

融合全色度 LZMA 与色度子采样 HEVC 的屏幕图像编码

张培君* 王淑慧 周开伦 林涛
(同济大学超大规模集成电路研究所 上海 200092)

摘要: 由于屏幕图像的各向异性特点, 使用传统的图像/视频编码算法不能得到理想的编码效率。该文提出一种双编码器方案, 在保留 HEVC(High Efficiency Video Coding)对连续色调区域的优秀性能的同时, 加入了从 LZMA(Lempel-Ziv-Markov chain Algorithm) SDK 中提取出来的对非连续色调区域编码性能更优的字典-熵编码模块。两种编码器以宏块级自适应的方式有机融合, 可适应不同的视频源特性。为了减少 YUV4:4:4 格式转换到 YUV4:2:0 对图像造成的失真, 该文还提出了混合色度采样率的设计, 可在保留传统色度子采样编解码器和其低码率低成本优势特性的前提下, 有效提高编码效率。实验结果表明, 该文提出的方案, 比单纯使用 HEVC 的性能提高约 10~30 dB, 其主观性能改善也非常明显。

关键词: 高效视频编码; Lempel-Ziv-Markov chain Algorithm (LZMA); 屏幕图像编码; 字典-熵编码器; 混合色度采样率

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)01-0196-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00746

Screen Content Coding by Combined Full-chroma LZMA and Subsampled-chroma HEVC

Zhang Pei-jun Wang Shu-hui Zhou Kai-lun Lin Tao
(Institute of VLSI, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Considering the anisotropic characteristics of screen content, satisfactory coding efficiency cannot be achieved when screen content is coded only by traditional image/video coding tools. A new Dual-coder Mixed Chroma-sampling-rate (DMC) technique is proposed for full-chroma (YUV4:4:4) screen content coding by adding a dictionary-entropy based coder which extracted from Lempel-Ziv-Markov chain Algorithm (LZMA) to existing High Efficiency Video Coding (HEVC) SDK tools for better coding efficiency of discontinues-tone portion of screen content. Two coders are seamlessly unified and the optimal coder is selected adaptively macroblock-by-macroblock to fit the characteristics of the macroblock content. A mixed chroma-sample-rate method is also proposed for reducing distortions to convert YUV4:4:4 to YUV4:2:0. Coding experimental results show that DMC coding can achieve much higher PSNR than the current HEVC. There are also obvious improvements on the subjective visual quality differences between them.

Key words: High Efficiency Video Coding (HEVC); Lempel-Ziv-Markov chain Algorithm (LZMA); Screen content coding; Dictionary-entropy coder; Mixed chroma-sampling-rate

1 引言

随着硬件和移动互联网的迅猛发展, 云计算的相关应用已在 IT 市场上逐渐形成规模。云计算可为用户提供强大的云端计算能力以及海量数据存储的平台。在这种模式下, “计算能力” 将被当作一种新的资源在互联网上进行流通和使用。然而, 在当

前的互联网条件下, 如何在云端和客户端之间传送海量数据, 仍是有待解决的重要问题。SCC(Screen Content Coding)技术将是解决这一问题的最有效途径。通过传送压缩后屏幕图像, 可以将移动终端的部分或全部计算任务转移到云端来完成, 真正实现瘦客户端的云计算模型。目前市场上已经出现了一些以 SCC 技术为基础的概念和应用, 如虚拟屏幕, 云片计算, 远程桌面, VDI(Virtual Desktop Infrastructure), Zero Client 等^[1,2]。SCC 也是其他一些热门应用不可或缺的技术, 如无线 HDMI, iPad/iPhone 的无线屏幕映像技术。

2012-06-13 收到, 2012-09-21 改回

国家自然科学基金(61201226, 61271096), 上海市自然科学基金(12ZR1433800)和中央高校基本科研业务费专项资金(2810219002, 2810219003)资助课题

*通信作者: 张培君 zhang_pj@yeah.net

屏幕图像内容大致可分为两类：一种是由计算机产生的非连续色调区域，包括文本，图形，图标，图表等；另一种是由摄像机产生的连续色调区域如自然图像，视频序列等。非连续色调区域一般都有明显的像素边缘，包含少量颜色的文字，线条等。连续色调区域一般都有丰富的色彩和纹理。实验结果表明，传统视频编码器(指以预测/变换/量化为主要步骤的 Hybrid 编码器，如 MPEG4, H.264/AVC, AVS, HEVC 等)对连续色调区域有较高的编码效率，但对非连续色调区域的编码效果并不理想，而且这些基于变换域的有损编码工具也会使文字/线条等主观敏感区域产生明显的失真。因此，针对屏幕图像的特点，理想的 SCC 算法应该能结合传统视频编码器的优点，并对非连续色调区域产生更好的编码性能。

