

文章编号: 1006-2467(2010) 02-0165-06

基于分层判断的 x264 快速模式选择算法

刘 硕, 宋 利, 余松煜

(上海交通大学 图像通信与信息处理研究所, 上海 200240)

摘 要: 针对高度优化的 x264 模式判断算法进行了研究, 准确定位了其中仍存的冗余点. 在此基础上, 基于层次化思想, 对模式判断流程进行了重新组织, 提出了帧间辅助模式失效条件、帧间主要模式有效条件以及相应的模式选择算法. 实验表明, 所提算法在几乎不损失压缩质量的前提下使编码速度得到了显著提升. 此外, 该算法不仅适用于 P 帧, 而且适用于 B 帧, 能够全面提升 x264 编码器的编码速度.

关键词: 视频编码; 模式判断; 算法优化

中图分类号: TN 919.81

文献标志码: A

x264 Fast Mode Selection Based on Hierarchical Decision

LIU Shuo, SONG Li, YU Song-yu

(Institute of Image Communication and Information Processing, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper carries out research on the highly optimized mode decision algorithm of x264 software and accurately pins out its redundant points. The mode selection process is reorganized hierarchically. Auxiliary inter modes' invalidating condition and main inter modes' validating condition are proposed. New mode selection algorithm based on them is designed. According to the experimental results, the new algorithm brings remarkable speed gain for both P and B slices.

Key words: video coding; mode decision; algorithm optimization

H. 264 较之 H. 263 与 MPEG-4 能够在同等质量下节省约 50% 的码率^[1-2], 其高性能是以高复杂度为代价获得的, 算法优化极为重要. 作为性能优异的 H. 264 编码器, x264^[3] 已经采用了诸多方法优化编码过程. 然而, 对于高分辨率、高压缩比的应用, x264 的速度离实时性要求仍有一定差距. 因此, 在已有优化成果基础上展开深度算法优化具有重要的意义. 本文在 x264 快速模式判断算法基础上, 按照层次化思想对模式判断流程进行了重新组织, 提出

了帧间辅助模式失效条件与帧间主要模式有效条件, 同时改善了 $P_{sub8 \times 8}$ 与 $I4 \times 4$ 模式的判断效率. 在同等质量条件下, 新算法较之穷举算法及 x264 原算法分别获得约 150% 与 30% 左右的速度提升.

1 x264 快速模式判断算法分析

当前, 关于快速模式判断算法的文献已有较多, 然而已有研究大多基于 Joint Video Team 的参考编

收稿日期: 2009-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60702044, 60632040), 国家高技术研究发展计划(863)项目(2008AA01A318)

作者简介: 刘 硕(1985-), 男, 山东淄博市人, 硕士生, 从事多媒体处理与通信方面的研究. E-mail: shuoliu@sjtu.edu.cn.

宋 利(联系人), 男, 讲师, 电话(Tel.): 021-34205492; E-mail: song_li@sjtu.edu.cn.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

码器 JM 进行,实用性受到了一定的限制.较之 JM, x264 集成了多种优化算法,速度得到了明显提升.在 x264 基础上进行模式判断优化,具有较高的实用价值.x264 采用了灵活而精细的模式判断算法,在几乎不损失压缩性能的前提下较穷举算法提速明显.算法基于如下思想设计:若大尺寸模式预测性能良好,则小尺寸模式极有可能导致更大的编码代价,因此判断过程可被跳过;反之,若小尺寸模式预测性能良好,则大尺寸模式可被跳过.将上述关系称之为尺寸单调性原理.基于此, x264 首先对 $P16 \times 16$ 与 $P8 \times 8$ 进行判断,利用上述 2 种模式编码代价的相对关系确定宏块适合大尺寸模式编码还是小尺寸模式编码,进而指导其余模式的选择过程,大致步骤为:

(1) 若空域邻块中存在 Skip 宏块,进行 Skip 模式判断.若通过,采用 Skip 模式编码,提前终止.

(2) $P16 \times 16$ 模式判断.若残差足够小且 M 与邻块相近,则进行 Skip 模式判断.若通过,采用 Skip 模式编码,提前终止.

(3) $P8 \times 8$ 帧内预测.

