

一种高精度的自适应码率控制图像压缩算法

宋蓓蓓¹, 何帆¹, 马穗娜¹, 孙文方²

(1. 长安大学信息工程学院, 710064, 西安; 2. 西安电子科技大学空间科学与技术学院, 710126, 西安)

摘要: 针对非完全嵌入编码的图像压缩算法难以实现精确的码率控制问题,提出了一种结合码率预测和压缩后率失真优化的高精度自适应码率控制的图像压缩(HTJ2K-RPRD)算法。首先,根据二维离散小波变换高频子带数据的高斯分布特性,计算量化前高频子带数据的信息熵得到最小平均比特数,用最小平均比特数来估计量化编码后高频子带数据的码率预测值;接着,采用与 JPEG2000 标准压缩质量相当但复杂度比其低的 HTJ2K 标准进行图像压缩,根据 HTJ2K 标准中清理通道的编码特点,粗略计算二维离散小波变换低频子带数据在码流中嵌入的平均比特数,用嵌入的平均比特数来估计编码后低频子带数据的码率预测值;然后,统计所有编码后子带数据的码率预测值来估计基础截断位平面;最后,从基础截断位平面编码产生多个编码通道,对产生的编码通道进行率失真优化以实现自适应码率控制的图像压缩。实验结果表明:HTJ2K-RPRD 算法在自适应码率控制的情况下可实现带宽受限压缩系统的定码率压缩,且复杂度更低;在不同位深和像素大小的图像上的压缩码率控制精度可达 99.997%。

关键词: 图像压缩;码率控制;编码;率失真优化;JPEG2000 标准;HTJ2K 标准

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202202021 **文章编号:** 0253-987X(2022)02-0198-09



OSID 码

An Image Compression Algorithm With High-Precision Adaptive Rate Control

SONG Beibei¹, HE Fan¹, MA Suina¹, SUN Wenfang²

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710126, China)

Abstract: An image compression (HTJ2K-RPRD) algorithm with high-precision adaptive rate control is proposed to solve the problem that the image compression algorithm with incomplete embedded coding is difficult to achieve accurate rate control, and the algorithm combines bit rate prediction and post compression rate distortion optimization. Firstly, according to the Gaussian distribution characteristics of the high-frequency subband data of two dimensional discrete wavelet transform, the information entropy of the wavelet coefficients before quantization is calculated to obtain the minimum average bit number which is used to estimate the predicted bitrates of the high-frequency wavelet coefficients after quantization and encoding. Secondly, the HTJ2K standard, which has the same compression quality as the JPEG2000 standard but a lower complexity than it, is used for image compression. According to the coding characteristics of the cleanup passes in the HTJ2K standard, the average bits embedded in the code stream of the low-

frequency wavelet coefficients are roughly calculated and the predicted rates of the encoded low-frequency wavelet coefficients are estimated by the average embedded bits. Then the predicted bitrates of all encoded wavelet coefficients are counted to estimate the basic truncated bit plane. Finally, multiple coding channels are generated from the base-truncated bit-plane coding, and the generated coding channels are optimized for rate-distortion to achieve adaptive rate control image compression. Experimental results show that the HTJ2K-RPRD algorithm can achieve fixed rate compression for bandwidth-constrained compression systems with lower complexity under the condition of adaptive bit rate control; the compression bit rate control accuracy can reach 99.997% on images with different bit depths and pixel sizes.

Keywords: image compression; rate control; coding; rate-distortion optimization; JPEG2000 standard; HTJ2K standard

通信带宽是在多媒体信息传输中影响获得高质量数字图像的重要因素。在传输带宽受限的情况下,图像的码率控制压缩可以实现最佳的带宽利用^[1]。因此,如何实现精确的码率控制是图像压缩领域研究的热点。