计算机屏幕图像是一种复合图像(Compound image)。常见的复合图像编码方法一般分为两类，一类是分层的思路，用的比较多的是基于 MRC (Mixed Raster Content)^[3]的 3 层编码方案，将图像分解为前景层，背景层和屏蔽层分别编码。文献[4]首先将图像按水平方向划分成条状区域，然后对每个条状区域使用 JPEG2000 来编码前景层和背景层，用 JBIG 来编码屏蔽层。文献[5,6]以宏块的颜色数为划分依据，将图像分解为两层，并用 LZW 编码文本/图形层，用 JPEG/JPEG2000 来编码自然图片层。另一类方法是分块的思路，根据宏块类型的不同，选择相应的编码方案。文献[6-9]为了提高文本/图形区域的编码效率，提出了两种方案，一种使用颜色量化和颜色索引来对颜色数较少的区域编码，另一种是跳过频域变换而直接量化编码，其性能比 H.264 的 PSNR 提高约 10 dB。文献[10]提出了一种部分无损的算法 ULHC(Unified LZ and Hybrid Coding)，同时使用 gzip 和 H.264 对宏块进行编码，然后使用 H.264 的 R-D 优化策略，从两个编码结果中选择一个较好的输出到码流中。文献[10]提出的算法 UC(United Coding)是 ULHC 的改进版本，增加了 PNG 编码器和 RLE(Run-Length Encoding)编码来帮助提高编码效率。总的来说，分层方案是历史上针对复合文档编码的需求而提出的，对图像进行分层处理以整幅图像为单位进行，具有很大编码和解码延迟，所以无法满足 SCC 实时编解码的要求，另外分层方案也与传统图像/视频编码器以宏块为单位的编码方式不兼容，多层分别产生的码流无法融合在一起，其以扫描文档，静态图像编码为数据源的算法并不适用于屏幕图像这样需要帧间编码的视频压缩。分块方案由于要对不同的宏块做不同

的编码处理，就有可能破坏宏块间的相关性和耦合性，从而增加算法的复杂度和计算量，但从云端的计算能力考虑，计算量的增加不会产生太大问题。另外分块方案可与现有视频编码标准自然融合，更利于 SCC 技术标准化的推进。从已有研究情况来看，对非连续色调区域一般会采用空域手段进行编码，一类方法是跳过现有视频编码标准中的变换/量化步骤，预测后直接做熵编码。这种方法实现比较简单，但得到的性能提升有限。另一类是引入其他编码工具，如 LZ 系列的字典编码，这种方法可以得到更理想的性能提升，但需要注意和传统视频编码工具的兼容性问题。

HEVC(High Efficiency Video Coding)是继 H.264 后新一代的视频编码标准，由 ISO/IEC 的 MPEG 和 ITU-T 的 VCEG 联合开发，合作开发组称为 JCT-VC，从世界各大研究机构，高校征求提案。HEVC 着重于高清视频的高效编码，其设计目标是在同等图像质量下，比 H.264/AVC 的比特率降低 50%。相比较 H.264，HEVC 中出现了一些新特性，如宏块大小不再局限于 16×16 ，最大可达到 64×64 ，变换编码的尺度最大也增加到 32×32 ，更有利于高清视频的编码。多达 35 种的帧内预测模式，以及高精度运动补偿插值(8 抽头滤波)使预测更加准确。SAO(Sample Adaptive Offset)和 ALF(Adaptive Loop Filter)有利于提高重建图像主观质量。Tiles 技术使 HEVC 增加了对并行计算的支持。JCT-VC 也成立了专门的小组研究 SCC 技术，以期能将合适的 SCC 算法加入 HEVC 中。最近几次 JCT-VC 的会议中，已经有 40 多份和 SCC 相关的提案，本文算法也已作为提案^[11,12]提交 JCT-VC。

