

# 一种通用的视频传输端到端失真度估算方法

彭强 邓云 杨天武 诸昌铃

(西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610031)

**摘要** 在综合考虑差错扩散、差错掩盖策略及信道误码率的基础上,从像素级对端到端的视频传输差错扩散失真情况进行了分析,根据帧间相关系数和掩盖比率,提出了一种适用于各种时域差错掩盖方法的通用传输失真度估算模型。基于包丢失的仿真实验表明,该模型能够较好地近似估计出差错扩散失真情况,可以适应于各种不同的时域掩盖方法。实验还显示,基于该模型的宏块编码模式的帧内更新选择,与传统的R-D模式帧内更新算法相比,达到了较好地抑制差错扩散的效果,可适用于多种时域掩盖方法。

**关键词** 视频编码 差错恢复 率失真优化 端到端失真

中图分类号: TN919.8 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)06-0792-06

## A Novel General End-to-End Distortion Estimation Model for Video Transmission

PENG Qiang, DENG Yun, YANG Tian-wu, ZHU Chang-qian

(School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

**Abstract** The end-to-end error propagation distortion on pixel level precision is analyzed based on temporal concealment strategies in decoder and channel error rate. By using frame correlative coefficient and concealment ratio of TR and MCR, a new general transmission distortion estimation model for various temporal concealments is proposed. The estimation accuracy is demonstrated via simulation results for video transmission over packet loss channel, which illustrates that actual distortion can be estimated by proposed expectation model approximately. The proposed model provides an efficient method for MB coding parameters optimal selection over error prone environment. The simulation results also show that the MB mode INTRA-update algorithm based on proposed model has better substantial and consistent gains than traditional R-D optimal INTRA-update algorithm.

**Keywords** video coding, error resilient, rate-distortion optimization, end-to-end distortion

## 1 引言

视频编码中典型的率失真(rate-distortion, R-D)优化问题是在给定的码率限制条件下,通过适当选择各个宏块(macroblock, MB)的编码模式及其编码参数使得一帧的总失真度最小,或在给定的期望失真度下达到最小的码率。码率计算较为简单,可以通过实际编码或经典公式计算得到。而失真度的计算则较为复杂,对此问题目前已有很多研究<sup>[1,2]</sup>,特

别是一些文献对差错条件下的传输失真进行了分析和研究<sup>[3-7]</sup>。文献[3]提出了基于块加权的失真度估算方法,文献[4]提出的端到端基于像素递归的估计算法,较为准确地计算出解码器端整像素精度的每个像素的失真度期望。但这些研究大多都是针对某种特定的差错掩盖算法,不具有通用性,如文献[6]虽然在分析差错扩散、掩盖以及信道误码等基础上,给出了评估信道失真的理论框架,但只给出了基于时域替代(temporal replacement, TR)掩盖一种方法的失真度计算方法,而有些则只适用于整像

基金项目:铁道部科技研究开发项目(2003X040-A)

收稿日期:2005-03-28;改回日期:2005-09-09

第一作者简介:彭强(1962~),男,教授。2004年毕业于西南交通大学交通信息工程及控制专业获博士学位。目前主要从事多媒体技术、图形/图像处理、视频编码与传输、智能交通等领域研究工作。E-mail: qpeng@home.swjtu.edu.cn

素精度情况<sup>[4]</sup>。

本文在详细分析了视频编码与传输各个环节的基础上,提出了一种适用于各种差错掩盖方法的通用传输失真度估算模型。通过在像素级的递归计算,可以较精确地估计出视频图像端到端的失真度,为实现编码参数的率失真优化提供了一个有效的工具。

## 2 端到端像素失真度分析

目前主流的视频编码标准都是采用基于块的混合编码方式,用预测编码去掉时间冗余,用变换编码去掉空间冗余,其压缩、传输、解码及差错掩盖恢复的端到端传输过程如图 1 所示。