目前针对码率控制图像压缩算法的研究主要分为3类。第一类是基于变换编码压缩的码率控制图像压缩算法,其中最经典的是 JPEG2000 标准采用的压缩后率失真优化(post compression rate-distortion optimization, PCRD-opt)算法^[2]。PCRD-opt 算法可实现在最小失真下的最优码率分配策略,但由于需要编码所有编码通道,因此该算法的复杂度较高且运行效率较低。为了解决这一问题,Yeugn 等提出了基于预扫描的最优截断算法^[3],虽然有效减少了编码通道数量,但在高倍压缩时仍然存在较大的编码冗余。王超等提出了最小斜率截断的压缩后率控制算法^[4],其利用率失真斜率的两个特性来获得最佳的截断点,虽然减少了存储空间,但图像的峰值信噪比略有降低。Li 等提出了根据各子带对图像重建的重要性原理和最优率失真理论分配所有小波子带码率的算法^[5],有效降低了编码冗余。第二类是基于预测编码压缩的码率控制图像压缩算法,该类算法主要是将量化步长作为变量建立码率控制的数学模型。Valsesia 等通过对非重叠编码块建立预测码率与失真的数学模型实现了有效的码率控制^[6]。在此基础上,Conoscenti 等实现了在保证码率控制精度的同时也降低算法复杂度的算法^[7]。Valsesia 等通过动态估计残差信息更新量化步长实现了更精确的码率控制和更高的算法吞吐量^[8]。然而,这种动态调整可能导致量化步长的突变,从而在解压图像上引入较大的误差。Joan 等提出了一种重复编码的码率控制图像压缩算法^[9],该算法首先

设置某一量化步长对图像进行编码,在未达到目标码率时,重新调整量化步长并重复该过程。尽管以上算法都获得了有效的码率控制,但在低码率时码率控制精度仍存在 0.4% 的误差。第三类是基于深度学习压缩的码率控制图像压缩算法,该类算法主要解决深度学习压缩模型只能输出单一码率的问题^[10-11],不适用于传统压缩算法的码率控制。

JPEG2000 标准由于质量和分辨率的可伸缩性、ROI 编码以及高效率压缩等特性受到了广泛应用,但其核心算法的高复杂度严重影响了其在低延迟应用上的实现。虽然目前的码率控制算法对 JPEG2000 的码率控制进行了优化,但没有从根本上解决码率控制复杂度高的难题。HTJ2K 是建立在 JPEG2000 标准基础上的一种实现高吞吐率的图像压缩标准,其改变了 JPEG2000 的块编码算法,从根本上降低了 JPEG2000 的编码复杂度^[12],但在很大程度上损失了 JPEG2000 核心算法 EBCOT^[13]所具有的精细的渐进传输特性,其非完全的嵌入编码方式导致难以实现精确的码率控制。作为可选项,虽然 HTJ2K 提供了码率控制框架,但没有给出具体的实现方法。为了解决这一问题,本文根据 HTJ2K 算法本身的特点,提出了一种结合码率预测和压缩后率失真优化的高精度自适应码率控制的图像压缩(HTJ2K-RPRD)算法,实现了低复杂度的精确码率控制图像压缩。

1 HTJ2K 图像压缩框架

HTJ2K 是 JPEG 委员会标准制定组于 2019 年公布的新的图像压缩标准^[14],该标准采用了最优截断的快速块编码算法(fast block coding with optimized truncation, FBCOT)^[15],解决了 JPEG2000 复杂度高的难题。HTJ2K 图像压缩框架主要包含

多分量变换、离散二维小波变换、量化、块编码和码流包生成 5 个部分,如图 1 所示。其中,多分量变换用于去除彩色图像分量间的相关性,离散二维小波变换用于去除图像空间内的相关性^[16],量化用以调节小波变换数据的有效位深,若为无损压缩则无需进行量化处理。随后的块编码器则是 HTJ2K 的关

键环节,块编码器采用 3 种编码通道进行编码:清理 (cleanup, CUP) 通道、显著性传播 (significance propagation, SP) 通道和幅值细化 (magnitude refinement, MR) 通道^[17]。当进行定码率压缩时,则需要进行码率控制处理。编码的最后部分是对每个编码块的输出码流打包为一个完整的压缩码流包。

