

一种基于 MPEG-4 视频编码流的信道失真模型

唐振华 刘文予 赵爽

(华中科技大学电子与信息工程系, 武汉 430074)

摘要 准确地估算信道失真是视频通信系统中联合功率失真(P-R-D)优化的重要基础,提出了一种基于MPEG-4视频编码流的信道失真模型,采用帧间递归,根据信道平均误比特率和视频编码信息在编码器端实时估算视频序列的信道失真,仿真结果表明,对于不同的视频编码序列,在不同信道误比特率和信源编码率下,模型估算的平均相对偏差和绝对偏差较小,准确度高,为基于P-R-D优化的失真估算提供一个有力的工具。

关键词 视频通信 率失真 信道失真模型 MPEG-4

中图分类号: TN919.8 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)05-877-07

A Channel Distortion Estimation Model Based on MPEG-4 Coding Bit Stream

TANG Zhen-hua, LIU Wen-yu, ZHAO Shuang

(Department of Electronic and Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

Abstract Accurately estimating the channel distortion for the video communication is significant to the joint power and rate-distortion (P-R-D) optimization. This paper proposes a channel distortion estimation model based on MPEG-4 coding stream. The model recursively estimates the channel distortion of the video coding sequences according to the bit error rate of the channel and the video coding information obtained in the video encoder. Simulation results demonstrate that the average relative estimation error and the average absolute estimation error introduced by the model are small. The model is applicable for the relative optimizations based on P-R-D.

Keywords video communication, rate-distortion, channel distortion estimation model, MPEG-4

1 引言

随着无线移动多媒体通信的发展,针对无线移动通信信道衰落、窄带宽及移动终端能量有限的特点,通信系统趋向于提供更灵活有效的资源优化配置机制。在视频通信系统中,由传统的率失真(R-D)发展而来的联合功率失真(P-R-D)优化,旨在优化视频失真、传输码率与终端能量消耗之间的资源分

配。接收端重构视频的失真估算是发送端进行P-R-D优化的重要基础,而估算的准确程度是系统有效配置资源的关键,因而,建立准确而具有鲁棒性的失真估算模型成为必要。

在端到端视频编码与通信系统中,接收端重构视频的失真主要包含由信源量化引起的失真以及由信道传输错误而导致的失真,并且,这两种失真是相互独立的^[1-2]。对于发送端来说,信源的量化失真可在信源编码器中精确估算,而信道失真估算由于

基金项目:国家自然科学基金项目(60572063);教育部博士点基金项目(20040487009)

收稿日期:2007-05-21;改回日期:2007-10-17

第一作者简介:唐振华(1979~),男,华中科技大学通信与信息系统专业博士研究生。主要研究方向为视频编码、无线视频通信。

E-mail: tangedward@21cn.com

涉及诸如复杂的信道状况及差错蔓延等因素仍然充满挑战。信道失真估算不仅是端到端视频失真估计的重要部分,而且也是视频编码器帧内/帧间的模式选择、多描述编码、不平等信道编码保护及视频解码器差错隐藏等诸多容错技术的基础。

目前,针对视频传输信道失真(或端到端失真)估算已有不少研究工作。Stuhlmuller 等人提出了描述信道错误对帧间差错扩散影响的解析模型^[1]。文献[3]提出了一种基于像素级别的递归失真估计算法(ROPE),文献[2]则提出一个基于帧级别递归信道失真模型。但上述研究工作均从视频分组丢失的影响来讨论信道失真(或端到端失真)估算,假设视频分组存在错误均视为丢包,没有深入考虑比特层次上的差错对失真的影响。Sabir 等人首次考虑传输码流的比特错误对编码系数的错误影响^[4],建立 JPEG 图像传输联合信源信道失真估算模型,随后,又将该思想推广到 MPEG-4 视频传输中^[5],然而,该模型需要根据特定的视频内容事先离线确定模型参数,难以在实时视频通信系统或事先未能获知视频内容的系统中应用。

