

一种新的多假设运动补偿预测算法

黄 为 陈维荣

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘 要 多假设运动补偿预测(multi-hypothesis motion compensated prediction, MHMCP)算法目前只应用于 H. 264/AVC 视频编码标准中 B 帧的双向预测模式, 因为其需对多个运动矢量及参考帧信息进行编码, 而且其最终预测信号由前/后向参考帧中的最佳运动补偿信号(假设值)求和取平均值获得, 精确性不够。针对 MHMCP 传统算法的缺陷, 提出了一种新的 MHMCP 算法, 即在保持当前最佳编码模式不变的基础上, 首先通过加入前/后向运动矢量导出搜索模式来进行假设值的局部优化, 并对多假设值进行自适应权重系数调整; 最后通过比较率失真代价来选择最佳编码模式。模拟实验表明, 该新算法可有效降低残差信号能量, 不但能提高运动补偿预测信号的精确度, 而且能使编码器获得更佳的率失真性能。

关键词 多假设运动补偿预测 率失真优化 H. 264/AVC 运动估计

中图法分类号: TP919. 81 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2008)03-0428-07

A New Multi-hypothesis Motion-compensated Prediction Algorithm

HUANG Wei, CHEN Wei-rong

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract Multi-hypothesis motion compensated prediction has been used as bi-directional prediction mode in B picture of the H. 264/AVC video compression standard. The optimal motion-compensated prediction signal, named hypotheses, is composed of blocks in both forward and backward reference pictures, which are simply added and averaged to synthesize the final prediction signal. In the original algorithm, more than one motion vector and reference information has to be encoded and the accuracy of motion-compensated prediction is still insufficient. To overcome these disadvantages, a new rate-distortion optimization based MHMCP algorithm is proposed. After the optimal MB's encoding mode has been obtained by motion estimation and mode decision procedure, bi-directional motion search with iterative local motion vector refinements will be started. At the same time, two extra mv-tracking modes which need not to encode additional side information will be examined, accompany with adaptive hypothesis-coefficients adjustment. Experimental results show that not only the energy of the residual signal can be decreased but also the quality of the motion-compensated prediction signal can be improved. Therefore better R-D performance can be achieved by the proposed algorithm.

Keywords multi-hypothesis motion compensated prediction (MHMCP), rate-distortion optimization, H. 264/AVC, motion estimation

1 引 言

近年, 视频编码技术发展迅猛, 致使编码效率得以大幅提升。这主要归功于视频编码的核心技术——运动补偿预测(motion compensated prediction, MCP)

的改善。如今已涌现出了包括多参考帧^[1-3]、多块分割模式^[4]及多假设运动补偿预测(MHMCP)^[5-10]等诸多算法。其中, 多假设运动补偿预测算法并没有局限于只用一个运动补偿块, 而是一种广义的MCP。其核心思想是通过多个假设值的线性组合来对预测信号进行运动补偿, 其假设值由位于不同参

收稿日期: 2006-06-21; 改回日期: 2006-11-18

第一作者简介: 黄 为(1980 ~), 男, 西南交通大学电气工程学院 2003 级博士研究生。主要研究方向为工业监控与智能信息处理。

E-mail: ieyer@163.com

考帧或同一参考帧中的运动补偿预测信号构成。相关研究已表明, MHMCP算法既可显著提高运动补偿的精确度, 并获得更高的编码效率, 又可减小由信道差错产生的误码传播失真^[5-10]。文献[5]对采用 N 个假设的最优综合值、运动补偿精度和残差信号噪声水平之间的关系进行了研究, 得到了在信号噪声水平较高的条件下, 多假设运动补偿预测比分数像素精度运动补偿效率更高的结论。文献[6]对码率受限条件下的 MHMCP算法进行了理论建模和详细分析认为, 将多个运动补偿块的线性组合作为预测信号的运动补偿块不仅可以提高运动补偿精度, 而且可降低编码残差信号所需的比特数。文献[7]提出了一种优化的预测系数和假设值选择算法。文献[8]详细阐述了率失真优化技术在视频编码技术中的应用。文献[9]对 MHMCP算法的编码效率和误码传播失真进行了理论建模, 得出 MHMCP算法既能提高编码效率, 又能有效地控制网络传输差错影响和减小误码传播失真的结论。

事实上, H. 263 视频编码标准中的可重叠块运动补偿(OBMC)算法^[10]和 MPEG-2 视频编码标准中 B 帧^[11]都是 MHMCP算法的成功应用, 它们都是将多个运动补偿信号进行线性综合。在目前最新的视频编码标准 H. 264/AVC 中^[12], 由于 B 帧不仅具有前向/后向的双向运动补偿模式, 还具有前向/前向、后向/后向等多向运动补偿模式^[13], 因而进一步提高了编码效率。