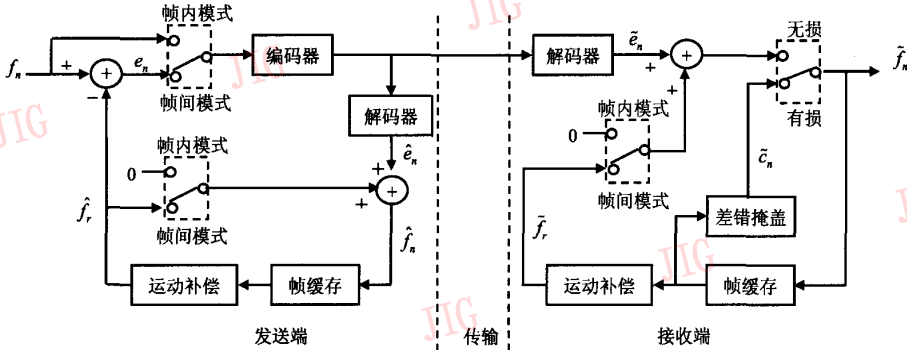


图 1 端到端视频传输示意图

Fig. 1 Illustration of end-to-end video transmission

这里用  $f_n^i$  表示第  $n$  帧中的第  $i$  个像素点的原始值,用  $\hat{f}_n^i$  表示其在编码器上的重建值;  $\tilde{f}_n^i$  为对应解码器上的重建值,此重建值可能含有传输错误,故对编码器而言,是一个随机变量。当使用帧间模式时,以  $\hat{f}_r^j$  表示  $f_n^i$  的预测值,即参考帧  $r$  中第  $j$  个像素点的编码器重建值,  $\tilde{f}_r^j$  为对应的解码器重建值。预测残差  $e_n^i = f_n^i - \hat{f}_r^j$ ,经过量化和反量化之后,其重建值记为  $\hat{e}_n^i$ 。如果传输没有错误,则有  $\tilde{f}_n^i = \hat{f}_n^i + \hat{e}_n^i$ ;当使用帧内模式时,像素的原始值被直接编码并传输,如果传输无错,有  $\tilde{f}_n^i = \hat{f}_n^i$ 。如果传输出错,解码器则用特定的像素值  $\tilde{c}_n^i$  进行掩盖,有  $\tilde{f}_n^i = \tilde{c}_n^i$ 。

假定在实时视频传输系统中,数据包丢失率  $p$  在编码器端是已知的,则在基于 RTP/UDP/IP (real time transport protocol/user datagram protocol/internet protocol) 的传输环境及打包策略下,IP 包中每个像素的丢失率等于数据包的丢包率  $p$ <sup>[4]</sup>。

像素点  $i$  的端到端的失真度期望值可表示为

$$\begin{aligned} d_n^i &= E[f_n^i - \tilde{f}_n^i]^2 \\ &= E[(f_n^i - \hat{f}_n^i) + (\hat{f}_n^i - \tilde{f}_n^i)]^2 \\ &= (f_n^i - \hat{f}_n^i)^2 + E[\hat{f}_n^i - \tilde{f}_n^i]^2 + \\ &\quad 2(f_n^i - \hat{f}_n^i)E[\hat{f}_n^i - \tilde{f}_n^i] \end{aligned} \quad (1)$$

大量实验结果表明,式(1)中最后一项占总失真度的比例通常误差不足 1.5%<sup>[6]</sup>,因此,式(1)可近似为

$$d_n^i \approx (f_n^i - \hat{f}_n^i)^2 + E[\hat{f}_n^i - \tilde{f}_n^i]^2 \quad (2)$$

式(2)表明,信道失真和编码器失真可以分开计算。此后凡有类似的地方,都作此近似忽略。考虑传输正确和出错时  $\tilde{f}_n^i$  的不同情况,式(2)可写为

$$\begin{aligned} d_n^i &= (f_n^i - \hat{f}_n^i)^2 + (1 - p)E[\hat{f}_n^i - \tilde{f}_n^i]^2 + pE[\hat{f}_n^i - \tilde{c}_n^i]^2 \\ &= d_q^i(n) + (1 - p)d_p^i(n) + p \cdot d_c^i(n) \\ &= d_q^i(n) + d_r^i(n) \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $d_q^i(n) = (f_n^i - \hat{f}_n^i)^2$  为量化失真;  $d_p^i(n) = E[\hat{f}_n^i - \tilde{f}_n^i]^2$  表示因帧间预测扩散到当前帧的失真度,称为扩散失真。  $d_c^i(n) = E[\hat{f}_n^i - \tilde{c}_n^i]^2$  表示出错后解码器进行掩盖后的失真度,称为掩盖失真。将扩散失真与掩盖失真按概率累加,表示由信道不可靠而产生的失真度,称为传输失真,记为

$$d_r^i(n) = (1 - p) \cdot d_p^i(n) + p \cdot d_c^i(n) \quad (4)$$

已有大量文献对量化失真进行了研究<sup>[8]</sup>,本文的主要工作是对传输失真度的估计提出有效模型。

## 3 通用传输失真度估计模型

当传输出错时解码器会用一定的掩盖策略进行替代。尽管实际编码时参考帧有可能是前面第  $r$  帧而不是  $n - 1$  帧,但由于传输差错的影响,该参考帧信息可能无法得到,因此,在此只用  $n - 1$  帧信息来