2 本文提出的方法

2.1 双编码方案

由于屏幕图像的各相异性特点，单纯使用传统的图像/视频编码器(MPEG4, H.264, AVS, HEVC 等)并不能得到理想的编码效率。因此，本文提出了一种混合色度采样率的双编码器方案(Dual-coder Mixed Chroma-sampling-rate, DMC)，对屏幕图像中出现的文本/图形等非连续性色调区域，使用字典-熵编码，而对色彩丰富，纹理细节复杂的自然图像区域，仍然使用传统的视频编码器。两种编码方案会对同一原始数据单元进行处理，并通过比较编码后的 RDC(Rate-Distortion Cost)，最终决定哪种编码方案会被选中并输出到码流中。具体编解码流程如图 1 所示。

HEVC 中 RDC 的计算如式(1)所示：

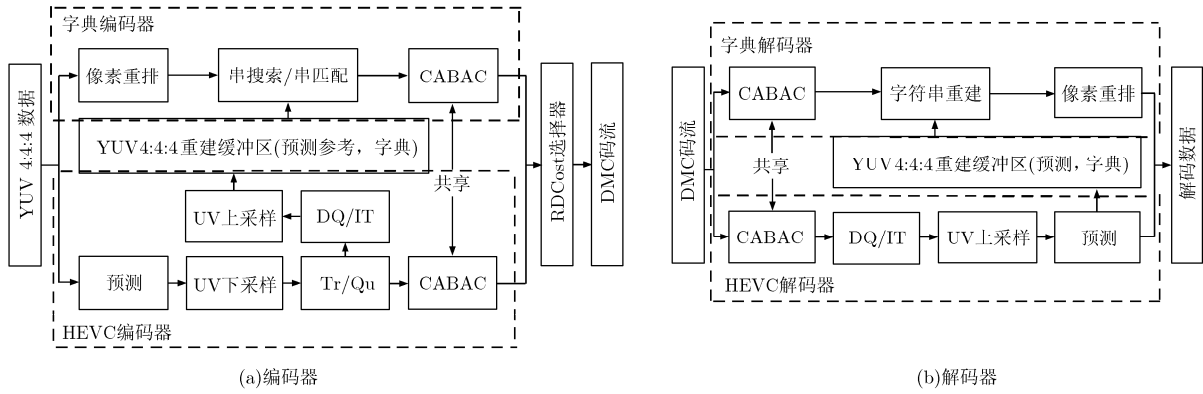


图 1 DMC 编解码流程

$$RDC_{HM} = (D_l + w_c \cdot D_c) + \lambda \cdot R_{HM} \quad (1)$$

其中 D_l 和 D_c 分别为亮度和色度失真度。 w_c 为色度失真权重因子, R_{HM} 为 HEVC 的码率, λ 是随量化因子 qp 变化的参数, λ 按式(2)计算:

$$\lambda = c \cdot s \cdot (2^{qp/6})^2 = c \cdot s \cdot 2^{qp/3} \quad (2)$$

其中 c 是取值在[0,1]的一个常数, 缩放因子 s 主要用于调整 B/P 帧的 RDC 计算, 帧内编码时可以忽略。其计算方法见式(3):

$$s = 1.0 - \max(0, \min(0.5, 0.05 \cdot nbf)) \quad (3)$$

其中 nbf 为受编码参数影响的因子。由于 HEVC 在 qp>29 时, 对亮度和色度使用了不同的 qp, 因此也引入了色度调整因子 λ_c 和色度权重因子 w_c :

$$\lambda_c = c \cdot s \cdot (2^{qp_c/6})^2 = c \cdot s \cdot 2^{qp_c/3} \quad (4)$$

$$w_c = \frac{\lambda}{\lambda_c} = \frac{c \cdot s \cdot 2^{qp/3}}{c \cdot s \cdot 2^{qp_c/3}} = 2^{(qp - qp_c)/3} \quad (5)$$

由于亮度和色度的码率分开计算会比较复杂, 所以 HEVC 将 w_c 作用于 D_c , 对码率 R_{HM} 使用统一的 λ 来计算, 如式(1)所示。

由于字典编码是无损的, 失真度 $D_l = D_c = 0$, 因此, 字典-熵编码器的 RDC 可如下计算, 其中 R_{SM} 是字典-熵编码的码率:

$$RDC_{SM} = \lambda \cdot R_{SM} \quad (6)$$

显然, RDC 越小, 编码性能越理想, 为了比较两种编码器, 我们定义了参考指标 G :

$$G = \frac{RDC_{HM}}{RDC_{SM}} = \frac{(D_l + w_c \cdot D_c) + \lambda \cdot R_{HM}}{\lambda \cdot R_{SM}} \quad (7)$$

