

基于 H.264 的无再损帧内编码

董鹏宇 林涛

(同济大学超大规模集成电路研究所 上海 200092)

摘要: 为了在改进的 H.264 上实现无再损帧内编码, 该文提出了一种新的基于整数线性规划的优化 clip 算法及改进算法, 解决了 H.264 多次编码中由当前 clip 模块和帧内预测运算引入的视频畸变问题, 并且改进了现有帧内预测算法的代价函数以确保多次编码时后续编码器预测值与前次编码器预测值一致。实验结果显示, 与现有帧内编码算法比较, 基于整数线性规划理论的帧内编码算法完全消除了现有算法导致的多次编码时的图像降质现象, 在改进的 H.264 编解码算法中实现了严格视频无再损编码。

关键词: 视频多次编码; 帧内编码; 无再损; 整数线性规划; H.264

中图分类号: TN919.81

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)01-0117-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01664

Re-loss-free Intra-frame Coding Based on H.264

Dong Peng-yu Lin Tao

(VLSI Lab, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper addresses the video distortion of intra-frame coding in multigeneration, which is introduced by the current clip operation and intra-frame prediction. In order to implement the Re-Loss-Free (RLF) intra-frame coding in modified H.264, a novel optimal clipping algorithm based on Integer Linear Programming (ILP) and its improved algorithm are proposed. Furthermore, the cost function of intra-frame prediction is improved to guarantee later encoder the same prediction values with the former. Experimental results show that the ILP-based intra-frame coding method completely eliminates the video degradation and achieves superior performance in comparison with current intra-frame coding method in H.264.

Key words: Video multigeneration; Intra-frame coding; Re-Loss-Free (RLF); Integer Linear Programming (ILP); H.264

1 引言

随着视频编码技术及相关电子产品的发展, 人们对视频质量的要求也随之提高。在一些应用领域如图形图像工作室或多媒体网络服务器, 图像或视频流通常要经过多次压缩-解压缩的循环过程, 而视频畸变也会随着再编码次数的增加而增加。因此解决多次编码中的视频畸变具有很强的实际意义。

最近几十年里, 研究人员对视频多次编码的特性以及多次编码中可能造成视频畸变的原因进行了分析, 并提出了相应的解决方法。文献[1]分析了 MPEG-2 4:2:2 格式视频流在多次再编码环境中的特性。Erdem 与 Sezan 使用广义投影理论(the theory of generalized projections)分析了在特定条件下 MPEG 视频流中 I 帧 P 帧与 B 帧在多次再编码中的“饱和”特性^[2]。Sorial 和 Lynch 进一步分析了 MPEG-2 视频流多次再编码中可能导致视频畸变的 5 个因素^[3]。类似地, 文献[4,5]对于静态图像在多次再编码中的图像降质进行分析。然而这些关于多次再编码中图像降质的研究都局限于采用

MPEG 或 JPEG 标准压缩的视频/图像。

与采用 MPEG/JPEG 标准压缩的视频/图像类似, H.264 重构帧或解码帧在每次再编码时也可能产生视频畸变。在这种情况下, 需要找到一种编码方法降低甚至完全消除 H.264 多次再编码中的视频畸变。从无损和有损视频编码的角度考虑, 本文按照文献[6,7]的提法, 称之为无再损(Re-Loss-Free)视频编码。

在 H.264 帧内编码中, 图像重构和解码单元可能会遇到重构或解码数据超出变量表示范围的情况(数据溢出), 而目前算法的 clip 操作会导致图像畸变。为了降低由当前 clip 算法导致的视频畸变, 本文提出了基于整数线性规划(ILP)的最优化 clip 算法及具有低复杂度的改进算法。为了确保后续编码预测像素与前次编码时一致, 本文同时改进了 H.264 帧内预测算法的代价函数。实验结果表明, 使用本文方法改进的 H.264 编解码器能够完全消除视频再编码中的像素畸变。

本文第 2 节介绍 H.264 无再损视频编码定义和 H.264 无再损帧内编码的条件。并通过例子说明现有 clip 算法在多次再编码中造成图像降质的原因。

第 3 节简要介绍整数线性规划理论, 随后提出基于整数线性规划理论的 clip 算法和改进算法, 以及新的帧内预测代价函数。最后通过实验评估改进算法在实际视频再编码中的效果并给出结论。

