有效地降低传输需用的带宽. 此外, 从对不同序列的测试结果可以看出, 本文所提机制对运动较为平缓、纹理相对单一的序列的传输更为有效; 从对不同比特率下的测试结果可以看出, 本文所提机制适用于低比特应用环境. 虽然本文的算法是以包交换主干有线网络为模拟环境进行测试的, 但对其它易错环境也同样适用. 而且从上面提到的两个特点可见, 本文算法更适合应用于目前带宽严重受限的无线视频传输中. 本文利用各种情况的实验结果对比分析了本文算法的性能. 对于纹理很复杂的序列, 由于其本身的时空相关性较弱, 所以本文算法相对于 BEARQ 的提高也就很小. 但对于常规序列而言, 本文算法还是能够取得较好的传输效率.

本文所提算法是一种开放性的框架算法, 其它容错算法性能的提高, 将进一步促进本文算法性能的提高. 不足之处在于本文仅考虑了压缩后码流的传输, 未能将编解码端控制也综合进来. 所以, 从整体上而言, 本文所提机制仍然是局部的优化. 此外, 文中对错误恢复模式的编码以及出现连续 Slice 错误后的处理机制, 还可以做进一步的优化, 以便获得更好的性能, 这也是我们下一步要做的工作.

参 考 文 献

[1] Wang Yao, Zhu Qin-Fan. Error control and concealment for

- video communications; A review. *Proceedings of IEEE*, 1998, 86(5): 974-997
- [2] Girod B. Feedback-based error control for mobile video transmission. *IEEE Proceedings*, 1999, 87(10): 1707-1723
- [3] Zhang Qian. Channel adaptive resource allocation for scalable video transmission over 3G network. *IEEE Transactions on Circuit, System on Video Technology*, 2004, 14(8): 1049-1063
- [4] Lam Wai-Man, Reibman A R, Liu Bede. Recovery of lost or erroneously received motion vectors//*IEEE Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP93)*. Minneapolis, USA, 1993: 417-420
- [5] Salama P, Shroff N B., Delp E J. A fast suboptimal approach to error concealment in encoded video streams//*Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP97)*. Washington, DC, USA, 1997: 101-104
- [6] Wang Yao, Zhu Qin-Fan, Shaw L. Maximally smooth image recovery in transform coding. *IEEE Transactions on Communications*, 1993, 41(10): 1544-1551
- [7] Sun Huifang, Kwok W. Concealment of damaged block transform coded images using projections onto convex sets. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, 4(4): 470-477
- [8] Kwok W, Sun Huifang. Multi-directional interpolation for spatial error concealment. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1993, 39(3): 455-460
- [9] Cheng H S, Fairhurst G, Samaraweera N. Efficient partial retransmission ARQ strategy with error detection codes by feedback channel. *IEE Proceedings on Communications*, 2000, 147(5): 263-268
- [10] Kallel S, Haccoun D. Sequential decoding with an efficient partial retransmission ARQ strategy. *IEEE Transactions on Communications*, 1991, 39(2): 208-213
- [11] Li Wei-Ping. Overview of fine granularity scalability in MPEG-4 video standard. *IEEE Transactions on Circuit and Systems for Video Technology*, 2001, 11(3): 301-317
- [12] Lu J. Signal processing for Internet video streaming: A review//*Proceedings of the SPIE Image and Video Communications and Processing*. San Jose, CA, USA, 2000: 1-14
- [13] Wang Ye-Kui, Hannuksela M M, Varsa V. The error concealment features in the H. 26L test model//*IEEE Proceedings of International Conference on Image Processing (ICIP02)*. New York, USA, 2002, II: 729-732
- [14] Wenger S. Error patterns for Internet experiments. ITU-Telecommunications Standardization Sector, STUDY GROUP 16, Video Coding Experts Group (Question 15) Q15-I-16r1, Ninth Meeting: Red Bank, New Jersey, 1999
- [15] Wenger S. Common conditions for wire-line, low delay IP/UDP/RTP packet loss resilient testing. ITU-T Video Coding Experts Group Doc. VCEG-N79, Sep. 2001 [online] Available: ftp://ftp3.itu.ch/video-site/0109_San/VCEG-N79.doc
- [16] Yu P, Lin Shu. An efficient selective-repeat ARQ scheme for satellite channels and its throughput analysis. *IEEE Transactions on Communications*, 1981, 29(3): 353-363



ZHOU Shu-Min, born in 1978, Ph. D., assistant professor. His major research field includes graphics & image processing, video codec and wireless video delivery.

LI Jin-Tao, born in 1962, professor, Ph. D. supervisor. His major field includes multimedia processing and VR technology.

ZHANG Yong-Dong, born in 1973, associate professor. His major field includes image processing and video processing.

Background

Video delivery over Internet or wireless network has been the focus in video communication field. Due to the fact that data transmission over network is always uncertain, some error control strategies have to be adopted so as to insure successful delivery. As to the data transmission except video, e. g., file transmission, the data must be transmitted in an errorless way. Such a scenario is not true to video delivery. This is due to the fact that, on one hand, there is much temporal and spatial correlation in video signal sequence, the corrupted video data can be concealed by temporal and spatial interpolation; on the other hand, human's eye can ignore some defects in the successive video sequence. Therefore, we can recover the corrupted video data by post-processing rather than have to deliver it losslessly.

At present, in order to receive data losslessly, automatic request repeat (ARQ) is often used in video transmission over erroneous network. Only if ARQ is not available (e. g., delay permission is timed out), post-processing is considered. As is known, ARQ needs to spend more extra bandwidth than post-processing, which is not reasonable for video transmission since video data can tolerate error bits to some extent. Therefore, when there is corrupted data, we should consider post-processing firstly by use of the temporal and

spatial correlation in video data rather than ARQ scheme. Thus, a problem occurs in which we need to determine whether the post-processing can be used to recover the corrupted data or not. The conventional R-D cost criteria is not feasible in the case, so a new one must be presented. With this problem, the concept of bandwidth-distortion (B-D) cost is proposed and the analytical relationship between bandwidth and distortion is presented. Based on these new tools, a new partial retransmission scheme is given based on minimal B-D cost, with which we can make full use of the correlation in video sequence to reduce the bandwidth usage in transmission.

The research is under the project "Video Delivery over GPRS/Internet Network" in Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences. In order to be convenient, the simulation results of the paper is obtained by use of the data loss pattern which is simulated from main branch of Internet. Although the cause of data loss is different between wire and wireless transmission, both of them lead to abrupt packet loss in transport layer. Therefore, the packet loss pattern over main branch of Internet is also available for wireless transmission simulation in transport layer.