



一种多色度格式级联编码的 AVS2 全色度图像编码算法

赵利平¹, 林涛², 周开伦², 胡珂立¹, 林春梅¹

(1. 绍兴文理学院计算机科学与工程系, 浙江 绍兴 312000 ;

2. 同济大学超大规模集成电路研究所, 上海 200092)

摘要: 在我国最新的第二代数字音视频编解码算法标准 (AVS2) 的基础上, 提出了一种多色度格式级联编码 (MCFCC) 的全色度 (4:4:4 采样格式) 图像编码算法。MCFCC 算法首先对 4:4:4 采样格式的图像进行色度下采样转换成 4:2:0 采样格式的图像, 然后进行 4:2:0 采样格式的帧内预测、变换、量化、反量化、反变换、熵编码和在率-失真最优化过程中使用带权重的 4:4:4 采样格式的失真计算方案, 最后将其上采样为 4:4:4 采样格式的预测补偿图像并采用 4:4:4 采样格式的环内滤波补偿算法。实验结果表明: 对于全色度自然图像, MCFCC 算法在低编码复杂度和低实现成本 (完全复用 4:2:0 编解码模块) 的前提下, 综合编码效率进一步提高。

关键词: 图像编码; AVS2; 全色度; 色度重采样; 环内滤波

中图分类号: TP919.81

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018122

A multi-chroma format cascaded coding method for full-chroma image in AVS2

ZHAO Liping¹, LIN Tao², ZHOU Kailun², HU Keli¹, LIN Chunmei¹

1. Department of Computer Science and Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China

2. Institute of VLSI, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: In the second generation of audio video coding standard (AVS2), a multi-chroma format cascaded coding method (MCFCC) for full-chroma (4:4:4 sampling format) images coding was proposed. The MCFCC algorithm firstly converts the 4:4:4 sampling format image into 4:2:0 sampling format image, then the 4:2:0 sampling format image was processed by 4:2:0 sampling format intra prediction, transform, quantization, inverse quantization, inverse transform, entropy coding and a weighted 4:4:4 sampling format distortion calculation method in the rate-distortion optimization process, finally 4:4:4 sampling format in-loop filtering and offset algorithms were applied to the 4:4:4 sampling format image after up sampling. The experimental results show that, for full-chroma natural images, the MCFCC algorithm achieves higher coding efficiency at very low additional encoding complexity and very low additional design and implementation cost.

Key words: image coding, AVS2, full-chroma, chroma subsampling, in-loop filtering

收稿日期: 2017-09-17; 修回日期: 2018-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61601200, No.61603258)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 61601200, No.61603258)



1 引言

随着“宽带中国”战略和“互联网+”行动计划的实施,互联网图像编码技术尤其是全色度互联网图像编码算法成为图像和视频应用领域(比如电视和电影的制作域等)的关键技术之一。全色度图像,也称 4:4:4 采样格式的图像,即不对色度分量进行下采样(在用 YUV(如 YCbCr)色彩空间表示的图像中,一个像素由 3 个分量构成:一个亮度分量 Y 以及两个色度分量 U 和 V)。2017 年 3 月,针对我国最新的第二代数字音视频编解码标准(the second generation of audio video coding standard, AVS2)^[1-3]不支持 4:4:4 采样格式图像和视频编码的现状,下一代 AVS 视频编码标准的需求 V9.0^[4]中提出了支持 4:4:4 采样格式图像和视频编/解码的需求,包括互联网图像视频和屏幕混合内容编码等^[5-14]。因此,基于 AVS2 标准的高效的全色度图像编码算法也是视频编码技术^[16,17]的重要研究课题之一。

目前应用最广泛的主流图像和视频编码算法与标准,如 JPEG、MPEG-1、MPEG-2、AVS2 基准档次、H.264 主要档次和 HEVC 主要档次都是采用 4:2:0 采样格式(即对每个色度分量进行 4:1 的下采样)的编码。事实上,几乎所有实际应用中,4:2:0 采样格式都不是图像和视频的原始格式,而是从 4:4:4 采样格式经过色度下采样后获得的;与此对应,经过编/解码后的重构的 4:2:0 采样格式的图像和视频,也都要经过色度上采样转换成 4:4:4 采样格式后才能显示。因此,这些主流图像和视频编码算法与标准对全色度图像和视频的整个编/解码过程可以看成由色度下采样、4:2:0 采样格式的编/解码、色度上采样这 3 部分组成。这些算法与标准对全色度图像和视频编/解码过程简称为伪 4:4:4 编码算法。参考文献[11]针对已颁布的 AVS2 标准基准档次不支持 4:4:4 采样格式的视频压缩,提出了融合像素串匹配的

AVS2 全色度屏幕与混合内容视频编码算法,同样采用伪 4:4:4 编码算法使 4:2:0 格式的 AVS2 帧内预测编/解码器能够处理 4:4:4 格式的图像和视频。显然,伪 4:4:4 编码算法中色度下采样和 4:2:0 采样格式的编/解码都起到数据压缩的作用。一方面,伪 4:4:4 编码算法对输入 4:4:4 采样格式的图像和视频进行下采样至 4:2:0 采样格式,色度下采样本身就可以将比特数减少一半,达到 2:1 的压缩比。这也是过去 30 多年来,从 JPEG 和 MPEG-1 甚至更早的国际电信联盟(International Telecommunications Union, ITU)视频编码标准开始,4:2:0 采样格式图像或视频编码算法一直占有主流地位的原因。另一方面,由于伪 4:4:4 编码算法的实际的图像和视频编码总误差由色度重采样误差和 4:2:0 采样格式编/解码误差这两部分组成,也会导致编码效率较低。为了减少色度重采样误差,业界的一种主流做法是对色度分量进行线性插值。

为了更好地支持全色度(4:4:4 采样格式)图像编解码算法,国际上最新的视频标准 HEVC (high efficiency video coding) 的扩展档次^[18](简称 HEVC-RExt)对 4:4:4 采样格式的色度分量不进行色度重采样算法,直接进行编/解码,这种算法简称为全 4:4:4 编码算法。显然,全 4:4:4 编码算法的总误差等于编/解码误差。全 4:4:4 编码算法对于无损或几乎无损的超高质量的图像或视频的编码,如计算机屏幕内容编码等,编码效率比伪 4:4:4 编码算法更好。参考文献[5-14]提出了基于串匹配算法的全色度屏幕内容编码算法^[15]。