由以上分析可得出, MHMCP 算法已成为了视频编码技术中的研究热点, 但国内对其相关研究还不多见, 现行的 MHMCP 算法只在 B 帧中的双向预测模式中得到应用, 由于其多个假设值是分别从前/后向参考帧中取得, 因此必然需要对多个运动矢量和参考帧信息进行编码。另外, 因最终的运动补偿预测信号是由多假设值求和取平均获得的, 故不能保证运动补偿预测信号足够精确。本文针对该缺陷, 并结合 H. 264/AVC 视频编码算法的特点, 通过将 MHMCP 算法纳入率失真优化理论框架中进行系统性研究, 提出了一种新的基于率失真优化的 MHMCP 算法。

2 MHMCP 理论模型

MHMCP 算法的理论模型如图 1 所示, 其中 s 为原始视频信号, Δ_i 为通过运动估计所获得的位于参

考帧缓存中已解码的多个运动补偿信号, n 为噪声信号(包括信源噪声、量化噪声、残差信号噪声等)。

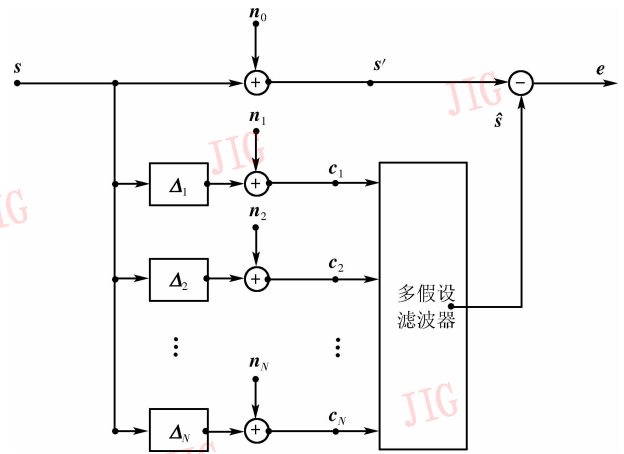


图 1 MHMCP 算法理论模型

Fig. 1 Theoretical model of MHMCP

运动补偿预测的主要目的就是尽可能使得预测信号与原始信号间的残差信号 e 的能量变小(如式(1)所示):

$$\min\{E[e^2]\} = \min\{E[(s' - \hat{s})^2]\} \quad (1)$$

一般条件下, 量化噪声主要由量化参数(QP)决定, 而残差噪声则与视频信号的特征和运动剧烈程度相关。图 1 中多假设滤波器的作用就是将多个运动补偿预测信号 $c_1 \sim c_N$ (即假设值)进行综合并产生最终多假设运动补偿预测信号 \hat{s} (如式(2)所示):

$$\hat{s} = \hat{c} \cdot \hat{h} = (c_1, c_2, \dots, c_N) \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_N \end{pmatrix} \quad (2)$$

经过多假设滤波器滤波后, 噪声信号对预测信号 \hat{s} 的影响会显著降低, 由此编码器便可获得更精确的运动补偿预测信号。

对于最优的多假设权重系数的计算问题, 一般通过解 Winer-Hopf 方程^[5]即可得到最优系数(如式(3)所示):

$$\begin{aligned} & \min_{\{h: I^T h = I\}} \{C_{ss} - 2h^T C_{cs} + h^T C_{cc} h\} \\ \Rightarrow h_{opt} &= C_{cc}^{-1} \left(C_{cs} - \frac{I^T C_{cc}^{-1} C_{cs} - I}{I^T C_{cc}^{-1} I} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, C_{ss} 为原始信号方差, C_{cc} 为 $N \times N$ 维运动补偿信号的协方差矩阵, C_{cs} 为 $N \times 1$ 维的运动补偿信号与原始信号之间的协方差向量, 但采用该最优系数显然计算量极大, 因为其不仅需计算解视频图像信

号相关系数矩阵方程,并且要用最小方差准则的维纳滤波器和有限冲激响应的 FIR 滤波器来实现,还并不十分有效。另外,该方程得到的最优权重系数 h 一般为高精度浮点数,对其进行编码一般会导致码字较长,并将影响编码效率。

3 基于率失真优化的编码模式选择

在 H.264/AVC 中,B 帧除具有所有 P 帧的所有预测模式外,还具有直接模式 (direct mode)、后向 (backward, BW) 预测及双向 (Bipred) 预测模式等^[13] (如式(4)所示)。其中前向 (beforeward, FW) 与后向预测模式支持 $16 \times 16 \sim 4 \times 4$ 的块大小;双向模式支持从 $16 \times 16 \sim 8 \times 8$ 块大小。B 帧丰富的预测模式可使运动补偿预测的精确度得到大幅度的提升。

$$Mode \in \left\{ \begin{array}{l} Skip, Intra, Fw, \\ Bw, Bipred, Direct \end{array} \right\} \quad (4)$$

