©2023 IEEE。允许将此材料用于个人用途，对于任何其他用途，无论是在当前还是未来的媒体中，包括为广告或促销目的重印/再版此材料、创作新的合集、转售或重新分发至服务器或列表，或在其他作品中重复使用本作品中任何受版权保护的部分，均必须获得 IEEE 的许可。https://doi.org/10.1109/ICASSP48485.2024. 10447125

改进的屏幕 采用软上下文形成的 VVC 屏幕内容编码

Hannah Och⋆ *Shabhrish Reddy Uddehal*†⋆ *Tilo Strutz*† *Andr´e Kaup* ⋆

⋆埃尔朗根-纽伦堡弗里德里希-亚历山大大学多媒体通信与信号处理¨（FAU），德国埃尔朗根

†科堡应用科学与艺术大学电气工程与计算机科学系，德国科堡

arXiv:2305.05440v3 [eess.IV] 7 Oct 2024

摘要

屏幕内容图像通常由自然图像部分和合成图像部分混合构成。合成区域通常由颜色均匀的区域以及重复的颜色和模式组成。在 VVC 标准中，这些特性通过帧内块复制和调色板模式加以利用。本文表明，在这类区域中，逐像素无损编码的性能可以优于有损 VVC 编码。我们提出了一种改进的 VVC 屏幕内容图像编码方法，该方法采用软上下文形成原理。首先，使用基于学习的方法，根据四种块特征按块方式将图像分为两个层。合成图像部分采用软上下文形成进行无损编码，其余部分则使用 VVC 编码。我们改进了现有的软上下文形成编码器，将从解码后的 VVC 层获取的信息纳入其中，以提升编码效率。与 VVC 相比，该方法在所评估的数据集上实现了 4.98% 的 Bjøntegaard-Delta码率增益。

索引词— 图像压缩、屏幕内容、VVC、分割、软上下文形成

1. 引言

随着在线视频会议、电子学习和桌面共享等应用的日益普及，高效压缩屏幕内容图像（SCIs）变得愈发重要。SCIs通常由合成部分（例如文本、按钮或计算机图形）以及自然图像部分（例如摄像机拍摄的场景或逼真的计算机动画）组成。合成图像部分的特性与自然图像场景不同。它们通常包含大面积的均匀着色区域、强烈对比、精细结构、较少的独特颜色、重复模式，并且通常不存在噪声。由于图像统计特性的这些差异，压缩SCIs极具挑战性。单一的压缩技术通常无法同时有效压缩这两类内容。因此，先进的视频编码标准，如高效视频编码（HEVC）[1, 2] 及其后继标准通用视频编码（VVC）[3, 4]，引入了多种编码工具，以辅助合成区域的压缩。其中最主要的工具是调色板模式 [5], 和帧内块复制（IBC）[6, 7], ：前者利用屏幕内容中有限的颜色数量，后者则利用相似的重复图像块。

进一步而言，许多压缩方法都基于将图像分割成不同区域，并根据内容类型对这些区域采用完全不同的编码方法。在 ITU-T 混合光栅内容（MRC）标准中 [8]，复合图像被分离为具有不同图像特征的组件，即前景、背景和掩码平面。这些层中的每一层都使用不同的压缩算法进行压缩 [9]。文献 [10] 描述了一种混合压缩方法，其中合成区域使用游程编码进行编码，而自然区域则通过 JPEG 编码。联合编码方法 [11] 是一种按块处理的混合有损与无损编解码器：首先，为每个块从一系列可用编解码器中选择一种最优的无损编码器；随后，根据率失真优化准则，该编码器可能被有损编码方法所替代。文献 [12] 提出了一种面向文本语义的屏幕内容图像编码方法，其中屏幕内容图像被分离为文本信息和背景。背景使用 HEVC 编码，而文本信息则与图像分开编码，并在解码器中根据大小、字体、颜色和位置信息进行恢复。针对屏幕内容图像的无损编码，文献 [13], 提出了一种基于块的分割方法，将图像分割为自然块和合成块，以便分别学习它们的统计特性。