全色度自然图像与屏幕内容图像^[7,8,12]。具有不同的特征。以上算法对于全色度自然图像的编码存在以下局限性:一方面,全 4:4:4 编码算法的比特率非常大,色度的峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)不必非常高,降低了整体编码效率;而伪 4:4:4 编码算法的误差较大,也降低了整体编码效率;参考文献[11]提出的融合像素串匹

配的 AVS2 全色度视频编码算法主要是对屏幕图像很有效,对全色度自然图像序列的编码效率的提升效果不显著;另一方面,全 4:4:4 编码算法和参考文献[11]中的算法需要增加编码复杂度和对现有标准文本做较大的修改。

综合以上考虑,本文在我国最新的 AVS2 标准框架中,做了以下工作。

- 为了保持伪 4:4:4 编码算法低码率的优势,将色度分量的上下采样算法与编码算法结合起来考虑,提出了一种在不同编码阶段采用不同色度采样格式的全色度图像编码算法,称为色度格式级联编码(multi-chroma format cascaded coding, MCFCC)算法。
- 为了进一步减少色度采样误差,通过在率-失真优化(rate-distortion optimization, RDO)过程中使用带权重的 4:4:4 采样格式的失真计算方式和采用 4:4:4 采样格式的环内滤波补偿算法。

实验结果表明:对于全色度自然图像,提出的 MCFCC 算法比全 4:4:4 编码算法、伪 4:4:4 编码算法(包括加上线性插值方案)获得的综合编码效率更高。与全 4:4:4 编码算法和参考文献[11]中算法相比的另一优势是:设计和实现全 4:4:4 或参考文献[11]中编/解码器,特别是硬件编/解码器,很多模块都需要“重起炉灶”,增加的设计和实现成本非常高;而 MCFCC 算法的软件或硬件的编/解码器实现和设计成本极低,完全复用 4:2:0 编/解码模块(后处理部分仅扩大涉及的色度像素数目而不必对算法进行任何修改),以非常小的设计和实现成本代价可以很有效地提升编码效率,具有较好的实际应用价值。多色度格式级联编码算法基于 AVS2 提案^[19]。

2 相关工作

图 1 给出了基于 HEVC-RExt 的全 4:4:4 编码算法的全色度图像或视频编码框架。

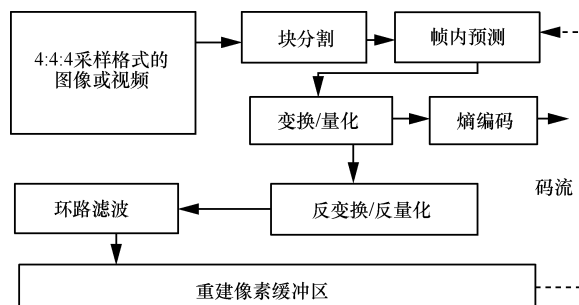


图 1 基于 HEVC-RExt 的全 4:4:4 编码算法的全色度图像编码框架

对于输入的 4:4:4 采样格式的图像或视频,首先进行块分割,HEVC^[20]和 AVS2^[1]中都定义了 3 种块分割单元,分别是编码单元(coding unit, CU)、预测单元(prediction unit, PU)和变换单元(transform unit, TU)。最大的 CU 称为 LCU(largest coding unit)。一帧图像可以认为是由互相不重叠的 LCU 组合而成,由于 CU 是二维对称结构,对 LCU 的进一步分割是以递归四叉树方式进行的。CU 是最基本的二维对称结构编码单位,各种编码环节如帧内预测、变换/量化、反变换/反量化、环路滤波以及熵编码都是以分割单元为单位进行的。全 4:4:4 编码算法中亮度分量与色度分量采用统一大小的 CU 进行编码。

图 2 给出了基于 AVS2 的伪 4:4:4 编码算法的全色度图像或视频编/解码框架。AVS2 与 HEVC-RExt 均采用了基于分块结构的预测和变换的混合编码(hybrid coding)结构。与 HEVC-RExt 不同的是,目前 AVS2 只支持 4:2:0 采样格式的帧内预测、变换、量化、反量化、反变换、熵编码、环内滤波补偿算法。采用伪 4:4:4 编码算法使 4:2:0 采样格式的编/解码器能够处理 4:4:4 采样格式的图像或视频。具体而言,如图 2 所示,对于编码单元 CU_n ,在进入 AVS2 编码器前,将 4:4:4 数据经过色度下采样转换成 4:2:0 数据,再进入编码器编码并输出图像位流,编码完成后,再把重建的 4:2:0 的数据经过色度上采样转换为 4:4:4 格式的重构图像;解码器对 4:4:4 采样格式的图像或视频位流,采用 AVS2



4:2:0 采样格式的熵解码、反量化、反变换、帧内预测、环内滤波补偿等, 经过色度上采样转换为 4:4:4 格式的重构图像。伪 4:4:4 编码算法在编码前后进行色度下采样和上采样, 在编码的整个过程都是采用 4:2:0 采样格式的预测和编码, 因此称为伪 4:4:4 编码算法。