如果 $G > 1$, 则说明字典编码的性能要好于 HEVC, 本文对 12 幅屏幕图像共 70776 个 16×16 的宏块进

行了测试, 得到的平均值数据如表 1 所示, 可以看出, 低码率时, 字典编码和 HEVC 的 RDC 性能比较接近, 但中高码率部分, 字典编码的性能要远好于 HEVC。

2.2 混合色度采样率

屏幕图像的原始采集数据一般为 YUV4:4:4 格式, 但传统的视频编码器普遍支持的格式为 YUV4:2:0, 让现有的基于 YUV4:2:0 的编解码器能够处理 YUV4:4:4 的数据的方法有如下 3 种:

方法 1 在进入 HEVC 编码器前, 把色度数据子采样, 将 YUV4:4:4 数据转换成 YUV4:2:0, 再进入编码器, 编码完成后, 再把重建的 YUV4:2:0 的色度数据上采样为 YUV4:4:4 格式。这种方案实施起来比较简单, 但下采样会造成色度信号的失真^[1]。

方法 2 在视频编码器内部增加对 YUV4:4:4 格式的支持, 目前 HEVC 的最新版本还不支持 YUV4:4:4 格式, 增加新格式会增加软硬件成本, 而收益却不明显, 尤其对屏幕图像这种包含大量非连续性色调区域的图像类型。

方法 3 将色度子采样的步骤后移到变换/量化前, 也就是说以 YUV4:4:4 的格式进行帧内/帧间预测, 只是再把 YUV4:4:4 格式预测残差做子采样转换成 YUV4:2:0 格式, 再做变换/量化等后续编码步骤, 详见图 1, 方法 3 我们称之为混合色度采样率(mixed chroma-sampling-rate)。其实现起来虽然略为复杂, 但由于将帧内/帧间预测前移, 相比较方法 1 对原始色度数据做下采样, 方法 3 只是对色度预测残差做下采样, 使得 YUV4:4:4 \rightarrow YUV4:2:0 造成的色度损失有一定程度的降低, 尤其在色度预测

表 1 两种编码器 RDC 性能比较

qp	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48
G_{avg}	685.25	270.57	110.48	45.91	19.61	9.19	5.41	3.15	2.14	1.69	1.16

比较成功的情况下，预测残差多数会是 0，这种情况下的色度下采样损失可以忽略不计。此方案仍以现有的 YUV4:2:0 编解码器为核心，只是在适当的位置增加了色度的上采样/下采样步骤，能以较少的软硬件成本换取较为可观的编码收益。

2.3 字典-熵编码

字典编码的核心原理就是从历史数据中寻找当前数据的匹配，如果匹配成功，就以(匹配长度，匹配距离)数据对来替代原始数据，从而实现数据的无损压缩，字典编码的原理如图 2 所示。这种编码方法对屏幕图像中的大量非连续色调区域具有良好的编码效果，可以认为利用已编码的历史数据建立了一个巨量的参考数据空间，该空间的数据随着编码流程的进行而不断增大，其字符串搜索/匹配的效益也随之逐渐增加。该数据空间可称为“字典”。

LZMA 算法是现有无损编码工具中效率最高的，同等情况下，其压缩性能比 gzip 高 10%~15%左右。本文使用的字典编码器即是从 LZMA SDK 中裁剪，修改而来的，并使其融合于宏块化、自适应 RD 选择的混合色度采样率双编码器方案中。

数据排列方式也会对字典编码的性能产生重要影响，本算法中，在进行串匹配搜索前，要把当前宏块的数据转为列序排列，并以打包形式(packed)重排，见图3。打包重排可使原来各自松散存放的 YUV分量转变为聚合存放，这样可以明显提高字符串匹配的效率和匹配长度。表2列举了几种数据排列方式对字典编码压缩比的影响，测试图像如图4所示。可以看出，结合以列序和打包方式重排数据，可以获得最高 103%的压缩性能提升。其中打包方式对性能提升的贡献尤为明显，特别是当原始图像数据中非连续色