(4) 若 $C_{P8 \times 8} < C_{P16 \times 16}$, 采用 $P_{sub}8 \times 8$ 模式对 $P8 \times 8$ 模式进行优化.

(5) 若 $C_{P8 \times 8} + C_{mv(tr)} + C_{mv(dl)} < C_{P16 \times 16}$, 进行 $P16 \times 8 / P8 \times 16$ 判断.

(6) 进行 $I16 \times 16$ 判断,若 $2C_{inter} < C_{I16 \times 16}$ 且 $b=1$, 转至步骤 (8).

(7) 进行 $I4 \times 4$ 判断.

(8) 选取编码代价最小模式作为最终编码模式.其中: M 为运动向量; $C_{P8 \times 8}$ 、 $C_{P16 \times 16}$ 及 $C_{I16 \times 16}$ 分别为 $P8 \times 8$ 、 $P16 \times 16$ 及 $I16 \times 16$ 模式的编码代价; C_{inter} 为最佳帧间模式的编码代价; $C_{mv(tr)}$ 与 $C_{mv(rh)}$ 分别为右上/左下位置子宏块运动向量的编码代价; b 为变量, $b=1$, 其他情况下, $b=0$. 当根据当前宏块的时空上下文信息判断,该块不太可能采用帧内模式编码时,步骤 (1)、(2) 中, Skip 模式的判断方法为: 采用空域邻块的运动向量对当前宏块进行运动补偿得到预测残差,若残差 DCT 系数量化后零值个数较多,则认为当前块可以采用 Skip 模式编码.

在 x264 算法中, $P16 \times 16/Skip$ 、 $P8 \times 8$ 、 $I16 \times 16$ 属于不可跳过的模式,其判断结果被用来构造其余模式的删减条件; $P16 \times 8 / P8 \times 16$ 、 $P_{sub}8 \times 8$ 、 $I4 \times 4$ 属于可被跳过的模式,根据不同的删减条件决定是否跳过其判断过程.虽然性能优越, x264 算法仍然存在一定冗余: ① 帧内宏块在很多视频序列中占有可观的比重,如果能够提前检测出适合帧内编码的

宏块,就可以省略帧间模式判断的冗余过程.② $P8 \times 8$ 耗费计算资源显著,且出现的概率有限,针对 $P8 \times 8$ 的不必要的判断过程将带来大量的计算冗余.③ $P_{sub}8 \times 8$ 耗费计算资源显著,适度提高该模式被跳过的概率能够提升编码速度.

2 基于分层判断改进的模式选择算法

为克服 x264 存在的计算冗余,设计更为精确、灵活快速模式判断算法,本文采用层次化思想对 x264 原有算法进行改进,具体如下: 将帧内与帧间模式分开考虑,对于帧间预测,令 $P16 \times 16/Skip$ 为主要模式, $P16 \times 8$ 、 $P8 \times 16$ 、 $P8 \times 8$ 与 $P_{sub}8 \times 8$ 为辅助模式;对于帧内预测,令 $I16 \times 16$ 为主要模式, $I4 \times 4$ 为辅助模式.主要模式保证基本压缩质量,辅助模式对编码性能起优化作用.模式判断先针对主要模式展开,完毕之后,由主要模式的判断结果构建若干判断条件,决定是否跳过各个辅助模式的判断过程.上述层次化关系如图 1 所示.该算法能够在保证基本质量的前提下,依据特定条件,仅针对需要提高预测精度的宏块进行辅助模式判断,从而去除了大量的计算冗余.

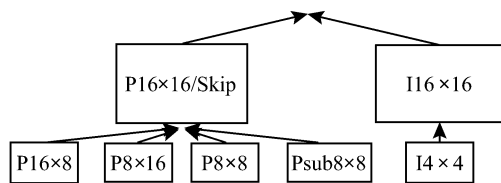


图 1 模式的层次化划分(P 切片)

Fig. 1 The hierarchical classification of modes (P slice)