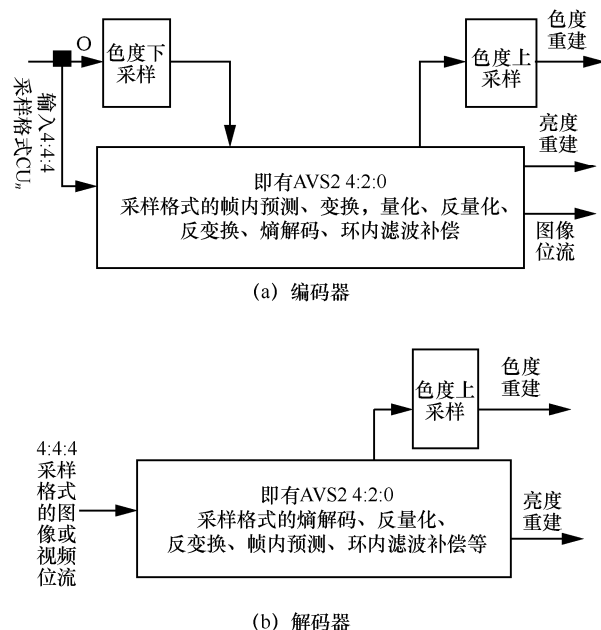
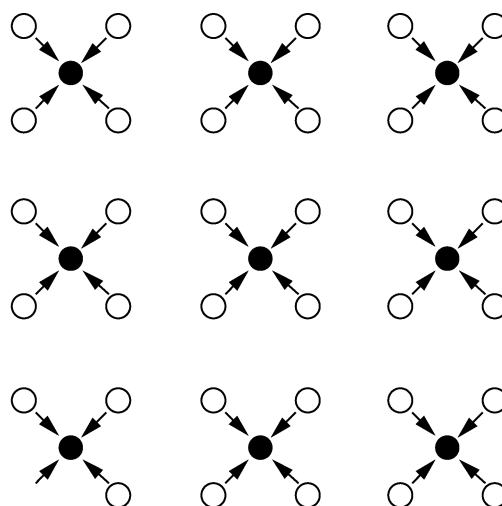


图2 基于 AVS2 的伪 4:4:4 编码算法的全色度图像编解码框架

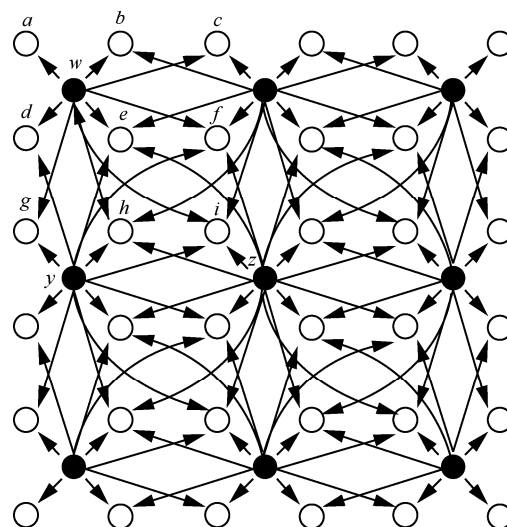
为了减少色度采样误差, 业界的一种主流做法是对于自然图像的色度分量进行线性插值。图3给出了基于线性插值上采样算法的伪 4:4:4 编码算法。

如图3所示, 白点表示 4:4:4 采样点, 黑点表示 4:2:0 采样点; 下采样时, 4:2:0 采样点由 4 个 4:4:4 采样点取平均值获得; 上采样时, 采用线性差值方案, 每个 4:4:4 采样点由 1 个或 2 个或 4 个 4:2:0 采样点的四舍五入的加权平均获得。本文的线性插值上采样算法对所有的 4:4:4 采样点主要分为四角点 (比如 a , 见式 (1))、边界点 (比如 b 、 c 、 d , 见式 (2)) 和内部点 (比如 e , 见式 (3)) 3 种类型分别计算。其他各点的计算可用式 (1)、(2)、(3) 类似的方法获得。

$$a = w \quad (1)$$



(a) 取平均值下采样算法



(b) 线性插值上采样算法

图3 基于线性插值上采样算法的伪 4:4:4 编码算法

$$b = (3w + x + 2) \gg 2, c = (w + 3x + 2) \gg 2, d = (3w + y + 2) \gg 2 \quad (2)$$

$$e = (3(3w + x) + (3y + z) + 8) \gg 4 = (9w + 3x + 3y + z + 8) \gg 4 \quad (3)$$

参考文献[11]针对目前 AVS2 不支持全色度 4:4:4 格式的特点, 设计与实现了一种融合 4:4:4 格式的像素串匹配编码算法和 4:2:0 格式的帧内、帧间预测编码算法的全色度屏幕混合内容编解码框架与算法。该算法在软件编码复杂度增加 24% 左右, 硬件实现则需要设计全新的像素串匹配编码器的高代价下, 对于屏幕图像序列类别, 有损全帧内配置 Y 分量的编码效率可以提高 56.1%, 对

于全色度屏幕混合内容的编码效率提升显著。

显然, 伪 4:4:4 编码算法和基于的线性插值方案的伪 4:4:4 编码算法没有将色度采样与编/解码作为一个整体来考虑导致编码效率低; 而全 4:4:4 编码算法和参考文献[11]中算法都需要增加较多的编码复杂度, 对现有 AVS2 文本做较大修改, 还需要在实际应用中付出完全重新设计编/解码器的代价。MCFCC 算法正是在这样的背景下提出的。

3 多色度格式级联编码算法

3.1 编码框架

图 4 给出了基于 AVS2 的多色度格式级联编码算法的全色度图像编/解码框架。多色度格式级联编码算法简称 MCFCC 算法。MCFCC 算法在不同的编码阶段采用不同的色度采样格式, 算法的主要步骤如下。

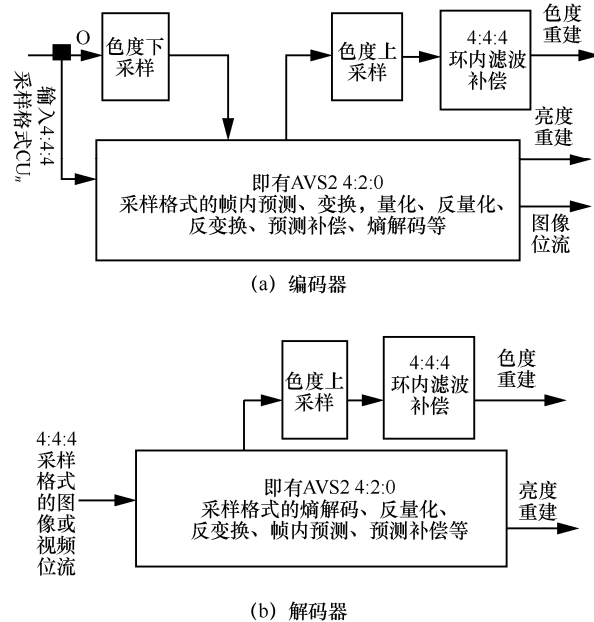


图 4 基于 AVS2 的多色度格式级联编码算法的全色度图像编解码框架

步骤 1 在进入 AVS2 编码器前, 以 CU_n 为处理单元, 将原始的 4:4:4 采样格式的色度分量值经过色度下采样, 转换成 4:2:0 的色度分量值。