2 H.264 无再损帧内编码分析

2.1 无再损视频编码理论

无再损(Re-Loss-Free)视频编码理论在文献[6,7]中提出, 其基本思想是: 假设选择与初次编码同样的编码参数时, 基于初次编码的重构帧或解码帧的任何后续编码-解码过程都不会引入新的视频畸变或数据丢失, 并且将一直保持为无损编码, 可以称之为无再损(RLF)视频编码。无再损(RLF)视频编码系统表示为

$$D(E(\tilde{O}, p)) = D(E(O, p)) = \tilde{O} \quad (1)$$

其中运算单元 E 为编码单元或者编码器, 运算单元 D 为解码单元或解码器, p 为输入编码参数, \tilde{O} 为重构视频序列, O 为输入视频流。

2.2 H.264 帧内无再损视频编码条件

根据 H.264 标准^[8], 视频帧可被分为 16×16 宏块, 8×8 块或者 4×4 子块。为了描述的方便, 以下本文的讨论限于帧内 4×4 亮度块。图 1 是一个典型的 H.264 再编码算法框图, 可以将其看作组成视频再编码的一个压缩-解压缩循环单元: 重构帧或解码帧作为后续编码器的输入。其中 Tr , Qu , DQ , IT , $Pred$ 分别代表变换, 量化, 反量化, 反变换, 预测模块。符号 B 到 S 与 \tilde{B} 到 \tilde{S} 分别代表第 1 次与第 2 次编码中各运算模块输入 4×4 矩阵。考虑到熵编码为无损编码, 为了表示的方便将其从算法框图中省略。

为了实现无再损编码, 按照式(1)可知, 在编码参数不变的条件下, 必须保证第 2 个编码器的重构视频信号 \tilde{S} 与第 1 个编码器的重构视频信号 S 严格一致。

在图 1 中假设没有 clip 操作, 如果式(2)成立则

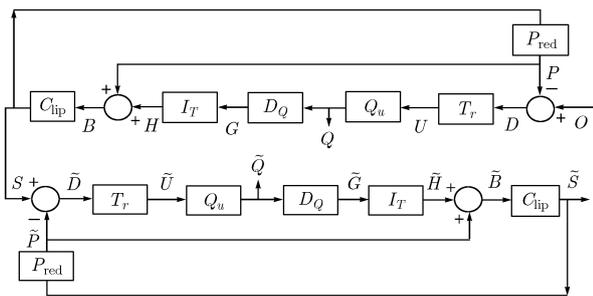


图 1 4×4 亮度视频再编码框图

图 1 为无再损视频编码

$$\begin{aligned} & Qu(Tr(IT(DQ(Q)) + P - \tilde{P})) \\ &= Qu(Tr(IT(DQ(Q)))) = Q \end{aligned} \quad (2)$$

如果从数学角度假设反量化与反变换操作均为线性可逆运算, 即 $(Tr \cdot IT = Qu \cdot DQ = I)$, 则无需其它任何附加条件式(2)依然成立。然而 H.264 标准中的变换, 量化以及其逆运算均定义为整数运算, 这就不可避免地存在量化误差, 对于严格无再损视频编码系统来说, 这些由整数运算引入的舍入或拾入误差不可忽略。因此, 考虑到量化误差的影响, 参考文献[6,7]证明式(2)在量化因子 q_f (0~51) 大于等于 20 时始终成立。

2.3 H.264 中的 Saturation Clip 算法

由于 H.264 编解码器中大多数运算是 8 bit 整数运算, 相应地, 变量也定义为 8 bit 无符号类型。当反 DCT 变换的输出与预测值做加法运算来重构或者解码视频帧时, 输出结果可能会超出 8 bit 无符号类型的表示范围。为了解决这一问题, H.264 算法加入了 clip 运算单元来确保加法运算输出的有效性。以图 1 为例, 如果 4×4 输出矩阵 B 中的某些元素大于 255 或者小于 0, 现有的 clip 算法会强制地将这些溢出元素置为 255(上溢)或 0(下溢), 同时保持矩阵中其它未溢出元素不变。考虑到 clip 运算, 式(2)重写为

$$Qu(Tr(Clip(IT(DQ(Q)) + P) - P)) = Q \quad (3)$$

$$\text{其中 } Clip(a) = \begin{cases} 255, & a > 255 \\ 0, & a < 0 \\ a, & 0 \leq a \leq 255 \end{cases}$$