掩盖。对于 H. 263 这类单参考帧编码标准,两者实际上指的是同一帧,即  $r = n - 1$ ,但在 H. 26L 这种多参考帧预测编码的标准下,两者有所不同。

为适用各种差错掩盖算法,以两种极端算法为界:一为 TR 算法,则有  $\tilde{c}_n^i = \tilde{f}_{n-1}^i$ ,大量文献说明此算法效果最差<sup>[9,10]</sup>;另一个为理想掩盖算法,即假定用前一帧作为参考帧,并且所有像素的运动向量均被正确恢复,像素以其运动补偿预测值恢复,这里称为运动补偿替代(motion compensation replacement, MCR),此时有  $\tilde{c}_n^i = \tilde{f}_{n-1}^i$ 。其他掩盖效果,如边框匹配,则介于上述两种算法之间。

### 3.1 传输失真度模型

考虑像素  $i$  处于帧内和帧间两种不同模式下的传输失真,分别记为  $d_{T,I}^i(n)$  和  $d_{T,P}^i(n)$ 。

#### 3.1.1 帧间模式

已知编码器端  $\hat{f}_n^i = \hat{f}_r^i + \hat{e}_n^i$ ,如果当前帧传输不出错,则解码器端有  $\tilde{f}_n^i = \tilde{f}_r^i + \hat{e}_n^i$ ,由式(3)、(4)得到帧间编码时像素  $i$  的传输失真为

$$\begin{aligned} d_{T,P}^i(n) &= (1-p)E[(\hat{f}_r^i + \hat{e}_n^i) - (\tilde{f}_r^i + \hat{e}_n^i)]^2 + \\ & pE[\hat{f}_n^i - \tilde{c}_n^i]^2 \\ &= (1-p)E[\hat{f}_r^i - \tilde{f}_r^i]^2 + pE[\hat{f}_n^i - \tilde{c}_n^i]^2 \quad (5) \end{aligned}$$

解码器分别使用上述两种差错掩盖算法时,有:

#### (1) TR 掩盖算法

此时  $\tilde{c}_n^i = \tilde{f}_{n-1}^i$ ,故

$$\begin{aligned} d_{T,P}^i(n) &= (1-p)E[\hat{f}_r^i - \tilde{f}_r^i]^2 + pE[\hat{f}_n^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2 \\ &\approx (1-p)E[\hat{f}_r^i - \tilde{f}_r^i]^2 + p[\hat{f}_n^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2 + \\ & pE[\hat{f}_{n-1}^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2 \\ &= (1-p)E[\hat{f}_r^i - \tilde{f}_r^i]^2 + p[\hat{f}_n^i - \hat{f}_{n-1}^i]^2 + \\ & pd_{T,I}^i(n-1) \\ &= (1-p)E[\hat{f}_r^i - \tilde{f}_r^i]^2 + p[\hat{f}_{n-1}^i + \hat{e}_n^i - \hat{f}_{n-1}^i]^2 + \\ & pd_{T,I}^i(n-1) \\ &\approx (1-p)E[\hat{f}_r^i - \tilde{f}_r^i]^2 + p[\hat{f}_{n-1}^i - \hat{f}_{n-1}^i]^2 + \\ & p[\hat{e}_n^i]^2 + pd_{T,I}^i(n-1) \quad (6) \end{aligned}$$

其中,  $\hat{e}_n^i$  为像素  $i$  以  $n-1$  帧为参考帧的预测残差。

注意到  $d_{T,I}^i(n-1) = E[\hat{f}_{n-1}^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2$  为像素  $i$  在  $n-1$  帧对应的编码器和解码器重建值之差,而  $E[\hat{f}_r^i - \tilde{f}_r^i]^2$  表示其相应参考帧中的预测值之差,二者与两帧之间像素的运动程度密切相关,因此定义帧间相关系数  $b$  来表示它们之间的关系,记

$$\begin{aligned} E[\hat{f}_r^i - \tilde{f}_r^i]^2 &= bE[\hat{f}_{n-1}^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2 \\ &= bd_{T,I}^i(n-1) \quad (7) \end{aligned}$$

