

无反馈分布式视频编码中的速率控制算法

陈健, 惠超, 阔永红

(西安电子科技大学 通信工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对现有比特平面级编码端速率控制算法估计精度要求高的问题, 提出了一种帧级编码端速率控制算法。该算法通过在编码端利用分层快速运动补偿内插产生高质量的边信息估计, 并根据循环移位去除比特平面间的级别性, 使每个比特平面的编码速率均匀化, 从而实现帧级别的速率控制。实验结果表明, 与现有算法相比, 所提算法对中高速运动视频边信息估计质量有明显提升, 且解码视频的平均 PSNR(peak signal-to-noise ratio) 均有提高。

关键词: 分布式视频编码; 循环移位; 运动补偿内插; 速率控制

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)06-0032-07

Rate control algorithm for no-feedback distributed video coding

CHEN Jian, HUI Chao, KUO Yong-hong

(School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In order to address the high requirement of accuracy on rate estimation in the existed bit-plane-level encoder rate control (ERC) methods, a frame-level ERC algorithm was proposed. It used hierarchical fast motion compensated interpolation to obtain high quality side information estimation at the encoder, and removed the difference between bit-planes with cyclic shift to make the coding rates on each bit-plane homogeneous, therefore achieving a frame-level rate control. The simulation results show that compared with the existed methods, the proposed algorithm can improve the quality of side information estimation considerably especially for the middle-high motion video sequences and increase the average PSNR (peak signal-to-noise ratio) of decoded video.

Key words: distributed video coding; cyclic shift; motion compensated interpolation; rate control

1 引言

传统视频编码标准通过编码端复杂的运动估计与补偿技术对视频进行高效压缩, 导致编码器复杂度是解码器的 5~10 倍^[1], 难以在低功耗编码设备上实现, 如无线多媒体传感器网络中能量受限的传感器节点^[2]等。为解决这一问题, 分布式视频编码(DVC, distributed video coding)以其低复杂度的编码算法和很高的压缩效率得到了广泛关注^[3,4]。

在传统 DVC 系统中, 解码端通过编码端产生的校验比特对边信息进行修正, 完成解码^[5], 但编码端无法得知需要传输的校验比特数, 导致编解码

率难以控制。DISCOVER 系统利用反馈信道来控制码率^[6], 反馈信道的存在虽能提高编码效率, 但同时也使整个系统的复杂度和时延大大提高。文献[7]首次提出基于变换域的无反馈 DVC 编码端速率控制系统, 利用编码端产生的边信息计算比特平面条件熵和相对错误概率, 实现比特平面级速率控制; 文献[8]在所提比特平面级速率控制算法的基础上提出了无反馈模式下的重建算法; 文献[9]在文献[7]速率控制模块的基础上利用帧间以及系数子带间的相关性提高了比特平面级速率控制算法的精度, 但编码端边信息估计质量反而降低; 文献[10]提出利用不同的 WZ 帧编码模式通过比特平面级速率控

收稿日期: 2013-02-20; 修回日期: 2013-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972072, 61340033); 高等学校学科创新引智计划基金资助项目(B08038)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60972072,61340033); The "111" Project (B08038)

制算法构造无反馈编码系统；文献[11]对文献[7]中编码端边信息生成算法进行了改进，但仅提高了边信息估计的质量，复杂度反而增加。上述已有算法在编码端边信息估计时质量与复杂度均有待进一步综合优化，且为了确保所有比特平面均解码成功，需根据不同比特平面的错误分布情况进行速率估计，对估计精度的要求也较高。

本文针对上述问题提出了一种帧级无反馈编码端速率控制算法，在编码端利用分层快速运动补偿内插，以较低的复杂度明显提升了边信息估计的质量，并通过循环移位去除比特平面间的级别性，均匀化每个比特平面的编码速率，进而只需在编码端进行帧级别的速率估计就可顺利解码，降低了编码端速率估计的精度要求，同时有效地改善了解码输出图像的质量。

2 无反馈 DVC 系统

基于变换域的无反馈 DVC 系统如图 1 所示。图 1 中灰色方框所代表的模块是本文所提算法中的关键模块。通过在编码端增加循环移位模块使每个比特平面的编码速率均匀化，在解码端增加反循环移位模块恢复原始比特平面；使用分层快速运动补偿内插对简单边信息估计模块进行修改以提高边信息估计的质量，并在速率控制模块使用提出的帧级速率估计模型进行编码速率控制。

由图 1 可以看出，输入视频序列在编码端分为关键帧和 WZ 帧。关键帧采用传统的 H.264/AVC 进行独立帧内编解码。WZ 帧，首先进行 4×4 块的 DCT 变换，并根据变换系数频率位置的不同组合产生 16 个不同的系数子带 $\{X_k, k=1, \dots, 16\}$ ；按照 Z 字形顺序，以系数子带为单元进行均匀量化得到 q_k ，通过循环移位产生