以图 1 为例, 矩阵 B 中存在数据溢出时, 按照现有 clip 算法校正后输出为 $H_m + P$,

$$Clip(B) = Clip(H + P) = H_m + P \quad (4)$$

$$\text{其中 } h_m = \begin{cases} 255 - p, & b > 255 \\ 0 - p, & b < 0 \\ h, & 0 \leq b \leq 255 \end{cases}$$

h , h_m , p , b 分别为矩阵 H , H_m , P , B 中元素。以视频序列 Hall Monitor^[9] 中的一个 4×4 亮度块为例, 经过第 1 个编码器后的量化输出矩阵如图 2(a)所示。图 2(b)为 clipping 前的重构/解码矩阵, 4×4 矩阵中有 6 个元素发生了数据上溢, 采用现有 Saturation clipping 算法校正后的矩阵如图 2(c)所示。假设后续编码器的预测值与前一次一致并选择同样的编码参数, 经过第 2 个编码器的量化输出不等于第 1 次量化输出, 如图 2(d)所示, 在第 1 行第 2 列处产生了数据畸变。

$$\begin{array}{cccc}
\begin{bmatrix} -3 & 4 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} &
\begin{bmatrix} 266 & 250 & 251 & 240 \\ 257 & 257 & 244 & 201 \\ 253 & 261 & 240 & 183 \\ 257 & 257 & 244 & 203 \end{bmatrix} &
\begin{bmatrix} 255 & 250 & 251 & 240 \\ 255 & 255 & 244 & 201 \\ 253 & 255 & 240 & 183 \\ 255 & 255 & 244 & 203 \end{bmatrix} &
\begin{bmatrix} -3 & 3 & -2 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
\text{(a)第1次编码量化结果} & \text{(b) Saturation clipping前的重构值} & \text{(c) Saturation clipping之后的重构值} & \text{(d)第2次编码量化结果}
\end{array}$$

图 2 现有 Saturation clipping 样例

3 本文提出的算法

3.1 基于整数线性规划理论的优化 Clip 算法

线性规划一般表示为在若干约束条件下, 探求目标函数的极大或者极小值。如果要求决策变量为整数, 则演变为整数线性规划问题^[10], 如经典的背包问题和工厂选址问题。

实现无损再编码的条件是重构或解码数据溢出时优化 clip 算法可以确保后续编码时的量化结果与第 1 次编码时量化结果一致。按照这种思想实现的优化 clip 算法统称为固定量化值 clip 算法 (Preserving Q Clipping, PQC)。本节介绍基于整数线性规划理论实现的固定量化值 clip 算法 (ILP-Based PQC)。以图 1 为例, 第 2 次编码时的 DCT 变换输出矩阵 \tilde{U} 中的每一个元素都要被限制在与第 1 次编码时的 DCT 变换输出矩阵 U 中对应元素相同的量化范围内。为了实现这一目标, 本文从整数线性规划理论角度描述这一问题, 引入新的变量矩阵 $Y = |S - B|$, 建立数学模型如下:

最小化 $\sum (y_1 + y_2 + \dots + y_{16})$, 满足 $U_L \leq C_f(S - P)C_f^T \leq U_H$, $0 \leq S \leq 255$, $Y - S \geq -B$, $Y + S \geq B$, $Y \geq 0$, 其中 C_f 为 H.264 标准中定义的整数 DCT 变换矩阵, U_H , U_L 为 Q 的量化范围, 矩阵 U_H , U_L 中的每一个元素 u_H , u_L 均可以通过式(5)得到:

$$\left. \begin{array}{l} u_1 = (2^{15+q\text{bits}}(|q|+1) - f - \text{MF})/\text{MF} \\ u_2 = (2^{15+q\text{bits}}|q| - f + \text{MF})/\text{MF} \\ u_L = \begin{cases} u_1, & q > 0 \\ -u_2, & q \leq 0 \end{cases} \\ u_H = \begin{cases} u_2, & q \geq 0 \\ -u_1, & q < 0 \end{cases} \end{array} \right\} \quad (5)$$