编码器通过遍历当前编码宏块的所有预测模式,最终选择使率失真代价最小的编码模式来对该宏块进行编码。预测模式的率失真代价计算方法如下:

$$J_{mode}(s, c, Mode | \lambda_{mode}) = SSD(s, c, Mode) + \lambda_{mode} \cdot R(s, c, Mode) \quad (5)$$

式中, s 为原始视频信号, c 为编码重建信号, SSD 为 s 与 c 之间的均方差之和 (sum of square difference, SSD), $Mode$ 即为式(4)中所示的各种预测模式, $R(s, c, Mode)$ 为编码该模式所消耗的比特数,包括宏块头信息、运动矢量及 DCT 系数等。 λ_{mode} 为拉格朗日乘子,其计算方法如下:

$$\lambda_{mode} = 0.85 \cdot 2^{(QP-12)/3} \quad (6)$$

通过模式选择过程后,编码器便得到当前编码宏块的最优编码模式(最佳参考帧、最佳预测模式及运动矢量等信息)。从式(5)中可知,编码效率的提高就意味着率失真代价减小,而要使率失真代价 J 值减小,则必须降低重建信号的失真度 D (即提高运动补偿信号的精确度)或者降低码率 R ,即减小需要编码该模式所消耗的比特数(包括头信息如运动矢量、编码模式、参考帧信息等及 DCT 系数等)。随着运动补偿信号精确度的提高,残差信号的能量将会变小,反过来也会降低编码 DCT 系数所消耗的比特数。而本文也正是从这两方面着手来降低当前编码宏块的率失真代价。

4 MHMCP 算法

如图 2 所示,在 B 帧的双向运动补偿模式中,其多个假设值不仅可分别从前/后向的参考帧中进行选取,还可从前向/前向、后向/后向的参考帧中进行选取。图 2 中,当前编码宏块采用两个运动补偿预测信号 c_1 和 c_2 进行联合运动补偿。其中 c_1 和 c_2 是经运动估计获得的位于前向/后向参考帧中的最佳运动补偿预测信号。其运动矢量和参考帧信息分别为 v_1^m, v_2^m 及 s_1^{ref}, s_2^{ref} 。如当前编码宏块的最优模式为双向运动补偿模式,则最终的运动补偿预测信号 \hat{s} 将由 c_1 和 c_2 进行相加,并取平均得出(如式(7)所示)。

$$\hat{s} = \left(\sum_{i=1}^N c_i \right) / N, c_i = \underset{c_j \in F_{ref}}{\operatorname{argmin}} (J_i, c_j), N = 2 \quad (7)$$

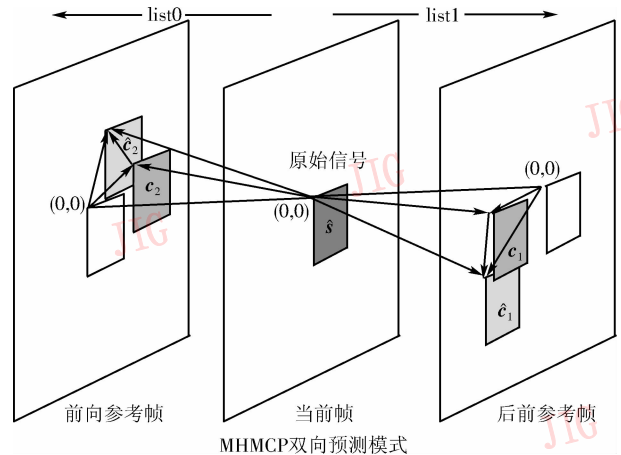


图 2 B 帧的双向预测模式

Fig. 2 Bi-directional prediction mode in B picture

不过,虽然 c_1 和 c_2 在各自单独的参考帧中为最佳预测值,但由于进行求和平均之后未必是最佳预测值,所以算法可以做进一步的调整,即首先在 c_1 固定的条件下,对 c_2 的运动矢量进行局部优化调整,并求得在该条件下使得 J 值(式(4))最小的 c_2 值;之后重复该过程,在 c_2 固定的条件下对 c_1 的运动矢量进行局部优化调整,并求得此时的最佳 c_1 值,该迭代过程可反复进行多次,但为了不使计算复杂度过高,一般调整次数在 2~3 次;最后将联合优化搜索所得到的预测信号 \hat{c}_1 和 \hat{c}_2 进行求和取平均即可求得双向预测信号 \hat{s}' (如式 8 所示):

$$\hat{s}' = \left(\sum_{i=1}^N \hat{c}_i \right) / N, \hat{c}_i = \underset{c_i, c_j \in F_{ref}, i \neq j}{\operatorname{argmin}} (J_i, c_i, c_j), N = 2 \quad (8)$$