2.1 帧间辅助模式失效条件

为了在主模式判断结果的基础上提前识别出不适合帧间编码的宏块,从而跳过其余帧间模式的判断过程,本文提出了帧间辅助模式失效条件对上述情况加以评判.帧间主辅模式均采用运动估计进行预测,辅模式的优越性仅仅来自更小的预测尺寸.由于预测尺寸差别有限,且小尺寸模式的高预测精度会被额外的编码信息相抵消,因此可推断:帧间主要模式与最优辅助模式的编码代价较为接近.值得注意的是,上述关系对于帧内预测并不成立,其原因在于 $I16 \times 16$ 仅提供了 4 方向的纹理预测,而 $I4 \times 4$ 能够提供较为可观的纹理方向组合,这使得 $I4 \times 4$ 编码复杂纹理时优越性大为提升.图 2 所示为帧间/帧内预测情形下主要模式分别与最优辅助模式编码代价之差绝对值的分布情况,数据来源于 crew 序列(量化参数 $QP=26$) 前 50 个 P 帧.统计知,帧间与

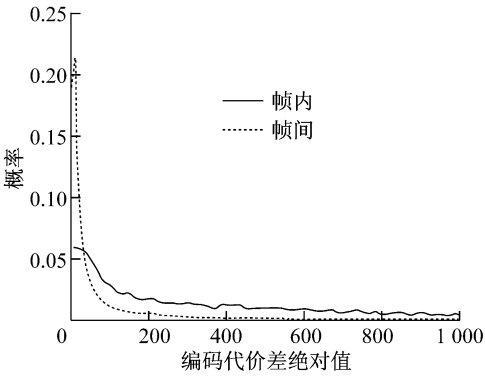


图 2 帧间/ 帧内主辅模式编码代价之差绝对值概率分布

Fig. 2 The distribution for the cost difference between main modes and best auxiliary modes

帧内数据概率分布 90% 单侧置信区间边界分别为 225 与 1 203. 基于上述分析得出结论: 帧间预测时, 主模式能够为最优辅助模式的编码代价提供基本的估计. 当帧间主模式的编码代价显著大于帧内主模式的时, 帧间辅助模式编码代价大于帧内模式的概率也将较高, 此时帧间辅助模式失效, 可跳过其判断过程. 以上述结论为基础对帧间辅助模式失效条件进行补充. 首先, 当视频内容出现剧烈变化时, 当前宏块的 $P16\times16$ 编码代价较之时域邻块的 $P16\times16$ 编码代价将产生较大上升, 此时采用帧内预测更有优势. 其次, 帧内宏块往往具有空域连续性, 邻块采用帧内模式较多时当前块采用帧内模式编码的概率也较高. 综合上述原理设计出的算法如下:

if(空域邻块采用帧内编码的个数不小于 2){
if($C_{P16\times16} - 8SAD(QP) > C_{I16\times16}$ or
 $C_{P16\times16} - C_{I16\times16}^{in} > 55 SAD(QP)$) {
帧间辅助模式失效,
 $P8\times8/P16\times8/P8\times16/Psub8\times8$ 被
跳过
}
}

其中: $C_{P16\times16}^{in}$ 为当前 16×16 宏块的编码代价; $C_{P16\times16}^{in}$ 为其时域邻块的编码代价; $SAD(QP)$ 为量化参数为 QP 时 4×4 残差子块 DCT 直流系数量化为 0 时绝对误差和的数值^[4]. 通过下式得到参考帧内与当前宏块最为接近的宏块的坐标, 从而实现对时域邻块的跟踪^[5],

$$\left. \begin{aligned} x_{ref} &= x + \text{round}(M_x/64) \\ y_{ref} &= y + \text{round}(M_y/64) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$SAD(QP) = 2^{15+QP/6} - \frac{2^{15+QP/6}}{6e(QP)} \quad (2)$$

式中: x, y 与 x_{ref}, y_{ref} 分别为当前宏块与参考帧内时

域邻块的坐标; M_x, M_y 为当前宏块运动向量在 x 与 y 方向上的分量; round 为舍入取整算子; $e(QP)$ 为由 QP 确定的量, 其值等于首项为 $\text{mod}(QP, 6)$ 时 4×4 量化参数表中直流分量的值. 表 1 所示为帧间辅助模式失效条件成立时无条件约束时帧内模式的出现概率(P_1 及 P_2). 可见, 较之无条件约束的情形, 帧间辅助模式失效条件成立时宏块采用帧内模式编码的概率显著升高.