本文借鉴文献[4]的思想,从传输的视频编码流本身来研究信道失真估算,以无线移动视频通信中常见的 MPEG-4 视频传输为例,在分析其信道失真的基础上,提出一种基于视频编码流的信道失真估算模型(简称信道失真模型),采用帧间递归,根据视频变长编码信息及信道平均误比特率,在视频发送端实时估算视频序列的信道失真,不需要类似文献[1]和文献[5],需根据特定的视频内容事先离线确定模型的参数,更易于在事先无法获知传输的视频内容及实时性要求较强的系统中应用。仿真结果表明,对于不同的视频序列,在不同的信道误比特率和信源编码率下,模型的估算准确度高,适应性强。此外,模型还可推广到其他与 MPEG-4 有相似编码结构的视频传输通信系统中。

2 基于 MPEG-4 视频编码流的信道失真估算

2.1 MPEG-4 视频编码结构

MPEG-4 标准^[6]的简单类(SP)中包含采用帧内(Intra)编码和帧间(Inter)预测编码的两种视频对象平面(VOP)类型,分别用 I-VOP 和 P-VOP 来表示。而每个图像组(GOP)由一个 I-VOP 与若干个 P-VOP 组成,每个 GOP 由 I-VOP 开始,P-VOP 紧接其后。I-VOP 由采用帧内编码的 Intra 宏块组成,而 P-VOP 既可包含采用帧间编码的 Inter 宏块,也可包含 Intra 宏块,为了讨论的方便,本文假设 P-VOP 中仅包含 Inter 宏块。此外,在 MPEG-4 编码方案中,每个宏块包含若干个 8×8 小块,这些块是亮度块或色差块,色度采样为 $4:2:0$ 格式的宏块包含 4 个亮度块和 2 个色差块。

2.2 视频分组结构与差错处理方案

MPEG-4 标准提供了灵活的视频分组大小选择,其标准议案^[6]提出,可根据不同的信道传送速率,固定相应的比特数作为一个分组,那么一个视频分组可包含一个宏块到一帧不等的内容。为了重点突出根据视频编码信息估计信道失真,本文考虑如图 1 所示的视频分组结构。当然,本文讨论的方法还可以推广到其他更复杂的分组形式。

宏块及宏块内的数据保持 MPEG-4 编码器输出的原始码流排序,宏块间插入分割标记,并假设视频分组头信息以及分割标记被重点保护,能够无差错传输。宏块间发生错误是独立的,当前宏块发生的错误由于分隔标记的存在不会影响到下一宏块。对于帧内编码宏块来说,如果宏块头信息发生至少一个比特的错误,则该宏块的信息将被丢掉,所有系数置零;如果宏块中某个离散余弦变换(DCT)系数出现至少一个比特发生错误的情况,则该系数及后

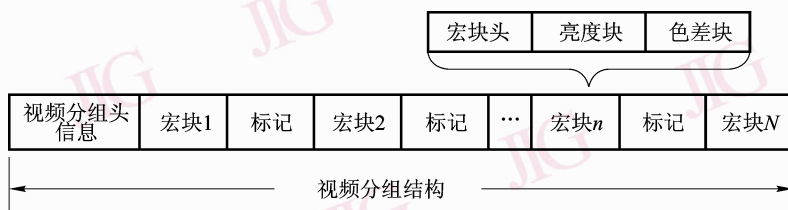


图 1 本文采用的视频分组结构

Fig. 1 The structure of the video packet

续的系数由于采用变长编码无同步标记可认为是无法正确解码,将其设为零。对于帧间预测编码宏块而言,宏块运动矢量包含于头信息中,若头信息部分发生错误,则运动矢量丢失,该宏块将用前一帧相同位置的宏块信息来代替;如果仅宏块的某残差系数发生比特错误,则该系数及后续的系数将被置零,但由于运动矢量接收正确,仍进行相应的运动补偿。

2.3 信道失真度分析与估算

采用均方误差(MSE)准则对上述两种宏块分别进行信道失真度分析。为简便起见,不考虑 Intra 宏块直流系数(DC)和交流系数(AC)预测的情况。

设 $\hat{B}_{f,m}^i$ 和 $\tilde{B}_{f,m}^i$ 分别是发送端视频编码器重构和接收端视频解码器重构的第 f 帧 m 宏块的第 i 个 8×8 块,每个宏块包含 K 个 8×8 块,那么第 f 帧 m 宏块由于信道错误而导致的失真可表示为

$$D_{f,m} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^K E[(\hat{B}_{f,m}^i - \tilde{B}_{f,m}^i)^2] \quad (1)$$