该方法称为双向运动估计 (bi-directional motion estimation)。显然,经双向运动估计之后编码器所获得的双向预测信号 \hat{s} 一般将优于原有的预测信号 \hat{s} 。

4.1 运动矢量追踪搜索模式

从以上分析可知,原有 MHMCP 算法只能用于 B 帧的双向预测模式,其假设值只能在多个参考帧中进行选取,而且必须编码多个运动矢量 ($\mathbf{v}_1^M, \mathbf{v}_2^M, \dots, \mathbf{v}_n^M$) 及参考帧信息 ($\mathbf{s}_1^{\text{ref}}, \mathbf{s}_2^{\text{ref}}, \dots, \mathbf{s}_n^{\text{ref}}$) (n 一般为 2 个)。为了克服这一缺陷,本文引入了一种运动矢量追踪的局部优化搜索算法 (如图 3 所示)。

通过前向运动矢量 \mathbf{v}_{FW}^M (上角 M 代表 motion,下角 FW 代表前向) 可计算出后向运动矢量 \mathbf{v}_{BW}^M ; 同理,也可从后向运动矢量 \mathbf{v}_{BW}^M 计算得到前向运动矢量 \mathbf{v}_{FW}^M 。其计算方法如式 (9) 所示,与 B 帧中的 Direct 模式较为类似^[13],不同之处在于 Direct 模式的运动矢量是由位于 list1 参考帧中的 Co-located 宏块的运动矢量进行前向推导得到的。

$$\mathbf{v}_{\text{track}}^M = \begin{cases} \frac{t_2^{\text{ref}}}{t_1^{\text{ref}}} \times \mathbf{v}_{\text{FW}}^M & \text{前向模式} \\ \text{round} \left(\frac{t_2^{\text{ref}}}{t_1^{\text{ref}}} \times \mathbf{v}_{\text{BW}}^M \right) & \text{后向模式} \end{cases} \quad (9)$$

很明显,前向伸缩模式会使运动矢量的精度变低,而后向伸缩模式则会使运动矢量的精度变高,经过后向伸缩模式得到的运动矢量的精度有可能超过 1/4 pixel 精度,这将与 H. 264/AVC 标准不兼容。为此,式 (9) 中 round 操作符的作用就是取与预测运动矢量距离最小的 1/4 pixel 运动矢量作为最终的运动矢量。通过这种运动矢量追踪方法,当采用多向预测模式进行预测时,编码器便可只编码一个运动矢量,而不必对所有假设值的运动矢量进行编码,这在低码率条件下是非常有效的。另外,如果通过运动矢量伸缩得到的运动矢量位于默认的相邻参考帧中,则编码器就无需编码额外的参考帧信息。

4.2 自适应多假设权重系数调整

在 H. 264/AVC 标准中, c_1 和 c_2 线性综合的方法是直接采用求和取平均来进行的,即系数 $h_1 = h_2 = 0.5$ 。这种方式比较简洁,且无需对权重系数进行编码。

典型的 SSD 与最优多假设系数的关系如图 4 所示。从图 4 可知,失真度的均方差和 (sum of square difference, SSD) 值近似服从于系数 h 的二次单峰凹函数,因此采用 SSD 的平均值作为最优多假设系数显然不是最优。