MF 为 H.264 协议中定义的量化乘数因子, $f = 2^{15+q\text{bits}} // 3$, $q\text{bits} = q_f // 6$ (//代表整数除法, q_f 为量化因子), q 为矩阵 Q 中元素。优化算法的目标为在以上约束条件下找到满足公式中数学模型的矩阵 Y 与 S 。在算法实现中, 采用分支界定法^[10] (branch and bound)来迭代搜索最优解。

结合整数线性优化的改进 clip 算法步骤如下:

(1)当数据溢出时, 使用原始的 clip 输出 S 再编码一次, 确认 \tilde{Q} 不等于 Q (某些情况下现有 clip 算

法恰巧为最优, 此时则不需要 ILP 运算);

(2)计算 $C_f P C_f^T$, 与第 1 次编码时 Q 的量化范围相加, 作为数学模型的优化约束;

(3)使用分支界定法查找最优解

(a)初始化优化问题上下界;

(b)分枝;

(c)求解分枝优化问题;

(d)修改上下界;

(e)重复步骤(b)至步骤(d)直至搜索到最优解。

(4)再编码一次确认 \tilde{Q} 等于 Q , 并用优化值替代原始 clip 输出。

依然以 Hall Monitor 中的那个 4×4 亮度子块为例, 经过 ILP-Based PQC 算法校正的重构像素值如图 3 所示, 此时后续编码的量化输出 \tilde{Q} 与前次编码时量化输出 Q 保持一致。

$$\begin{bmatrix} 255 & 250 & 251 & 240 \\ 255 & 255 & 244 & 199 \\ 253 & 253 & 240 & 183 \\ 255 & 255 & 244 & 203 \end{bmatrix}$$

图 3 经过 ILP-Based PQC 校正后像素

3.2 单像素快速校正 PQC 算法

根据以上介绍的 ILP-Based PQC 算法实现步骤可以看出整数线性规划分支界定法中的分支、变换上下界(3.1 节中步骤(3)中的(c)~(e))运算是迭代的过程。为了便于无再损编码系统的工程实现, 本节提出了一种快速次优的单像素校正 PQC 算法。

将采用 ILP-Based PQC 算法校正后的重构像素输出(图 3)与采用传统饱和 clip 算法(图 2(c))校正后的重构像素输出比较, 可以看出两组数据只有在第 2 行第 4 列位置上的像素有差异。换句话说, 在以上的例子上, 只要传统饱和 clip 算法校正输出像素的基础上再对第 2 行第 4 列位置上的像素做小的调整即可以实现无再损编码。

假设第 1 次编码时采用传统饱和 clip 算法, 第 2 次编码时输入的残差为 \tilde{D} , 经过变换后输出为 4×4 矩阵, 将其用向量形式表示: $\text{Tr}(\tilde{D}) = \tilde{U} = [\tilde{u}_1, \dots, \tilde{u}_x, \dots, \tilde{u}_{16}]$ 。欲使前后两次编码量化结果一致, 则经过变换后的输出 \tilde{U} 中的各分量必须落在第 1 次编码时的变换输出 U 的量化范围之内, 即上式中各

元素必须满足 $\tilde{u}_i \in [u_{i,\min}, u_{i,\max}]$ 。当变换后的数据产生上溢 ($\tilde{u}_i > u_{i,\max}$) 或者下溢 ($\tilde{u}_i < u_{i,\min}$) 时, 以上条件遭到破坏, 第2次编码的量化结果不满足 $\tilde{Q} = Q$ 。

考虑到保证前后两次编码具有相同量化结果的充要条件 $\tilde{u}_i \in [u_{i,\min}, u_{i,\max}]$, 在变换后的数据溢出量化边界时, 我们希望通过在变换输出元素后加入经过计算后的修正值来使 \tilde{U} 重新满足量化条件 $\tilde{u}_i \in [u_{i,\min}, u_{i,\max}]$ 。即

$$\begin{aligned} \text{Tr}(\tilde{D}) + nA = \tilde{U} + nA = [\tilde{u}_1, \dots, \tilde{u}_x, \dots, \tilde{u}_{16}] \\ + n[a_1, \dots, a_x, \dots, a_{16}] \end{aligned} \quad (6)$$

满足

$$\tilde{u}_i + na_i \in [u_{i,\min}, u_{i,\max}], \quad 1 \leq i \leq 16 \quad (7)$$