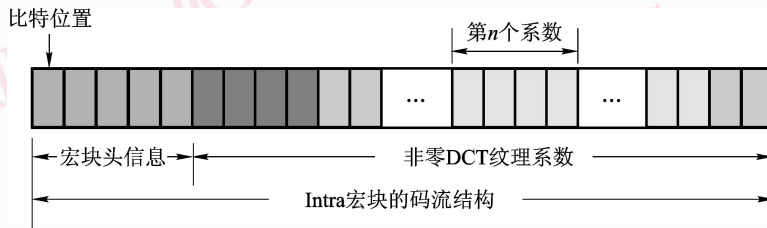


图2 基于比特的 Intra 宏块的压缩码流结构

Fig.2 The structure of bit stream for the Intra macroblock

设宏块头信息的长度为 L_h ,信道平均误比特的概率为 ρ ,那么宏块头信息发生至少一个比特错误的概率是 $1 - (1 - \rho)^{L_h}$,记为 P_h ,其中下标 h 表示与头信息相关的量。若 Intra 宏块头信息出错,则该宏块所有 DCT 系数将被丢掉,即 $\tilde{X}_{i,j} = 0$,结合式(2)得到该宏块由于头信息出错而导致的失真:

$$D_{f,m}^h(1) = \frac{1}{T} P_h \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^J (\hat{X}_{i,j})^2 \quad (3)$$

考虑游程编码,若 Intra 宏块中所有非零 DCT 系数的个数为 N ,令 $(\hat{X}_{i,j})^2 = \sigma_n^2$,那么式(3)也可表示为

$$D_{f,m}^h(1) = \frac{1}{T} P_h \sum_{n=1}^N \sigma_n^2 \quad (4)$$

设 Intra 宏块码流中第 n 个非零 DCT 系数的编码长度为 L_n ,如果码流中第 n 个非零 DCT 系数发生比特错误而该系数之前无错误,则该系数及其后续

式中, $E[\cdot]$ 表示所有可能信道状况的数学期望, T 表示每个宏块所包含亮度和色差分量的总数,即 $T = 8 \times 8 \times K$ 。

2.3.1 Intra 宏块的信道失真估算

由帕塞瓦尔定理可知, 8×8 块经 DCT 变换后,实际只改变能量的空间分布,设 Intra 宏块中 $\hat{B}_{f,m}^i$ 和 $\tilde{B}_{f,m}^i$ 对应的 DCT 系数分别是 $\hat{X}_{i,j}$ 和 $\tilde{X}_{i,j}$,那么 I-VOP 中 Intra 宏块的信道失真可表示为

$$D_{f,m}(1) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^K E\{[\text{DCT}(\hat{B}_{f,m}^i) - \text{DCT}(\tilde{B}_{f,m}^i)]^2\} \\ = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^J E[(\hat{X}_{i,j} - \tilde{X}_{i,j})^2] \quad (2)$$

如图2所示,在宏块的压缩码流中,头信息与经变长编码后的 DCT 系数以及系数之间无分隔标记,如果头信息或者当前的 DCT 系数发生至少一个比特错误将导致后续的系数无法正确解码,其后续的系数将被丢掉,因此,宏块信息出错存在依赖关系。

所有系数将被丢掉。该系数发生至少一个比特错误的概率是 $(1 - \rho)^{L_h + \sum_{s=0}^{n-1} L_s} [1 - (1 - \rho)^{L_n}]$, $n \in [1, N]$, 记为 P_n ,其中 $L_0 = 0$ 。那么第 n 个非零 DCT 系数发生错误而引起的失真为

$$D_{f,m}^n(1) = \frac{1}{T} P_n \sum_{k=n}^N \sigma_k^2 \quad (5)$$

容易看出,非零 DCT 系数出错的概率需通过宏块每一非零系数的准确码长信息及信道平均误比特率来确定。而文献[4]利用若干非零 DCT 系数的平均码长来计算系数出错的概率,这并不能精确地确定某个系数比特发生错误的位置,计算的出错概率存在偏差。本文的估算比利用平均码长来估算更准确。