步骤 2 对 4:2:0 的色度分量值进行 4:2:0 采

样格式的帧内预测、变换、量化、反量化、反变换、熵编码等得到 4:2:0 采样格式的色度预测补偿值。

步骤 3 对 4:2:0 采样格式的色度预测补偿值进行色度上采样后产生 4:4:4 采样格式的色度预测补偿值。

步骤 4 对 4:4:4 采样格式的色度预测补偿值进行 4:4:4 的色度环内滤波补偿, 产生 4:4:4 的色度重建值。

同理, 解码器也是在环内滤波补偿之前进行上采样, 再进行 4:4:4 的环内滤波补偿, 产生 4:4:4 的重建图像。

3.2 色度分量上下采样算法和带权重的 4:4:4 色度采样格式的失真计算方式

图 5 给出了 MCFCC 算法不同编码阶段采用不同的色度采样格式。可以看出, MCFCC 算法与伪 4:4:4 算法相同的地方在于编码的大部分阶段采用 4:2:0 采样格式的编码以保持伪 4:4:4 算法固有的低码率的优势, 不同的地方在于增加了上下采样模块、帧内预测阶段采用带权重的 4:4:4 色度采样格式的失真计算方式来进行率-失真最优化和对色度分量预测补偿值采用 4:4:4 的色度分量环内滤波补偿算法。

MCFCC 算法采用的色度下采样算法是 4:2:0 格式的色度分量取 4:4:4 格式中 4 个像素的色度分量的平均值, 而色度上采样算法则是重复色度分量 4 次。

图 5 中 $C_{x,y}$ 表示坐标位置为 x 和 y 的原始 4:4:4 格式色度分量值、 $DSC_{dx,dy}$ 表示坐标位置为 dx 和 dy 的 4:2:0 格式色度分量值 ($dx = x \gg 2, dy = y \gg 2$)。⌊ ⌋ 表示向下取整。下采样算法用式 (4) 表示:

$$DSC_{dx,dy} = \left\lfloor (C_{x,y} + C_{x+1,y} + C_{x,y+1} + C_{x+1,y+1} + 2) / 4 \right\rfloor \quad (4)$$

同理, $ComC_{x,y}$ 表示坐标位置为 x 和 y 的 4:4:4 格式色度分量预测补偿值, $ComDSC_{dx,dy}$ 表示坐标位置为 dx 和 dy 的 4:2:0 格式色度分量预测补偿值。色度分量预测补偿值上采样算法用

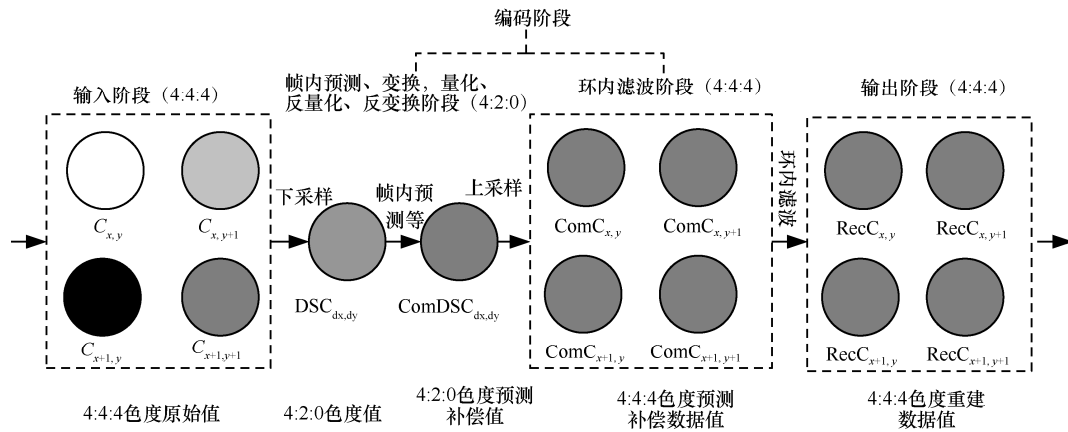


图5 MCFFC 算法不同编码阶段的不同色度采样格式

式 (5) 表示:

$$\begin{aligned} \text{ComC}_{x,y} &= \text{ComC}_{x+1,y} = \text{ComC}_{x,y+1} = \\ \text{ComC}_{x+1,y+1} &= \text{ComDSC}_{dx,dy} \end{aligned} \quad (5)$$

AVS2 中采用 RDO 模式选择机制自适应选择最佳编码模式。为了进一步减少色度采样误差对模式选择的影响, 采用带权重的 4:4:4 色度采样格式的失真 (Distortion) 计算方式, 用式 (6) 表示:

$$\begin{aligned} \text{Distortion} &= \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^h (L_{x,y} - \text{Com}L_{x,y})^2 + \\ \lambda \times \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^h (C_{x,y} - \text{Com}C_{x,y})^2 \end{aligned} \quad (6)$$

对于大小为 $w \cdot h$ (w 为宽度, h 为高度) 的 4:4:4 采样格式的 CU, 失真之和由亮度分量的失真之和和色度分量的失真之和组成。原始的 $w \cdot h$ 个亮度分量 $L_{x,y}$ ($1 \leq x \leq w, 1 \leq y \leq h$) 与预测补偿后的 $w \cdot h$ 个亮度分量 $\text{Com}L_{x,y}$ 的差的平方和为亮度分量的失真之和; 原始的 $w \cdot h$ 个色度分量值 (包括 UV 分量) $C_{x,y}$ 与预测补偿后上采样为 4:4:4 采样格式的 $w \cdot h$ 个色度分量 $\text{Com}C_{x,y}$ 的差的平方和为色度分量的失真之和。总的失真采用带权重的 4:4:4 色度采样格式的失真计算方式, 通过权重因子适当降低色度分量的编码和下采样失真的权重。本文色度分量的失真之和的权重因子 λ 为 0.5。