式(7)带入式(6)有

$$\begin{aligned} d_{T,P}^i(n) &= [p(1-b) + b]d_{T,I}^i(n-1) + \\ & p[\hat{f}_{n-1}^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2 + p[\hat{e}_n^i]^2 \quad (8) \end{aligned}$$

#### (2) MCR 掩盖算法

此时  $\tilde{c}_n^i = \tilde{f}_{n-1}^i$ ,故

$$\begin{aligned} d_{T,P}^i(n) &= (1-p)E[(\hat{f}_r^i - \tilde{f}_r^i)^2] + pE[\hat{f}_n^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2 \\ &= (1-p)E[\hat{f}_r^i - \tilde{f}_r^i]^2 + pE[\hat{f}_{n-1}^i + \hat{e}_n^i - \\ & \tilde{f}_{n-1}^i]^2 \\ &\approx (1-p)E[\hat{f}_r^i - \tilde{f}_r^i]^2 + p[\hat{e}_n^i]^2 + \\ & pE[\hat{f}_{n-1}^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2 \\ &= (1-p)bd_{T,I}^i(n-1) + p[\hat{e}_n^i]^2 + pd_{T,I}^i(n-1) \\ &\approx (1-p)bd_{T,I}^i(n-1) + p[\hat{e}_n^i]^2 + pbd_{T,I}^i(n-1) \\ &= bd_{T,I}^i(n-1) + p[\hat{e}_n^i]^2 \quad (9) \end{aligned}$$

这里认为  $n-1$  帧到  $n$  帧的相关系数与  $r$  帧到  $n$  帧的相关系数近似相等,都用  $b$  表示。

其他任何掩盖算法的效果介于上述两种算法之间,故其失真度也介于式(8)与式(9)之间,将两式结合在一起,可得任何一种掩盖算法的帧间模式的传输失真度为

$$\begin{aligned} d_{T,P}^i(n) &= [b + pc(1-b)]d_{T,I}^i(n-1) + \\ & p[\hat{e}_n^i]^2 + cp[\hat{f}_{n-1}^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2 \quad (10) \end{aligned}$$

式(10)右边第 1 项表示由于像素运动将前一帧失真而扩散到本帧的情况,由于是帧间编码,它主要取决于两帧之间的相关程度,即预测编码导致的差错扩散;第 2 项  $p[\hat{e}_n^i]^2$  为帧间编码传输出错后,像素  $i$  用  $n-1$  帧像素  $j$  进行掩盖替代后产生的预测误差失真;第 3 项  $cp[\hat{f}_{n-1}^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2$  为像素运动带来的掩盖失真。 $c$  为掩盖失真系数,它与具体掩盖方法有关。采用理想的运动补偿掩盖 MCR 时,  $c = 0$ ; 采用最差的 TR 掩盖时,  $c = 1$ ; 而其他时域掩盖方法  $c$  取值介于二者之间。

#### 3.1.2 帧内模式

由式(4)知,帧内编码时,如果传输正确,则只存在量化失真,传输失真为 0,只有传输出错时才存在传输失真。在上述两种不同差错掩盖算法下,其失真度分别为

#### (1) TR 掩盖算法

此时  $\tilde{c}_n^i = \tilde{f}_{n-1}^i$ ,故

$$\begin{aligned} d_{T,I}^i(n) &= (1-p) \cdot 0 + pE[\hat{f}_n^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2 \\ &\approx p[\hat{f}_n^i - \hat{f}_{n-1}^i]^2 + pE[\hat{f}_{n-1}^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2 \\ &= p[\hat{f}_n^i - \hat{f}_{n-1}^i]^2 + pd_{T,I}^i(n-1) \\ &= p[\hat{f}_{n-1}^i - \hat{f}_{n-1}^i + \hat{e}_n^i]^2 + pd_{T,I}^i(n-1) \\ &\approx p[\hat{f}_{n-1}^i - \hat{f}_{n-1}^i]^2 + p[\hat{e}_n^i]^2 + pd_{T,I}^i(n-1) \quad (11) \end{aligned}$$