综合式(4)和式(5),得到第 f 帧第 m 个 Intra 宏块平均信道失真为

$$D_{f,m}(1) = D_{f,m}^h(1) + D_{f,m}^1(1) + \dots + D_{f,m}^N(1)$$

$$= \frac{1}{T} P_h \sum_{n=1}^N \sigma_n^2 + \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N P_n \sum_{k=n}^N \sigma_k^2 \quad (6)$$

若将宏块头信息视为一个特殊的系数,令 $L_0 = L_h, P_0 = P_h$, 并且 $\sigma_0^2 = 0$, 那么式(6)可简化为

$$D_{f,m}(I) = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^N \sum_{k=n}^N P_n \sigma_k^2 \quad (7)$$

由以上分析可以看出,要实现 Intra 宏块的信道失真估算,需要得到 Intra 宏块头信息的编码长度、非零 DCT 系数对应的编码长度、系数量化重构后的值以及当前信道的平均误比特率。信道的平均误比特率可通过当前信道反馈的状况信息得到,而宏块精确的编码信息也可在视频编码器对其进行编码的同时统计出来,那么 Intra 宏块的信道失真估算便可在编码过程中实时完成。

2.3.2 Inter 宏块的信道失真估算

在 Inter 宏块中,信道失真分析针对 3 种情况:运动矢量信息出错、运动矢量正确接收而残差系数出错、运动矢量和残差系数均不出错。

对于第 1 种情况,如果运动矢量信息发生错误,该宏块将用前一帧相同位置的宏块信息来代替。Inter 宏块的运动矢量包含在头信息中,宏块头信息至少发生一个比特错误的概率为 $P_h = 1 - (1 - \rho_b)^{L_h}$,由式(1)可得 P-VOP 中 Inter 宏块由于运动矢量丢失而带来的失真:

$$\begin{aligned} D_{f,m}^h(P) &= \frac{1}{T} P_h \sum_{i=1}^K E[(\hat{B}_{f,m}^i - \tilde{B}_{f-1,m}^i)^2] \\ &= \frac{1}{T} P_h \sum_{i=1}^K E[(\hat{B}_{f,m}^i - \hat{B}_{f-1,m}^i + \hat{B}_{f-1,m}^i - \tilde{B}_{f-1,m}^i)^2] \\ &= \frac{1}{T} P_h \sum_{i=1}^K E[(\hat{B}_{f,m}^i - \hat{B}_{f-1,m}^i)^2] + \\ &\quad \frac{1}{T} P_h \sum_{i=1}^K E[(\hat{B}_{f-1,m}^i - \tilde{B}_{f-1,m}^i)^2] \\ &= P_h A_m(f, f-1) + P_h D_{f-1,m} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $A_m(f, f-1)$ 表示编码器重构视频中当前帧 f 与前一帧 $f-1$ 相同位置宏块 m 的均方误差,而 $D_{f-1,m}$ 则表示前一帧 $f-1$ 中宏块 m 的平均信道失真。需要注意的是,式(8)中假设以上的两项是互不相关的,在实际中这样的假设是合理的,本文以下类似的假设与此相同。

对于第 2 种情况,如果 Inter 宏块的运动矢量接收正确,而第 n 个非零残差系数出现比特错误,那么该残差系数及后续的所有的系数将被丢掉,此外,该宏块在前一帧的参考宏块也可能存在信道失真,根

据式(1)可得其导致的失真是:

$$\begin{aligned} D_{f,m}^n(P) &= \frac{1}{T} P_n \sum_{i=1}^K E[\hat{B}_{f,m}^i - (\tilde{B}_{f-1,m+\Delta d}^i + \tilde{e}_{f,m}^i)]^2 \\ &= \frac{1}{T} P_n \sum_{i=1}^K E[(\hat{B}_{f-1,m+\Delta d}^i + \hat{e}_{f,m}^i) - \\ &\quad (\tilde{B}_{f-1,m+\Delta d}^i + \tilde{e}_{f,m}^i)]^2 \\ &= \frac{1}{T} P_n \sum_{i=1}^K E[(\hat{B}_{f-1,m+\Delta d}^i - \tilde{B}_{f-1,m+\Delta d}^i)^2] + \\ &\quad \frac{1}{T} P_n \sum_{i=1}^K E[\text{DCT}(\hat{e}_{f,m}^i) - \text{DCT}(\tilde{e}_{f,m}^i)]^2 \\ &= P_n D_{f-1,m+\Delta d} + P_n D_{f,m}^n \end{aligned} \quad (9)$$