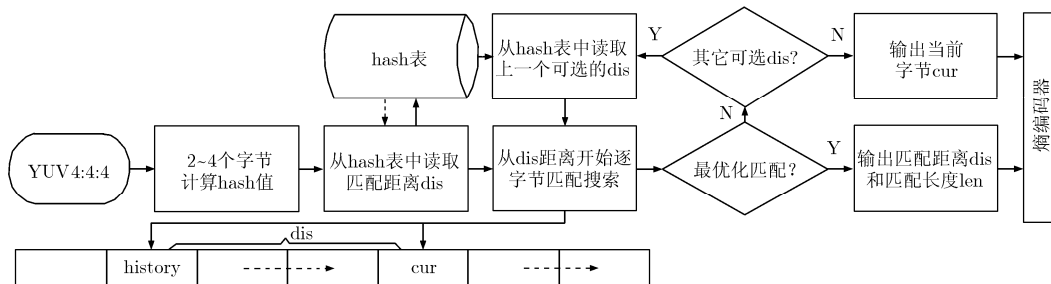


图2 字典-熵编码原理

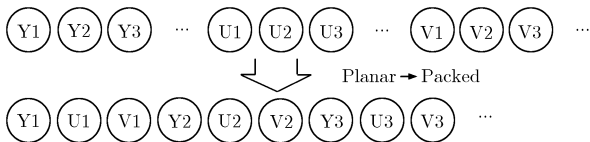


图3 数据打包重排

的。与文献[10,11]的方案比较，本文算法对YUV4:4:4格式使用了混合色度采样率的方法，在传统的Hybrid Coding部分仍然基本采用色度子采样YUV4:2:0的格式，计算复杂度和实现成本大为降低，在低码率时常常比文献[10,14]的方法有更好的RD特性，详见文献[15,16]。

3 实验结果

本文所使用图 4 所示的 6 幅测试图像都是以 24 bit RGB 格式捕获并转换为 YUV4:4:4 格式。使用的 HEVC 软件测试版本是 HM4.0。实验产生的 R-D 曲线数据在图 6 中列出。其中 HEVC420 格式的曲线指在编码时，首先将 YUV4:4:4 数据下采样为 YUV4:2:0 格式，然后用 HEVC 编码器进行编码，并将重建的 YUV4:2:0 图像上采样为 YUV4:4:4 格式。HEVC420 Pred444 指按照 2.2 节所述混合色度采样率的方法，先做 YUV4:4:4 格式的帧内预测，对色度残差做下采样后再进行其余步骤的 YUV4:2:0 格式的编码，同样，产生的 YUV4:2:0 格式的重构图像也要上采样为 YUV4:4:4 格式。这两种方案都没有引入字典编码器，PSNR 都是以 YUV4:4:4 格式计算的。

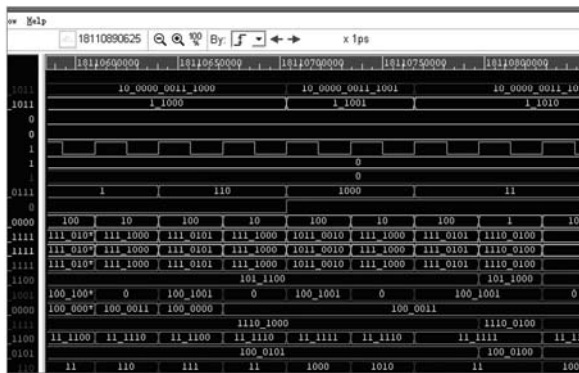
表2 数据排列方式对压缩比的影响

测试图像	未重排	列序重排	打包重排	列序&打包重排	性能提升(%)
图 4(a)	46.27	53.92	66.91	94.22	103.62
图 4(b)	4.22	3.99	4.45	4.37	3.63
图 4(c)	168.88	169.11	255.76	266.96	58.08

