

HEVC 中的变换系数熵编码优化算法

单娜娜 周 巍 段哲民

(西北工业大学电子信息学院 西安 710072)

摘 要 在高性能视频压缩标准中,由于熵编码算法的高度复杂性和变换系数的庞大计算量,使得变换系数编码成为影响视频编码效率的瓶颈之一。根据变换系数大都是零或一些绝对值较小的数,以及两类熵编码方法各自的特点,提出一种针对变换系数熵编码的优化算法,通过减少上下文自适应算术编码字节的数量达到提高变换系数熵编码效率的目的。实验结果证明,与标准的 HM 10.0 算法相比,采用所提算法可以在 QP 为 2,12 和 22 时分别减少 37.31%, 26.34% 和 20.63% 的编码时间。

关键词 高性能视频编码,熵编码,基于上下文自适应算术编码,常规编码模式,旁路编码模式,变换系数,量化参数
中图法分类号 TN919.81 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.06.051

Improved Entropy Coding Algorithm for Transform Coefficients in HEVC

SHAN Na-na ZHOU Wei DUAN Zhe-min

(Department of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract Transform coefficients coding has been the bottleneck of influencing the efficiency of video coding because of the complexity of entropy coding and the quantity of transform coefficients in high efficient video coding. There are many zeroes and small absolute values in transform coefficients. According to some features of context adaptive binary arithmetic coding and bypass coding, an improved entropy coding algorithm for transform coefficients was proposed by reducing some context adaptive binary arithmetic coding bins. Experiment results show that compared with HM 10.0, the proposed algorithm can provide 37.31%, 26.34% and 20.63% time savings at QP being 2, 12 and 22 respectively.

Keywords High efficient video coding (HEVC), Entropy coding, Context adaptive binary arithmetic coding (CABAC), Regular coding, Bypass coding, Transform coefficient, Quantization parameter (QP)

1 引言

提高 HEVC 的编码效率是目前视频编码研究的主要方向,文献[1]根据屏幕内容中不同类型区域的编码特性提出了一种有损字典编码方案,并将其应用到 HEVC 中,可以明显提高编码性能。文献[2]提出了一种基于决策树的编码单元划分算法,将编码单元划分问题归为分类问题,提取编码单元的划分信息到决策树模型中进行学习,得到决策树分类器。其可以跳过某些划分单元和率失真计算,从而降低视频编码的计算复杂度。

熵编码按照信息熵原理将视频序列的一系列信息(如预测模式、运动矢量、变换系数等)编码成易于被传输或者存储的压缩比特流。它可以利用信息间的统计相关性有效去除冗余,因此是视频编码中重要的压缩手段。与其他熵编码方法相比,由于基于上下文的自适应二进制算术编码(Context Adaptive Binary Arithmetic Coding, CABAC)可以充分利用算术编码的特点和视频码流之间的统计相关性,并进行自适应

概率更新,从而可以更好地接近编码效率的最优值,因此在最新的编码标准 HEVC 中主要采用 CABAC 这一方法进行熵编码。

在熵编码提高编码效率的同时,CABAC 需要用到很多的上下文模型,并且对这些上下文模型的概率估计进行大量的计算,所以如何降低熵编码的复杂度成为了研究重点。目前针对 CABAC 的优化主要集中在如下几个方面:文献[3]使用旁路编码模式编码运动矢量差;文献[4]将指数哥伦布编码转化为旁路编码;文献[5]中变换系数编码中的部分语法元素采用旁路编码模式;文献[6]将旁路编码字节分组以便在一个周期内处理多个编码字节;文献[7]减少总的被编码字节数目以降低编码复杂度;文献[8]减少上下文选择相关性,从而可以并行处理被编码字节。但是由于变换系数熵编码是目前熵编码过程中复杂度最高的环节,需要针对其编码特点做出进一步的优化。

本文介绍了 HEVC 中 CABAC 的处理流程和变换系数编码的特点,分析了影响其编码效率的瓶颈问题,提出了进一

到稿日期:2016-05-15 返修日期:2016-12-02 本文受国家自然科学基金(60902101),教育部新世纪优秀人才计划(NCET-11-0824),中央高校基本科研业务费专项资金(3102014JJCQ01057)资助。