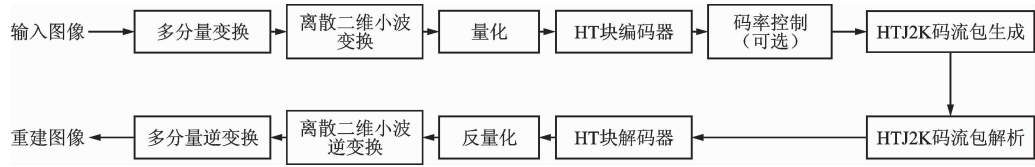


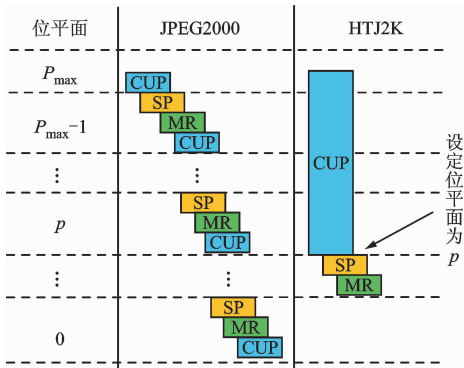
图 1 HTJ2K 编解码系统框架
Fig. 1 Framework of HTJ2K codec system

HTJ2K 与 JPEG2000 系统架构相似,最主要的区别在于块编码器部分。HTJ2K 与 JPEG2000 的块编码通道产生方式对比如图 2 所示。在 JPEG2000 中,除编码块的最高位平面只生成一个清理通道外,其他的每一个位平面都要生成 3 个编码通道^[18]。假设最高位平面为 $p_{\max}$ (0 为最低位平面),则每个编码块最多可以生成 $3p_{\max} + 1$ 个编码通道,这样便对小波系数进行了精细的分数位平面划分。而在 HTJ2K 中,对于给定的位平面 p ,每个编码块仅生成一个清理通道,进而生成一个显著性传播通道和一个幅值细化通道,因此每个编码块仅生成 3 个编码通道^[19]。特别地,当给定的位平面 $p = 0$ 时,则只需要一个清理通道即可完成对该编码块的编码。HTJ2K 极大地降低了算法复杂度,非常有利于并行实现,是实现高吞吐率的关键,但是 HTJ2K 对编码通道的粗分方式只能生成极少的质量层,给精确的定码率图像压缩带来困难。

2 自适应码率控制方法

码率控制问题实质是一种有约束条件的率失真优化问题^[20]。JPEG2000 采用压缩后率失真优化算法实现最优码率控制,首先通过计算每个编码通道的重建损失和输出码流长度来获得下凸的率失真函数曲线,然后通过计算率失真曲线的斜率寻找定码率输出要求的最优码流截断点。JPEG2000 的每个编码通道的终止点就是一个候选截断点,因此每个编码块都能形成精细的率失真曲线,这非常有利于获得最优截断点,而 HTJ2K 能产生的待截断点数量非常有限,难以构成精细的率失真曲线。文献 [21]对 JPEG2000 率失真优化的各编码块的编码通道截断点进行了分析,通过观察大量的图像实验后发现,每幅图像中每个编码块的码流是在邻近的编码通道结束点被截断。在标准测试图像 lena 和 barb 上分别进行 4 倍、8 倍和 16 倍的 JPEG2000 压缩,可得到每个编码块的截断位平面曲线,如图 3 所示。对于既定的压缩倍数,即使每个编码块数据互相差异较大,但是截断位平面的差异并不大,一般仅相差 1 个位平面,即使在高倍压缩时也仅相差 2~3 个位平面。这表明在既定的压缩倍数下,编码块间会存在一个基础的截断位平面,如 lena 图像 4 倍、8 倍和 16 倍压缩的基础截断位平面分别为 2、3 和 4。

基于以上小波编码的特点,提出了一种结合码率预测和压缩后率失真优化的高精度自适应码率控制的图像压缩 (HTJ2K-RPRD) 算法。该算法的主要思想是:首先根据图像小波变换域编码块数据统计模型预测编码的基础截断位平面;然后从基础截断位平面编码产生多个编码通道,采用 PCRD-opt 算法获得每个编码块的编码通道截断点以实现精确



$p_{\max}$ —最高位平面; p —设定的位平面;CUP—清理通道;
SP—显著性传播通道;MR—幅值细化通道。
图 2 HTJ2K 与 JPEG2000 的块编码通道产生方式对比
Fig. 2 A comparison of block coding passes generation
methods between HTJ2K and JPEG2000