3.3 色度分量 4:4:4 采样格式的环内滤波补偿

AVS2 的环内滤波补偿包括去块效应滤波

(deblock filter, DF)、样本自适应偏移补偿 (sample adaptive offset, SAO) 和自适应环路滤波 (adaptive loop filter, ALF) 3 个步骤^[1-3]。表 1 给出了 4:4:4 采样格式的环内滤波补偿与 AVS2 中 4:2:0 采样格式的环内滤波补偿的主要区别。可以看出, 本文实现的 4:4:4 采样格式的环内滤波补偿主要涉及两方面的修改:

- 涉及色度像素块宽度和高度的地方, 均在原来的基础上扩大一倍;
- 对涉及色度像素块的在图像中的位置的变量进行相应的位置修改。

具体而言, 对于 DF 算法, 色度块数目增加到原来的 4 倍, 色度块用到的像素数目也增加到原来的 4 倍; 对于 SAO 算法, 色度 SAO 单元大小从 32×32 扩展到 64×64 ; 同样, 色度 ALF 单元大小也从 32×32 扩展到 64×64 。

因 DF、SAO、ALF 的逐点 (像素) 操作都与色度块大小本身和色度块数目无关, 为了与 AVS2 的基准档次标准文本等同, 本文实现的 4:4:4 采样格式的环内滤波补偿对于语法元素和熵编/解码过程不做任何修改, 因此是完全等同 AVS2 标准中 4:2:0 的环内滤波补偿算法。

4 实验结果与分析

4.1 测试序列、编码配置和性能评价指标

本文的测试数据采用 AVS 技术提案^[19]使用的

表 1 4:4:4 采样格式的环内滤波补偿与 4:2:0 采样格式的环内滤波补偿的主要区别

算法	参数	4:2:0 采样格式	4:4:4 采样格式
环内滤波补偿	DF	色度 DF 块数目 (以 8×8 为单位)	(图像高度/8) × (图像宽度/8) /4
	SAO	色度 SAO 单元大小	32×32
	ALF	色度 ALF 单元大小	32×32
			64×64

12 幅不同互联网应用场景的原始 RGB 格式的数码相机拍摄的自然图像,转换为 8 bit YUV 单帧序列^[19]。12 幅图像的缩略图(灰度图)如图 6 所示。

为了便于说明本文算法的特性,将本文提出的算法及其比较的基准分为以下 5 种算法:

- 基于 HEVC-RExt 的全 4:4:4 编码算法,简称全 4:4:4,采用 HM16.6 的参考软件^[20];
- 基于 AVS2 RD17.0 的伪 4:4:4 编码算法^[11],简称伪 4:4:4,上下采样算法同 MCFCC 算法;
- 基于 AVS2 RD17.0 的线性插值伪 4:4:4 编码算法,简称伪 LI4:4:4,上下采样算法采

用图 3 中的方案;

- 基于 AVS2 RD17.0 的多色度格式级联编码算法^[19],简称 MCFCC 算法;
- 参考文献[11]提出的基于 AVS2 的串匹配算法,简称 AVS2SM 算法。

表 2 给出了编码参数配置。所有算法均采用有损编码模式,分别采用 HEVC-RExt 通用测试条件的标准配置^[21]和 AVS2 通用测试条件的标准配置^[22]。其中,有损编码模式分为两组 QP,分别是传统 QP 组(记为 QP 组 1): HEVC-RExt 为{ 22, 27, 32, 37 }, AVS2 为{ 25, 32, 38, 45 };超

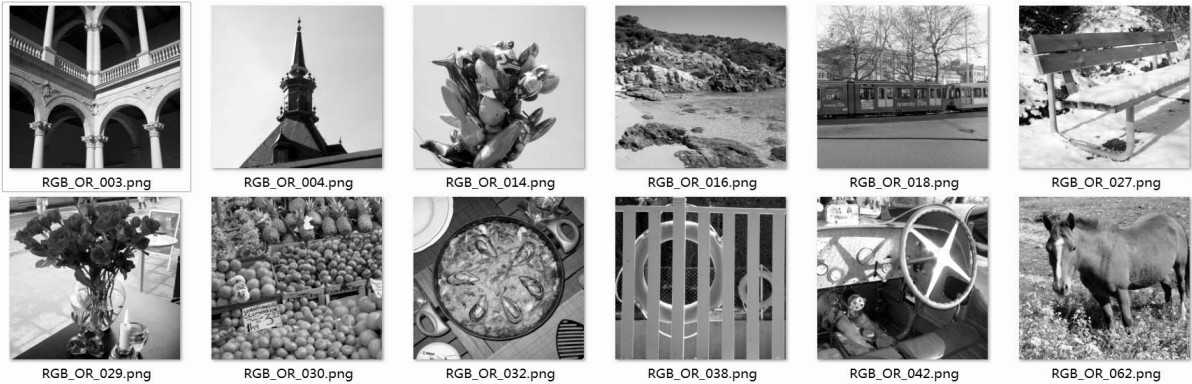


图 6 典型自然图像序列

表 2 编码配置参数

算法类别	参数名称	值
全 4:4:4、伪 4:4:4、伪 LI4:4:4、MCFCC 算法、AVS2SM 算法	编码配置	全帧内 (all intra, AI) 编码
	编码类型	有损编码
	超高质量 QP 组	2, 7, 12, 17
全 4:4:4 算法	传统 QP 组	22, 27, 32, 37
	其余编码参数配置同 HEVC-RExt 通用测试条件的标准配置 ^[21]	
	超高质量 QP 组	0, 5, 12, 18
	传统 QP 组	25, 32, 38, 45
伪 4:4:4、伪 LI4:4:4、MCFCC 算法、AVS2SM 算法	其余编码参数配置同 AVS2 通用测试条件的标准配置 ^[22]	



高质量 QP 组 (记为 QP 组 2): HEVC-RExt 为 { 2, 7, 12, 17 }, AVS2 为 { 0, 5, 12, 18 }。使用 all intra (AI, 即全部图像都是 I 图像) 编码图像类型的配置。实验环境配置为 Intel Core CPU i7-2600K @3.40GHz (4 处理器)、24 GB 内存、硬盘为 1.4 TB 的 Win7 x64 位操作系统的服务器。