单娜娜(1979-),女,博士生,主要研究方向为视频编码,E-mail:helensnn@hotmail.com;周 巍(1979-),男,副教授,主要研究方向为视频编码;段哲民(1953-),男,教授,主要研究方向为视频编码、集成电路分析与设计。

步优化的方法。最后,在标准测试模型 HM10.0 上进行了验证并得出相应的实验结果。

2 基于上下文的自适应二进制算术编码

Marpe 等人于 2001 年首先提出了 CABAC 的算法模型^[9],接着又对其做出了某些改进^[10-11],使得该模型可以更好地利用编码符号的统计特性为当前编码符号分配相应的码字,其也逐步形成了 H.264 中的 CABAC 模型^[12]。随后, Vivienne 等人又针对新一代视频编码标准 HEVC 的特点对 CABAC 做出了进一步的改进^[13],使其能够更加适应高清视频的特点。

基于上下文的自适应二进制算术编码将二进制算术编码和上下文模型结合起来,并且可以自适应地更新概率模型,有效地提高了熵编码的效率。如图 1 所示,CABAC 的处理流程可以简单描述为:二进制化、上下文建模和二进制算术编码,其中二进制算术编码又可以分为常规编码模式和旁路编码模式。

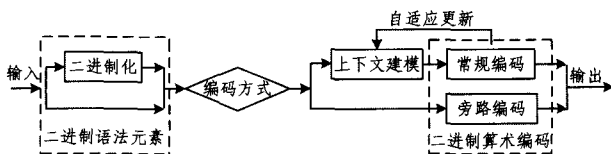


图 1 CABAC 编码器结构

2.1 二进制化

二进制化是将待编码的非二进制元素转化为由字符“0”和“1”构成的二进制序列(Bin String),其中常用的方法有截断莱斯二进制化(TR)、定长二进制化(FL)和 K 阶指数哥伦布二进制化(EGK)等。根据不同语法元素的特点和其概率分布的特征来具体选择二进制化方法。假如输入信息本身已经是二进制的,则跳过此步骤,信息被直接传递到下一步骤进行处理。

2.2 上下文建模

由于被编码的符号之间存在着相关性,因此根据条件熵理论,可以利用前面已编码的信息(即上下文)对被编码的符号进行条件编码。

对于长度为 N 的符号序列而言,在已知前 $N-1$ 个符号 X_1, \dots, X_{N-1} 时,第 N 个符号所携带的平均信息量,即它的 N 阶条件熵可以表示为:

$$H(X_N | X_1 \dots X_{N-1}) = - \sum_{i_1=1}^q \dots \sum_{i_{N-1}=1}^q p(x_{i_1} \dots x_{i_{N-1}}) \log p(x_{i_N} | x_{i_1} \dots x_{i_{N-1}})$$

这表明符号之间的依赖关系越大,后面符号的不确定性越弱,即前面给出的条件越多得到的条件熵越小。因此通过引入上下文,可以得到比独立编码更好的性能。

在 HEVC 中,每个语法元素的概率分布不同,通常采用查表的方式进行上下文模型的初始化工作。

2.3 二进制算术编码

采用算术编码的本质是为整个输入流分配一个码字,而不是对每个字符分配码字。CABAC 将待编码符号序列表示成 0 和 1 之间的一个区间,根据符号的概率和前一个已经被划分完的区间进行递归的处理,不断缩小区间范围,输出时只

要取最终区间中的一个二进制小数即可表示该输入流。在理想情况下,该小数已经近似等于其熵。

针对统计概率不相等的字符串,采用常规编码模式,即首先根据语法元素上下文建模,然后结合概率模型表进行概率估计,接着进行算术编码,完成区间划分、确定区间上下限以及区间长度。最后,根据前面已编码符号为下一个待编码符号进行自适应更新。

针对统计概率近似相等的字符串,采用旁路编码,无需为每个 Bin 分配概率模型,而是以将字符取“0”和“1”的概率都设为 0.5 的方式进行固定概率编码,使编码复杂度大大降低。为了简化区间划分,没有将区间长度二等分,而是将区间下限值 L 加倍。