新的量化值组合 q_r 后提取比特平面输入 LDPCA 编码器，利用由简单边信息估计出的编码速率进行编码、生成校验比特，将校验比特传至解码端。解码时，首先对 WZ 帧前后 2 个解码后的关键帧通过内插运动补偿产生边信息(SI, side information)；按照 WZ 帧编码相同的方式对边信息进行 4×4 块 DCT 变换、均匀量化以及循环移位后提取比特平面；LDPCA 解码器根据接收的校验信息和 SI 比特平面信息进行联合解码得到 q'_r ，再通过反循环移位得到系数子带量化值 q'_k ，利用反量化重建模块得到解码系数子带 X'_k ，对 X'_k 进行 4×4 块 IDCT 变换后得到解码 WZ 帧。

3 帧级无反馈编码端速率控制算法

3.1 简单边信息估计

如果编码端估计出的边信息与解码端的一致，则编码端仅需传输相应的校验比特就可以修正解码端边信息中的错误，控制了传输速率，并保证了解码质量。编码端估计出的边信息和解码端边信息越接近，编码端速率控制的失真性能就会和有反馈信道时越接近。

文献[7]提出了快速运动补偿内插(FMCI, fast motion compensated interpolation)算法，虽改善了边信息估计的质量，但由于没有利用各搜索块间的运动矢量相关性，导致复杂度较高；文献[9]使用最简单的平均内插(AI, average interpolation)算法，复杂度很低，但边信息估计的质量较差。

针对上述问题，本文受到文献[7,12]的启发，提出了分层的快速运动补偿内插(HFMCI, hierarchical fast motion compensated interpolation)算法。该算法首先对 WZ 帧中各像素点进行提取构成提取层，然后再对提取层中所有块进行搜索匹配，将得到的初

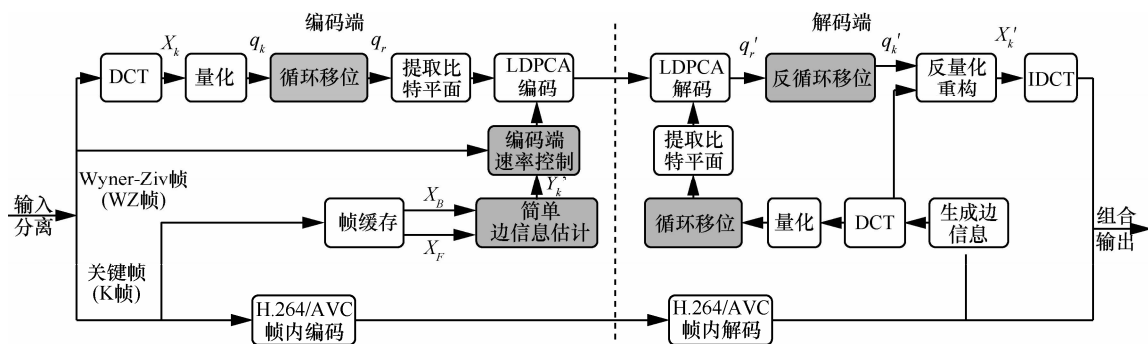


图 1 基于变换域的无反馈 DVC 系统

始运动矢量返还给原始层, 最后再对原始层中的部分搜索块二次搜索匹配得到最终的运动矢量。所提算法一方面利用提取层使得 WZ 帧中每一个搜索块直接或间接都进行了运动估计, 提高了边信息估计的质量; 另一方面, 提取层的产生使得本算法能够充分利用各运动搜索块间运动矢量场的空间相关性, 降低了算法的复杂度。对搜索块间的运动矢量相关性的充分利用以及使用不同大小的搜索范围, 使该算法能更为准确地对运动矢量场空间相关性较高的中高速运动序列做出估计, 对于低速运动序列, 各帧对应搜索块的 SAD 差异相对较小, 分层运动估计这一特点不能得到有效利用, 但不会降低运动估计的准确性。

具体的算法步骤如下。

1) 提取层的构成

① 对 WZ 帧的前后关键帧 X_F 与 X_B 提取产生提取层 \bar{X}_F 和 \bar{X}_B , 图 2 为一帧中 8×8 块构成提取层的示例, 构成的方法: 把每一帧中的所有像素按照给定的行列关系分成长宽为 2×2 的块, 每块中有 4 个像素, 选择右下方的像素构成提取层。

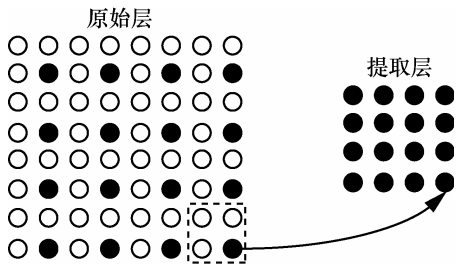


图 2 提取层的构成(每个点代表一个像素)