(2) MCR 掩盖算法

此时  $\tilde{e}_n^i = \tilde{f}_{n-1}^i$ , 故

$$\begin{aligned} d_{T-1}^i(n) &= pE[\hat{f}_n^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2 \\ &= pE[(\hat{f}_n^i - \hat{e}_n^i) + (\hat{e}_n^i - \tilde{f}_{n-1}^i)]^2 \\ &= pE[(\hat{f}_{n-1}^i - \tilde{f}_{n-1}^i + \hat{e}_n^i)^2] \\ &\approx pE[\hat{f}_{n-1}^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2 + p[\hat{e}_n^i]^2 \\ &= pb d_T^i(n-1) + p[\hat{e}_n^i]^2 \end{aligned} \quad (12)$$

式(11)、(12)成立的条件是,编码器在确定某个 MB 为帧内编码模式时,同样还要计算出以  $n-1$  帧为参考帧的运动向量和预测残差  $\hat{e}_n^i$ 。该计算实际上在判断 MB 帧内编码模式之前已经进行了比较。

同理,合并式(11)与式(12),有:

$$\begin{aligned} d_{T-1}^i(n) &= [pb + pc(1-b)]d_T^i(n-1) + \\ &\quad p[\hat{e}_n^i]^2 + cp[\hat{f}_{n-1}^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2 \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)中,第 1 项表示由于像素运动将前一帧失真扩散到本帧的情况,由于是帧内编码,因此从前一帧而带来的扩散失真主要取决于丢包率的大小和两帧的相关性;而后两项同样表示为出错后编码器用时域掩盖而带来的预测失真和掩盖失真。

由式(10)、(13)中的  $d_T^i(n-1)$  可通过递归计算求得  $d_T^i(n)$ 。一帧的整体传输失真度为

$$D_T(n) = \sum_{i \in \text{frame } n} d_T^i(n) \quad (14)$$

故一帧总的端到端失真度为

$$D(n) = \sum_{i \in \text{frame } n} d_Q^i(n) + \sum_{i \in \text{frame } n} d_T^i(n) \quad (15)$$

3.2 帧相关系数

比较  $E[\hat{f}_n^i - \tilde{f}_n^i]^2$  与  $E[\hat{f}_{n-1}^i - \tilde{f}_{n-1}^i]^2$ , 如果像素没有运动,则  $\hat{f}_{n-1}^i$  与  $\tilde{f}_n^i$  应完全相同;如果运动剧烈,则二者可能相差较大,它们的关系与两帧像素间的运动程度相关。文献[6]中将其假设为一个固定的常量。本文将参考帧中被用作预测点的个数占参考帧总像素个数的比例,定义为帧相关系数  $b$ , 即图 2(b)中阴影部分的像素占总像素的比例。

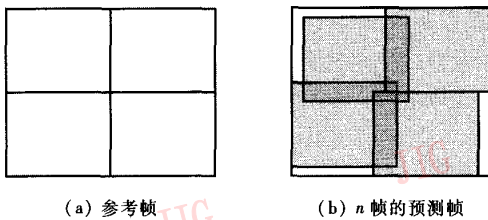


图 2 帧相关系数  $b$  的含义

Fig. 2 Illustration of frame correlative coefficient  $b$

如果相邻两帧无变化,则相关性最大,  $b = 1$ ; 如果相邻两帧运动剧烈,则相关性减小,  $b$  值降低。该系数随帧相关性的大小而变化,故能更准确地反映出真实的情况。在运动剧烈的图像帧区间内,  $b$  值较低,实验统计如图 3 所示,  $b$  的值通常都介于 0.9 ~ 1.0 之间。

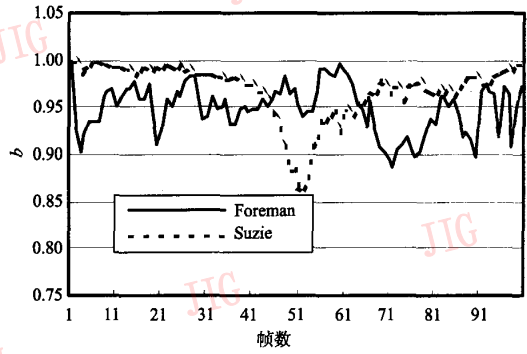


图 3 Foreman、Suzie 序列帧相关系数比较

Fig. 3 Correlative coefficient  $b$  for different video sequence

3.3 差错掩盖系数

由于实际的掩盖算法效果千差万别,不可能确切求得每次掩盖的精确值,故只能在编码器进行模拟掩盖,对每一帧的掩盖系数近似估算出其大小。具体做法是,在编码器端假定前一帧没错,计算出某一种掩盖方法的失真  $D_{CON}$ , 然后计算出时域掩盖失真上下限  $D_{MCR}$  和  $D_{TR}$  的大小。掩盖系数  $c$  如下估算:

$$c = \frac{D_{CON} - D_{MCR}}{D_{TR} - D_{MCR}} \quad (16)$$

4 模拟实验

模拟实验将 QCIF (quarter common intermediate format) 实验序列用 H. 263 + 测试模型 TMN8 进行压缩,加入本文提出的通用失真度预测模型,编码比特率设为 100kbps,其余选项均为缺省方式。实验在 10% 丢包率下进行编/解码,每个 GOB (group-of-blocks) 封装成一个包,用随机错误发生器进行丢包,每次在不同的信道模板下分别编码,重复 50 次,其平均失真度作为实际失真度,失真度的计算使用编码器端输入像素值与解码重建值之间的差的平方作为度量标准。使用式(15)作为估算方法,其中量化失真度的计算使用编码过程中实际产生的量化失真。

实验结果如图 4、图 5 所示,其中 SM 表示使用

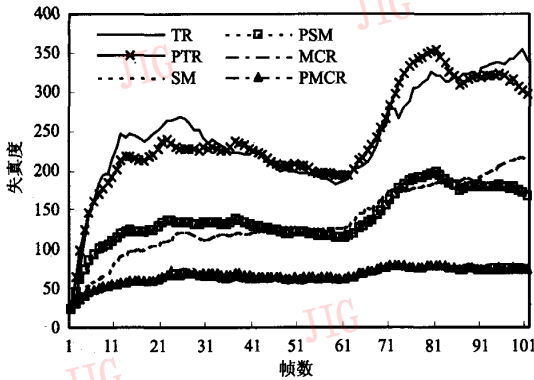


图 4 Foreman 序列在  $p = 10\%$  时的失真度比较

Fig. 4 Distortion comparison in 10% packet lost rate for sequence Foreman

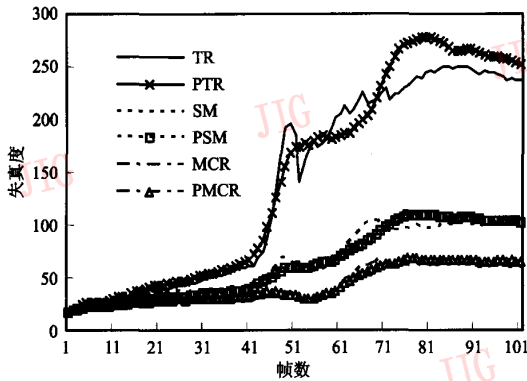


图 5 Suzie 序列在  $p = 10\%$  时的失真度比较

Fig. 5 Distortion comparison in 10% packet lost rate for sequence Suzie

边界匹配算法的失真度, PSM 为对应的估算失真度; TR 为时域替代算法的失真度, PTR 为对应的估计值; MCR 为理想的运动补偿替代掩盖算法的失真度, PMCR 为估计值。从图中可以看出, TR 的失真度最大, MCR 的失真度最小, SM 掩盖方法的失真度介于两者之间。公式估算出的失真度较好地反映出失真度的实际情况。

为了进一步验证本文提出的模型, 在 TMN8 基础上加入本模型实现的 R-D 优化 MB 帧内更新算法。为便于与文献 [4] 提出的 ROPE (recursive optimal per-pixel estimate) 方法进行实验结果对比, 差错掩盖算法使用简单的时域掩盖算法, 即对错误宏块的运动向量按如下规则计算: 如果当前 GOB 丢失, 而当前 GOB 的上面一个 GOB 被正确收到, 则以当前宏块的上一行的 3 个相邻宏块的运动向量的中值为当前错误宏块的运动向量, 在此称为 MD