3 变换系数编码

HEVC 是基于块进行编码的,其中又可以分为编码单元(CU)、预测单元(PU)和变换单元(TU),其中 TU 的有关处理涉及大量信息,在视频编码过程中占有重要的作用。在经过一系列的预测、变换和量化等处理之后,TU 中的变换系数具有非常显著的特点,即数据向左上角高度集中,也就是每个变换单元中只在左上角有少量的非零系数,其他位置的系数大部分都为零^[14-15]。

在 HEVC 中,无论是亮度信息还是色度信息,均是变换块来进行处理的,每个变换块又继续被分割为 4×4 大小的子块。在进行熵编码前,按照变换系数幅值的分布情况选择具体的扫描方式:对角扫描、水平扫描或垂直扫描,将一组变换系数转换成一维的数组,并且幅值接近的系数尽量排列在相邻的位置,从而便于建立高效的 CABAC 模型,提高编码效率。

图 2 示出了一个 4×4 变换系数组采用对角扫描时变换系数的扫描顺序。

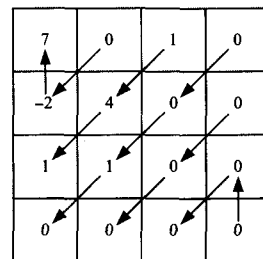


图 2 4×4 子块对角扫描变换系数的扫描顺序

一个 4×4 变换单元中变换系数的处理流程如下。

1) last_significant_coeff_flag_x(LASTX):

扫描出该变换单元中的最后一个非零系数的位置,传送最后一个非零系数的坐标 x 值。

2) last_significant_coeff_flag_y(LASTY):

传送最后一个非零系数的坐标 y 值。

3) significant_coeff_flag(SCF):

按照扫描顺序,对所有在 LASTX 和 LASTY 之前的变换系数都传送一个 SCF 来表示该位置变换系数是否为零。

4) coeff_abs_level_greater1_flag(GR1):

假如 SCF 为 1,传送 GR1 表示该位置的变换系数是否大于 1。

5)coeff_abs_level_greater2_flag(GR2):

假如 GR1 为 1, 传送 GR2 表示该位置的变换系数是否大于 2。

6)coeff_abs_level_remaining(REM):

假如该位置的 GR2 为 1, REM 表示该值减去 3 之后变换系数的剩余幅值; 假如该位置的 GR2 为 0 且 GR1 为 1, REM

表示该值减去 2 之后变换系数的剩余幅值。

7)coeff_sign_flag(SIGN):

SIGN 表示该位置的变换系数的符号。

在标准算法 HM 中, 对于图 2 所示的变换系数, 各个语法元素的编码情况如表 1 所列。除 REM 和 SIGN 采用旁路编码, 其余的语法元素都是通过 CABAC 常规编码来处理。

表 1 4x4 变换系数编码

scanning position	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
coefficient	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	4	1	0	-2	7
significant_coeff_flag	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1
last_significant_coeff_flag_x									1							
last_significant_coeff_flag_y								2								
coeff_abs_level_greater1_flag									0	0	0	1	0	0	1	1
coeff_abs_level_greater2_flag												1				
coeff_abs_level_remaining												1				4
coeff_sign_flag								0				0			1	0

4 变换系数熵编码算法改进

由变换编码的原理可知, 对于像素值变化缓慢的像素块, 经过 DCT(离散余弦变换)或者 DST(离散正弦变换)后的大多数能量(即非零系数)都集中在左上角的低频系数中, 反之, 像素块包含了较多的纹理时, 将会有较多的能量分散在其高频系数区域^[16]。

BasketballDrill(832x480)是标准测试序列之一, 图 3 统计了该序列在不同 QP 下, 其变换系数个数的分布情况。由图 3 可见, 随着 QP 的减少, 变换系数的个数越来越多。因此, 可以将视频的量化参数 QP 作为衡量变换系数编码复杂度的标准。