表 1 帧间辅助模式失效条件成立时无条件约束时宏块采用帧内模式编码的概率(P 切片)

名称/ 帧数/ QP	$P_1/\%$	$P_2/\%$
crew/ 50/ 26	98. 46	28. 64
ic e/ 50/ 26	77. 04	22. 81
harbo r/ 50/ 26	69. 28	3. 26

2. 2 帧间主要模式有效条件

为了在帧间主模式判断结果的基础上提前识别出适合采用 $P16\times16$ 模式编码的宏块, 从而跳过其余帧间模式的判断过程, 本文提出了帧间主要模式有效条件对上述情况加以评判. 依据 x264 所采用的尺寸单调性原理, 该条件可通过门限运算实现: 若 $P16\times16$ 编码代价小于某门限, 则认为主模式良好匹配, 跳过辅模式集合的检验过程. 该门限对于当前宏块的最优帧间编码代价应当尽可能地接近, 过严的门限能够保证质量, 但损失了速度; 过松的门限能够提高速度, 但将显著降低压缩率. 时空邻块的编码代价能够为门限估计提供依据. 文献[4] 中利用式 (1) 得到时域邻块, 以其最终编码代价作为当前宏块的提前终止门限. 图 3(a) 所示为该门限与当前宏块最佳帧间编码代价的相关性关系(数据来源同图 2). 数据表明, 相关性显著, 但仍存在优化余地. 首先, 由于门限仅仅决定是否对帧间辅助模式进行跳过, 不影响帧内模式的选择过程, 因此应当采用最佳帧间编码代价而非最终编码代价提供估计. 其次, 当前宏块内容发生激烈变化时, 其最佳帧间编码代价与时域邻块将产生较大差别, 此时采用时域邻块的最佳帧间编码代价提供门限估计将会带来比较大的误差. 由于 $P16\times16$ 模式能够提供最佳帧间编码代价的基本估计, 认为只有当 $P16\times16$ 代价未发生突变时时域邻块的最佳帧间代价才能够被用来计算门限. 在应用中, 将下式作为界定是否发生突变的条件,

$$\text{abs}(C_{P16\times16} - C_{P16\times16}^{in}) < 6SAD(QP) \quad (3)$$

式中, abs 为绝对值运算. 由于符合式 (3) 要求的时

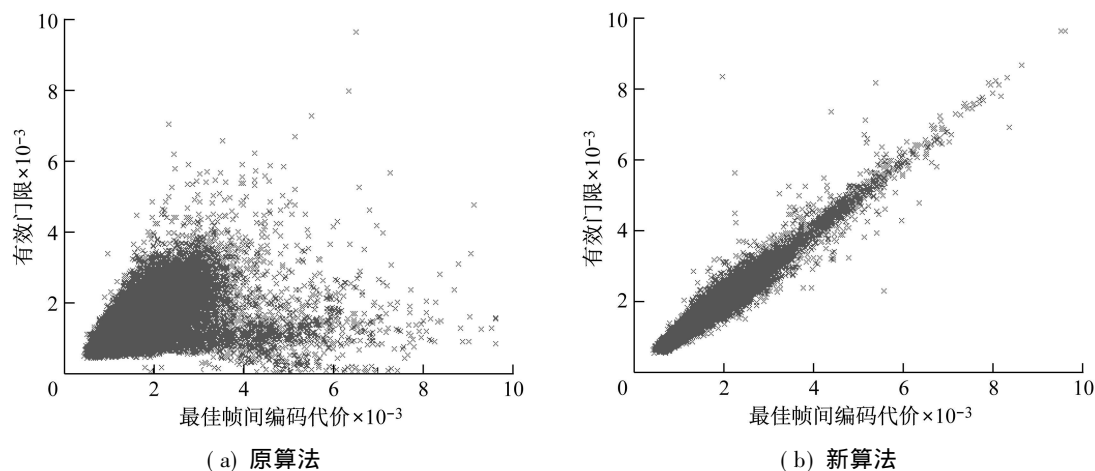


图3 帧间主模式有效门限与当前宏块最佳帧间编码代价间的相关性

Fig.3 The relativity between main inter mode's validating threshold and the cost of best inter mode

域邻块比例有限,一部分宏块无法获得有效的门限估计.为此,除采用时域参考宏块之外,还采用正左、左上、正上、右上4处空域邻块提供门限估计信息,将所有可用的门限估计求均值作为最终的门限估计.图3(b)所示为改进算法所得门限与最佳帧间编码代价间的相关性.可知,新算法门限相关性显著提高.门限计算步骤如下:

(1) 由式(1)找到时域参考宏块.若式(3)条件满足,将其最佳帧间编码代价加入统计列表.