从这个角度出发, 在预测值不变的前提下, 逆推至前一次编码重构像素溢出时的传统饱和 clip 运算: 在第2次变换运算模块输出元素后加入修正值 nA 相当于在传统饱和 clip 运算的输出 S 后加入校正矩阵 nR , 满足:

$$nC_f R C_f^T = nA \quad (8)$$

$$0 \leq (s_i + nr_i) \leq 255, \quad 1 \leq i \leq 16 \quad (9)$$

该算法思想可以总结为: 当编码重构像素溢出时, 首先采用传统饱和 clip 方法校正溢出像素, 输出为 S ; 然后寻找原始校正矩阵 R , 使得矩阵中各元素在满足约束式(9)的前提下, 经过 H.264 中的变换运算模块后输出校正矩阵 nA , 同时 nA 满足约束式(7)。在本算法中, 我们将这样的 4×4 原始校正矩阵 R 称为“单像素原始校正基矩阵”: R 中某一个元素为 1 其余元素均为零。我们将式(8)中单像素原始校正基矩阵经过变换运算模块后输出的矩阵 A 称为“单像素校正基矩阵”, n 为校正因子。为了方便算法的快速实现, 预先计算出 16 个单像素校正基矩阵, 每个单像素校正基矩阵以向量形式组成一个 16×16 矩阵 M_A 。

$$M_A = [A_1, A_2, \dots, A_{16}] \quad (10)$$

其中 $A_i = C_f R_i C_f^T = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i16}]^T$ 。

本文提出的单像素快速 PQC 算法步骤如下:

- (1) 在第1次编码做量化运算时计算出量化系数 Q 的量化阈值 U_H 与 U_L 并保存。
- (2) 当 B 中像素发生上溢或者下溢时, 使用原始 clip 算法校正后的输出 S , 原预测值 P , 求出残差后再做一次变换和量化确认 \tilde{Q} 不等于 Q (某些情况下现 clip 算法恰巧为最优, 此时则不需要 ILP 运算)。
- (3) 如果 \tilde{Q} 不等于 Q , 并且不相等的元素只有一个, 相应地, \tilde{U} 中有且只有一个分量 \tilde{u}_i 超出了量化阈值范围 $[u_{i,\min}, u_{i,\max}]$ 。计算量化误差 Δ_i :

$$\Delta_i = \begin{cases} u_{i,\max} - \tilde{u}_i, & \tilde{u}_i > u_{i,\max} \\ u_{i,\min} - \tilde{u}_i, & \tilde{u}_i < u_{i,\min} \end{cases}$$

(4) 遍历 16×16 矩阵 M_A 的各向量 A_j , 依次计算校正因子 $n_j = \Delta_i / a_{j,i}$, $1 \leq j \leq 16$ 。当单像素校正基矩阵 A_j 与校正因子 n_j 满足 $U_L \leq \tilde{U} + n_j A_j \leq U_H$, 同时单像素原始校正基矩阵 R_j 与校正因子 n_j 中元素均满足 $0 \leq n_j R_j + S \leq 255$ 时, 将 $n_j R_j$ 记为一组可行解。当校正因子 n_j 的绝对值为 1 时, 当前解为最优解, 退出循环。假设将 16×16 矩阵 M_A 的 16 个向量 A_j 全部遍历一遍后依然无法找到一组可行解, 则说明需要对矩阵 S 中的两个及两个以上的像素校正才能实现无再损编码。在这种情况下依然需要使用 ILP-Based PQC 算法求最优解。

(5) 在所有可行解中, 选取校正因子 n_j 绝对值最小时对应的解 $n_j R_j$ 作为最终校正值加在原始 clip 算法校正后的输出 S 之后。再做一次变换与量化确认 \tilde{Q} 等于 Q 。