通过前文对于 CABAC 常规编码特点的描述, 可以发现 CABAC 常规编码具有很强的数据相关性, 这使得其难于被并行处理, 另外, 在算术编码的区间递归处理和概率的自适应更新, 尤其是上下文的选择等过程中常规编码的计算复杂度较高, 严重制约了整个视频编码的效率。而旁路编码模式无需进行概率更新, 编码过程相对简单。并且每个 TU 中存在大量变换系数为零的情况, 没有必要继续传输后面剩余的大量零系数。在一个 4x4 变换单元中, GR1 中的少量非零系数主要集中在扫描的左上角位置, 而 GR2 中非零系数出现的频率更少。因此, 设计一种优化算法通过减少对于 GR1 和 GR2 的处理来简化变换系数编码的过程。本文接下来主要针对 4x4 变换单元中变换系数的这一特点, 围绕着在视频编码复杂度高的较小的 QP 设置下如何去掉其数据相关性或者减少其编码字节来进行改进。

在标准算法中, 最后一个非零变换系数的位置信息 X, Y, SCF, GR1 和 GR2 都是采用的常规编码模式, 而 SIGN 和 REM 采用旁路编码模式。其中, 仅编码前 8 个非零变换系数的 GR1, 后面的非零系数默认其 GR1 为 0; 仅编码第一个非零系数的 GR2, 对于后面的非零变换系数, 默认其 GR2 为 0。

根据上文的分析, 变换系数中非零系数的个数随着 QP 的降低而增加。因此本算法针对较小的 QP 值来减少编码 GR1 的个数。当 QP ≤ 22 时, 视频的编码复杂度较高, 这时将仅处理前两个非零变换系数的 GR1, 不再编码非零系数的 GR2。相应的 REM 也要进行调整, 当 GR1 为 1 时, REM 表示该变换系数减 2 后的剩余幅值。采用这种方式编码变换系数可以将大量使用 CABAC 常规编码模式进行处理的变换系数编码转化为使用旁路编码模式来处理。

图 4 显示了采用两种方法对于图 2 中的变换系数进行编码的差异。对于图 2 中的变换系数来说, 采用本算法可以节约 7 个 CABAC 常规编码的 Bin, 而仅仅增加了一个旁路编码

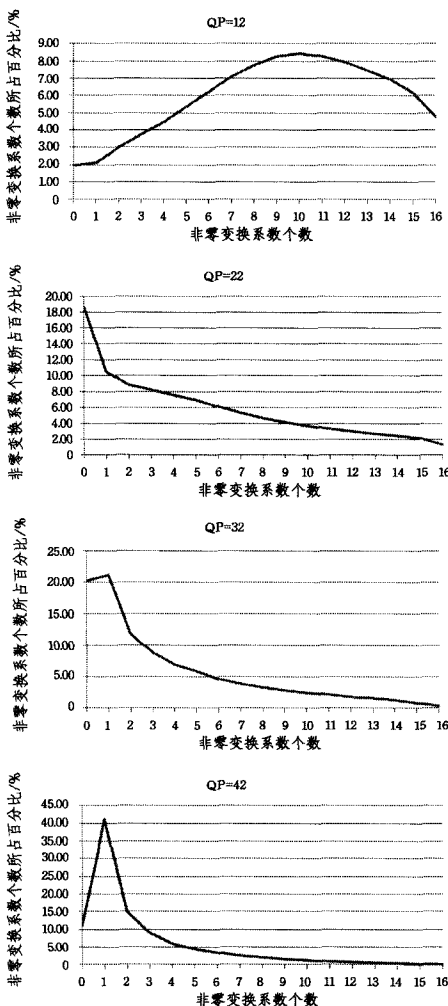


图 3 不同 QP 下变换系数个数的分布情况

模式的变换系数。

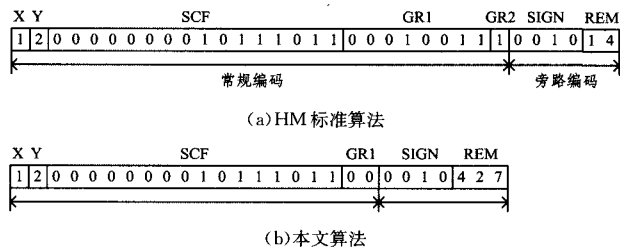


图 4 采用两种方法编码图 2 中的变换系数

图 5 显示了本算法编码一个 4×4 变换系数组的流程,具体描述如下。

(1)首先判定该 4×4 变换系数组内是否存在非零系数,假如有非零系数,按照幅值分布情况选择扫描模式,将 16 个变换系数排列成便于处理的一维数组,进入步骤(2);否则,跳过该系数组,进入下一个系数组进行编码。