对于合成内容，基于上下文的算术编码器已被证明效果显著。其中一种方法是软上下文形成（SCF）编码器 [14], , 对于颜色较少且包含许多重复图像结构的合成图像，它在无损情况下优于 VVC 和 HEVC；在某些情况下，它甚至超越了有损 VVC 压缩，正如我们将在第 3 节中看到的那样。因此，我们提出通过首先将图像分割为两层来增强 VVC。一层包含采用 SCF 进行无损编码的合成内容，其余图像则采用 VVC 编码。本文表明，通过使用一种简单的、基于学习的逐编码树单元分类方法，与原始 VVC 相比，我们能够为屏幕内容图像（SCIs）实现 BD-rate 增益。本文的组织结构如下：首先，简要回顾 SCF 编码器的关键组成部分；其次，详细介绍所提出的方法；最后，使用多个屏幕内容数据集评估结果，并将其与 VTM 17.2 进行比较。

2. 软上下文形成编码器综述

SCF编码器 [14, 15] 是一种专为屏幕内容图像开发的逐像素无损熵编码器。其主要处理阶段如图1所示。图像按照光栅扫描顺序进行处理。在SCF编码器的阶段1中，针对每个像素，根据已编码的像素估计当前RGB值的概率分布。因此，如图2所示，模式$P = \{A, B, C, D, E, F\}$ 中的相邻像素被用作上下文。在编码过程中，每个上下文对应的像素 X 颜色都会保存在一个直方图中。对于当前像素 X，将相似模式的颜色直方图进行合并，并用于生成概率分布，随后利用算术编码器对RGB颜色值进行编码。给定 n（$c|P$）作为计数.....

本研究由德国研究联合会（DFG，德国研究基金会）资助，项目编号为438221930。

©2023 IEEE。允许将本材料用于个人用途。对于任何其他用途，包括在任何当前或未来媒体中重印/再版本材料以用于广告或宣传目的、创作新的合集作品、转售或重新分发至服务器或列表，或在其他作品中重复使用本作品的任何受版权保护部分，均须事先获得 IEEE 的许可。https://doi.org/10.1109/ICASSP48485.2024. 10447125

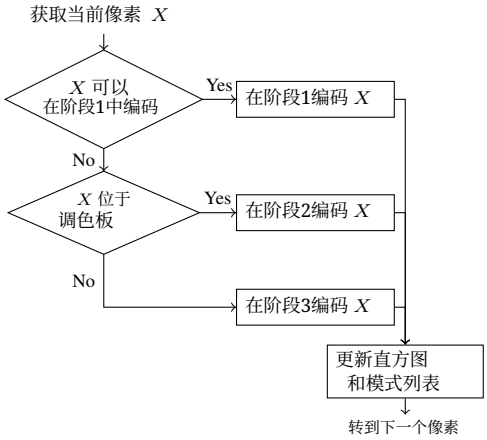


图1：SCF方法的框图，包含三个阶段。

在 c 的 P相似模式的组合直方图中，以及 N_P直方图中的计数总数，给定模式 P时颜色c 的概率估计为

$$p(c|P) \approx \frac{n(c|P)}{N_P}. \tag{1}$$

如果当前像素的颜色属于组合直方图，则会使用算术编码器对该像素值进行编码，其所需的比特数大致等于编码整个 RGB 颜色的自信息量

$$I(c|P) = -\log_2 p(c|P) \text{ [bit]} \tag{2}$$

。然而，如果当前模式 P对应的生成直方图尚未包含颜色 c，例如颜色首次与模式 P组合出现时，就会发送一个转义符号，并启动 SCF编码器的第二阶段。在阶段2中，根据全局调色板生成概率分布。每编码一个阶段2或阶段3中的像素后，都会更新调色板；调色板包含所有已出现过的颜色及其出现次数，但不包括阶段1编码的像素。如果某种颜色此前从未出现过，则通过转义符号指示，并在阶段3中使用残差编码对该颜色进行编码：使用增强型中值自适应预测器（cMAP） [15], 按通道预测像素颜色后，根据先前编码的预测误差直方图，对每个通道的预测误差进行算术编码。

3. 所提出的方法

受 SCF 编码器在无损情况下对某些类型图像相比 VVC 有较高增益的启发，我们研究了 SCF 相对于有损 VVC 编码的编码性能。我们比较了对小图像区域使用 SCF，以及使用具有不同量化参数（量化参数）的 VVC 时所需的比特率。为此，我们从自有资源中的 236 幅屏幕内容图像中选取了 8602 个大小为 128×128 的块。每个块均使用 SCF 和