② $(\bar{X}_F - \bar{X}_B)$ 残差计算, 选择 SAD 匹配准则, 对提取层 \bar{X}_F 和 \bar{X}_B 中相同位置的 8×8 块进行匹配计算, 每一个块对应一个 SAD 值。

③ $(\bar{X}_F - \bar{X}_B)$ 残差排序, 对②中得到的 SAD 值按大小降序排序。排序完成后, 为使运动矢量更为精确, 前 $\alpha\%$ 的块在恢复到底层时需要进行二次搜索匹配; 剩余块则在恢复到原始层后直接使用提取层获取的运动矢量, 不再另行搜索匹配。

2) 提取层的运动矢量估计

① 定义提取层中第 k 块的相邻的左面和上面两块的运动矢量的均值为其初始运动矢量 \bar{V}_0^k 。

② 以原点 $(0,0)$ 为 \bar{V}_0^k , 如图 3 所示, 在扩展小运动搜索区域(ESMR, extended small motion region)进行搜索, 搜索 5 个 SP_1 点: $(0,0)$ 、 $(0,\pm 1)$ 、 $(\pm 1,0)$ 。

取 SAD 最小的运动矢量为 \bar{V}_1^k 。若在 $(0,0)$ 处 SAD 最小, 令 $\bar{V}_2^k = \bar{V}_1^k$, 跳至④。

③ 搜索 4 个 SP_2 点: $(0,\pm 2)$ 、 $(\pm 2,0)$, 取 SAD 最小的运动矢量为 \bar{V}_2^k 。

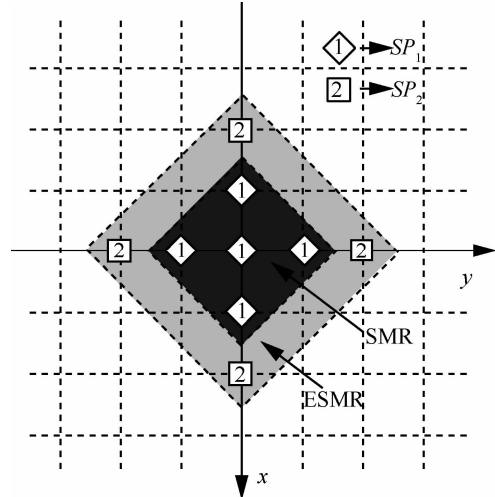


图 3 搜索模式和对应的搜索点

④ 初始的运动矢量 \bar{V}_0^k 加上上述步骤得到的运动矢量 \bar{V}_2^k 便可得到提取层运动矢量 \bar{V}_k , 每块对应的最小 SAD 值记为 \overline{SAD}_k 。

3) 原始层的矢量估计

① 将提取层中每一块的 \bar{V}_k 和 \overline{SAD}_k 值赋给对应的原始层中的块, 由图 2 可知, 1 个提取层 8×8 块对应原始层 4 个 8×8 块。原始层中第 k 块的初始运动矢量为 V_0^k , 初始 SAD 值为 SAD_0^k 。

② 运动矢量估计

a) 如果原始层中的第 k 块不在提取层前 $\alpha\%$ 的块所恢复出的块中, 那么底层第 k 块的最终矢量就直接对应提取层中的运动矢量, 即 $V_k = V_0^k$ 。

b) 如果原始层中的第 k 块在提取层前 $\alpha\%$ 的块所恢复出的块中, 笔者对运动矢量 V_0^k 对应的块进行匹配, 若 SAD 值小于 SAD_0^k (若大于, 跳至 c)), 那么底层第 k 块的最终运动矢量为 $V_k = V_0^k$ 。

c) 对以 V_0^k 为中心的小运动搜索区域(SMR, small motion region)搜索 4 个点 $(0,\pm 1)$ 、 $(\pm 1,0)$, 取 SAD 最小的运动矢量为 $V_0^{k'}$, 则该块的最终运动矢量 $V_k = V_0^k + V_0^{k'}$ 。

4) 运动补偿内插

根据原始层每一块的最终运动矢量 V_k , 通过运动补偿内插得到编码端边信息估计。

3.2 循环移位

循环移位可将每个比特平面的错误信息分散到所有比特平面, 去除比特平面间的级别性, 进而实现每个比特平面编码速率的均匀化。以 WZ 帧 DCT 变换并通过 $Q3$ 量化矩阵均匀量化后的系数子带为例(如图 4 所示), 将每一块中的所有系数子带合并成一个大的系数带, 再经过循环移位处理实现比特平面错误量的平均, 具体过程如下。