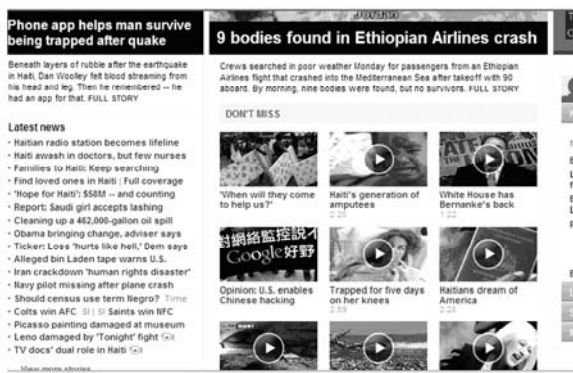
调区域较多的情况下。

2.4 DMC方案的特点和改进

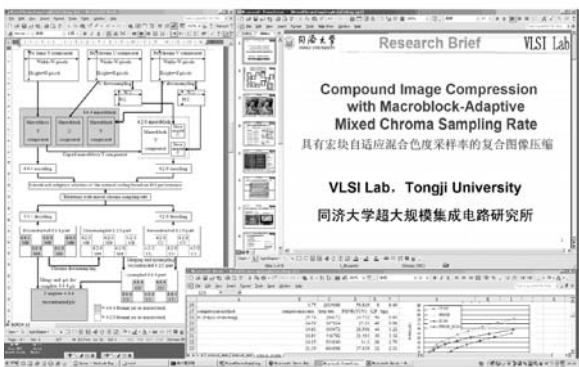
相比较文献[6-9]提出的SCC方案，本文算法引入了以LZMA为基础的字典编码，由于预测范围的增大以及非连续色调区域的特点，对屏幕图像的编码性能有显著提升。JCT-VC的文档^[13]中也指出现有SCC方案中，LZ系列的方法的性能表现是最好



(a) IC设计 704×448



(b)网页 704×448



(c)办公软件 1920×1200



(d)长城 1920×1080

图 4 4 幅测试图像

HEVC DMC 是在使用 2.2 节方法的基础上,引入以 LZMA 为蓝本的经过反复修改、裁剪而提炼出来的字典编码器,并和 HEVC 组合成混合色度采样率的双编码方案。为了和以前的方法进行比较,图 6 中也引入了两种以 H.264 为基础的编码方案,其中 H.264 DMC 是结合 H.264 和 gzip 的双编码器混合色度采样率算法。本文所列数据都经过严格测试,并全部通过了解码验证。另外,图 5 也给出了同等码率情况下,本文算法和 HEVC420 的重建图像主观性能比较,截图取自图 4(a),可以看出,同等码率下,对文字/图形等非连续色调区域,DMC 算法

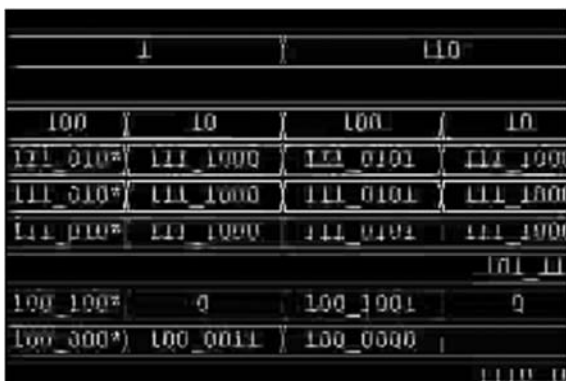
能有效降低图像失真,得到更好的主观图像质量。

从 R-D 曲线中可以看出:

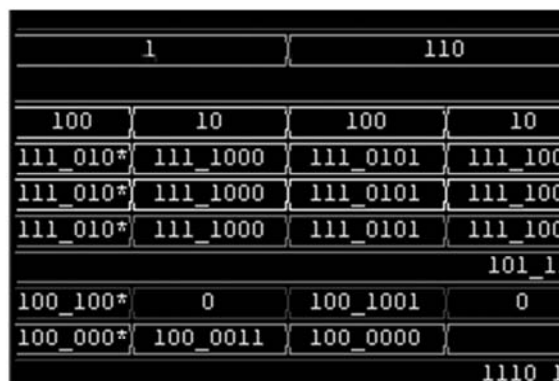
(1)和单纯使用 HEVC 或 H.264 视频编码器比较,本文提出的方案 HEVC DMC 有明显的性能提升,和 H.264 DMC 比较,在同等 PSNR 的情况下,比特率也要明显降低。以 PSNR=45 为例,6 幅图像的比特率降低依次为 29%, 18%, 26%, 39%, 48%, 37%。