QP 为 22、27、32 和 37 时使用 VVC 参考编解码器 VTM 17.2。对于 RGB 数据和相机拍摄内容，按照 [16] 采用 VTM 全帧内配置，即在 RGB 4:4:4 设置下启用所有屏幕内容专用编码工具，例如调色板模式、帧内块复制、变换跳过残差编码 [17] 或基于块的差分脉冲编码调制 [18], 。即使

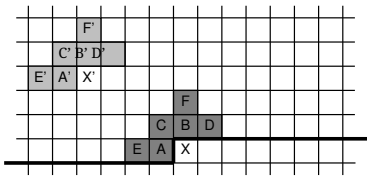


图 2：上下文模式：如果模板 $\{A, B, \ldots, F\}$中的值与 $\{A', B', \ldots, F'\}$相似，那么位置 X处的当前值很可能与 X'处的值相似。

在 VVC 中启用了这些编码工具，与 QP 为 22、27、32 和 37 的有损 VTM 相比，SCF编码器对 49.5%、43.7%、38.9% 和 34.1% 的块实现了更好的无损压缩。这意味着，对于 QP 22，使用 SCF 编码时，近一半的块所需比特率更低。即使 QP 为 37，仍有超过三分之一的块可从无损 SCF 编码中受益，在降低比特率的同时不引入失真。下文将介绍如何利用这一信息：先将合成图像分割为两层，再分别使用 VVC 和 SCF 对这些层进行编码。

3.1. 按块分割

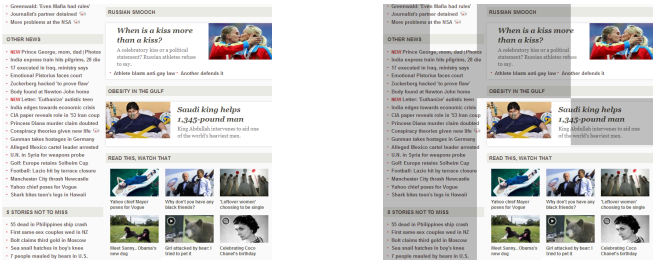
所提出的方法的第一步是将图像分割为两层。SCF 层包含合成图像区域，并使用 SCF 进行编码；VVC 层则包含其余图像部分，并使用 VVC 进行压缩。需要注意的是，分割的目标并非将图像完美地分割为自然图像部分和合成图像部分。

由于 SCF 编码器是无损的，在图像的某些部分使用它通常可以降低图像失真。因此，为了简化分割，我们可以着重于率优化，从而直接改善率失真。要实现有效的分割，必须考虑多个因素：首先，分割掩码应易于传输，且不会带来过大的开销。其次，分割不应显著影响 VVC 的编码性能。这两点促使我们决定按块进行分割，使用与 VVC 中编码树单元大小相同的块；在本例中为 128×128，这样每个编码树单元只需 1 位即可轻松传输。最后还需考虑的是，合成性并不能直接转化为良好的 SCF 编码性能。例如，恒定的垂直和水平颜色渐变可以通过合成生成，但很难使用 SCF 编码器压缩，因为它几乎没有重复图案，而且颜色种类繁多。因此，必须采用专门针对 SCF 的分类方法，而不是简单地使用现有的自然/合成图像分割方法。

使用 SCF编码器时，若不实际对块进行编码，就很难估算编码树单元所需的比特率；而使用 VVC 编码器进行估算的计算成本又很高。因此，我们提出了一种分割算法，用于估算使用 SCF编码器编码一个编码树单元所需的比特率是否低于使用 VVC 编码所需的比特率。为此，我们基于四个特征训练了一个 k 近邻分类器，用于判定编码树单元是否满足条件 $r_{\text{SCF}} < r_{\text{VVC},\,i}$其中 r_{SCF}为 SCF 比特率，$r_{\text{VVC},\,i}$其中 $i \in \{22, 27, 32, 37\}$为单个编码树单元依赖于量化参数的 VVC 比特率。根据分类结果，相应地将编码树单元分配到 SCF 或 VVC 层。