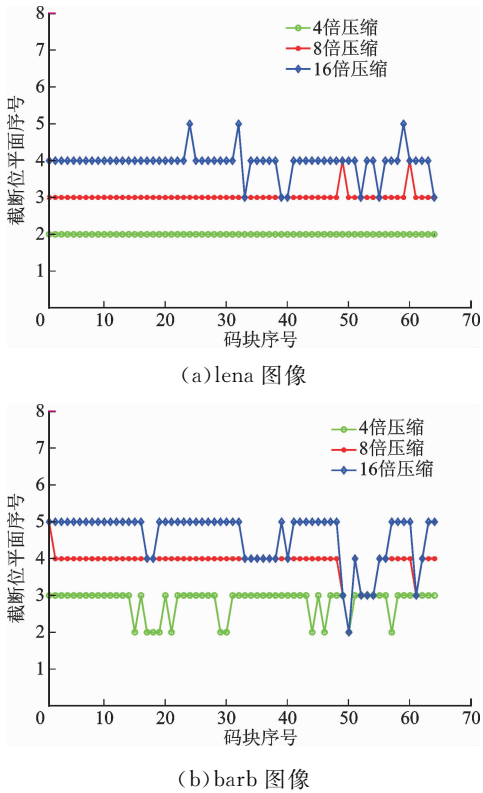


图 3 不同压缩倍数下各编码块的截断位平面
Fig. 3 The truncation bit plane of each coding block under different compression ratio

的码率控制。

2.1 基于高斯统计模型的小波高频子带数据码率预测

在信息论中,香农信源编码理论确定了数据压缩的极限^[22]。根据这一理论,文献[23]给出了在均匀量化器作用下用于所有样本数据的最小平均比特数 $R_{\hat{x}}$,计算公式如下

$$R_{\hat{x}} = H(\mathbf{X}) - \text{lb}(\Delta) \tag{1}$$

式中: $\mathbf{X}$ 是原始样本数据; $\hat{\mathbf{X}}$ 是量化后的样本数据; $H(\mathbf{X})$ 是原始样本数据的信息熵; Δ 是量化步长。

通过计算量化前数据的信息熵得到量化后数据被编码的最小平均比特数 $R_{\hat{x}}$ 。一般当图像经过二维小波去冗余变换后,小波变换域除 LL 子带外的其他高频子带的第 i 个编码块的数据 $\mathbf{A}_i$ 表征为高斯分布^[24],其概率密度主要与其方差 σ_i^2 有关,此时 $\mathbf{A}_i$ 的信息熵 $H_{\mathbf{A}_i}$ 的近似估计值如下

$$H_{\mathbf{A}_i} = \text{lb}(\sqrt{2\pi e}\sigma_i) \tag{2}$$

式中: σ_i 为第 i 个码块的标准差; e 为自然常数。

根据最优率失真理论,当使得式(3)最小时,可获得最优的编码参数

$$\min J = \sum_{i=1}^M (D_i + \lambda R_{\mathbf{A}_i}) =$$

$$\sum_{i=1}^M \left(\frac{\Delta^2}{12} + \lambda (\text{lb}(\sqrt{2\pi e}\sigma_i) - \text{lb}\Delta) \right) \tag{3}$$

式中: M 为低频子带码块的总个数; D_i 为第 i 个码块的损失; $R_{\mathbf{A}_i}$ 是数据 $\mathbf{A}_i$ 在均匀量化器下的最小平均比特数; λ 表示率失真斜率。当 $\Delta = \sqrt{6\lambda/\ln 2}$ 时,上式取得最小值。也就是说,当所有的编码块的量化步长均为 $\sqrt{6\lambda/\ln 2}$ 时,上式率失真函数取得最小值,这便是每个编码块的码流是在邻近的编码通道结束点被截断的理论依据。设高频子带第 i 个编码块的数据量占有高频子带数据量的比例为 w_i ,有 $\sum_{i=1}^M w_i = 1$,则仅通过统计小波域每个编码块数据的方差便可预测出高频子带数据在量化步长 Δ 下的平均输出码率 $R_H(\Delta)$ 如下

$$R_H(\Delta) = \sum_{i=0}^M w_i (\text{lb}(\sqrt{2\pi e}\sigma_i) - \text{lb}\Delta) \tag{4}$$

设基础的截断位平面为 p ,当量化步长 Δ 为 2 的整数次幂时,根据 $\Delta = 2^p$ 则高频子带数据在截断位平面 p 的平均输出码率 $R_H(p)$ 如下

$$R_H(p) = \left(\sum_{i=0}^M w_i (\text{lb}(\sqrt{2\pi e}\sigma_i)) \right) - p \tag{5}$$