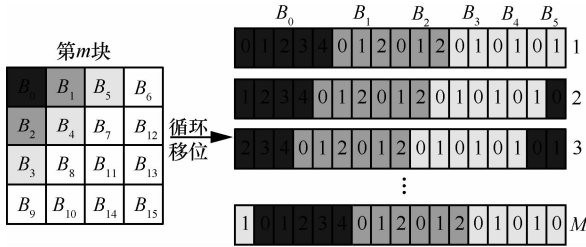


图 4 量化矩阵为 $Q3$ 时编码端的循环移位

假设第 m 块所有比特平面的和为 N , 第 k 个系数子带 B_k 量化后对应用 M_k 个比特表示, 那么总的比特平面数为

$$N = \sum_{k=0} M_k \quad (1)$$

一帧中共有 M 块, 这样就形成 $M \times N$ 的比特平面矩阵。对于第 $m (m \leq M)$ 块, 通过式(3)进行 T 次循环移位。

$$T = \text{MOD}(m, N) - 1 \quad (2)$$

其中, MOD 表示求余。

从图 4 可以直观地看出一帧中第 m 块循环移位的具体过程。在编码时, 每一块的系数带向左循环移动, 对应地, 在解码时, 每一块的系数带向右循环移动来恢复比特平面的原始性。

3.3 编码端速率控制

传统有反馈的编码方案中, 解码端如果译码失败, 则通过引入的反馈信道向编码端请求传输更多的校验比特, 直到解码成功, 编码效率虽高, 但系统时延大。无反馈编解码系统中, 通过在编码端预测解码成功所需要的码率, 即在编码端进行速率控制去除反馈信道, 降低系统时延。本文结合统计分析方法, 提出了一种帧级速率控制模型。

为保证统计分析的全面性, 根据不同视频序列图像内容变化快慢的差异, 选取图像内容变化较剧烈的 Soccer 序列和变化较平缓的 Foreman 序列的解码端边信息 PSNR 与解码速率进行统计分析。所提帧级速率控制算法在充分考虑算法复杂度的前提

下, 基于最小二乘拟合思想, 将边信息的 PSNR 与解码端速率设定为一次直线分布模型, 即

$$R_{\text{Drc}} = N(KQ_{\text{SI_PSNR}} + B) \quad (3)$$

其中, R_{Drc} 表示一帧图像成功解码的速率, $Q_{\text{SI_PSNR}}$ 表示边信息的 PSNR, N 表示当前帧比特平面总个数, K 和 B 是 2 个待确定的模型参数值。

根据设定模型建立优化目标

$$\min \left[\frac{\sum q_n \text{DIS}_{\text{cost}}^{q_n}}{F} \right] \quad (4)$$

受限于

$$q_n \in Q_{\text{SI_PSNR}} \quad r_n \in R_{\text{Drc}} \quad (5)$$

$$\text{DIS}_{\text{cost}}^{q_n} = \frac{|NKq_n - r_n + NB|}{\sqrt{(NK)^2 + 1}} \quad (6)$$

其中, $\text{DIS}_{\text{cost}}^{q_n}$ 表示一帧成功解码的代价, F 表示解码成功帧的总个数, 即有 F 个点在直线 $R_{\text{Drc}} = N(KQ_{\text{SI_PSNR}} + B)$ 以下。

分析可知, 导致编码解码两端产生的边信息存在误差的因素如下: 1) 由于编码端在进行边信息估计时使用了原始的前后 2 个关键帧 X_F 与 X_B , 其质量要比解码端经 H.264/AVC 帧内编解码后关键帧 X'_F 与 X'_B 高; 2) 编码端快速估计算法与解码端的边信息估计算法不同。因此, 为了减少编解码两端边信息误差对编码速率的影响, 本文通过统计的方法建立模型, 对误差进行估计。

对 Foreman 和 Soccer 2 个序列的编解码两端边信息 PSNR 进行统计分析, 在充分考虑算法复杂度的前提下, 建立二次曲线分布模型, 即

$$Q_{\text{Error}} = aQ_{\text{SIE_PSNR}}^2 + bQ_{\text{SIE_PSNR}} + c \quad (7)$$

$$Q_{\text{SI_PSNR}} = Q_{\text{SIE_PSNR}} - Q_{\text{Error}} \quad (8)$$

其中, Q_{Error} 表示编码端估计边信息与解码端边信息的误差, $Q_{\text{SIE_PSNR}}$ 是编码端估计出的边信息的 PSNR, a 、 b 和 c 是 3 个待确定的模型参数值。