(2) 若正左/左上/正上/右上侧邻块存在,且式(3)条件满足,将其最佳帧间编码代价加入统计列表.

(3) 求取统计列表中参考代价均值 C_e ,若当前宏块没被提供任何门限参考信息,设 $C_e = 0$.

(4) 若 $C_e < 16\text{SAD}(\text{QP})$, 则

$$C_e = C_e + 12 \text{SAD}(\text{QP})$$

(5) 存储当前最优帧间编码代价,为下一帧门限计算提供参考依据.

由于过小的门限对应于残差DCT系数基本被量化为零的情形,采用其作为删减门限过于严格,因此步骤(4)对较小的门限值进行了调整.

2.3 改进的帧间辅助模式选择算法

为了提高模式选择的效率,基于x264原有算法对 $P8 \times 8$ 、 $P16 \times 8$ 、 $P8 \times 16$ 、 $P_{\text{sub}}8 \times 8$ 四种模式的判断过程进行改进.x264利用 $P8 \times 8$ 与 $P16 \times 16$ 编码代价的相对关系来指导其余3种模式的选择过程,新算法对其进行继承.在此基础上,为提高 $P_{\text{sub}}8 \times 8$ 模式被跳过的概率,先对 $P16 \times 8/8 \times 16$ 进行检验,以其判断结果指导 $P_{\text{sub}}8 \times 8$ 的判断过程.基于上述层次关系的帧间辅助模式选择步骤为:

(1) $P8 \times 8$ 帧间预测.

(2) 若 $C_{P8 \times 8} + C_{mv(tr)} + C_{mv(dl)} < C_{P16 \times 16}$, 进行 $P16 \times 8/P8 \times 16$ 判断.

(3) 若 $\min(C_{P8 \times 8}, C_{P16 \times 8}, C_{P8 \times 16}) = C_{P8 \times 8}$, 采用 $P_{\text{sub}}8 \times 8$ 对 $P8 \times 8$ 进行优化.

$P_{\text{sub}}8 \times 8$ 判断条件的理论依据在于:当宏块适合使用 $P16 \times 8/8 \times 16$ 模式编码时,进一步采用 $P_{\text{sub}}8 \times 8$ 编码的概率有限;当宏块适合使用 $P8 \times 8$ 模式编码时,采用 $P_{\text{sub}}8 \times 8$ 优化预测过程的可能性较大.

2.4 算法全局概览

按照图2对模式进行层次化划分,将帧间辅助模式失效条件、帧间主要模式有效条件以及改进的帧间辅助模式选择算法集成起来,就得到了本文所提算法的步骤:

(1) 若空域邻块中存在Skip宏块,进行Skip模式判断.若通过,采用Skip模式编码,提前终止.

(2) $P16 \times 16$ 模式判断.若残差足够小且 M 与邻块相近,则进行Skip模式判断.若通过,采用Skip模式编码,提前终止.

(3) $I16 \times 16$ 模式判断.

(4) 若帧间辅助模式失效或帧间主要模式有效,转至步骤(6).

(5) 帧间辅助模式快速选择.

(6) 若 $C_{I16 \times 16} < 32 \text{SAD}(\text{QP})$ 且帧间辅助模式未被跳过,转至步骤(9).

(7) 若 $2C_{\text{inter}} < C_{I16 \times 16}$ 且 $b=1$, 转至步骤(9).

(8) $I4 \times 4$ 模式判断.

(9) 从已测模式中选择最佳编码模式.