2.2 基于清理通道编码规则的小波低频子带数据码率预测

由于小波低频子带数据分布与图像内容紧密相关,往往不满足高斯分布,因此不能用上节方法进行码率估计。由图 2 可见,清理通道是 HTJ2K 中最主要的编码部分,承担了大部分码流输出。而清理通道的码流由 MagSgn 比特流、MEL 比特流和 VLC 比特流组成,各个部分比特流由其对应的编码器产生^[25]。清理通道码流结构如图 4 所示。清理通道以 2×2 结构的数据为一个最小编码单元,称为四元组。清理通道的四元组处理样本如图 5 所示。因此,本文以四元组为基本单元,根据 3 个码字段的编码规则进行低频子带小波数据码率预测。

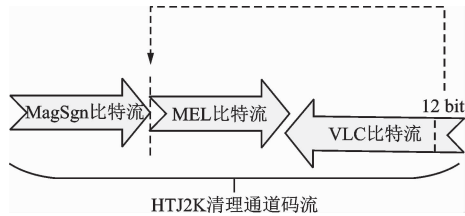
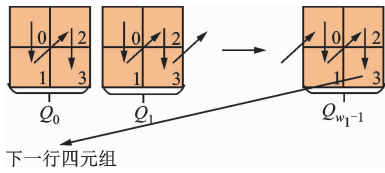


图 4 清理通道码流结构

Fig. 4 Stream structure of Cleanup passes

在 MagSgn 编码器中,对于第 i 个四元组 Q_i ,其中每个样本数据在不同位平面 p 嵌入 MagSgn 码流



Q_0 —第0个四元组; Q_1 —第1个四元组; Q_{w_q-1} —第 w_q-1 个四元组; w_q —码块中每行四元组的个数。

图5 清理通道的四元组处理样本

Fig. 5 Quad processing samples of cleanup passes

的比特数为 $m_{i,n}(p)$, $n=0,1,2,3$ 。 $m_{i,n}(p)$ 满足如下关系式

$$\left. \begin{aligned} m_{i,n}(p) &\leq \max\{E_{i,0}(p), E_{i,1}(p), E_{i,2}(p), E_{i,3}(p)\} \\ E_{i,n}(p) &= \min\{E \in \mathbb{N} \mid \lfloor \frac{|X_{i,n}|}{2^p} \rfloor - \frac{1}{2} < 2^{E-1}\} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\mathbb{N}$ 为自然数集; $X_{i,n}$ 为四元组 Q_i 中的第 n 个数据值; $E_{i,n}$ 为四元组 Q_i 中的第 n 个数据值的幅值指数^[26]。

在预测时用 $\max\{E_{i,0}(p), E_{i,1}(p), E_{i,2}(p), E_{i,3}(p)\}$ 近似估计 $m_{i,n}(p)$, 则四元组 Q_i 嵌入 MagSgn 码流的比特数预测值为 $4\max\{E_{i,0}(p), E_{i,1}(p), E_{i,2}(p), E_{i,3}(p)\}$ bit。

VLC 编码器采用查找表的方法进行编码, 即对每个四元组通过查找表产生一个不超过 7 bit 的码字段直接嵌入 VLC 码流。预测每个四元组嵌入 VLC 码流的比特数为 7 bit。

MEL 编码器主要对零上下文四元组的重要性编码。相对于 MagSgn 和 VLC 编码器, MEL 编码器产生极少的码流。由于在对 MagSgn 和 VLC 码流的预测中均按照上限进行了超量的码流估计, 因此在这里可忽略对每个四元组嵌入 MEL 码流的长度。

综上, 假若二维小波低频子带有 N 个四元组, 则在不同位平面 p 嵌入清理通道码流的码率表示如下

$$R_L(p) = \sum_{j=1}^N \{4\max[E_{j,0}(p), E_{j,1}(p), E_{j,2}(p), E_{j,3}(p)] + 7\} / 4N \quad (7)$$

2.3 码率控制

由以上两节可知, 当图像二维小波变换的低频子带数据数量占比为 a_L , 高频子带数据数量占比为 a_H , 有 $a_L + a_H = 1$, 则编码到位平面 p 截止时输出码率 $R(p)$ 可估计如下

$$R(p) = a_H R_H(p) + a_L R_L(p) \quad (8)$$

式中: R_H 和 R_L 分别为二维小波系数在高、低频子带数据的平均输出码率。

假设目标码率为 R_T , 则预测的基础截断位平面如下

$$p_{\text{pre}} = \min\{p \in \{0, 1, \dots, p_{\text{max}}\} \mid R_T \geq R(p)\} \quad (9)$$