为进一步提高预测精度,本文通过将 c_1 和 c_2

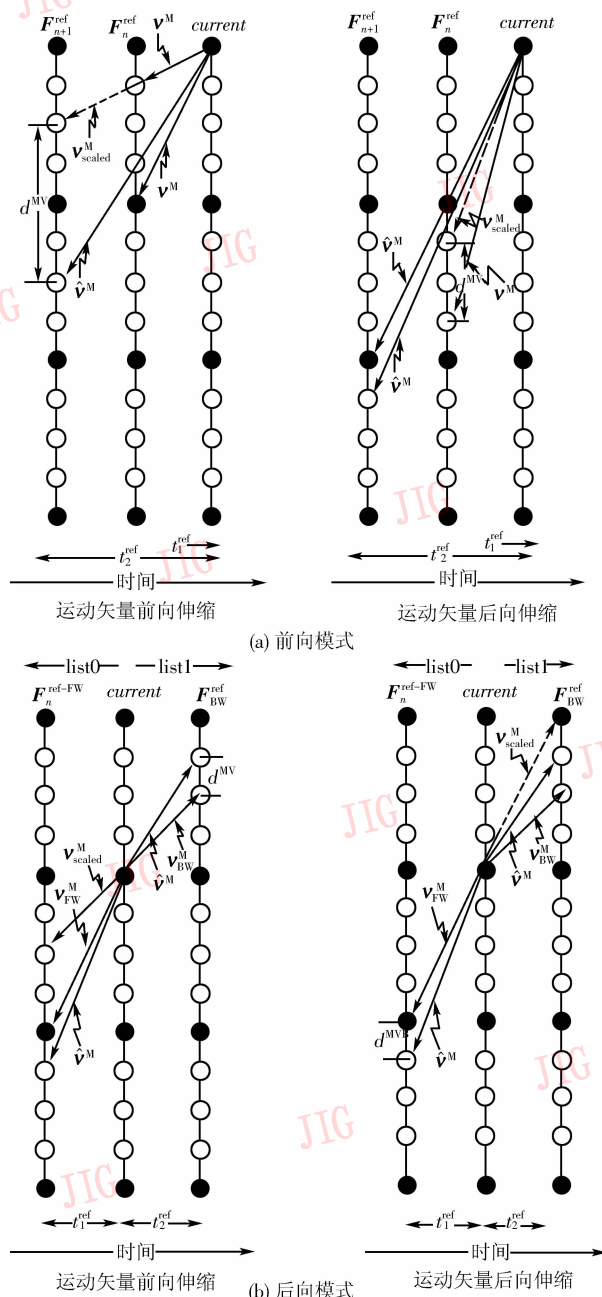


图 3 运动矢量追踪搜索模式

Fig. 3 Searching mode of MV-tracking

的多假设权重系数在 $1/2^N$ 之间进行调节 (本文中 $N=4$) 来逼近最优预测信号,以便获得比 $h_1 = h_2 = 0.5$ 系数更好的结果,其计算公式如下:

$$\hat{s} = (\hat{c}_1 \cdot i + \hat{c}_2 \cdot (n - i) + n/2) / n \quad (10)$$

图 5 为实际的多假设系数分布特征,其中 x 轴即为多假设系数,当具有两个假设值时,则多假设系数在靠近中心位置的值 (如 7 和 9) 可能性较高,而取其余位置包括中心位置 (即 $h_1 = h_2 = 8$) 的可能性较低。由此可见,从信息熵的角度看,多假设系数仍然具备一定的信息冗余,但通过设计合适的多假设系数码