(2)扫描变换系数,编码该系数组内的最后一个非零变换系数,将其坐标记为 X 和 Y 。

(3)扫描最后一个非零系数之前的所有变换系数,若该系数是 0,则 SCF 为 0,否则,SCF 的值为 1,直到编码完该变换系数组内所有的变换系数。

(4)编码非零系数的幅值信息,判断编码前两个非零系数幅值的绝对值是否大于 1,若大于 1,则 GR1 为 1,否则 GR1 为 0。

(5)若 GR1 为 1,则编码该变换系数的剩余幅值,REM 等于该变化系数绝对值减 2。

(6)编码非零系数是正值还是负值,若为正值,则 SIGN 为 0;若为负值,则 SIGN 为 1。

采用本算法可以将变换系数的幅值由复杂的 CABAC 常规编码模式转换为较为简单的旁路编码模式来处理,可以更好地利用变换系数的特性来提高熵编码的效率。

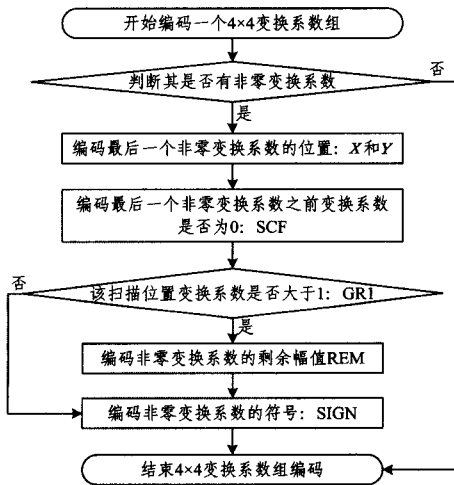


图 5 编码一个 4×4 变换系数组流程

5 实验结果及分析

表 2 列出了针对标准的 5 个不同级别的 12 个测试序列采用本算法在 HM-10.0 上进行测试的实验结果,其中配置模式使用的是全 I 帧,在量化参数 QP 分别设置为 22,12 和 2 的条件下,分别可以节约 20.63%,26.34%和 37.31%的编码时

间。表 3 列出了在 QP 为 22,12 和 2 时的结果,其码率的增加量分别为 0.81%,1.29%和 0.95%。由表中的数据也可以看出,本算法对于量化参数设置为较低数值的视频序列以及具有较高分辨率的视频序列具有更好的提升效果。

表 2 本算法实验结果 $\Delta T/\%$

类型	序列名称	QP=22	QP=12	QP=2
ClassA	Traffic	-8.40	-35.51	-51.69
	Kimono	-26.14	-6.11	-36.28
ClassB	BasketballDrive	-7.47	-23.03	-39.59
	BQTerrace	-43.08	-26.60	-44.34
ClassC	BasketballDrill	-14.22	-40.04	-12.21
	BQMall	-19.84	-26.78	-39.63
	RaceHorsesC	-6.30	-34.25	-41.36
ClassD	BasketballPass	-9.95	-24.86	-40.90
	BQSquare	-20.84	-56.61	-43.99
ClassE	Vidyo1	-35.47	-8.91	-26.81
	Vidyo3	-50.90	-15.46	-38.77
	Vidyo4	-4.92	-17.96	-32.22
平均值		-20.63	-26.34	-37.31