式中: p_{max} 为图像小波变换数据的最高位平面; $R(p)$ 为截断位平面为 p 时 CUP 通道编码的预测码率。

式(9)获得的基础截断位平面表示为清理编码后的码率不超过目标码率的最高位平面, 而在实际编码中, 每个编码块的截断位平面略有偏差。为了获得更精确的码率控制结果, 分别将位平面 p_{pre} 及 $p_{\text{pre}}-1$ 作为截断位平面对每个编码块进行两次编码。这样, 每个编码块将共产生 6 个编码通道, 于是有较多的截断点可以保证 PCRD-opt 算法的执行。码率控制的主要步骤描述如下。

(1) 按照截断位平面从下向上的顺序逐个位平面进行码率预测。首先令 $p=0$, 根据编码块所属的小波子带采用相应的预测方法进行编码块的码率输出估计, 然后采用式(8)计算整个图像压缩的输出码率估计值。

(2) 判断码率估计值是否超出目标码率。当估计值超过目标码率时, 令 $p=p+1$ 跳转到步骤(1); 否则停止码率估计, 记预测的基础截断位平面 $p_{\text{pre}}=p$ 。

(3) 将 p_{pre} 及 $p_{\text{pre}}-1$ 分别作为截断位平面对每个编码块进行 HTJ2K 编码。

(4) 对每个编码块进行统一的 PCRD-opt 率失真优化、码流截断及码流组织。

3 实验与结果分析

为了验证本文高精度自适应码率控制的图像压缩(HTJ2K-RPRD)算法的码率控制性能、压缩性能以及计算复杂度, 首先, 采用本文 HTJ2K-RPRD 算法对 4 幅测试图像在压缩比分别为 4:1、8:1 和 16:1 时进行码率控制性能测试实验; 然后, 采用 4 种算法对 4 幅测试图像在压缩比分别为 4:1、8:1 和 16:1 时进行压缩性能测试实验, 采用的 4 种算法分别为 JPEG2000、CCSDS-IDC^[27]、本文算法, 以及 HTJ2K-PCRD。其中, HTJ2K-PCRD 是对每个位平面均进行 3 个通道编码, 然后采用 PCRD-opt 进行码率控制的算法; 最后, 采用本文算法对 4 幅测试图像在压缩比为 8:1 时进行压缩耗时实验。

3.1 测试图像

实验所用到的 4 幅测试图像均为单通道灰度图像, 由自然场景标准测试图像以及空间系统数据咨

询委员会(CCSDS)提供的遥感测试图像组成。4 幅测试图像如图 6 所示。其中,lena 图像为自然场景标准测试图,像素深度为 8 bit;mars、ice、和 solar 为 CCSDS 提供的遥感测试图像,像素深度分别为 8 bit、10 bit 和 12 bit。