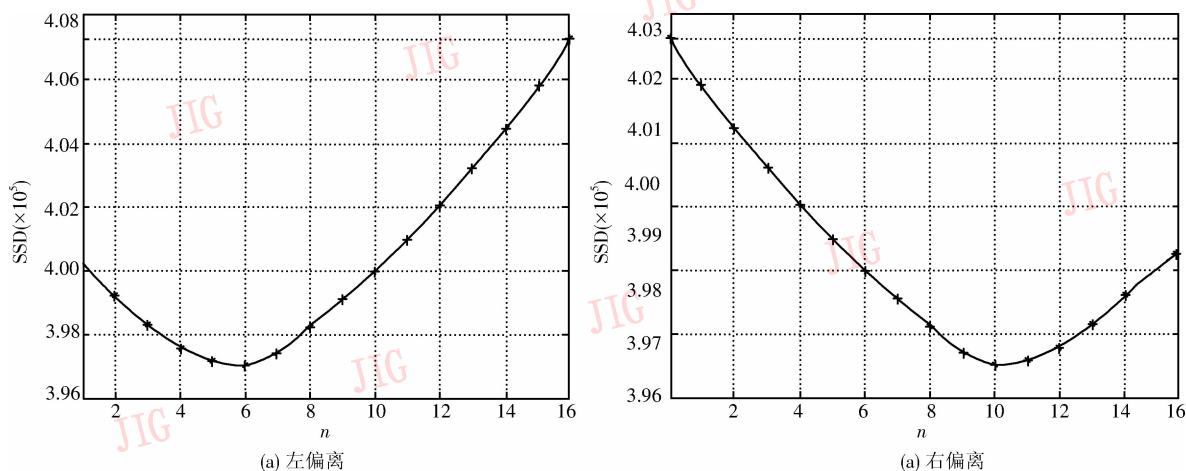


图 4 典型的 SSD 与最优多假设系数关系

Fig. 4 Typical relationship between SSD and MH-Coeff

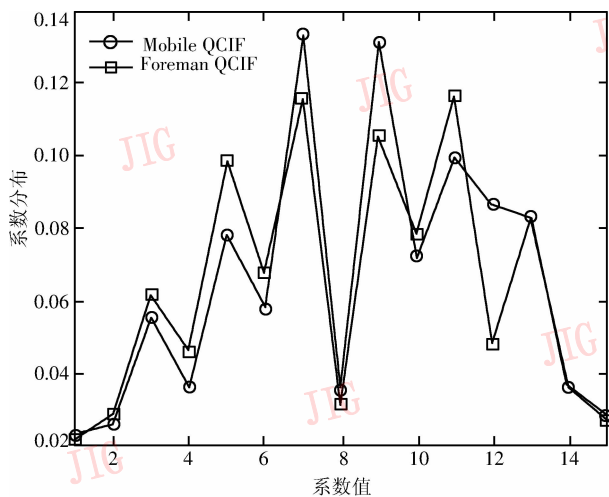


图 5 多假设系数分布特征

Fig. 5 Distribute of MH-coeff

表,可进一步降低编码多假设系数所耗费的比特数。

另外,可将搜索方向调整为朝较小的 SSD 值的方向,以便使多假设综合计算过程的搜索区域减小一半。在当前帧所有宏块编码完毕后,就可对当前帧所有多假设系数系数进行差分编码,并在 SLICE_HEADER 中增加 MHMCP 标志位,而这种编码多假设系数所需比特数相比编码整帧所需比特数比例很小。解码器解码时,若在 SLICE_HEADER 中读到 MHMCP 标志位,则需首先对多假设权重系数进行解码,以供运动补偿计算使用。

5 算法说明与复杂度分析

编码器经运动估计与模式选择过程,在获得

当前编码宏块最佳编码模式(包含 P 或 B 宏块各种运动补偿模式)后算法开始。如果其最佳编码模式为 P_SKIP 或 B_SKIP,或者其背景模式编码(coded block pattern, CBP)值为 0(即 DCT 系数经量化后为全零),则证明该宏块残差系数能量较小,算法将直接结束;否则,算法将循环运行前向运动矢量追踪(fw-mvTrack)、后向运动矢量追踪(bw-mvTrack)和双向运动矢量追踪(Bi-mvTrack)3种新的多假设运动补偿预测模式,并进行相应的自适应权值调整。在获得了最佳双向运动矢量及多假设权重系数后,即可通过比较当前编码宏块 MHMCP 模式与原始的最优模式之间的率失真代价来得到最佳编码模式。

显然, MHMCP 算法给编解码都会增加一定的运算复杂度。对编码器而言,运算复杂度的增加集中在多假设优化搜索和多假设综合等过程,但主要以多假设优化搜索为主,如果以搜索范围为 8×8 的多假设优化搜索为例,则编码器在每个参考帧中均需进行 64 个点的双假设综合、SAD 计算等操作,若多假设搜索范围越大,参考帧越多,则 MHMCP 算法所增加的运算复杂度也将越大,不过,并非所有宏块均需进行多假设搜索,因为算法中的提前中止策略与搜索模式预判策略可一定程度降低额外计算量;对于解码器而言, MHMCP 算法只是增加了一次额外的运动补偿及一次多假设综合操作,其运算量的增加非常小。

总之, MHMCP 算法非常适合应用在视频存储和视频广播等领域。因为对于这些应用,编码器端所增加的运算复杂度是可以接受的,而 MHMCP 算

法则能带来编码效率的极大提升,从而可充分降低网络带宽或存储空间的要求。而对于需要进行实时视频压缩编码的应用领域来说,在使用 MHMCP 算法时就需考虑进一步减少多假设优化的搜索范围及参考帧数量,以便降低运算复杂度。

6 实验结果

将 JM10.2 标准测试模型^[14]进行修改以支持 MHMCP 算法中 fw-mvTrack、bw-mvTrack 和 Bi-mvTrack 等预测模式及多假设系数调整模式,并与原始 H.264/AVC 算法率失真性能进行比较。测试环境设置为:采用全搜索(搜索范围为 16×16),开启率失真优化,采用 5 个参考帧和所有块分割模式,熵编码采用 CABAC, GOP 结构采用 IBPBPBP,即插入一个 B 帧,只有第 1 帧为 I 帧,其余帧为 P 帧或 B 帧。

从图 6 和图 7 中可看出,通过对 B 帧的编码模式进行改进,MHMCP 算法可获得比传统算法更高的编码效率。若视频信号变化越剧烈或 QP 值越低,则残差信号能量将越高。由于 MHMCP 算法的主要优点就是可以提高运动补偿信号的精确度和降低残差信号的能量,所以在高码率以及运动剧烈的情况下(如图 6 所示),MHMCP 算法的编码效率增益体现得更为明显。这是因为一方面 MHCMP 算法具有 fw-mvTrack 模式和 bw-mvTrack 模式,相比双向预测模式可少编码一个运动矢量;另一方面由于对多个假设值进行了权重系数调节,因此不仅进一步增加了运动补偿预测精确度,而且提高了预测信号质量。