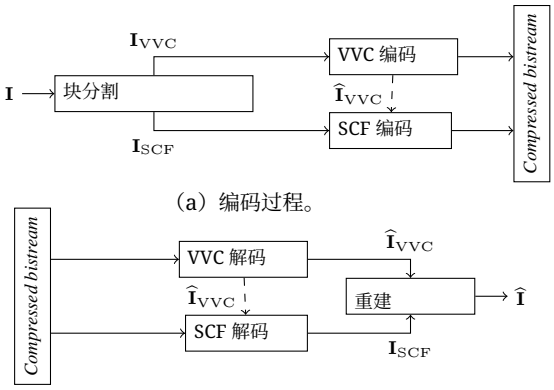
对于 SCF 编码器，影响其编码性能的主要特征包括颜色数量、唯一模式的数量、颜色熵，以及给定上下文时像素颜色的熵。因此，这四项特征被用作分类器的预测变量。在这种情况下，统计的模式经过简化，仅包含直接邻居和当前像素： $P'_X = \{A, B, X\}$。

©2023 IEEE。允许个人使用本材料。对于任何其他用途，包括在任何当前或未来媒体中重印/再版本材料以用于广告或促销目的、创作新的汇编作品、转售或重新分发到服务器或列表，或在其他作品中重复使用本作品中任何受版权保护的组成部分，均须事先获得 IEEE 的许可。https://doi.org/10.1109/ICASSP48485.2024. 10447125



(a) 原始图像。 (b) 分割图像。

图 3：图像按块分割成不同的层，分别由 VVC 和 SCF 编码器编码，量化参数为 22。灰显区域表示将在 SCF 层中编码的像素。



(a) 编码过程。

(b) 解码过程。

图 4：所提出的方法的编码和解码过程框图。

颜色熵仅根据预测为将在阶段2和阶段3中编码的像素计算。应排除阶段1像素，以模拟阶段2中使用的调色板（见第2节）。为此，估计每个特定模式 P'_X 首次出现的所有像素都必须在阶段2或阶段3中编码。此外，给定上下文 $H(X|P' = \{A, B\})$时像素颜色的熵也使用简化后的模式计算，并模拟在阶段1中编码一个像素所需的比特率。为使分类器能够用于不同块大小（例如图像边缘处的截断块），颜色数量和模式数量均按每块的像素数进行归一化。

由于 $r_{\mathrm{VVC},\,i}$ 取决于量化参数，因此我们需要针对每个量化参数训练一个分类器。我们使用上文提到的 8602 个大小为 128×128 的块，并进行 10 折交叉验证。针对量化参数 22、27、32、37 训练的分类器，其验证准确率分别达到 90.6%、91.8%、92.4% 和 92.6%。图 3 展示了一个使用针对量化参数 22 训练的分类器以此方式分割的示例图像。除一个包含小型图像图标的块外，大多数完全由文本构成的块都位于 SCF 层中。正如预期，自然图像位于 VVC 层中。

3.2. 编码过程

所提出的VVC编码方法修改如下所述：首先，在预处理步骤中，如第3.1节所述，将图像分割为VVC 层和SCF 层。随后，为减少不必要的开销，通过模式标志指示当前图像是否仅包含SCF模式块、仅包含VVC模式块，或同时包含两者。此外，还会传输图像的高度和宽度。如果图像中同时包含VVC模式和SCF模式，则通过一个标志指示每个编码树单元的标签。该标志可使用每块1比特进行传输，因此开销相对较低。VVC 层采用RGB 4:4:4格式，使用VTM 17.2参考编解码器，并按照 [16]中的描述，采用全帧内配置以及针对非4:2:0计算机生成内容的配置进行编码。所有SCF编码树单元均设置为黑色。图像的其余部分则使用SCF编码器进行编码。因此，对SCF编码器的实现进行了调整，使其跳过所有不属于SCF 层的像素。基本处理块如图4所示。此外，对 [14] 中的基础SCF编码器进行了修改，以利用可用的解码后的VVC层所提供的信息。为此，在所有未标记为SCF的位置，将SCF层图像$\widehat{\ }$填充为解码后的VVC层$\mathbf{I}_{\mathrm{VVC}}$。这会对SCF编码器产生影响，因为编码树单元边缘处的模式（见图2）可能包含来自VVC 层的像素。此外，如果编码树单元边缘处出现新颜色，cMAP预测将利用前一个块中的像素。此外，还会生成一个调色板

