

H.264/AVC 重复编解码性能分析

朱子元, 林 涛

(同济大学超大规模集成电路研究所, 上海 200092)

摘要: 研究 H.264/AVC 帧内重复编解码的性能, 通过论证和实验把导致重复编解码 PSNR 损失的因素归纳为 4 个方面: 量化-变换误差, 预测模式再选择误差, Clipping 误差和环路滤波误差。为了提高 H.264/AVC 帧内重复编解码的性能, 通过选择相同的预测模式且不使用环路滤波的方法进行重复编码, 实验结果表明该方法使重复编解码的 PSNR 损失减少 0.5 dB~1.4 dB。

关键词: H.264/AVC 编解码; 重复编解码; 性能

Performance Analysis of H.264/AVC Multi-generation Coding

ZHU Zi-yuan, LIN Tao

(Very Large Scale Integrated Circuits Laboratory, Tongji University, Shanghai 200092)

【Abstract】 This paper studies the performance of H.264/AVC multi-generation coding, presents four mechanisms that contribute to the continued degradation: quantization-transform error, prediction mode re-estimation error, clipping error and deblocking error. To improve the multi-generation performance, it presents a multi-generation coding procedure by selecting the same prediction mode and disabling deblocking filter for each compression stage. Experimental results show that PSNR loss of multi-generation coding decreases 0.5 dB~1.4 dB.

【Key words】 H.264/AVC coding; multi-generation coding; performance

1 概述

重复编解码是对图像反复进行再编码、再解码的过程^[1]。在实际应用中, 如视频编辑、码流切换、码流的动态转换, 往往需要对图像进行重复编解码。文献[2]为了用无线方式传输 HDMI 高清数字电视信号, 采用 JPEG-2000 对解码后的高清视频信号再编码。在重复编解码的过程中, 再编解码的误差越小越好, 因此, 欧洲制定了 ATLANTIC 计划^[3], 以提高重复编解码的性能。文献[4]研究了 JPEG 和 JPEG2000 重复编解码的性能。文献[5]改进了 MPEG-2 的重复编解码性能。本文归纳了导致 H.264/AVC 帧内重复编解码 PSNR 损失的因素, 并给出了提高 H.264/AVC 帧内重复编解码性能的方法。

2 H.264/AVC 帧内重复编解码的性能

一般 H.264/AVC 每次再编码相对于前一次总会有 PSNR 损失。图 1、图 2 为参考编解码器 JM14 对 720P 序列 Crew 和 Parkrun 在不同码率下 10 次重复编解码的重构图像相对于原始图像的 PSNR 分布情况, 编码参数为: 全 I 帧, 每秒 30 帧, RDO=1, Error Metric=SAD, CABAC, Deblocking Filter。可以看到, PSNR 随着重复编解码次数的增加而降低。