式中, P_n 表示 Inter 宏块中运动矢量正确而第 n 个残差系数至少出现一个比特的概率,即 $(1 - \rho)^{L_h + \sum_{s=0}^{n-1} L_s} [1 - (1 - \rho)^{L_n}]$ 。而 $\hat{e}_{f,m}^i$ 和 $\tilde{e}_{f,m}^i$ 则分别是 $\hat{B}_{f,m}^i$ 和 $\tilde{B}_{f,m}^i$ 对应的残差块。 Δd 表示当前 Inter 宏块在前一帧参考宏块的运动偏移量, $D_{f-1,m+\Delta d}$ 则是前一帧中预测宏块的平均信道失真。在式(9)中, $D_{f,m}^n$ 表示 Inter 宏块第 n 个残差系数丢失而导致的失真,该部分与 Intra 宏块纹理系数发生错误的失真情况类似,易得 $D_{f,m}^n = \frac{1}{T} P_n \sum_{k=n}^N \varepsilon_k^2$, 其中, ε_k^2 表示宏块中非零残差系数的平方值。根据式(9)得到 Inter 宏块运动矢量接收正确,而残差系数出错所导致的失真:

$$D_{f,m}^R(P) = \sum_{n=1}^N P_n (D_{f-1,m+\Delta d} + D_{f,m}^n) \quad (10)$$

式中, R 表示所有残差系数。

对于第 3 种情况,如果当前 Inter 宏块的运动矢量与残差信息不发生错误,但由于帧间预测关系的存在,前一帧对应参考宏块的失真可能因补偿环路的存在而引入当前宏块,发生这种情况的概率是 $P_{nc} = (1 - \rho)^{L_h} + \sum_{n=1}^N L_n$, 那么其带来的失真是:

$$D_{f,m}^{ne}(P) = P_{nc} D_{f,m+\Delta d} \quad (11)$$

式中, ne 为 no_err, 表示运动矢量和残差系数均不出现错误的情况。

综合式(9)~(11),得到第 f 帧第 m 个 Inter 宏块由信道错误引起的平均失真为

$$\begin{aligned} D_{f,m}(P) &= D_{f,m}^h(P) + D_{f,m}^R(P) + D_{f,m}^{ne}(P) \\ &= P_h [A_m(f, f-1) + D_{f-1,m}] + \\ &\quad \sum_{n=1}^N P_n (D_{f-1,m+\Delta d} + D_{f,m}^n) + \\ &\quad P_{nc} D_{f,m+\Delta d} \end{aligned} \quad (12)$$

由以上分析可知, Inter 宏块的信道失真估算除了需要得到与 Intra 宏块相同的编码信息外, 还需要得到该宏块的运动矢量、前一帧对应参考宏块和相同位置宏块的信道失真估算值及当前帧与前一帧相同位置宏块编码端重构后的均方差值。特别地, 前一帧参考宏块和相同位置宏块的信道失真估计值作为输入, 递归实现了当前帧 Inter 宏块信道失真的估算, 不需要类似文献[5]中为了估算 P-VOP 的失真, 需要根据视频序列库的内容事先离线确定帧间错误蔓延参数。

2.4 视频编码序列的信道失真估算

设每个 VOP 有 M 个宏块, 那么 I-VOP 的平均信道失真是该 VOP 所有 Intra 宏块信道失真的均值, 由式(7)得:

$$D_f(I) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M D_{f,m}(I) \quad (13)$$

同理, 由式(12)得 P-VOP 的平均信道失真为

$$D_f(P) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M D_{f,m}(P) \quad (14)$$

若视频编码序列的 GOP 的大小设为 W , 视频序列共有 G 个 GOP, 那么该序列的平均信道失真估算值为

$$D_{seq} = \frac{1}{GW} \sum_{g=0}^{G-1} \left(D_{gW}(I) + \sum_{f=gW+1}^{(g+1)W-1} D_f(P) \right) \quad (15)$$