表 3 本算法实验结果 $\Delta \text{BitRate}/\%$

类型	序列名称	QP=22	QP=12	QP=2
ClassA	Traffic	1.00	1.32	0.88
	Kimono	1.01	0.73	0.67
ClassB	BasketballDrive	0.19	1.20	1.22
	BQTerrace	1.78	1.39	0.33
ClassC	BasketballDrill	0.90	1.56	0.42
	BQMall	0.51	1.97	0.40
	RaceHorsesC	0.76	0.79	0.40
ClassD	BasketballPass	1.06	0.66	0.69
	BQSquare	0.62	0.54	0.24
ClassE	Vidyo1	0.52	1.83	1.94
	Vidyo3	0.32	1.79	2.07
	Vidyo4	1.03	1.69	2.14
平均值		0.81	1.29	0.95

由图 3 统计的量化参数 QP 分别设置为 42,32,22,12 的条件下,变换系数个数的分布情况也可以看出,当 QP 值较小时,变换系数组中不为零的变换系数数量增多,采用本算法可以节约更多的 CABAC 常规编码的 Bin 的个数,可以更加有效地降低编码 Bin 数量,提高熵编码的效率。

结束语 本文根据变换系数的稀疏性,以及熵编码方法的复杂性特点,提出一种针对变换系数熵编码的优化算法,通过将某些上下文自适应算术编码常规编码的处理转化为旁路编码处理,从而达到提高变换系数熵编码效率的目的。熵编码处理的数据量大,编码复杂度高,是视频编码中的重要瓶颈,接下来还需要针对熵编码的处理过程做进一步的研究以提高整个视频编码的效率。

参考文献

[1] ZHANG P J, JIN X J, WANG S H, et al. Screen content coding of combining full-chroma HEVC and lossy matching dictionary coder[J]. Computer Science, 2014, 41(3): 286-292. (in Chinese) 张培君, 金小娟, 王淑慧, 等. 结合全色度 HEVC 和有损字典算法的屏幕图像编码[J]. 计算机科学, 2014, 41(3): 286-292.

[2] CEN Y F, WANG W L, YAO X W, et al. Decision tree based coding unit splitting algorithm for HEVC[J]. Computer Science, 2016, 43(4): 308-312. (in Chinese)