(middle) 方法; 如果上面一个 GOB 也丢失, 则置当前宏块的运动向量为 0。系数  $\lambda$  采用同文献 [4] 一样的缓冲区算法。

图 6、图 7 分别显示了序列 Suzie 和 Foreman 在 300kbps 以及 4 种不同的丢包率下帧内更新算法的效果以及与 ROPE 算法 [4] 的比较结果。其中, GM-TR 为采用通用模型下的 TR 方法, GM-MCR 为采用通用模型下的 MCR 方法, GM-MD 采用通用模型下的 MD 方法。

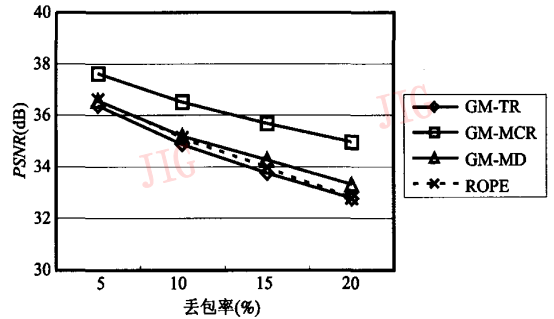


图 6 Suzie 序列在不同丢包率下帧内更新算法比较

Fig. 6 Intra update algorithms comparison in different packet lost rate for sequence Suzie

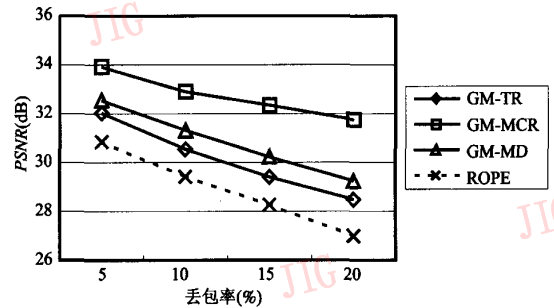


图 7 Foreman 序列在不同丢包率下帧内更新算法比较

Fig. 7 Intra update algorithms comparison in different packet lost rate for sequence Foreman

从仿真实验结果可以看出, 运用通用差错传输失真度模型进行 MB 编码模式的 R-D 优化更新的算法, 接近甚至超过了经典的 R-D 帧内更新方法, 达到了较好的抑制差错扩散的效果, 可适用于多种时域掩盖方法。

### 5 结论

本文提出的涵盖各种掩盖方法的失真度通用模型, 能较好地估算出解码端每个像素的失真度期望

值。仿真实验结果表明,该模型具有较好的估算能力,可以适应于各种不同的时域掩盖方法,为 R-D 框架的优化运用提供了一个有效的工具。

### 参考文献 (References)

- 1 Sullivan G J, Wiegand T. Rate-distortion optimization for video compression[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1998, 15(11): 74 ~ 90.
- 2 Wiegand T, Lightstone M, Mukherjee D, et al. Rate-distortion optimized mode selection for very low bit rate video coding and the emerging H.263 standard[J]. IEEE Transactions on Circuit Systems Video Technology, 1996, 6(2): 182 ~ 190.
- 3 Cote G, Shirani S, Kossentini F. Optimal mode selection and synchronization for robust video communications over error prone networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(6): 952 ~ 965.
- 4 Zhang R, Regunathan S L, Rose K. Video coding with optimal intra/inter mode switching for packet loss resilience[J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 2000, 18(6): 966 ~ 976.
- 5 Wu D, Hou Y T, Li B, et al. An end-to-end approach for optimal mode selection in Internet video communication: theory and applications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(6): 977 ~ 995.
- 6 He Zhi-hai, Cai Jian-fei, et al. Joint source channel rate-distortion analysis for adaptive mode selection and rate control in wireless video coding[J]. IEEE Transactions on Circuits and System for Video Technology, 2002, 12(6): 511 ~ 523.
- 7 Stuhlmüller K, Farber N, Link M, et al. Analysis of video transmission over lossy channels[J]. IEEE Transactions on Selected Areas in Communications, 2000, 18(6): 1012 ~ 1032.
- 8 Ribas-Corbera J, Lei S. Rate control in DCT video coding for low-delay communications [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1999, 9(1): 172 ~ 185.
- 9 Lee S-H, Choi D-H, Hwang C-S. Error concealment using affine transform for H.263 coded video transmissions [J]. Electronics Letters, 2001, 37(4): 218 ~ 220.
- 10 Salama Paul, Shroff N B, Delp E J. Error concealment in MPEG video streams over ATM networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(6): 1129 ~ 1144.