3 实验结果与分析

为了测试模型的性能, 在 MPEG-4 校验模型 (VM) 上实现了本文提出的信道失真模型。由于高斯白噪声信道 (AWGN) 以及瑞利 (Rayleigh) 衰落信道在获知比特出错概率且码元 0 和 1 相互出错的概率相等的条件下均可表示为二进制对称信道 (BSC)^[4], 因此, 本文采用 BSC 信道作为仿真信道。视频编码器输出的视频码流经过 BSC 信道传输后进行视频解码和差错处理并计算其信道失真值, 同一视频码流在设定相同目标信道误比特率的信道进行 30 次仿真实验 (每次实验的信道发生错误的模式和位置随机变化), 取 30 次实验的平均值作为实际的信道失真值。

本文同时采用绝对估算偏差与相对估算偏差^[7]来全面衡量模型对信道失真估算的性能。模型绝对估算偏差是指模型估算的 PSNR 值与实际失真的 PSNR 值之差的绝对值, 而相对估算偏差则是

模型估算的绝对偏差与实际失真值之比, 如式(16)所示, 其中 \tilde{D}_n 是第 n 帧信道失真估算 PSNR 值, \hat{D}_n 是实际 PSNR 值, F 为总的帧数。

$$e = \frac{\sum_{n=1}^F |\hat{D}_n - \tilde{D}_n|}{\sum_{n=1}^F \hat{D}_n} \times 100\% \quad (16)$$

仿真实验对 12 组采用四分之一通用中等格式 (QCIF) 的标准视频测试序列进行了测试, 采样格式为 4:2:0, 除 tempete 序列为 250 帧外, 其余序列均为 300 帧, 帧率设为 15 f/s, GOP 的大小是 5。

图 3 给出了在不同信道误比特率下, 本文提出的模型对 mobile 序列进行失真估算的 PSNR 值与实际信道失真的 PSNR 值, 图 3(a)、图 3(b) 和图 3(c) 分别是信源码率设定在 64 kbps、128 kbps 和 256 kbps 的实验结果。可以看出, 在不同信源码率和信道误比特率下, 模型对 mobile 序列的信道失真估算值与实际值相比, 估算的绝对偏差均控制在 0.9 dB 以内。

表 1 是本文提出的信道失真模型对各编码的视频序列根据不同信道误码率进行信道失真估算的平均相对偏差和绝对误差。信源编码率均设定为 128 kbps, 表中每个值是模型根据不同信道误码率下估算偏差的平均值, 信道误比特率的范围从 10^{-2} 到 10^{-6} 。

表 1 模型对视频编码序列信道失真估算的平均偏差

Tab. 1 The average estimation error of channel distortion for the video coding sequences

测试序列	平均相对估算偏差 (%)	平均绝对估算偏差 (dB)
salesman	2.05	0.37
mthr & dhtr	2.66	0.47
silent	3.09	0.44
news	3.23	0.57
akiyo	3.66	0.68
mobile	3.81	0.61
tempete	4.61	0.88
coastguard	5.01	0.86
tabletennis	6.21	0.91
carphone	6.75	1.23
foreman	8.99	1.24
stefan	18.77	2.65