该调色板由VVC 层生成，并按照出现次数降序排列。SCF编码器计算SCF层图像与解码后的VVC调色板之间相交颜色的比例，该比例针对VVC调色板中出现次数最多的 $\lfloor 1/2^b \rfloor$ 种颜色，以及 $b \in 0, \ldots\ldots, 6$进行计算。对最高比例对应的值 b进行编码；当最高比例小于0.9时，对 $b = 7$ 进行编码。该截止值经过经验选择，用于防止引入过多不必要的颜色，以免干扰SCF编码器的阶段2。SCF调色板使用VVC调色板的部分内容进行初始化，并根据块宽度对其颜色计数进行归一化。因此，b仅需使用3比特即可编码，同时仍支持使用完整调色板，最多使用预解码VVC调色板的 1/64项，甚至完全不使用该调色板。

解码过程遵循相同的流水线：首先解码模式标志，然后解码宽度和高度；在混合情况下，还要解码块标签。接着解码 VVC 层，并用它初始化调色板以及 SCF 层边缘的像素。SCF 编码器解码 SCF 层，并根据这两个已解码的层重建图像。

4. 评估

在评估中，将所提出的SCF增强型VVC编解码器与VTM 17.2进行比较。作为测试数据，我们使用了多个可用的RGB合成图像数据集，共包含173幅图像。所有测试图像的未压缩比特率均为24每像素比特数。测试集HEVC-CTC由从HEVC CTC测试序列中提取的单帧组成，这些序列列于 [15] 屏幕内容编码 [19] 和屏幕内容范围扩展实验的通用测试条件中的测试集*2*中。此外，还对广为人知的SCI数据集SIQAD [21] 和SCID [22, 23] 进行了评估，它们分别包含20幅和40幅图像。最后，[24] 中的“文本”和“混合”刺激（SC-Text和SC-Mixed）包含网页截图，分辨率为 1360 ×768，其中的文本内容与自然图像部分相结合。对于各测试集，比特率取所有图像的平均值。RGB-峰值信噪比作为质量指标取平均值。此外，还计算RGB-结构相似性指数和GFM [25] 得分，以模拟主观质量。除广为人知的结构相似性指数外，我们还使用GFM，因为它是专门为屏幕内容开发的质量指标，能够更好地捕捉合成图像的特征。GFM和结构相似性指数均在通过 $s_{\log} = -\log_{10}(1 - s)$转换到对数域后，对所有图像取平均值，其中 s 是结构相似性指数或GFM的质量得分，$s_{\log}$ 是转换后的得分。

©2023 IEEE。允许个人使用本材料。对于任何其他用途，无论是在当前还是未来的媒体中，包括为广告或促销目的重印/再版本材料、创作新的合集、转售或重新分发至服务器或列表，或在其他作品中重复使用本作品中任何受版权保护的部分，均须获得 IEEE 的许可。
https://doi.org/10.1109/ICASSP48485.2024. 10447125

SCF 层中的像素百分比				
数据集	量化参数 22	量化参数 27	量化参数 32	量化参数 37
HEVC-CTC [19, 20]	50.8%	47.0%	44.3%	41.1%
SIQAD [21]	20.7%	19.0%	17.9%	13.5%
SCID [22]	22.5%	20.3%	18.0%	13.4%
SC-Text [24]	52.2%	49.0%	45.1%	34.8%
SC-Mixed [24]	37.3%	34.8%	31.0%	24.6%
All	39.2%	36.4%	33.2%	26.4%

表 1：分类为 SCF 层像素的像素百分比。

BD码率（%）（参考：VTM 17.2）				
数据集	# 图像	PSNR	SSIM	GFM
HEVC-CTC [19, 20]	14	-8.12	-8.97	-6.99
SIQAD [21]	20	-5.19	-4.09	-4.26
SCID [22]	39	-2.67	-3.02	-2.04
SC-Text [24]	50	-8.19	-8.36	-6.97
SC-Mixed [24]	49	-1.48	-2.68	-0.76
All	173	-4.98	-5.34	-3.96

表 2：相对于 VTM 17.2，所有数据集的 BD码率结果（%）；负数表示节省了码率。

对于某个量化参数，一幅图像被完全分类为SCF图像，因此在编码时没有任何损失。这幅来自SCID数据集的图像（*'SCI34'*）从所有平均比特率和质量得分中移除，因为它会妨碍有意义的Bjontegaard-Delta计算。