在上述算法中,首先对 $P16 \times 16/\text{Skip}$ 与 $I16 \times$

16 进行判断, 若帧间主要模式良好匹配或帧间辅助模式失效, 则跳过帧间辅助模式的检验过程; 反之, 按照改进的帧间辅助模式选择算法进行快速判断. 然后, 判断是否能够跳过 14×4 的检验过程. 最后, 从所有已测模式中选择编码代价最小的作为最终的编码模式. 其中, 步骤 (6) 基于尺寸单调性原理对 x264 的 14×4 跳过条件进行了加强, 即认为当 116×16 良好匹配时, 可以跳过对 14×4 的判断过程.

上述算法稍加改动就可以将其应用到 B 切片的快速模式选择中来.

(1) 由表 2 可知, B 切片中帧间辅助模式出现的概率 P_B 远小于 P 切片的 P_P , 因此可通过下式适当放宽帧间主模式有效门限以相应提高辅助模式被跳过的概率,

$$C_e = C_c + 4 \text{ SAD}(QP)$$

(4)

(2) B 切片有 2 个参考帧, 因此可提供 2 个时域参考宏块. 帧间辅助模式失效条件对应于 2 个时域参考宏块均成立时才能跳过帧间辅助模式的判断过程. 同时, 为了便于预测参考门限的求取, 额外的时域参考宏块应当被加入帧间主模式有效门限的计算过程.

(3) x264 在 B 切片中更改了 $B16 \times 8/8 \times 16$ 的判断条件, 本算法对其进行继承, 如下所示:

```
if(  $C_{16 \times 8} < C_{B16 \times 16}$  ) {  
    if(  $T_{tl} = T_{tr}$  or  $T_{dl} = T_{dr}$  ) {  
        B16×8 模式判断  
    }  
    if(  $T_{tl} = T_{dl}$  or  $T_{tr} = T_{dr}$  ) {  
        B8×16 模式判断  
    }  
}
```

其中, T_{tl} 、 T_{tr} 、 T_{dl} 、 T_{dr} 分别为左上、右上、左下、右下 4 个子宏块的划分模式. 此外, 由于 $B_{sub8 \times 8}$ 计算过程繁琐, 性能提升有限, 因此直接删去其判断过程.

表 2 B/P 切片中帧间辅助模式的出现概率
Tab. 2 The probability for auxiliary inter modes in B/P slices

名称/ 帧数/ QP	$P_B/\%$	$P_P/\%$
crew/50/26	15.88	35.42
ice/50/26	12.02	23.46
harbor/50/26	31.35	77.87

3 实验与数据

3.1 P 切片编码性能测试

本测试目的在于检测新算法与 x264 及穷举算法编码 P 切片时的性能差异. 为提供合理的比较基准, 穷举算法由 x264 框架去除快速模式判断算法得来. 实验采用的 x264 版本为 r602, 编码配置为 IPPPPPP, I 帧与 P 帧量化参数差值为 -3, CABAC, fast pskip 开启, me_range=512, SubPixelME=5, 运动估计方法为 HEX, 参考帧数目为 1, 实验机配置为 Intel Core2 Duo 2.33 GHz, 1 GB 内存. 测试序列特点各异: crew 与 soccer 纹理复杂度及运动剧烈程度适中; harbor 带有摄像头抖动; ice 背景静止. 图 4 所示为 3 种算法的率失真曲线. 表 3 所示为 P 帧 QP=20、24、28、32、36 时新算法较之 x264 及穷举算法的平均性能变化. 表中: R_B 为比特率 (BR) 增加百分比; ΔPSNR 为峰值信噪比 (PSNR) 下降值; f_s 为编码速度增加的百分比. 可知, 该算法能够在几乎不降低压缩质量的前提下显著提高 P 切片编码速度, 且性能较为稳定.