性能评价主要包括算法编码效率和算法复杂度两方面。采用 BD-rate^[23] (HEVC 标准中根据两种算法 4 个 QP 的比特率 (bit-rate, 单位为 kbit/s) 与峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 数据形成的率失真 (rate distortion, RD) 曲线, 计算两种算法在相同 PSNR 下比特率的变化情况, 最后取平均值得到两种算法编码效率的比较结果) 比较两种算法有损编码模式编码效率的优劣。BD-rate 为负值表示相同 PSNR 下比特率降低, 编码效率提高。由于伪 4:4:4、伪 LI4:4:4 编码算法、MCFCC 算法和 AVS2SM 算法中引入了 YUV4:4:4 与 YUV4:2:0 之间的色度下采样和色度上采样, 采用基于 CPSNR——一种综合 3 个分量的 PSNR 的综合 BD-rate 来衡量^[24], 该衡量方法已经被 AVS2 标准采纳。CPSNR 为

负值, 表示综合编码效率提高。由于一帧图像解码时间太短, 算法复杂度的比较主要用国际标准制定工作中通用的编码运行时间的比值来衡量。

4.2 实验结果与结论分析

表 3 给出了 QP 组 1 情况下全 4:4:4 相对 MCFCC、伪 4:4:4 相对 MCFCC、伪 LI4:4:4 相对 MCFCC 3 组编码效率的比较结果。编码效率比较中, 每行数据表示一个序列, 分别给出了 AI 配置下 Y、U、V 分量的 BD-rate 和基于 CPSNR 的 3 个分量 (标记为 YUV) 的综合 BD-rate。最后一行给出了所有数据的平均编码效率。

表 4 给出了 QP 组 2 情况下基于 AVS2 的伪 4:4:4 相对 MCFCC、伪 LI4:4:4 相对 MCFCC 编码效率比较结果。

表 5 给出了 QP 组 1 和 QP 组 2 情况下, 基于 AVS2 的伪 LI4:4:4 相对伪 4:4:4、MCFCC 相对伪 4:4:4、AVS2SM 相对伪 4:4:4 算法性能比较。其中, EncTime 表示编码运行时间。

图 7 给出了 12 个序列 MCFCC 算法和全 4:4:4 算法在不同 QP 情况下获得的平均 Y-PSNR 和 U-PSNR 之差、Y-PSNR 和 V-PSNR 之差的曲线。

表 3 MCFCC 相对全 4:4:4、MCFCC 相对伪 4:4:4、MCFCC 相对伪 LI4:4:4 编码效率比较 (QP 组 1)

数据名称	MCFCC 相对全 4:4:4				MCFCC 相对伪 4:4:4				MCFCC 相对伪 LI4:4:4			
	BD-rate				BD-rate				BD-rate			
	Y	U	V	YUV	Y	U	V	YUV	Y	U	V	YUV
RGB_OR_003	-4.4%	64.4%	82.5%	-0.9%	1.0%	-12.6%	-13.8%	0.1%	1.0%	-11.4%	-13.0%	0.2%
RGB_OR_004	-8.8%	116.4%	86.8%	-0.4%	3.0%	-17.6%	-17.6%	0.1%	3.0%	-13.4%	-13.3%	0.8%
RGB_OR_014	-11.0%	76.8%	83.8%	-1.0%	2.9%	-28.8%	-25.8%	-4.2%	2.9%	-15.5%	-13.8%	-0.8%
RGB_OR_016	-6.4%	75.7%	65.5%	-3.6%	0.9%	-15.7%	-14.0%	0.0%	0.9%	-11.9%	-11.7%	0.2%
RGB_OR_018	-6.8%	82.1%	79.8%	-2.1%	1.0%	-18.7%	-30.9%	-1.5%	1.0%	-12.4%	-17.1%	-0.4%
RGB_OR_027	-5.1%	73.6%	70.2%	-1.6%	1.2%	-14.4%	-14.6%	0.1%	1.2%	-12.0%	-12.9%	0.2%
RGB_OR_029	-8.6%	79.8%	75.8%	-0.6%	2.4%	-20.5%	-33.8%	-3.8%	2.4%	-12.6%	-17.4%	-0.8%
RGB_OR_030	-13.7%	76.7%	82.5%	-3.3%	2.7%	-26.6%	-24.5%	-4.1%	2.7%	-13.8%	-13.0%	-0.8%
RGB_OR_032	-14.7%	93.2%	102.4%	-5.4%	2.4%	-23.9%	-23.8%	-2.3%	2.4%	-13.6%	-13.4%	-0.2%
RGB_OR_038	-12.9%	67.1%	79.1%	-3.0%	3.8%	-19.0%	-31.0%	-3.6%	3.8%	-11.4%	-14.2%	0.1%
RGB_OR_042	-10.3%	78.1%	71.6%	-2.7%	2.9%	-27.9%	-23.8%	-2.4%	2.9%	-14.7%	-14.7%	0.0%
RGB_OR_062	-14.3%	108.7%	83.3%	-4.7%	1.3%	-18.0%	-11.9%	-1.4%	1.3%	-11.5%	-8.3%	-0.5%
平均编码效率	-9.8%	82.7%	80.3%	-2.4%	2.1%	-20.3%	-22.1%	-1.9%	2.1%	-12.9%	-13.6%	-0.2%

表4 基于 AVS2 的 MCFCC 相对伪 4:4:4、MCFCC 相对伪 LI4:4:4 编码效率比较 (QP 组 2)

数据名称	MCFCC 与伪 4:4:4				MCFCC 与伪 LI4:4:4			
	BD-rate				BD-rate			
	Y	U	V	YUV	Y	U	V	YUV
RGB_OR_003	1.1%	-31.8%	-36.8%	-7.0%	1.1%	-19.5%	-27.5%	-4.5%
RGB_OR_004	1.2%	-62.4%	-48.4%	-8.5%	1.2%	-47.6%	-32.3%	-5.1%
RGB_OR_014	1.3%	-100%	-100%	-50.3%	1.3%	-100%	-100%	-25.9%
RGB_OR_016	0.8%	-39.7%	-27.5%	-10.0%	0.8%	-19.3%	-16.5%	-5.1%
RGB_OR_018	0.8%	-100%	-100%	-26.7%	0.8%	-42.5%	-100%	-15.1%
RGB_OR_027	0.8%	-41.4%	-41.0%	-8.8%	0.8%	-24.1%	-27.4%	-5.0%
RGB_OR_029	1.2%	-100%	-100%	-37.6%	1.2%	-51.5%	-100%	-16.4%
RGB_OR_030	1.1%	-100%	-100%	-39.4%	1.1%	-100%	-52.1%	-17.9%
RGB_OR_032	1.1%	-100%	-100%	-29.6%	1.1%	-50.7%	-43.6%	-14.7%
RGB_OR_038	1.3%	-100%	-100%	-32.4%	1.3%	-51.0%	-77.3%	-12.8%
RGB_OR_042	1.4%	-100%	-63.5%	-30.0%	1.4%	-50.8%	-29.6%	-11.8%
RGB_OR_062	0.8%	-100%	-45.4%	-25.2%	0.8%	-100%	-25.5%	-17.0%
平均编码效率	1.1%	-81.3%	-71.9%	-25.5%	1.1%	-54.8%	-52.7%	-12.6%