参 考 文 献

- [1] LLULL P, YUAN X, LIAO X J, et al. Temporal Compressive Sensing for Video[M]. Compressed Sensing and its Applications, Applied and Numerical Harmonic Analysis. Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- [2] GAO X W, JIANG F, LIU S H, et al. Hierarchical frame based spatial-temporal recovery for video compressive sensing coding[J]. Neurocomputing, 2016, 174(Part A): 404-412.
- [3] ROMBERG J, et al. Imaging via compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 14-20.
- [4] HOU, et al. Complex SAR Image Compression Based on Directional Lifting Wavelet Transform With High Clustering Capability[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(1): 527-538.
- [5] HOU, et al. SAR image Bayesian compressive sensing exploiting the interscale and intrascale dependencies in directional lifting wavelet transform domain[J]. Neurocomputing, 2014, 133: 358-368.
- [6] CHEN G, LI D F, ZHANG J S. Iterative gradient projection algorithm for two-dimensional compressed sensing sparse image reconstruction[J]. Signal Processing, 2014, 104: 15-26.
- [7] TAMADA D, et al. Two-dimensional compressed sensing using the cross-sampling approach for low-field MRI systems[J]. IEEE Trans. on Medical Imaging, 2014, 33(9): 1905-1912.
- [8] KANG B, ZHU W P, Yan J. Object detection oriented video reconstruction using compressed sensing[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2015, 2015: 15.
- [9] PEREIRA F, TORRES L, GUILLEMO C, et al. Distributed video coding; selecting the most promising application scenarios [J]. Signal Processing, Image Communication, 2008, 23(5): 339-352.
- [10] FOWLER J E, MUN S, TRAMEL E W. Block-based compressed sensing of images and video[J]. Found Trends Signal Process, 2012, 4(4): 297-416.
- [11] KIM J M, LEE O K, YE J C. Noise Robust Joint Sparse Recovery Using Compressive Subspace Fitting[EB/OL]. [2012-10-12]. <http://arxiv.org/abs/1112.3446>.
- [12] WARNELL G, BHATTACHARYA S, CHELLAPPA R, et al. Adaptive-Rate Compressive Sensing Using Side Information[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2015, 24(11): 3846-3857.
- [13] MUN S, FOWLER J E. Block compressed sensing of images using directional transforms[C]//Proceedings of the International Conference on Image Processing. Cairo, Egypt, 2009: 3021-3024.
- [14] LIU H X, SONG B, QIN H, et al. Dictionary learning based reconstruction for distributed compressed video sensing[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(8): 1232-1242.
- [15] TRAMEL E W. Distance-weighted regularization for compressed-sensing video recovery and supervised hyperspectral classification[D]. Mississippi State University, 2012.
- [16] TRAMEL E W, FOWLER J E. Video compressed sensing with multihypothesis[C]//IEEE data compression conference. Snowbird, UT, 2011: 193-202.
- [17] GOLDSTEIN T, SETZER S. High-order methods for basis pursuit[J]. UCLA CAM Report, 2010: 10-41.
- [18] KANG L W, LUC S. Distributed compressive video sensing [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2009: 1169-1172.
- (上接第 293 页)
- 岑跃峰, 王万良, 姚信威, 等. 基于决策树的 HEVC 编码单元划分算法[J]. 计算机科学, 2016, 43(4): 308-312.
- [3] NGUYEN T, MARPE D, SCHWARZ H, et al. Modified binarization and coding of MVD for PIPE/CABAC[C]//Proc. of ITU-T SG16 WP3 and ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 6th Meeting. Torino, 2011: 1-4.
- [4] NGUYEN T, WINKEN M, MARPE D, et al. Reduced-complexity entropy coding of transform coefficient levels using a combination of VLC and PIPE [C]//Proc. of ITU-T SG16 WP3 and ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 4th Meeting. Daegu, 2011: 1-8.
- [5] CHEN J L, CHIEN W J, RAJAN J, et al. throughput improvement on CABAC coefficients level coding [C]//Proc. of ITU-T SG16 WP3 and ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 8th Meeting. San José, 2012: 1-14.
- [6] SASAI H, NISHI T. Modified MVD coding for CABAC [C]//Proc. of ITU-T SG16 WP3 and ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 6th Meeting. Torino, 2011: 1-6.
- [7] NGUYEN N, JI T Y, HE D K, et al. Multi-level significance maps for Large Transform Units [C]//Proc. of ITU-T SG16 WP3 and ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 7th Meeting. Geneva, 2011: 1-11.
- [8] SZE V. Context selection complexity in HEVC CABAC [C]//Proc. of ITU-T SG16 WP3 and ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 4th Meeting. Dargu, 2011: 1-3.
- [9] MARPE D, BLÄTTERMANN G, WIEGAND T. Adaptive codes for H. 26L [C]//ITU-T SG 16/Q. 6. Eibsee, 2001.
- [10] MARPE D, BLÄTTERMANN G, HEISING G. Further results for CABAC entropy coding scheme [C]//ITU-T SG 16/Q. 6. Austin, 2001.
- [11] MARPE D, BLÄTTERMANN G, HEISING G, et al. Video compression using context-based adaptive arithmetic coding [C]//International Conference on Image Processing, 2001. Proceedings. 2001: 558-561.
- [12] MARPE D, SCHWARZ H, WIEGAND T. Context-based adaptive binary arithmetic coding in the H. 264/AVC video compression standard[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2003, 13(7): 620-636.
- [13] SZE V, BUDAGAVI M. High Throughput CABAC Entropy Coding in HEVC[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2012, 22(12): 1778-1791.
- [14] HEO J, HO Y S. Improved Context - Based Adaptive Binary Arithmetic Coding over H. 264/AVC for Lossless Depth Map Coding[J]. Signal Processing Letters IEEE, 2010, 17(10): 835-838.
- [15] SOLE J, JOSHI R, NGUYEN, et al. Transform Coefficient Coding in HEVC[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2012, 22(12): 1765-1777.
- [16] RAO K R, YIP P. Discrete Cosine Transform [J]. IEEE Transactions on Computers, 1974, c-23(1): 90-93.