相对于 ILP-Based PQC 算法的迭代求解过程, 单像素快速校正 PQC 算法可以将算法时间复杂度控制在平方阶以内。

3.3 改进的帧内预测算法

以上关于严格无再损视频编码推论过程中存在一个重要假设条件: 后续编码时的帧内预测值与前次编码的帧内预测值一致。而现有 H.264 的帧内预测算法以原始值与预测值误差绝对值之和 (SAD) 作为代价函数。以图 1 中第2次编码为例, 现有帧内预测算法依次遍历所有可能预测模式, 计算式(11)表示的代价函数, 并选择其最小化时的预测值进行帧内编码。

$$J_1 = \sum |S - \tilde{P}| = \sum |\tilde{D}| \quad (11)$$

此时式(11)显然无法满足 $\tilde{P} = P$ 这一前提条件, 因此需要对其进行改进。

引入新的拉格朗日代价函数:

$$J = J_1 + \lambda J_2 \quad (12)$$

$$J_2 = \sum |\tilde{S} - S| \quad (13)$$

λ 为拉格朗日算子。可以证明, 最小化代价函数式(12)的帧内预测模式可以确保假设条件成立, 证明过程如下。

已知经过优化 clip 算法后的前次与后续编码重构输出分别为

$$S = \text{OpClip}(H + P) \quad (14)$$

$$\tilde{S} = \text{OpClip}(\tilde{H} + \tilde{P}) \quad (15)$$

而由前面的论述可知, 优化算法 OpClip 的目的为寻找 \tilde{S} , 满足经过 DCT 变换和量化后输出结果不变, 即

$$\tilde{Q} = \text{Qu}(\text{Tr}(\tilde{S} - \tilde{P})) \quad (16)$$

而从图 1 可知,

$$\tilde{Q} = \text{Qu}(\text{Tr}(S - \tilde{P})) \quad (17)$$

由式(16), 式(17)可以推出代价函数式(13)最小时为 0, 此时 $\tilde{S} = S$ 。已知 $\tilde{Q} = Q$, $\tilde{H} = H$ 进而由式(14), (15)可知当满足代价函数式(13)最小时, $\tilde{P} = P$ 条件成立。

4 实验结果

我们使用的数据溢出较明显的视频序列 Hall Monitor, Coastguard 和 Container^[9]作为原始的 YUV 测试流, 分辨率为 176×144。将本文提出的算法整合到编码器 X.264^[11] 与解码器 JM^[12] 中。为最大程度模拟实际应用中的视频再编码过程, 实验步骤如下。

- (1)使用 X.264 编码原始视频序列;
- (2)使用 JM 解码步骤(1)的输出压缩视频;
- (3)使用 X.264 编码步骤(2)的输出解码视频;
- (4)使用 JM 解码步骤(3)的输出压缩视频;
- (5)比较步骤(2)与步骤(4)的输出文件, 其差异

就是第 1 次视频再编码时引入的图像畸变。

使用本文提出算法以及原始 H.264 算法对测试序列重复以上实验, 按照全 I 帧编码并关闭环路滤波器, 使用不同量化因子时视频流比较结果如表 1 所示。原始视频序列大小为 11404800 byte。

从表 1 可看出, 在经历过两次编码-解码循环后, 未经优化的 H.264 编码算法(原始算法)会有 15%到 20%左右的视频畸变。而本文提出的无再损编码算法(RLF 算法)则实现了严格意义上的视频无再损编码。

图 4 画出了量化因子为 26 时, 不同算法下测试序列平均亮度峰值性噪比与对应的视频再编码次数的曲线。从图 4(a)可以看出采用现有算法时第 1 次再编码平均亮度峰值性噪比下降最为明显, 为 0.7 dB, 随后峰值性噪比下降变缓并且随着再编码次数的增加而逐渐达到稳定(类似 MPEG 多次再编码中的“饱和”特性^[2])。类似现象也出现在图 4(b)与 4(c)中。而采用 RLF 算法多次编码时, 亮度峰值性噪比不随再编码次数的增加而变化。