表 1 展示了各数据集在不同量化参数下使用 SCF 编码的像素比例。可以看出，该比例因图像内容而异：例如，SIQAD 中约为 20%，而测试集 HEVC-CTC 和 SC-Text 中则超过一半。此外，随着量化参数升高，SCF 像素的比例会下降。平均而言，量化参数为 22 时，39.2% 的像素被标记为 SCF 像素；而量化参数为 37 时，约四分之一的像素属于 SCF 层。这是因为量化参数越高，VVC 对每个块所需的比特率越低，因此无损 SCF 编码器在比特率方面成本较低的可能性也就越小。

图 5 展示了对所有测试集取平均后，峰值信噪比对应的率失真曲线。对于所有量化参数，所提出的方法均优于 VTM 17.2。在较低的量化参数值下，增益略高。原因有二：首先，在较低的量化参数下，更多像素被分类为 SCF，因此所提出的方法有更多机会节省比特率。其次，由于 SCF编码器是无损的，其比特率在所有量化参数下保持不变。因此，与 VVC 相比，量化参数越低，潜在的比特率增益越大。此外，使用 VVC 加 SCF 对图像进行编码时，较低比特率下编码开销的影响会更大。为定量评估所提出方法的有效性，我们采用 Akima 插值计算了相对于 VTM 17.2 的 Bjøntegaard-Delta 率，如 [26] 所建议。结果列于表 2。对于所有数据集，在峰值信噪比、结构相似性指数和 GFM 方面均可观察到 BD码率增益。对于测试集，基于PSNR的BD比特率增益最低为 1.48%，最高为 8.19%。由于各数据集的 BD码率结果差异较大，我们可以得出结论：所提出方法的有效性高度依赖于图像内容。合成内容占比较高、且与图像内容明显分离的图像（例如 SC-Text [24]，中的网页）获益最大。平均而言，所提出的方法在峰值信噪比、结构相似性指数和 GFM 方面分别实现了 4.98%、5.34% 和 3.96% 的 BD-rate 增益。

使用不同编码方法以块为单位处理图像时，尤其是部分块采用无损编码时，可能会出现明显的视觉质量差异。在评估的测试集中，

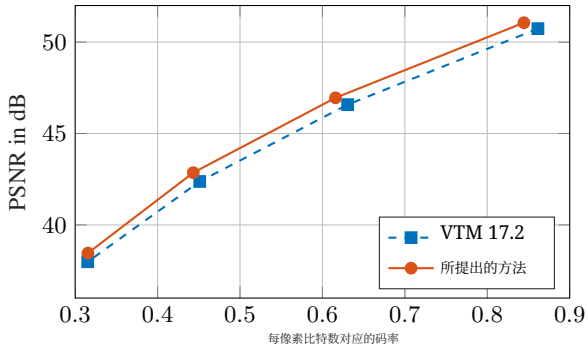


图 5：所提出的方法与原始 VTM 17.2 在所有测试集上取平均的率失真曲线（以峰值信噪比为指标）。

当量化参数为 22 至 32 时，这些差异可以忽略不计。量化参数较高时，不同层中编码的编码树单元之间偶尔会出现可见差异。通常只有在与软上下文形成编码树单元内容相似的相邻编码树单元采用 VVC 编码，且锐利边缘或轻微噪声伪影被平滑时，才会出现这种情况。

在计算复杂度方面，所提出的方法实际上所需的编码时间更短，这是因为对 SCF 层中编码树单元的 VVC编码器率失真优化搜索有所减少。例如，对于 SCID测试集，所提出的方法平均编码时间为 629 秒，而 VVC 的平均编码时间为 657 秒，约提升 4%。SCF编码器的对称特性会增加解码时间：所提出的方法平均解码时间为 11 秒，而 VVC 为 0.5 秒。不过，需要注意的是，所提出的方法并未针对速度进行优化；进一步优化（例如优化从 VVC解码器向 SCF编码器传输数据）将进一步缩短编码时间。

5. 总结

本文介绍了一种基于软上下文形成、面向SCI的改进型VVC编码方法。通过应用基于特征的块分类技术，图像的部分区域使用无损SCF编码器进行编码，从而提升图像质量，同时平均还能降低比特率。我们对SCF编码器进行了调整，使其能够利用解码后的VVC图像所获得的信息，初始化调色板和用于模式匹配与预测的边缘像素。与未经修改的VVC编解码器相比，在所评估的数据集上，所提出的方法平均可获得4.98%的基于PSNR的BD比特率增益。未来工作可进一步完善分割方法。例如，所提出的分割方法将每个块视为独立单元。然而，在SCF方法和VVC中，因果编码树单元都会影响当前编码树单元的编码效率。下一步可研究这些依赖关系，并将其纳入分割方法，以改进码率估计。改进分割并结合后处理步骤，也有助于减少较小量化参数下无损SCF编码树单元与有损VVC编码树单元之间明显的质量差异。最后，SCF方法的有损扩展或可进一步降低比特率。