表5 伪 LI4:4:4 相对伪 4:4:4、MCFCC 相对伪 4:4:4、AVS2SM 相对伪 4:4:4 算法性能比较

	QP 组 2					QP 组 1				
	BD-rate				EncTime	BD-rate				EncTime
	Y	U	V	YUV		Y	U	V	YUV	
伪 LI4:4:4 相对伪 4:4:4	0.0%	-48.3%	-49.0%	-16.6%	99.8%	0.0%	-8.7%	-10.1%	-1.8%	99.9%
MCFCC 相对伪 4:4:4	1.1%	-74.0%	-65.6%	-25.5%	103.2%	2.1%	-20.4%	-22.2%	-1.9%	102.2%
AVS2SM 相对伪 4:4:4	16.3%	-89.2%	-96.1%	-35.0%	131.4%	-0.2%	-32.4%	-34.5%	-6.2%	117.2%

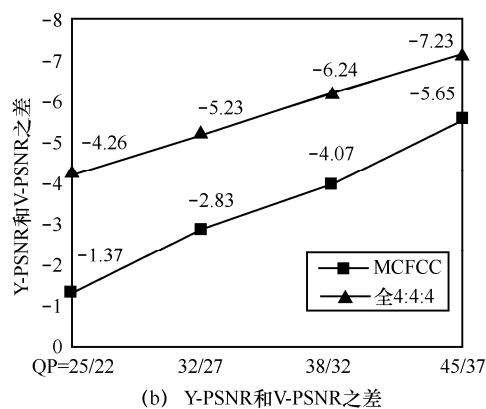
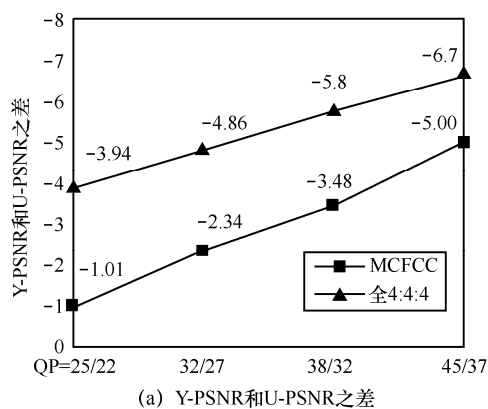


图7 MCFCC 算法和全 4:4:4 算法 Y-PSNR 和 U-PSNR、V-PSNR 之差比较 (QP 组 1)

从以上实验结果可以得出以下结论。

从表 3 中可知,对于传统 QP 组, MCFCC 算法与全 4:4:4 编码算法相比,每个序列的 Y 分量的编码效率都有不小提升, U、V 分量的编码效率降低,但综合编码效率有提升。例如, RGB_OR_032 序列的综合 BD-rate 为-5.41%,所有序列的平均综合 BD-rate 平均值为-2.43%。因

此, MCFCC 算法比全 4:4:4 编码算法取得的综合编码效率更高。MCFCC 算法与伪 4:4:4 编码算法相比,平均综合编码效率提升 1.9%。MCFCC 算法与伪 LI4:4:4 编码算法的编码效率相当,平均综合编码效率提升 0.2%。

从表 4 中可知,对于超高质量 QP 组, MCFCC 算法与伪 4:4:4 编码算法相比,12 个序列取得的



综合编码效率大幅提升,平均综合 BD-rate 平均值为-25.5%。MCFCC 算法与伪 LI4:4:4 编码算法相比,12 个序列取得平均综合 BD-rate 平均值为-12.6%。

从表 5 中可知,MCFCC 算法、伪 LI4:4:4、AVS2SM 算法与伪 4:4:4 算法相比的情况来看,MCFCC 算法具有兼顾低编码复杂度和较高编码效率的优势。MCFCC 算法与伪 4:4:4 算法相比,在 QP 组 1 和 QP 组 2 的情况下,编码时间仅仅增加了 3.2%和 2.2%的前提下,综合编码效率提升了 25.5%和 1.9%。MCFCC 算法与伪 LI4:4:4 算法相比,编码时间仅仅增加 3%左右的前提下,QP 组 1 情况下编码效率提升显著。AVS2SM 算法与 MCFCC 算法相比,综合编码效率虽分别提升约 10%和 4%,但是软件编码复杂度增加约 28%和 15%,且具有硬件实现需要设计全新的像素串匹配编码器的劣势。

从图 7 中可知,对于传统 QP 组,全 4:4:4 算法在不同 QP 情况下获得的平均 Y-PSNR 和 U-PSNR 之差、Y-PSNR 和 V-PSNR 之差比 MCFCC 算法要大一些。在自然图像和视频,人眼对亮度的差别很敏感,而对色度的差别的敏感度较低。在传统 QP 组情况下,全 4:4:4 色度的 PSNR 没有必要太高,MCFCC 算法 Y 的平均 BD-rate 比全 4:4:4 方法更是大幅降低了 9.8%。

5 结束语

本文在 AVS2 标准框架中,将色度下采样和上采样与编解码作为一个整体来考虑,提出了一种多色度格式级联编码的全色度图像编码算法。首先给出了多色度格式级联编码算法编解码框架,然后介绍多色度格式级联编码算法中的下采样和上采样算法、带权重的 4:4:4 色度采样格式的失真计算方式和 4:4:4 采样格式的环内滤波补偿算法等关键算法。实验结果表明,MCFCC 算法具有低编码复杂度、较高编码效率和编解码器部分