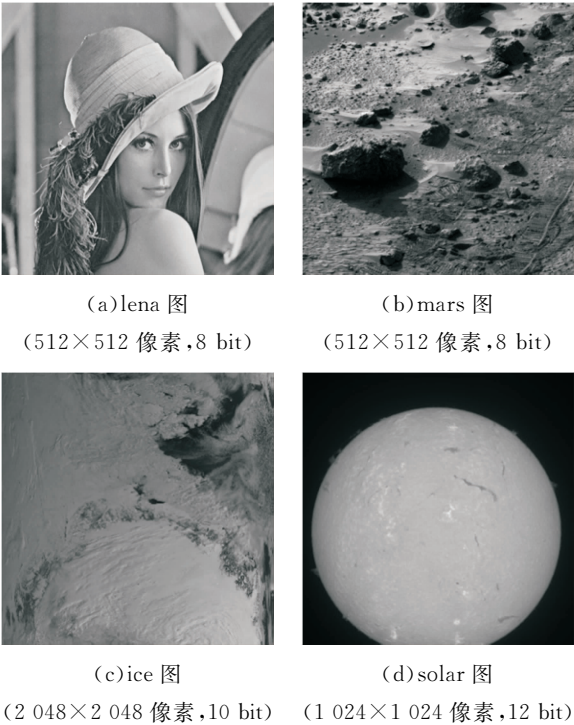


图 6 测试图像
Fig. 6 Test images

3.2 实验结果

3.2.1 码率控制

采用本文算法对 4 幅测试图像在压缩比分别为 4:1、8:1 和 16:1 进行码率控制性能测试的结果如表 1 所示。计算了按照上式(9)对基础截断位平面 p_{pre} 的估计值,当截断位平面为 p_{pre} 时 CUP 通道编码的预测码率及实际码率,以及码率控制后的最终实际压缩码率。结果显示,当截断位平面为 p_{pre} 时,对比 CUP 通道编码的预测码率及实际码率,平均预测误差仅 13.18%。对比目标压缩码率与码率控制后的最终实际压缩码率,平均码率控制精度达到 99.997%,本文算法获得精确的码率控制结果。

3.2.2 压缩图像质量

采用峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)和结构相似度(structural similarity, SSIM)作为图像压缩质量客观评价指标。

采用 4 种算法对 4 幅测试图像在压缩比分别为 4:1、8:1 和 16:1 进行压缩性能测试实验的图像质量客观评价结果分别如表 2、表 3 和表 4 所示。所有算法均采用 9/7 提升小波进行 3 级小波分解,编码块大小为 64×64。

结果显示,压缩比为 4:1 时,JPEG2000、CCS-DS-IDC、HTJ2K-PCRD 和 HTJ2K-RPRD 获得压缩图像相对原始图像的 PSNR 值的均值分别为 52.229 7、50.444 0、51.371 6 和 51.359 8 dB,SSIM

表 1 采用 HTJ2K-RPRD 算法对 4 幅测试图像的码率控制结果
Table 1 Rate control results of four test images using HTJ2K-RPRD algorithm

压缩比	图像	目标压缩码率/ (bit · 像素 ⁻¹)	截断位平面 p_{pre} 的估计值	CUP 通道编码预测码率/ (bit · 像素 ⁻¹)	CUP 通道编码实际码率/ (bit · 像素 ⁻¹)	实际压缩码率/ (bit · 像素 ⁻¹)
4:1	lena	2.000	5	0.893 8	0.787 2	1.996 7
	mars	2.000	5	1.756 4	1.509 8	1.999 6
	ice	2.500	5	1.779 1	1.542 1	2.500 0
	solar	3.000	6	2.229 6	1.923 3	3.000 0
8:1	lena	1.000	5	0.893 8	0.787 2	1.000 0
	mars	1.000	6	0.950 4	0.818 8	1.000 0
	ice	1.250	6	1.008 3	0.871 0	1.250 0
	solar	1.500	7	1.330 3	1.132 7	1.500 0
16:1	lena	0.500	6	0.442 2	0.412 0	0.500 0
	mars	0.500	7	0.442 2	0.406 7	0.500 0
	ice	0.625	7	0.501 7	0.453 8	0.625 0
	solar	0.750	8	0.670 8	0.600 8	0.750 0

表 2 压缩比为 4:1 时采用 4 种算法的压缩图像质量比较

Table 2 A comparison of compressed image qualities using four algorithms at 4:1

图像	峰值信噪比/dB				结构相似度			
	JPEG2000	CCSDS-IDC	HTJ2K-PCRD	HTJ2K-RPRD	JPEG2000	CCSDS-IDC	HTJ2K-PCRD	HTJ2K-RPRD
lena	44.981 4	44.271 9	44.363 8	44.363 8	0.982 4	0.981 0	0.979 7	0.979 7
mars	42.357 1	40.910 8	41.483 0	41.483 8	0.989 3	0.986 3	0.986 6	0.986 6
ice	57.274 4	55.977 8	56.407 7	56.407 8	0.998 6	0.998 2	0.998 2	0.998 2
solar	64.305 9	60.615 4	63.231 9	63.183 9	0.999 7	0.999 3	0.999 6	0.999 6