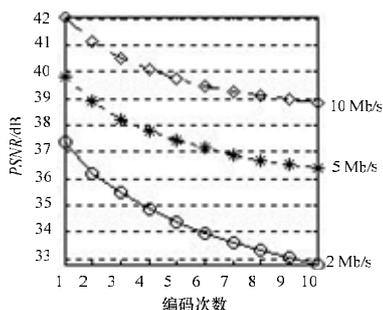


图 1 Crew 720P 10 次重复编解码 PSNR 分布

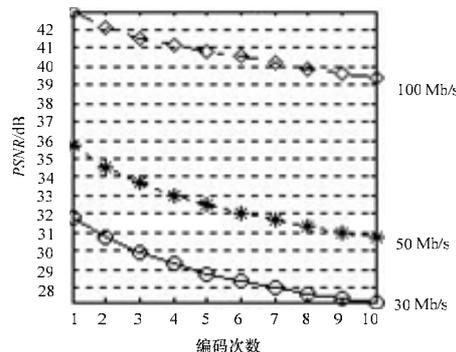


图 2 Parkrun 720P 10 次重复编解码 PSNR 分布

3 导致 H.264/AVC 帧内编解码 PSNR 损失的因素

不失一般性, 本文只分析 H.264/AVC 帧内重复编解码过程中的第 1 次和第 2 次编解码过程, 如图 3 所示。其中, OP 表示原始图像; DRP_1 表示第 1 次编解码的重构图像; DRP_2 表示第 2 次编解码的重构图像; D , TD , CRP , DRP 等变量均表示为矩阵形式; $pred(pm, cs)$ 是帧内预测, 其预测值依赖于预测模式 pm 和重构图像 cs ; Clipping 保证图像的重构值在有效范围内; DF 为环路滤波; Tr , Qu , DQu 和 ITr 分别表示变换、量化、反量化和反变换。为阐述方便, 用算子 $TQ(X, QP)$ 表示当量化参数为 QP 时, 对预测残差 X 进行 Tr , Qu , DQu 和 ITr 的过程:

$$TQ(X, QP) = ITr(DQu(Qu(Tr(X), QP), QP)) \quad (1)$$

于是可得第 1 次编解码的重构图像 DRP_1 :

作者简介: 朱子元(1980 -), 男, 博士研究生, 主研方向: 视频编码; 林涛, 教授、博士生导师

收稿日期: 2009-01-05 **E-mail:** zzy@hotmail.com

$$TD_1 = TQ(OP - pred(pm_1, cs_1), QP_1) \quad (2)$$

$$CRP_1 = Clip(TD_1 + pred(pm_1, cs_1)) \quad (3)$$

$$DRP_1 = DF(CRP_1) \quad (4)$$

第2次编解码的重构图像 DRP_2 为

$$TD_2 = TQ(DRP_1 - pred(pm_2, cs_2), QP_2) \quad (5)$$

$$CRP_2 = Clip(TD_2 + pred(pm_2, cs_2)) \quad (6)$$

$$DRP_2 = DF(CRP_2) \quad (7)$$

根据式(2)~式(7), 2次编解码重构图像的关系由以下5个因素决定: 变换-量化 TQ , Clipping, 环路滤波, QP 和 pm , 因此, 本文把导致 H.264 重复编解码误差的因素归纳为4个方面: 变换-量化误差, 预测模式再选择误差, Clipping 误差和环路滤波误差。

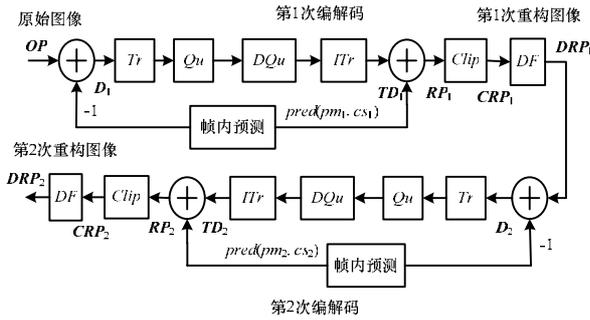


图3 H.264/AVC 帧内2次重复编解码结构

3.1 变换-量化误差

变换-量化误差是指由量化和变换不完全可逆性造成的再编码误差^[5]。为了讨论变换-量化误差, 假设编解码过程中不产生 Clipping 和环路滤波, 且2次编码的预测模式相同。即假设:

$$Clip(X) = X \quad (8)$$

$$DF(X) = X \quad (9)$$

$$pred(cs_1, pm_1) = pred(cs_2, pm_2) = P \quad (10)$$

由式(2)~式(4)、式(8)~式(10)得

$$DRP_1 = TQ(OP - P, QP_1) + P \quad (11)$$

由式(5)~式(9)得

$$DRP_2 = TQ(DRP_1 - P, QP_2) + P \quad (12)$$

将式(11)代入式(12)得

$$DRP_2 = TQ(TQ(OP - P, QP_1), QP_2) + P \quad (13)$$

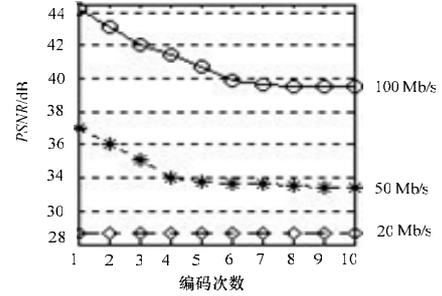
因此, 由量化-传输导致的重复编解码误差为

$$e = TQ(TQ(OP - P, QP_1), QP_2) - TQ(OP - P, QP_1) \quad (14)$$

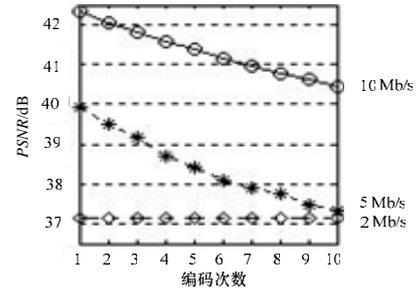
其值与量化和变换以及2次编码选择的 QP 有关。

为了评价变换-量化误差对 H.264/AVC 重复编解码性能的影响, 本文用 JM14 对 Crew 和 Parkrun 在不同码率下进行重复编解码。为了保证不存在预测模式再选择误差, 记录下每个宏块的预测模式, 作为下一次编码时相同位置的宏块的预测模式, 保证每次编码的预测模式相同。同时, 为了使重构图像时不发生 Clipping, 对序列进行预 Clipping, 即把序列 Crew 的每个像素 Clipping 到 50~210 之间, Parkrun 的每个像素 Clipping 到 60~190 之间。JM14 的主要编码参数设置为: 全 I 帧, 每秒 30 帧, 不使用 Deblocking Filter, CABAC。图4为 PSNR 分布情况。可以看到, 变换-量化误差一般导致 H.264/AVC 重复编解码 PSNR 随再编解码次数的增加而降低, 如序列 Crew 在 10 Mb/s 码率下, 其 PSNR 从第1次的 42.31 dB 降低到第10次的 40.45 dB。而对于同一个序列, 当码率减小

到一定程度时, 变换-量化误差将为 0。如序列 Crew 在 2 Mb/s 码率下, 每次重复编解码的 PSNR 均为 37.14 dB, 变化-量化误差为 0, 而序列 Parkrun 在码率为 20 Mb/s 时, 其变化-量化误差为 0。



(a) Parkrun 720P



(b) Crew 720P

图4 变换-量化误差对重复编解码的影响

3.2 预测模式再选择误差

预测模式再选择误差是由再编码时选择的预测模式与前次编码不同而导致的再编码的误差。为了对其进行讨论, 假设编码过程中不产生 Clipping 和环路滤波, 且不产生变换-量化误差。即假设式(8)、式(9)成立, 且

$$TQ(TQ(X, QP_1), QP_2) = TQ(X, QP_1) \quad (15)$$

由式(2)~式(4)、式(8)、式(9)得

$$DRP_1 = TQ(OP - P_1, QP_1) + P_1 \quad (16)$$

由式(5)~式(9)得

$$DRP_2 = TQ(DRP_1 - P_2, QP_2) + P_2 \quad (17)$$

将式(16)代入式(17)得

$$DRP_2 = TQ(TQ(OP - P_1, QP_1) + P_1 - P_2, QP_2) + P_2 \quad (18)$$

将式(15)代入式(16)得

$$DRP_1 = TQ(TQ(OP - P_1, QP_1), QP_2) + P_1 \quad (19)$$

其中, $P_1 = pred(cs_1, pm_1)$; $P_2 = pred(cs_2, pm_2)$; $P_e = P_1 - P_2$ 。

对比式(18)和式(19), 当 pm_1 和 pm_2 不相等时, DRP_1 与 DRP_2 一般不相等, 即存在预测模式再选择误差。而当预测相同且预测所依赖的重构像素 cs 相同时, 预测模式再选择误差为 0。

在图4中, 预 Clipping 后的序列 Crew 和 Parkrun 在码率为 2 Mb/s 和 20 Mb/s 情况下的重复编解码过程不存在量化-变换误差, 因此, 为了评价预测模式再选择误差, 对上述2个序列分别在 2 Mb/s 和 20 Mb/s 码率下进行重复编解码, 不再使用相同的预测模式, 而是由 RDO 决定预测模式的选择。其他编码参数为: 全 I 帧, 不使用 Deblocking Filter, CABAC, 每秒 30 帧, RDO=1, Error Metric = SAD, 其 PSNR 分布情况如表1所示。可以看到, 由于 RDO 判断的预测模式可能与前一次编码不同, 使得每次再编码的 PSNR 比前一次