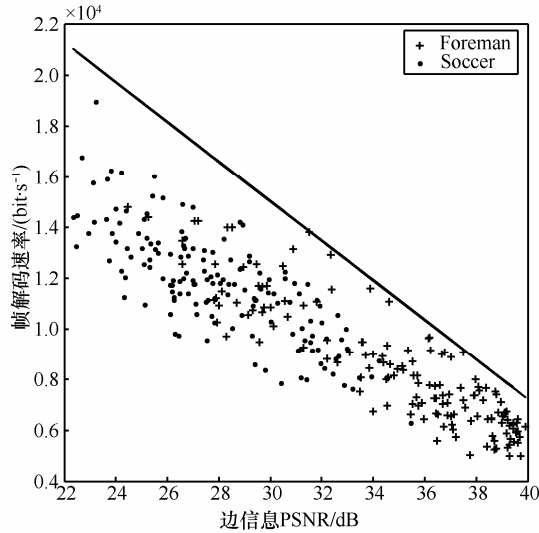
由式(3)、式(7)和式(8)可以得到估计出的编码速率 R_{Erc} 。

$$R_{\text{Erc}} = N(K(Q_{\text{SIE_PSNR}} - aQ_{\text{SIE_PSNR}}^2 - bQ_{\text{SIE_PSNR}} - c) + B) \quad (9)$$

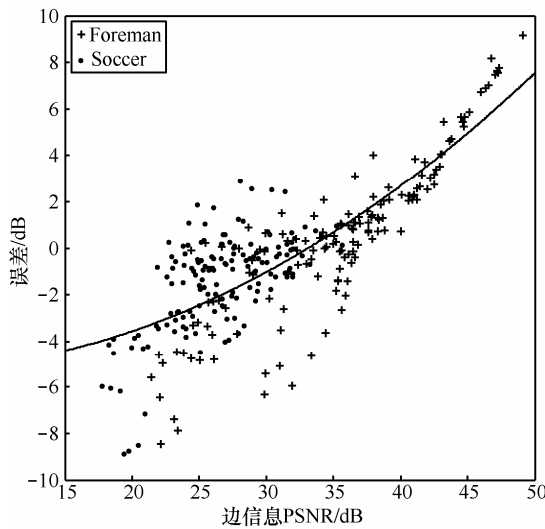
图 5 给出了量化矩阵为 $Q5$ 时, WZ 帧的速率估计模型分布, 从图 5 (a)中可以看出边信息 PSNR 与帧解码速率的分布模型为 $R_{\text{Drc}} = 36 \times (-21.7 \times Q_{\text{SI_PSNR}} + 1068.3)$, 从图 5 (b)中可以看出边信息 PSNR 与误差

的分布模型为 $Q_{Error} = 0.0058 \times Q_{SIE_PSNR}^2 - 0.0363 \times Q_{SIE_PSNR} - 5.1682$ ，由此即可得到量化矩阵为 Q_5 时的编码速率为

$$R_{Erc} = 36 \times (-21.7 \times (Q_{SIE_PSNR} - 0.0058 \times Q_{SIE_PSNR}^2 + 0.0363 \times Q_{SIE_PSNR} + 5.1682) + 1068.3)$$



(a) 边信息 PSNR 与帧解码速率的分布



(b) 边信息 PSNR 与误差的分布

图 5 WZ 帧的速率估计

4 仿真结果与分析

本文使用 QCIF 格式的标准视频序列进行仿真研究，设置 GOP 大小为 $2^{[7,9]}$ ，关键帧的量化系数 QP 根据 WZ 帧的质量来选择。Foreman @15 Hz 用于循环移位性能仿真；使用 Coastguard @15 Hz、

Hall monitor@15 Hz 和 Soccer@30 Hz 来仿真分层的快速运动补偿内插算法，参数 α 设定为 $25^{[13]}$ ；Hall monitor@15 Hz、Foreman@30 Hz、Coastguard@30 Hz 和 Soccer@30 Hz 用于解码图像质量仿真。每个序列的所有帧都被测试且只考虑亮度信号。

4.1 循环移位性能仿真

图 6 给出了循环移位前后每个比特平面平均速率的关系。从图中可以直观地看出循环移位前不同比特平面解码时所需码率相差很大，最大超过 1 400 bit/s，最小接近 0 bit/s，而循环移位后所有比特平面解码所需码率保持在 500 bit/s 左右。由此可以得出，循环移位可以有效地使每个比特平面的平均速率均匀化，为后续帧级别的速率估计提供基础。

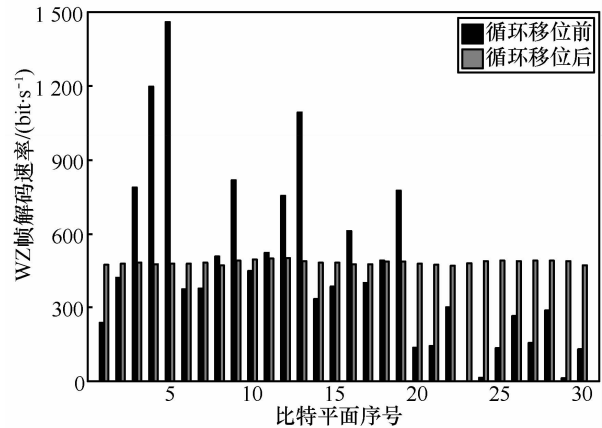


图 6 Foreman @ 15 Hz 量化矩阵 Q_4

4.2 分层快速运动补偿内插算法仿真

图 7 给出了“Coastguard”序列、“Soccer”序列和“Hall monitor”序列分别采用本文 HFMC I 算法、解码端运动补偿内插(MCFI, motion compensated frame interpolation)算法^[14]、FMCI 算法^[7,13]和 AI 算法^[9]得到的简单边信息估计 PSNR 值。