6. 参考文献

[1] Gary J. Sullivan、Jens-Rainer Ohm、Woo-Jin Han，以及 Thomas

©2023 IEEE。允许个人使用本材料。任何其他用途均须事先获得 IEEE 的许可，包括在任何当前或未来媒体中重印/再版本材料以用于广告或宣传目的、创作新的合集、转售或重新分发至服务器或列表，或在其他作品中重复使用本作品中任何受版权保护的部分。
https://doi.org/10.1109/ICASSP48485.2024. 10447125

Wiegand，“高效视频编码 (HEVC) 标准概述”，*IEEE*《电路与系统视频技术汇刊》，第 22 卷，第 12 期，第 1649–1668 页，2012 年 12 月。[2] Jizheng Xu、Rajan Joshi 和 Robert A. Cohen，“新兴 HEVC 屏幕内容编码扩展概述”，*IEEE*《电路与系统视频技术汇刊》，第 26 卷，第 1 期，第 50–62 页，2016 年 1 月。[3] Benjamin Bross、Ye-Kui Wang、Yan Ye、Shan Liu、Jianle Chen、Gary J Sullivan 和 Jens-Rainer Ohm，“通用视频编码 (VVC) 标准及其应用概述”，*IEEE*《电路与系统视频技术汇刊》，第 31 卷，第 10 期，第 3736–3764 页，2021 年 10 月。[4] Tung Nguyen、Xiaozhong Xu、Felix Henry、Ru-Ling Liao、Mohammed Golam Sarwer、Marta Karczewicz、Yung-Hsuan Chao、Jizheng Xu、Shan Liu、Detlev Marpe 和 Gary J. Sullivan，“VVC 中的屏幕内容支持概述：应用、编码工具与性能”，*IEEE*《电路与系统视频技术汇刊》，第 31 卷，第 10 期，第 3801–3817 页，2021 年 4 月。[5] Wei Pu、Marta Karczewicz、Rajan Joshi、Vadim Seregin、Feng Zou、Joel Sole、Yu-Chen Sun、Tzu-Der Chuang、Polin Lai、Shan Liu、Shih-Ta Hsiang、Jing Ye 和 Yu-Wen Huang，“HEVC 屏幕内容编码扩展中的调色板模式编码”，*IEEE*《电路与系统新兴及精选主题期刊》，第 6 卷，第 4 期，第 420–432 页，2016 年 12 月。[6] Xiaozhong Xu、Shan Liu、Tzu-Der Chuang、Yu-Wen Huang、Shaw-Min Lei、Krishnakanth Rapaka、Chao Pang、Vadim Seregin、Ye-Kui Wang 和 Marta Karczewicz，“HEVC 屏幕内容编码扩展中的帧内块复制”，*IEEE*《电路与系统新兴及精选主题期刊》，第 6 卷，第 4 期，第 409–419 页，2016 年 12 月。[7] Xiaozhong Xu、Xiang Li 和 Shan Liu，“采用参考样本存储器重用的通用视频编码中的帧内块复制”，载于*2019* 年图像编码研讨会 *(PCS)*，2019 年，第 1–5 页。[8] Ricardo L. de Queiroz、Robert R. Buckley 和 Ming Xu，“用于复合图像压缩的混合光栅内容 (MRC) 模型”，载于视觉通信与图像处理会议论文集，1998 年 12 月，第 3653 卷，第 1106–1117 页。[9] Ashok Mathew Kuruvilla，“用于兼容网络的复合图像压缩的平铺图像容器”，载于第八届信号图像技术与互联网系统国际会议论文集，2012 年 11 月，第 182–187 页。[10] Takeshi Mogi，“基于区域分离的合成与自然复合图像混合压缩方法”，载于*1999* 年国际图像处理会议论文集，1999 年 10 月，第 3 卷，第 777–781 页。[11] Shuhui Wang 和 Tao Lin，“复合图像压缩的联合编码方法”，多媒体工具与应用，第 71 卷，第 3 期，第 1263–1282 页，2014 年 8 月。[12] Tong Tang、Ling Li、Xiaoyu Wu、Ruizhi Chen、Haochen Li、Guo Lu 和 Limin Cheng，“TSA-SCC：超低码率文本语义感知屏幕内容编码”，*IEEE*《图像处理汇刊》，第 31 卷，第 2463–2477 页，2022 年 2 月。