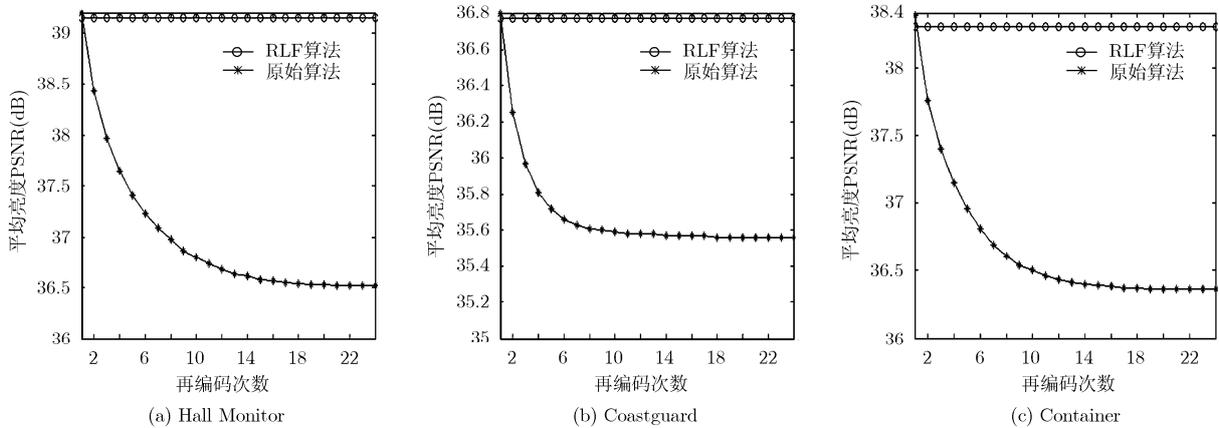


图 4 亮度 PSNR 与视频再编码次数曲线

表 1 不同量化因子下视频畸变比较(byte)

量化因子	再编码时输出码流差异 Hall Monitor		再编码时输出码流差异 Coastguard		再编码时输出码流差异 Container	
	RLF 算法	原始算法	RLF 算法	原始算法	RLF 算法	原始算法
26	0	1829970	0	1918800	0	1559481
28	0	1643831	0	1963281	0	1549297
32	0	2432496	0	2167548	0	2146204
34	0	2134959	0	2126594	0	1820307

5 结束语

本文提出了新的视频严格无再损帧内编码方法并在改进的 H.264 编码器与解码器上实现, 并在此基础上提出了快速算法。实验结果表明这种方法可以有效消除由原有 H.264 算法导致的视频畸变, 实现基于 H.264 算法框架的严格无再损视频帧内编码。今后的研究方向为如何在开启环路滤波器的情况下实现基于 H.264 的严格无再损视频帧内编码。

参 考 文 献

- [1] Horne C, Naveen T, Tabatabai A, Eifrig R O, and Luthra A. Study of the characteristics of the MPEG2 4:2:2 profile-application of MPEG2 in studio environment [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, 6(3): 251-272.
- [2] Erdem A T and Sezan M I. Multi-generation characteristics of the MPEG video compression standards[C]. *IEEE proceedings International Conference on Image Processing*, Austin, TX, USA, Nov.13-16, 1994, 2: 933-937.
- [3] Sorial H and Lynch W. Multigeneration of transform coded images[C]. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, San Jose, CA, USA, Feb.12, 1997, Proc. SPIE Vol. 3024: 1394-1405.
- [4] Hda L and Rosilesb J. Achieving idempotence in near-lossless JPEG-LS[C]. *Image and video communications and processing 2000*, San Jose, CA, USA, Jan.25, 2000, SPIE Vol. 3974: 685-690.
- [5] Joshi R, Rabbani M, and Lepley M. Comparison of multiple compression cycle performance for JPEG and JPEG2000[C]. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, San Jose, CA, USA, July.31, 2000, SPIE Vol. 4115: 492-501.
- [6] Lin T. Achieving Re-Loss-Free compression in H.264 like hybrid video coding[C]. *IEEE Proceedings of 2008 International Conference on Signals, Circuits & Systems*, Hammamet, Tunisia, Nov.7-9, 2008: 1-6.
- [7] Lin T. Achieving Re-Loss-Free video coding [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing Letters*, 2009, 16(4): 323-326.
- [8] ITU-T. Advanced video coding for generic audiovisual services. <http://www.itu.int/rec/T-REC-H.264-200711-I/en>, 2007.11.
- [9] Arizona State University. YUV sequences.<http://trace.eas.asu.edu/yuv/index.html>.2007.3.
- [10] Vanderbei J. *Linear Programming: Foundations and Extensions (second edition)* [M]. New York: Springer, 2001: 373-408.
- [11] Videolan. org. X264 code. <ftp://ftp.videolan.org/pub/videolan/x264/snapshots/>. 2007.3.
- [12] Suehring K. H.264/AVC software coordination. <http://iphome.hhi.de/suehring/tml/> 2007.3.

董鹏宇: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为多媒体信号处理.
林涛: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为多媒体信号处理.