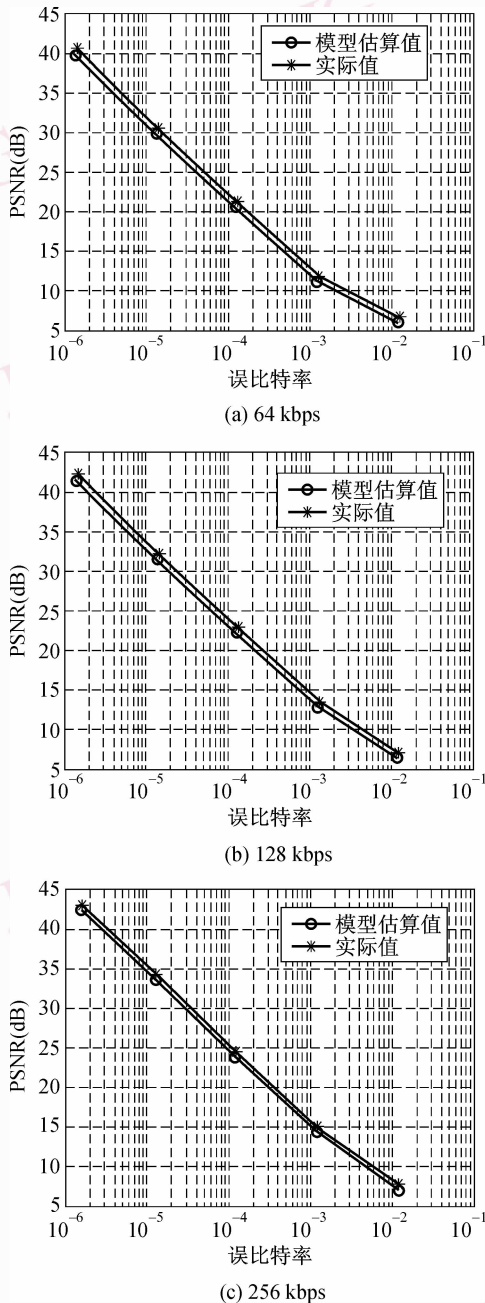


图 3 模型对 mobile 编码序列估算

PSNR 值与实际 PSNR 值的比较

Fig. 3 The comparative PSNR values on mobile video sequence between the model and the actual

从表 1 可以看出,对于绝大部分编码序列来说,模型根据不同的信道误比特率估算的信道失真的平均相对偏差控制在 9% 以内,模型估算的平均绝对偏差不超过 1.25 dB,准确度较高,但模型对个别编码序列(如 stefan 序列)的估算偏差较大,这主要由于模型对前景或者背景运动或变化极为剧烈的视频

缺乏根据视频内容变化的自适应调整而引起的。

文献[5]提出的模型对 16 个测试序列的失真估算绝对偏差均在 1 dB 以内,然而该模型的参数需要事先从由 20 个视频序列组成的训练库中获取,参数会随着训练库视频内容的变化而改变,估算的性能虽然会因此略有提升,但该模型难以在事先无法获知传输视频内容以及实时性要求较强的系统中应用。尽管本文模型对个别编码序列失真估算相对文献[5]的模型偏大,但是本文提出的模型不需要事先离线获取模型参数,并且对于绝大部分视频编码序列的估算平均偏差较小,更适用于事先无法获知传输的视频内容及实时性要求较高的系统中应用。

4 结 论

在详细分析 MPEG-4 视频编码流传输中信道失真的基础上,本文提出了一种基于其编码流结构的信道失真模型,该模型采用帧间递归,利用发送端的视频编码信息,根据信道的误比特状况,实时估算接收端的信道失真,模型不需要事先离线通过视频训练库获取模型的任何参数。实验结果表明,对不同的视频编码序列,在不同信道误比特率和信源码率下,模型估算的平均相对偏差和绝对偏差较小,准确度高,适应性强。该模型为基于 R-D 或者 P-R-D 的相关优化提供一个有力工具,如基于 R-D 优化的联合信源信道编码以及不平等保护等,适用于事先无法获取传输视频的内容及实时要求较高的系统。此外,模型还可推广到其他与 MPEG-4 有相似编码结构的视频传输通信系统中。在模型中加入可根据视频内容自适应调整的参数,进一步减小失真估算的偏差,将成为本文下阶段研究的目标之一。

参考文献 (References)

- 1 Stuhlmüller K, Farber N, Link M, *et al.* Analysis of video transmission over lossy channels [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, **18**(6):1012-1032.
- 2 He Z H, Cai J F, Chen C W. Joint source channel rate-distortion analysis for adaptive mode selection and rate control in wireless video coding [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2002, **12**(6):511-523.
- 3 Zhang R, Regunathan S L, Rose K. Video coding with optimal inter/intra-mode switching for packet loss resilience [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, **18**(6):966-976.
- 4 Sabir M F, Sheikh H R, Heath Jr R W, *et al.* A joint source-channel distortion model for JPEG compressed images [J]. *IEEE Transactions*

- on Image Processing, 2006, **15**(6):1349-1364.
- 5 Sabir M F, Heath Jr R W, Bovik A C. Joint source-channel distortion modelling for MPEG-4 video [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'06)[C], Toulouse, France,2006; 201-204.
- 6 ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N2202, Information Technology-Coding Of Audio-Visual Objects: Visual-ISO/IEC 14496-2 Committee Draft [S], Tokyo, Japan, 1998.
- 7 He Z H, Xiong H K. Transmission distortion analysis for real-time video encoding and streaming over wireless networks [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2006, **16**(9): 1051-1062.