由图 7 可知，对于“Coastguard”序列，所提 HFMC I 算法平均性能比 AI 算法提高约 5.3 dB，比 FMCI 算法提高约 1.9 dB；对于“Soccer”序列，所提算法平均性能比 AI 算法提高约 3.3 dB，比 FMCI 算法提高约 2 dB；对于“Hall monitor”序列，所提算法平均性能比 AI 算法提高约 0.83 dB，比 FMCI 算法提高约 0.1 dB。由于本文算法中利用提取层使得 WZ 帧每一搜索块都直接或间接地进行了运动估计，从而提高了边信息估计的质量。且从上述实验结果可以看出，相比于其他算法，

使用本文算法的中高速运动序列性能提升明显，低速运动序列性能大致相当，略有提高，与理论分析吻合。本文算法使用平均每块比较次数作为算法复杂度的度量^[7,13,14]，并以不同算法所得出的边信息估计 PSNR 值与解码端边信息 PSNR 的标准均方根误差作为算法精度的度量，各算法的性能比较如表 1 所示。

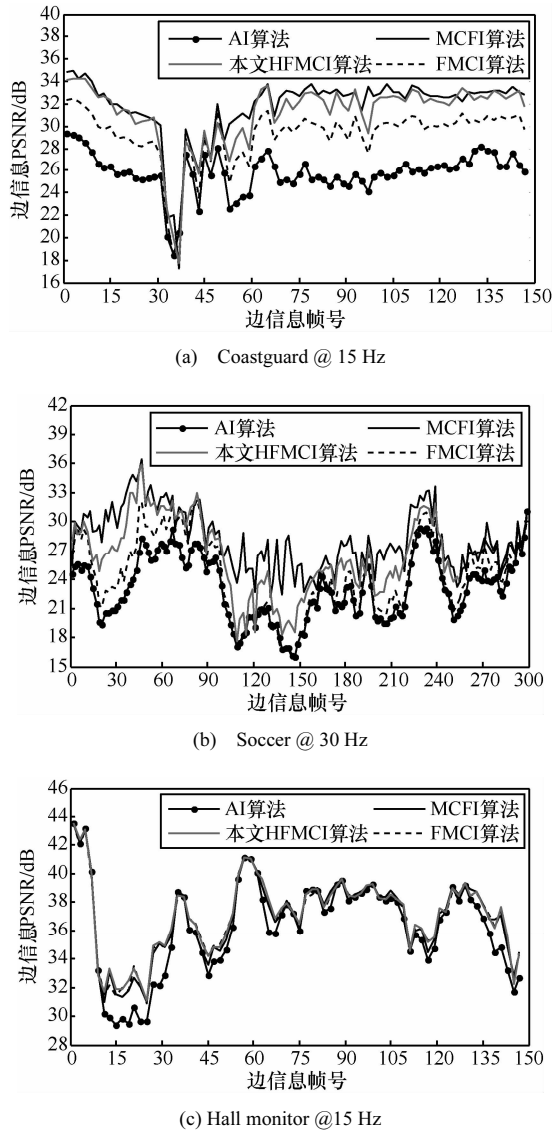


图 7 不同算法的边信息估计 PSNR 值比较

表 1

各算法性能比较

算法	平均每块比较次数				标准均方根误差		
	AI	FMCI	HFMCI	MCFI	AI	FMCI	HFMCI
Hall monitor@15 Hz	1.0	3.24	3.05	218.76	0.029	0.010	0.009
Coastguard@15 Hz	1.0	4.43	3.98	219.29	0.197	0.077	0.033
Soccer@30 Hz	1.0	4.50	4.26	221.16	0.200	0.148	0.093

由表 1 可以看出，测试序列使用本文所提 HFMCI 算法复杂度相比解码端 MCFI 算法均大幅降低。与 AI、FMCI 算法相比，该算法精度明显提升；且在算法复杂度方面，比同类算法 FMCI 有所降低，其原因在于对搜索块间运动矢量相关性的充分利用。从仿真结果可以看出，本文所提 HFMCI 算法以较低的复杂度，有效地提高了编码端边信息的估计质量，且对中高速运动序列效果尤为明显。