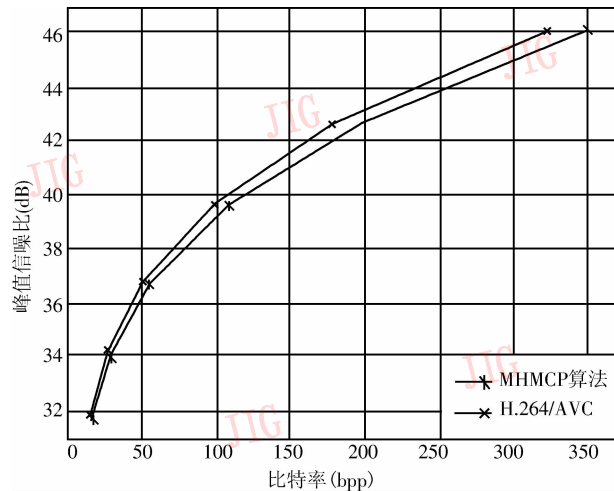


图 6 Foreman 序列率失真性能比较

Fig. 6 R-D performance of Foreman sequence

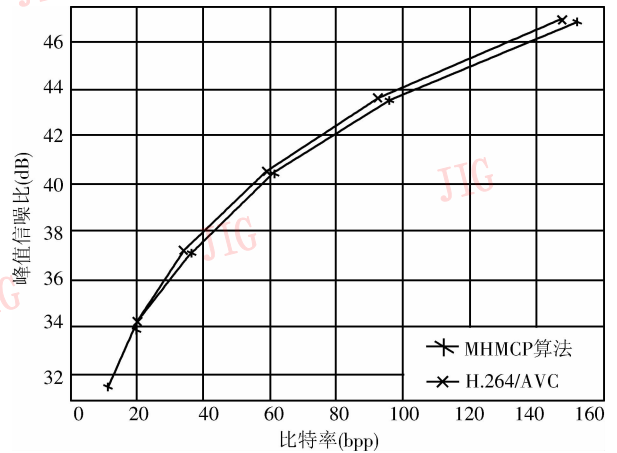


图 7 Silent 序列率失真性能比较

Fig. 7 R-D performance of Silent sequence

图 8 为 Foreman QCIF 序列采用 $QP = 14$ 、IBPBP 模式进行编码的前 40 帧的比特数比较。由于 B 帧不作为参考帧,所以两种算法的 P 帧编码结果相同。很明显,在 MHMCP 算法中,B 帧每帧所需比特数比原始算法更低,平均可降低 20% 左右。不过,MHMCP 算法的编码效率增益是以增加额外计算量为代价的,但相比复杂的运动估计与模式选择过程来说,其对整个编码器的计算复杂度的影响不会太大。

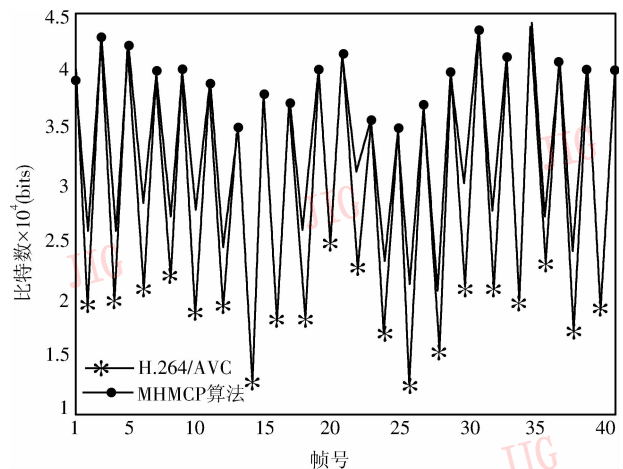


图 8 Foreman 前 40 帧比特数比较

Fig. 8 Bits comparison of 40th frames in Foreman

为了说明 QP 值变化对 MHMCP 模式的影响,本文还采用 MHMCP 模式和 Inter 模式(即除 MHMCP 模式外的所有帧间预测模式,包括 Skip 模式、前向预测、后向预测模式和 Direct 模式等统称为 Inter 模式)对 Foreman QCIF 和 Mobile QCIF 序列的宏块比例随 QP 值的变化进行了测试(如图 9 所示)。