(2)在极低码率的情况下,由于选中字典编码的宏块较少,DMC 算法性能和非双编码器方案接近。

(3)从图 6(a)的 R-D 曲线看,HEVC 420 Pred444



(a) Coder: HEVC 420, bpp: 0.22, PSNR: 21.5 dB



(b) Coder: HEVC DMC, bpp: 0.22, PSNR: 40.3 dB

图 5 测试图像的主观性能比较

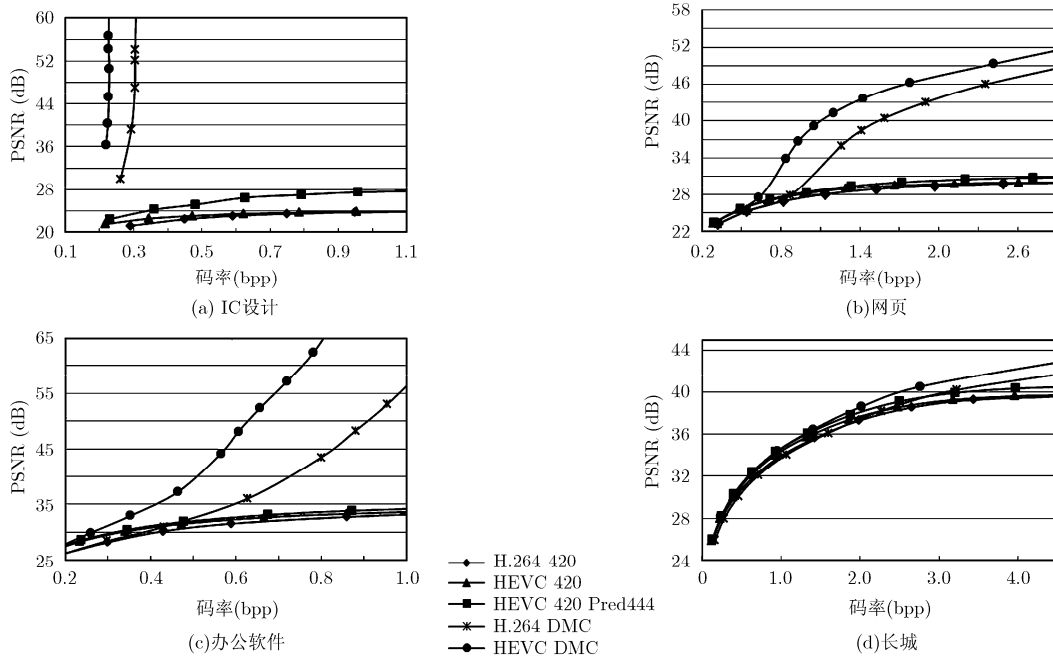


图 6 4 幅测试图像的 R-D 曲线

的性能要明显优于 HEVC 420，前者的优势在其他几幅图中还不是很明显，这说明帧内预测的精确度和混合色度采样率的性能提升效果成正比关系，帧内预测越精确，预测残差越接近 0，则混合色度采样率的设计就越能表现出更好的效率。因此，混合色度采样率的设计在帧间编码时将会产生更明显的性能提升，本文算法帧间编码的 R-D 性能比较可参看 JCT-VC 提案^[1]。

(4)对于非连续色调为主导的图像，例如图 6(a), 6(c)，引入字典编码的混合算法能表现出非常好的性能。而对于连续色调主导或存在大量背景噪声的图像，例如图 6(d)，DMC 算法相对于传统算法的也有一定的性能提升，但不像前者那样明显，与前者不同的是，自适应的宏块级编码可使字典编码由主导增益因素变为辅助增益因素。

4 结束语

通过分析屏幕图像的特点，并结合前人的研究经验，本文设计了一种宏块级自适应的双编码器方案，在保留现有传统视频编码器对连续色调区域性能良好的基础，增加了对非连续色调区域编码性能更好的字典编码，由于宏块级自适应的 RDO (Rate-Distortion Optimization) 选择机制，字典编码对整体的影响可以随视频源特性而自动调整。从实验结果来看，同单独使用 HEVC 编码器比较，在中等码率部分，同等码率下 PSNR 的提高大约在 10~15 dB，在高码率部分，PSNR 的提高大概有 30

dB 或更高。在同等比特率下，测试序列的主观性能改善也十分明显。

同 H.264 DMC 相比较，本文的方法也表现出了明显的优势。性能提升的主要原因有 3 点：(1) HEVC 作为新一代的视频编码标准，相对于 H.264 的编码性能提高；(2)本文的字典编码使用了 16 MB 的字典和 40 M 单元的 hash 表，相对于 H.264 DMC 使用 gzip 的 32 kB 字典和 64 kB 单元的 hash 表，能得到更好的字符串搜索/匹配性能；(3)HEVC 的 CABAC 相对于 gzip 的 Huffman 编码的性能提高。