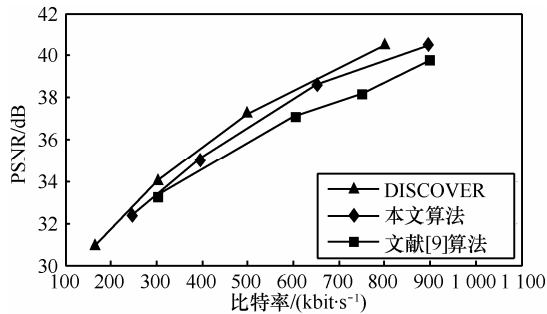
4.3 解码视频质量对比

对所测试的序列均使用峰值信噪比(PSNR)来衡量解码视频的客观质量。针对“Foreman”、“Coastguard”和“Hall monitor”序列，图 8 给出了本文所提算法与文献[9]中算法的率失真性能对比。从图 8(a)可以看出，在相同编码码率下，与文献[9]的算法相比，使用本文所提算法可平均将“Foreman”序列的 PSNR 提高约 1 dB。在图 8(b)中，使用本文算法对“Coastguard”序列所恢复的图像 PSNR 在中低码率时可提高约 1dB，高码率时提高了约 2 dB。在图 8(c)中，使用本文算法对“Hall monitor”序列的提升效果较低。率失真性能的提高与 4.2 节所提出的 HFMCI 算法有关，高质量的编码端边信息估计使得编码端可以更为精确地估计编码速率并传输校验比特，相同质量的视频信息所需的码率也进一步降低，从而导致了上述中高速运动序列性能的明显改善。而对于编码端边信息估计质量提升较低的低速运动序列，最终恢复的图像质量提高得也较低。

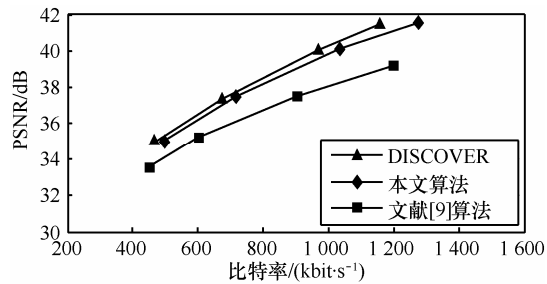
图 8 同时也给出了上述 3 个序列分别在有反馈速率控制和无反馈速率控制 DVC 系统中的性能对比。从图中可看出，与传统有反馈的 DISCOVER 系统^[15]相比，本文算法在解码视频 PSNR 方面仍存在 1~1.5 dB 的性能差距。为了进一步说明与有反馈 DVC 系统的比较，图 9 给出了 Soccer @ 30 Hz 的率失真性能对比。

由图 8 和图 9 可以得出，一方面，本文所提算

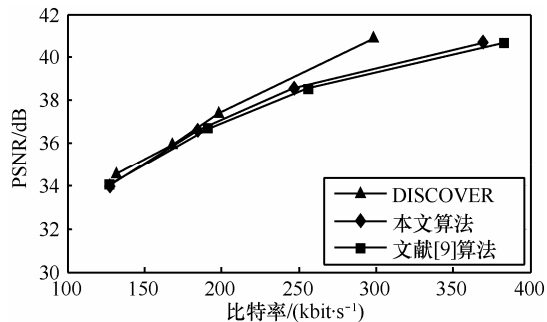
法相比文献[9]的算法率失真性能得到有效改善;另一方面,相对于有反馈的 DISCOVER 系统,在较低的码率时,使用本文算法的 DVC 系统可与之保持相当的率失真性能,在中高码率时,由于无反馈系统自身的特点会造成码率过高估计,导致其与 DISCOVER 系统的性能差距逐渐增大。



(a) Foreman @ 30 Hz



(b) Coastguard @ 30 Hz



(c) Hall monitor @ 15 Hz

图 8 不同算法的率失真性能比较

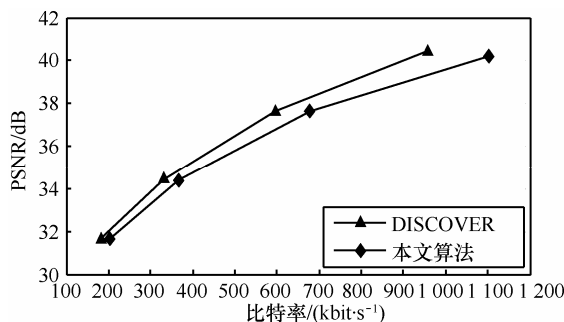


图 9 Soccer @ 30 Hz 率失真性能比较

5 结束语

通过讨论现有比特平面级无反馈编码端速率控制算法的不足,本文提出了一种帧级无反馈编码端速率控制算法,通过分层快速运动补偿内插产生编码端边信息估计,应用循环移位使每个比特平面的码率均匀,再通过编码端速率控制去除反馈信道。实验结果表明,在去反馈的前提下,本文所提算法提高了编码端边信息估计的质量并降低了速率估计的精度要求,同时有效改善了解码视频的质量,对中高速运动序列的效果尤为明显。

参考文献:

- [1] Information Technology-Coding of Audio-Visual Objects-Part 10: Advanced Video Coding[S]. ISO/IEC International Standard 14496-10, 2003.
- [2] SAMINA E, BECHIR H. A survey on energy-efficient routing techniques with QoS assurances for wireless multimedia sensor networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2012, 14(2): 265-278.
- [3] PURI R, MAJUMDAR A, ISHWAR P. Distributed video coding in wireless sensor networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(4): 94-106.
- [4] AARON A, ZHANG R, GIROD B. Wyner-Ziv coding of motion video[A]. Proceedings of the 36th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ACSSC' 02)[C]. Pacific Grove, USA, 2002. 240-244.
- [5] SLOWACK J, DELIGIANNIS N, LAMBERT P, et al. Distributed video coding with feedback channel constraints[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(7): 1014-1026.
- [6] ARTIGAS X, ASCENSO J, DALAI M, et al. The DISCOVER codec: architecture, techniques and evaluation[A]. Picture Coding Symposium[C]. Lisbon, Portugal, 2007.
- [7] BRITES C, PEREIRA F. Encoder rate control for transform domain Wyner-Ziv video coding[A]. Proc of 2007 IEEE International Conference on Image Processing[C]. San Antonio, Texas, 2007.5-8.
- [8] WEERAKKODY W A R J, FERNANDO W A C, KONDOZ A M. Enhanced reconstruction algorithm for unidirectional distributed video coding[J]. IET Image Processing, 2009, 3(6):329-334.
- [9] 宋彬, 杨明明, 秦浩. Wyner-Ziv 视频编码中无反馈速率控制算法研究[J].通信学报, 2011, 32(12): 1-7.
SONG B, YANG M M, QIN H. No-feedback rate control algorithm for Wyner-Ziv video coding[J]. Journal on Communications, 2011, 32(12):1-7.
- [10] SHENG T, ZHU X, HUA G, et al. Feedback-free rate allocation scheme for transform domain Wyner-Ziv video coding[J]. Multimedia Syst,2010,16(2): 127-137.

(下转第 46 页)

- [11] FILLION C, SHARMA G. Detecting content adaptive scaling of images for forensic applications[A]. IS&T/SPIE Electronic Imaging, Proc SPIE 7541, Media Forensics and Security II[C]. San Jose, California, 2010.75410Z-75410Z-12.
- [12] SARKAR A, NATARAJ L, MANJUNATH B S. Detection of seam carving and localization of seam insertions in digital images[A]. Proceedings of the 11th ACM Workshop on Multimedia and Security[C]. ACM, New York, USA, 2009.107-116.
- [13] CORTES C, VAPNIK V. Support-vector networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3):273-297.
- [14] NG T T, CHANG S F. A Data Set of Authentic and Spliced Image Blocks[R]. Technical Report 203-2004-3, Columbia University, 2004.
- [15] CHANG C C, LIN C J. LIBSVM:a library for support vector machines[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST), 2011, 2(3):27.



范礼 (1982-), 男, 天津人, 南开大学博士生, 主要研究方向为数字图像处理与模式识别、机器视觉、信息隐藏。



高琳 (1980-), 男, 天津人, 南开大学博士生, 主要研究方向为数字水印和数字图像取证技术。

作者简介:



盛国瑞 (1980-), 男, 山东烟台人, 南开大学博士生, 主要研究方向为数字图像取证和数字水印。



杨福圣 (1984-), 男, 天津人, 南开大学博士生, 主要研究方向为多媒体信息安全、图像取证。



高铁杠 (1966-), 男, 河北河间人, 南开大学教授, 主要研究方向为数字媒体安全技术、软件工程。



张顺 (1986-), 男, 山东莱州人, 南开大学博士生, 主要研究方向为数字水印、信息隐藏和多媒体信息安全。

(上接第 38 页)

- [11] HAO X R, CAI A, ZHUANG B J. A new encoder rate-allocation method for distributed video coding[J]. Front Electr Electron Eng China, 2011, 6(4): 535-541.
- [12] TEDMORI S, AI-NAJDAMI N. Hierarchical stochastic fast search motion estimation algorithm[J]. IET Computer Vision, 2012, 6(1): 21-28.
- [13] BRITES C, PEREIRA F. An efficient encoder rate control solution for transform domain Wyner-Ziv video coding[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2011, 21(9): 1278-1292.
- [14] BRITES C. Exploiting Correlation Noise modeling in Wyner-Ziv Video Coding[D]. Lisbon, Portugal: Technical University of Lisbon, 2011.
- [15] The DISCOVER codec evaluation[EB/OL]. <http://www.img.lx.it.pt/~discover/home.html>.

作者简介:



陈健 (1968-), 男, 江苏如东人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为认知网络、多媒体传感器网络及通信对抗技术。

惠超 (1989-), 男, 陕西三原人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为视频编码与通信。

阔永红 (1967-), 女, 陕西宝鸡人, 博士, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为认知网络、智能信号处理。