编码均有所降低,即存在预测模式再选择误差。

表 1 预测模式再选择误差对 PSNR 的影响 dB

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
Parkrun	30.68	30.30	30.13	30.02	29.94
Crew	37.14	36.67	36.44	36.30	36.22
	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次
Parkrun	29.88	29.83	29.80	29.77	29.75
Crew	36.16	36.12	36.10	36.08	36.07

3.3 Clipping 误差

对于 8 bit 精度的编码器,当重构像素值小于 0 或大于 255 时,该像素值分别被设定为 0 或 255,该过程即 Clipping。Clipping 误差是指重构像素时由 Clipping 导致的重复编解码误差。通过对序列 Coastguard 某个 4×4 块分别在“没有”Clipping 和“有”Clipping 2 种情况下进行重复编解码来说明 Clipping 误差。对于该 4×4 块,当 $QP_1=QP_2=21$ 时,不存在变换-量化误差;当 $pm_1=pm_2=Horizontal$ 时,不存在预测模式再选择误差。如图 5 所示,其中,分数表示 Clipping 对重构像素的影响;分子表示“没有”Clipping 时的重构像素;分母表示“有”Clipping 时的重构像素。

239	242	243	239	243	239	242	242	243	243	239	$\frac{242}{240}$	$\frac{242}{240}$	$\frac{243}{241}$	$\frac{243}{242}$
254	255	255	255	255	254	$\frac{257}{255}$	$\frac{257}{255}$	$\frac{258}{255}$	$\frac{258}{255}$	254	$\frac{257}{255}$	$\frac{257}{255}$	$\frac{258}{255}$	$\frac{258}{255}$
199	207	204	205	198	199	208	205	200	197	199	$\frac{208}{206}$	$\frac{205}{203}$	$\frac{200}{198}$	$\frac{197}{196}$
153	154	153	159	160	153	153	155	158	160	153	$\frac{153}{151}$	$\frac{155}{153}$	$\frac{158}{157}$	$\frac{160}{158}$

(a)原始像素块 (b)第1次编解码重构像素块 (c)第2次编解码重构像素块

图 5 Clipping 误差

可以看到,Clipping 造成该 4×4 块第 2 次编解码的重构图像与第 1 次编解码的重构图像不再保持一致。

类似地,为了估计 Clipping 误差,用 JM14 对没有经过预 Clipping 的原始序列 Crew 和 Parkrun 分别在 2 Mb/s 和 20 Mb/s 码率下采用相同的预测模式进行 10 次重复编解码,编码参数为:全 I 帧,不使用 Deblocking Filter, CABAC,每秒 30 帧。实验结果表明,Clipping 误差对 H.264 重复编解码性能影响较小,对于序列 Parkrun,Clipping 误差仅在第 2 次编解码时造成了 0.006 dB 的 PSNR 损失,对于 Crew 序列则没有产生影响。

3.4 环路滤波误差

环路滤波误差是指由于使用环路滤波而导致的重复编解码误差。通过对序列 Crew 某个 4×4 像素块分别在“不使用”和“使用”环路滤波 2 种情况下进行重复编解码来说明环路滤波误差,对于该 4×4 块,当 $QP_1=QP_2=35$ 时,不存在变换-量化误差;当 $pm_1=pm_2=Horizontal$ 时,不存在预测模式再选择误差,且不发生 Clipping。如图 6 所示,其中,分数表示环路滤波对重构像素的影响;分子表示“不使用”环路滤波时的重构像素;分母表示“使用”环路滤波时的重构像素。