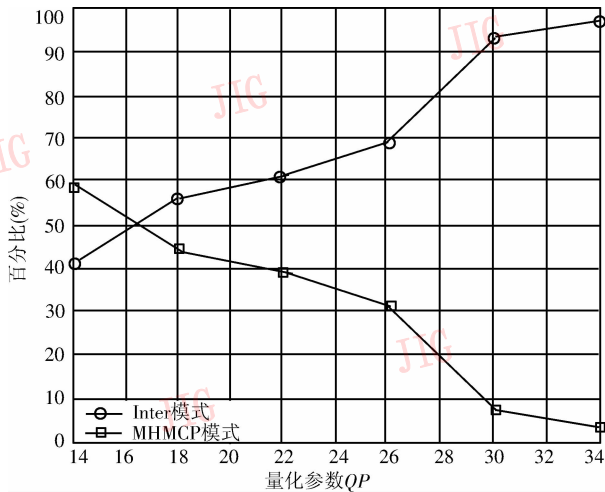


图9 Foreman MHMCP 模式与 QP 值的关系

Fig. 9 Relationship between MHMCP and QP in Foreman

从图9可见,随着QP值的不断增大,视频残差信号能量必然越小,编码器输出码率越低,此时采用MHMCP模式宏块的比例就不断降低;反之,QP值越小,视频残差信号能量就越大,编码器输出码率将越高,此时采用MHMCP模式的宏块比例也就越大。这与前文所述的多假设算法能充分提高预测精度、抑制残差信号能量的特点相一致,也说明MHMCP算法对于高码率条件及运动剧烈的视频序列可取得更佳的效果。

7 结论

本文结合率失真优化对MHMCP技术进行了深入研究,提出了一种新的MHMCP算法。其主要思想就是保持当前编码宏块最佳分割模式不变,采用多模式及自适应权重系数对多假设值进行局部优化调整,这就为多假设综合方法提供了新的思路。模拟实验表明,MHMCP算法不但对降低残差信号能量和提高运动补偿预测信号精确度有一定作用,而且能使编码器编码效率得到进一步提高。另外,由于算法兼容于现有的各种基于块的混合变换编码结构视频编码器,因此易于集成。

参考文献 (References)

1 Yuan Yu, Sun Li-feng, Han Dan, *et al.* Investigation of multi-reference-frame Prediction in H. 264 [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(9):

1575 ~ 1578. [袁昱, 孙立峰, 韩丹等. 对 H. 264 中的多参考帧预测技术的评测 [J]. 电子学报, 2004, 32(9): 1575 ~ 1578.]

2 Yu Yang, Zhu Xue-long. Propagation distortion and coding efficiency in multi-hypothesis motion compensated prediction [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12): 1863 ~ 1868. [郁杨, 朱雪龙. 多参考运动补偿预测中的误码传播和编码效率 [J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1863 ~ 1868.]

3 Wiegand T, Girod B, Multi-frame Motion-compensated Prediction for Video Transmission [M]. Boston, MA, USA: Kluwer Academic, 2002.

4 Wiegand Thomas, Sullivan Gary J. Overview of the H. 264/AVC video coding standard [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(7): 560 ~ 576.

5 Girod B. Efficiency analysis of multi-hypothesis motion-compensated prediction for video coding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(2): 173 ~ 183.

6 Markus Flierl, Thomas Wiegand, Bernd Girod. Rate-constrained multi-hypothesis prediction for motion-compensated video compression [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, 12(8): 957 ~ 969.

7 Flierl M, Wiegand T, Girod B. A locally optimal design algorithm for block-based multi-hypothesis motion-compensated prediction [A]. In: Proceedings of Data Compression Conference [C], Snowbird, Utah, USA, 1998: 239 ~ 248.

8 Sullivan G J, Wiegand T. Rate-distortion optimization for video compression [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1998, 15(6): 74 ~ 90.

9 Kung W Y, Kim C S, Kuo C C J. Error resilience analysis of multi-hypothesis motion compensated prediction for video coding with multi-hypothesis motion compensated prediction [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image, Processing [C], Singapore, 2004: 821 ~ 824.

10 Orchard M T, Sullivan G J. Overlapped block motion compensation: An estimation-theoretic approach [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1994, 3(6): 693 ~ 699.

11 Girod B. Why B-pictures work: a theory of multi-hypothesis motion-compensated prediction [A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing [C], Chicago, IL, USA: 1998, 2: 213 ~ 217.

12 ITU-T Rec. H. 264/ISO/IEC 14496-10 AVC. Draft ITU-T recommendation and final draft international standard of joint video specification [S]. In Joint Video Team (JVT) of ISO/IEC MPEG and ITU-T VCEG, JVT-G050, 2003.

13 Flierl M, Girod B. Generalized B pictures and the draft H. 264/AVC video-compression standard [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(7): 587 ~ 597.

14 JVT Reference Software, JM 10. 2 [EB/OL] downloaded from <http://bs.hhi.de/~suehring/tml>.