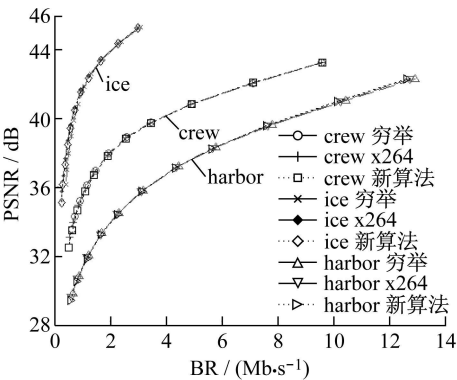


图 4 各种算法率失真曲线比较

Fig. 4 Rate-distortion curve for exhaust/x264/new method

3.2 B 切片编码性能测试

本测试目的在于检测新算法与 x264 及穷举算法编码 B 切片时的性能差异. 采用测试序列为 IBBBPBBB, P 帧与 B 帧量化参数差值为 -2, DirectMode=auto, 参考帧数目为 2, 其余条件与表 3 完全相同. 表 4 所示为 B 帧 QP=22、26、30、34、38 时新算法较之 x264 与穷举算法的平均性能变化. 可知, 该算法对于 B 帧提速效果显著. 同时, 由于采用了更多的相关性关系来指导模式选择过程, 本算法对于 B 帧性能更佳.

表 3 QP=20~36 平均性能测试(P 切片)

Tab. 3 QP=20~36 average performance test for P slice

视频序列 (名称/格式/帧数)	x264 算法			穷举算法		
	$R_B/\%$	$\Delta PSNR/\text{dB}$	$f_s/\%$	$R_B/\%$	$\Delta PSNR/\text{dB}$	$f_s/\%$
crew/D1/300	-0.62	0.092	34.28	-2.94	0.171	155.83
ice/D1/250	-0.59	0.146	33.08	-8.34	0.330	261.70
harbor/D1/300	-0.47	0.034	24.70	-2.83	0.097	113.22
soccer/D1/300	-0.19	0.102	30.28	-3.61	0.207	178.35
bus/CIF/300	0.70	0.033	19.89	0.50	0.081	84.13
city/CIF/300	1.15	0.087	22.68	0.40	0.192	135.96
foreman/CIF/300	0.19	0.107	27.66	-0.89	0.201	139.00

表 4 QP=22~38 平均性能测试(B 帧数目为 3)

Tab. 4 QP=22~38 average performance test when B frames=3

视频序列 (名称/格式/帧数)	x264 算法			穷举算法		
	$R_B/\%$	$\Delta PSNR/\text{dB}$	$f_s/\%$	$R_B/\%$	$\Delta PSNR/\text{dB}$	$f_s/\%$
crew/D1/300	0.14	0.049	37.77	-1.79	0.116	174.10
ice/D1/250	1.09	0.088	30.03	-1.92	0.221	156.04
harbor/D1/300	-0.15	0.011	32.71	-1.93	0.048	154.11
soccer/D1/300	-0.04	0.044	32.72	-0.88	0.122	156.66
bus/CIF/300	0.74	-0.035	40.07	1.66	-0.020	120.01
city/CIF/300	1.90	0.030	28.52	2.05	0.097	146.43
foreman/CIF/300	1.10	0.062	34.28	1.02	0.135	148.08

4 结 语

本文基于层次化思想优化了 x264 快速模式判断算法,以极小的代价换取了算法速度的显著提升.与以往文献不同的是,本文没有局限于基于某种相关性关系推测可删除模式的思路,而是采用系统化方法,将多种有效的判断条件集成于统一的框架中.本文对 x264 原有算法进行了合理的继承,并进一步剔除了原算法的运算冗余,从而以相同的增益提升了 P、B 切片的编码速度.

参考文献:

[1] ITU-T Recommendation H.264, Advanced video coding for generic audiovisual services [S] .

[2] 毕厚杰. 新一代视频压缩编码标准——H. 264/AVC [M] . 北京: 人民邮电出版社, 2005.

[3] Aimar L, Merritt L, Petit E, *et al.* x264 [CP/OL] . (2006-06-06) [2008-06-12] . <http://www.videolan.org/developers/x264.html>.

[4] Chen Z B, Zhou P, He Y, *et al.* Fast integer Pel and fractional Pel motion estimation for JVT [R] . Awaji, Island, JP: Joint Video Team (JVT) of ISO/IEC MPEG & ITU-T VCEG, 2002.

[5] Kim B G. Novel inter-mode decision algorithm based on macroblock (MB) tracking for the P-slice in H. 264/AVC video coding [J] . **IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology**, 2008, 18(2): 273-279.