通过把 LZMA 中字符串搜索/匹配部分改造成具有宏块化，可逆化的功能模块，并根据图像编码的特点加入数据重排以提升字符串匹配的性能，最后以 HEVC 的 RDO 自适应选择机制为基础，有机融合于 HEVC 的平台中。字典编码的合理引入是本文算法性能增益的最主要贡献因素。另外，对 YUV4:4:4 数据的混合色度采样率处理在不增加编解码器软硬件成本的前提下，对算法整体性能提升有一定帮助。

需要深入下去的研究包括，研究字典大小和 hash 表大小对编码性能的影响，尽量减小字典和 hash 表存储空间，优化调整字典编码的时间空间效率，以及提高对以连续色调区域为主导的屏幕图像的编码性能。

参考文献

- [1] Lu Yan, Li Shi-peng, and Shen Hui-feng. Virtualized screen: a

- third element for cloud-mobile convergence[J]. *IEEE Multimedia*, 2011, 18(2): 4–11.
- [2] Lin Tao and Wang Shu-hui. Cloudlet-screen computing: a multi-core-based, cloud-computing-oriented, traditional-computing-compatible parallel computing paradigm for the masses[C]. *IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing and Novel Parallel Computing*, New York, 2009: 1805–1808.
- [3] ITU-T Study Group8, Mixed raster content(MRC)[S]. Draft Recommendation, 1997.
- [4] Mukherjee Debargha, Chrysafis Christos, and Said Amir. JPEG2000-matched MRC compression of compound documents[C]. *International Conference on Image Processing*, New York, 2002: 73–76.
- [5] Lin Tony and Hao Peng-wei. Compound image compression for real-time computer screen image transmission[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005: 14(8): 993–1005.
- [6] Lin Tony, Hao Peng-wei, and Lee Sang Uk. Efficient coding of computer generated compound images[C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, Genoa, 2005, Vol.1: I-561–64.
- [7] Lan Cuiling, Wu Feng, and Shi Guang-ming. Compress compound images in H.264/MPEG-4 AVC by exploiting spatial correlation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(4): 946–957.
- [8] Lan Cui-ling, Wu Feng, and Shi Guang-ming. Screen content coding results using TMuC[C]. *JCT-VC-Meeting, JCTVC-C276*, Guangzhou, 2010.
- [9] Ding Wen-peng, Lu Yan, and Wu Feng. Enable efficient compound image compression in H.264/AVC intra coding[C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, San Antonio, 2007: 337–340.
- [10] Wang Shu-hui and Lin Tao. A unified LZ and hybrid coding for compound image partial-lossless compression[C]. 2nd International Congress on Image and Signal Processing, Tianjin, 2009: 1–5.
- [11] Lin Tao, Zhang Pei-jun, Wang Shu-hui, *et al.* 4:4:4 screen content coding using dual-coder mixed chroma-sampling-rate (DMC) techniques[C]. *JCT-VC-Meeting, JCTVC-I0272*, Geneva, 2012.
- [12] Zhang Pei-jun, Lin Tao, Wang Shu-hui, *et al.* Subjective quality comparison between DMC coding and chroma-subsampled 420 coding using YUV444 screen content test sequences[C]. *JCT-VC-Meeting, JCTVC-I0336*, Geneva, 2012.
- [13] Sullivan Gary and Ohm Jens-Rainer. Meeting report of the fifth meeting of the Joint Collaborative Team on Video Coding [C]. *JCT-VC-Meeting, JCTVC-E600*, Geneva, 2011.
- [14] Wang Shu-hui and Lin Tao. United coding for compound image compression[C]. 3rd International Congress on Image and Signal Processing, Yantai, 2010: 566–570.
- [15] Lin Tao and Wang Shu-hui. Mixed chroma sampling-rate coding: combining the merits of 4:4:4 and 4:2:0 and increasing the value of past 4:2:0 investment[C]. *JCT-VC-Meeting, JCTVC-H0065*, San Jose, 2012.
- [16] Wang Shu-hui and Tao Lin. 4:4:4 Screen content coding using macroblock-adaptive mixed chroma-sampling-rate[C]. *JCT-VC-Meeting, JCTVC-H0073*, San Jose, 2012.
- 张培君: 男, 1977 年生, 讲师, 研究方向为多媒体算法和 SoC 设计.
- 王淑慧: 女, 1973 年生, 讲师, 研究方向为多媒体算法和 SoC 设计.
- 周开伦: 男, 1977 年生, 讲师, 研究方向为多媒体算法和 SoC 设计.
- 林涛: 男, 1958 年生, 教授, 研究方向为多媒体算法和 SoC 设计.