149	146	146	147	141	149	$\frac{147}{148}$	$\frac{147}{148}$	147	147	149	$\frac{147}{149}$	$\frac{147}{149}$	$\frac{147}{149}$	$\frac{147}{149}$
149	148	152	152	148	149	$\frac{147}{148}$	$\frac{147}{148}$	147	147	149	$\frac{147}{149}$	$\frac{147}{149}$	$\frac{147}{149}$	$\frac{147}{149}$
149	150	151	149	144	149	$\frac{147}{148}$	$\frac{147}{148}$	147	147	149	$\frac{147}{149}$	$\frac{147}{149}$	$\frac{147}{149}$	$\frac{147}{149}$
149	147	143	139	135	149	$\frac{147}{148}$	$\frac{147}{148}$	147	147	149	$\frac{147}{149}$	$\frac{147}{149}$	$\frac{147}{149}$	$\frac{147}{149}$

(a)原始像素块 (b)第1次编解码重构像素块 (c)第2次编解码重构像素块

图 6 环路滤波误差

可以看到,环路滤波造成了第 2 次编解码重构图像不再与第 1 次编解码的重构图像保持一致。

为了估计环路滤波误差,对经过预 Clipping 的序列 Crew 和 Parkrun 分别在 2 Mb/s 和 20 Mb/s 码率下且在使用环路滤波的情况下,采用相同的预测模式进行 10 次重复编解码,其 PSNR 分布如表 2 所示,主要编码参数为:全 I 帧,使用 Deblocking Filter, CABAC,每秒 30 帧。可以看到,环路滤波误差导致每次再编码的 PSNR 比前一次均有所降低。

表 2 环路滤波误差对 PSNR 的影响 dB

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
Parkrun	30.73	30.22	29.96	29.78	29.66
Crew	37.50	36.52	35.92	35.46	35.10
	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次
Parkrun	29.57	29.51	29.46	29.42	29.40
Crew	34.82	34.59	34.40	34.26	34.14

4 结束语

从上述实验结果中可以看到,Clipping 误差对 H.264/AVC 重复编解码 PSNR 损失的影响较小,而变换-量化误差、预测模式再选择误差和环路滤波误差的影响较大。因此,为了得到较好的重复编解码性能,可以采用不使用环路滤波,并且在每次编码时记录下每个宏块的预测模式作为下一次编码时相同位置宏块的预测模式的编码方法。用该方法对 1080P 序列 Riverbed, RushHour 和 720P 序列 Crew, Parkrun 在不同的码率下进行 2 次重复编解码,并且与 JM14 两次重复编解码的情况比较,主要编码参数为:全 I 帧,每秒 30 帧,RDO=1, Error metric for Mode Decision = SAD, CABAC,不使用 Deblocking Filter。表 3 给出了 2 种重复编解码方法的 PSNR 损失情况对比。

表 3 2 种算法第 2 次编解码 PSNR 损失情况对比

序列	码率/(Mb·s ⁻¹)	JM14/dB	改进后算法/dB
Riverbed	100	1.619 9	0.241 6
RushHour	100	0.742 7	0.199 2
Crew	20	0.994 2	0.450 3
Parkrun	100	0.817 3	0.000 4

可以看到,当再编码时使用与前一次编码相同的预测模式且不使用环路滤波时,第 2 次编码的 PSNR 损失较小,比 JM14 在普通编码方式下的 PSNR 损失减少了 0.5 dB~1.4 dB。

参考文献

- [1] Horne C, Naveen T, Tabatabai A. Study of the Characteristics of the MPEG2 4:2:2 Profile — Application of MPEG2 in Studio Environment[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(3): 251-272.
- [2] Krishnamoorthy R. High Definition, Anywhere: How Ultra Wideband Makes Wireless HDMI Possible[C]//Proc. of IEEE CCNC'07. Las Vegas, USA: IEEE Press, 2007.
- [3] Wells N, Gilchrist N. ATLANTIC: Preserving Video and Audio Quality in an MPEG-Coded Environment[Z]. [2008-01-13]. <http://www.aes.org/e-lib/online/download.cfm/8137.pdf?ID=8137>.
- [4] Joshi R L, Rabbani M, Lepley M. Comparison of Multiple Compression Cycle Performance for JPEG and JPEG2000[C]//Proc. of SPIE'00. San Diego, USA: [s. n.], 2000.
- [5] 易彦,孙军. 图像多次无降质编解码的研究[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(4): 616-619.