[13] Shabhrish Reddy Uddehal、Tilo Strutz、Hannah Och 和 Andr´e Kaup，“通过图像分割改进无损屏幕内容压缩”，载于*IEEE* 国际声学、语音与信号处理会议论文集 *(ICASSP)*，2023 年 6 月，第 1–5 页。[14] Hannah Och、Tilo Strutz 和 Andr´e Kaup，《用于屏幕内容残差编码的概率分布优化》，载于视觉通信与图像处理国际会议（*VCIP*）论文集，2021年12月，第1–5页。[15] Tilo Strutz 和 Phillip M¨oller，《基于增强型软上下文形成的屏幕内容压缩》，*IEEE* 多媒体汇刊，第22卷，第5期，第1126–1138页，2020年5月。[16] Yung-Hsuan Chao、Yu-Chen Sun、Jizheng Xu 和 Xiaozhong Xu，《JVET 非 4:2:0 色彩格式的通用测试条件和软件参考配置》，AHG 报告，JVET-T2013，ITU-T 第16研究组第3工作组及 ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 11 联合视频探索组（JVET），2020年10月。[17] Tung Nguyen、Benjamin Bross、Heiko Schwarz、Detlev Marpe 和 Thomas Wiegand，《通用视频编码中变换跳过模式的残差编码》，载于*2020*年数据压缩会议（*DCC*）论文集，2020年3月，第83–92页。[18] Mohsen Abdoli、Felix Henry、Patrice Brault、Frederic Dufaux、Pierre Duhamel 和 Pierrick Philippe，《VVC 中采用层分离的屏幕内容帧内块 DPCM》，载于*IEEE* 国际图像处理会议（*ICIP*）论文集，2019年9月，第3162–3166页。[19] Haoping Yu、Robert Cohen、Krishna Rapaka 和 Jizheng Xu，《屏幕内容编码的通用测试条件》，JCTVC-U1015-r2，ITU-T 第16研究组第3工作组及 ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 11 联合视频编码协作组（JCT-VC），2015年6月。[20] Ankur Saxena、Do-Kyoung Kwon、Matteo Naccari 和 Chao Pang，《HEVC 范围扩展核心实验3（RCE3）：帧内预测技术》，JCTVC-N1123，ITU-T 第16研究组第3工作组及 ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 11 联合视频编码协作组（JCT-VC），2013年7月。[21] Huan Yang、Yuming Fang 和 Weisi Lin，《屏幕内容图像的感知质量评估》，*IEEE* 图像处理汇刊，第24卷，第11期，第4408–4421页，2015年11月。[22] Zhangkai Ni、Lin Ma、Huanqiang Zeng、Ying Fu、Lu Xing 和 Kai-Kuang Ma，《SCID》，网址：http://smartviplab.org/pubilcations/SCID.html，最后访问时间：May 28, 2021 [在线]。[23] Zhangkai Ni、Lin Ma、Huanqiang Zeng、Ying Fu、Lu Xing 和 Kai-Kuang Ma，《SCID：用于屏幕内容图像质量评估的数据库》，载于国际智能信号处理与通信系统研讨会（*ISPACS*）论文集，2017年11月，第774–779页。[24] Chengyao Shen 和 Qi Zhao，《网页显著性》，载于欧洲计算机视觉会议论文集，2014年9月，第33–46页。[25] Zhangkai Ni、Huanqiang Zeng、Lin Ma、Junhui Hou、Jing Chen 和 Kai-Kuang Ma，《基于 Gabor 特征的屏幕内容图像质量评估模型》，*IEEE* 图像处理汇刊，第27卷，第9期，第4516–4528页，2018年5月。[26] Christian Herglotz、Matthias Kr¨anzler、Ruben Mons 和 Andr´e Kaup，《超越 Bjøntegaard：视频压缩性能比较的局限性》，载于*IEEE* 国际图像处理会议（*ICIP*）论文集，2022年10月，第46–50页。