完全等同 AVS2 标准基准档次文本的优势,是基于 AVS2 标准的全色度自然图像编码算法的一个更好的选择。下一步的主要工作是探索更高编码效率的 4:4:4 采样格式的屏幕内容编码和互联网图像视频编码算法。

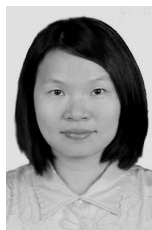
参考文献:

- [1] GAO W, MA S. Advanced video coding systems[M]. Berlin: Springer Publishing Company, Incorporated, 2015.
- [2] WANG S, LUO F, MA S. Overview of the second generation AVS video coding standard (AVS2)[J]. ZTE Communications, 2016, 14(1): 3-11.
- [3] 马思伟, 罗法蕾, 黄铁军. AVS2 视频编码标准技术特色及应用[J]. 电信科学, 2017, 33(8): 3-15.
MA S W, LUO F L, HUANG T J. Kernel technologies and applications of AVS2 video coding standard[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(8): 3-15.
- [4] AVS. 下一代 AVS 视频编码标准的算法需求 V9.0: N2401[S]. 2017.
AVS. The technical requirements V9.0 for the next generation of AVS video coding standards: N2401[S]. 2017.
- [5] WANG S, LIN T. Compound image compression based on unified LZ and hybrid coding[J]. IET Image Processing, 2013, 7(5): 484-499.
- [6] LIN T, ZHANG P, WANG S, et al. Mixed chroma sampling-rate high efficiency video coding for full-chroma screen content[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2013, 23(1): 173-185.
- [7] WANG S, LIN T. United coding method for compound image compression[J]. Multimedia Tools & Applications, 2014, 71(3): 1263-1282.
- [8] ZHAO L, LIN T, ZHOU K, et al. Pseudo 2D string matching technique for high efficiency screen content coding[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2016, 18(3): 339-350.
- [9] ZHOU K, ZHAO L, LIN T. A hardware decoder architecture for general string matching technique[J]. IEEE Journal on Emerging & Selected Topics in Circuits & Systems, 2016, PP(99): 1-13.
- [10] 赵利平, 林涛, 周开伦. 屏幕图像压缩中串复制位移参数的高效编码算法[J]. 计算机学报, 2017, 40(5): 1218-1228.
ZHAO L P, LIN T, ZHOU K L. An efficient ISC offset parameter coding algorithm in screen content coding[J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(5): 1218-1228.
- [11] 赵利平, 周开伦, 郭靖, 等. 融合像素串匹配的 AVS2 全色度屏幕与混合内容视频编码算法[J]. 计算机学报, 2017, 40(23): 1-15.
ZHAO L, ZHOU K, GUO J, et al. Pixel string matching for full-chroma screen and mixed content coding in AVS2[J]. Jour-

- nal of Computers, 2017, 40(23): 1-15.
- [12] ZHAO L, ZHOU K, GUO J, et al. A universal string matching approach to screen content coding[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2018.
- [13] 林涛, 蔡文婷, 陈先义, 等. 一种高性能低复杂度的基于串匹配的屏幕图像无损压缩算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(2): 351-359.
- LIN T, CAI W T, CHEN X Y, et al. Lossless compression algorithm based on string matching with high performance and low complexity for screen content coding[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(2): 351-359.
- [14] ZHOU K, ZHAO L, LIN T. A flexible and uniform string matching technique for general screen content coding[J]. Multimedia Tools & Applications, 2018(4): 1-25.
- [15] PENG W H, WALLS F G, COHEN R A, et al. Overview of screen content video coding: technologies, standards, and beyond[J]. IEEE Journal on Emerging & Selected Topics in Circuits & Systems, 2016, 6(4): 393-408.
- [16] 周建同, 杨海涛, 刘东, 等. 视频编码的技术基础及发展方向[J]. 电信科学, 2017, 33(8): 16-25.
- ZHOU J T, YANG H T, LIU D, et al. Trends and technologies of video coding[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(8): 16-25.
- [17] 郭劭, 聂秀英, 黄更生. 视频编码新技术和新方向[J]. 电信科学, 2017, 33(8): 26-34.
- GUO M, NIE X Y, HUANG G S. Recent development and prospective of video coding[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(8): 26-34.
- [18] ITU-T/ISO/IEC JCT-VC. Edition 2 draft text of high efficiency video coding (HEVC, including format range RExt, scalability (SHVC), and multi-view (MV-HEVC) extensions: JCTVC-R1013[S]. 2014.
- [19] AVS. AVS2-P2 框架下对 YUV4:4:4 和 YUV422 (CEExt) 图像的编码: M4221[S]. 2017.
- AVS. YUV4: 4: 4 and YUV422 (CEExt) image coding in AVS2-P2 framework: M4221[S]. 2017.
- [20] SULLIVAN G J, OHM J, HAN W J, et al. Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2013, 22(12): 1649-1668.

- [21] ITU-T/ISO/IEC JCT-VC. Common test conditions: Z1100[S]. 2017.
- [22] AVS. AVS2-P2 通用测试条: N2420[S]. 2017.
- AVS. Common test condition for AVS2-P2: N2420[S]. 2017.
- [23] ITU. Improvements of the BD-PSNR model: VCEG-A111[S]. 2008.
- [24] AVS. 一种计算综合 PSNR 的方法: M3830[S]. 2016.
- AVS. A method for calculating PSNR: M3830[S]. 2016.

[作者简介]



赵利平 (1984-), 女, 博士, 绍兴文理学院计算机科学与工程系讲师, 主要研究方向为高效视频编码、屏幕图像编码。



林涛 (1958-), 男, 博士, 同济大学超大规模集成电路研究所所长江学者特聘教授, 主要研究方向为高效视频编码、屏幕图像编码、多媒体芯片设计等。



周开伦 (1977-), 男, 博士, 同济大学超大规模集成电路研究所讲师, 主要研究方向为视频编码、超大规模集成电路架构、设计与验证。

胡珂立 (1989-), 男, 博士, 绍兴文理学院计算机科学与工程系讲师, 主要研究方向为图像处理、目标跟踪。

林春梅 (1961-), 女, 博士, 绍兴文理学院计算机科学与工程系副教授, 主要研究方向为机器学习。