表 3 压缩比为 8:1 时采用 4 种算法的压缩图像质量比较

Table 3 A comparison of compressed image qualities using four algorithms at 8:1

图像	峰值信噪比/dB				结构相似度			
	JPEG2000	CCSDS-IDC	HTJ2K-PCRD	HTJ2K-RPRD	JPEG2000	CCSDS-IDC	HTJ2K-PCRD	HTJ2K-RPRD
lena	40.280 1	39.511 2	40.012 8	39.988 7	0.953 6	0.950 9	0.950 6	0.950 7
mars	35.307 1	34.486 1	34.702 6	34.742 5	0.951 4	0.946 5	0.945 6	0.946 5
ice	49.159 2	48.172 2	48.537 6	48.536 6	0.991 5	0.990 4	0.990 5	0.990 5
solar	54.317 1	52.144 2	53.525 2	53.527 4	0.997 0	0.995 0	0.996 4	0.996 4

表 4 压缩比为 16:1 时采用 4 种算法的压缩图像质量比较

Table 4 A comparison of compressed image qualities using four algorithms at 16:1

图像	峰值信噪比/dB				结构相似度			
	JPEG2000	CCSDS-IDC	HTJ2K-PCRD	HTJ2K-RPRD	JPEG2000	CCSDS-IDC	HTJ2K-PCRD	HTJ2K-RPRD
lena	37.127 1	35.960 2	36.600 3	36.602 6	0.925 1	0.917 1	0.919 4	0.919 4
mars	30.936 7	30.335 0	30.300 2	30.312 7	0.882 6	0.869 4	0.867 2	0.867 3
ice	43.984 4	43.319 4	43.323 5	43.318 3	0.975 4	0.973 9	0.972 2	0.972 1
solar	48.448 4	47.320 8	47.746 7	47.748 8	0.989 1	0.985 1	0.986 7	0.986 7

的均值分别为 0.992 5、0.991 2、0.991 0 和 0.991 0。HTJ2K-RPRD 算法相对 JPEG2000 的 PSNR 值下降 0.8 dB 左右,而相对 CCSDS-IDC 提高 0.9 dB 左右,与 HTJ2K-PCRD 的 PSNR 值相差不到 0.1 dB,4 种算法获得的 SSIM 值相当。压缩比为 8:1 时,这 4 种算法获得 PSNR 值的均值分别为 44.765 9、43.578 4、44.194 6 和 44.198 8 dB,SSIM 的均值分别为 0.973 4、0.970 7、0.970 8 和 0.971 0。HTJ2K-RPRD 算法相对 JPEG2000 的 PSNR 值下降 0.5 dB 左右,而相对 CCSDS-IDC 提高了 0.6 dB 左右,与 HTJ2K-PCRD 的 PSNR 值相差不到 0.1 dB,4 种算法获得的 SSIM 值相当。压缩比为 16:1 时,这 4 种算法获得 PSNR 值的均值分别为 40.124 2、39.233 9、39.492 7 和 39.495 6 dB,SSIM 的均值分别为 0.943 1、0.936 4、0.936 4 和 0.936 4。HTJ2K-RPRD 算法相对 JPEG2000 的 PSNR 值下降 0.6 dB 左右,而相对 CCSDS-IDC 提高 0.3 dB 左

右,与 HTJ2K-PCRD 的 PSNR 值相差不到 0.1 dB,4 种算法获得的 SSIM 值相当。

综上所述,HTJ2K 和 CCSDS-IDC 均是以牺牲部分压缩图像质量为代价以提高编解码吞吐率,整体上 JPEG2000 压缩图像质量最佳,其次是 HTJ2K,HTJ2K 的压缩性能优于 CCSD-IDC 算法。

3.2.3 压缩耗时

采用 C 语言编写的 HTJ2K-RPRD 压缩算法(未考虑并行加速处理)对 4 幅测试图像在压缩比为 8:1 进行 100 次压缩。4 幅测试图像压缩过程中截断位平面预测部分的耗时平均值和压缩总耗时的结果如表 5 所示。结果显示,编码总耗时与图像像素总量呈近似线性关系,图像越大耗时越长。预测部分耗时占整个压缩时间不大于 3%,因此 HTJ2K-RPRD 算法对图像压缩算法复杂度影响极小。图像压缩算法的吞吐量可定义为单位时间内所处理的图像数据量,预测部分耗时增加了不大于 3%的压缩

耗时,因此整个图像压缩算法的吞吐量降低不足 3%,HTJ2K-RPRD 算法对图像压缩算法吞吐量影响极小。

采用本文算法和 HTJ2K-PCRD 分别对 4 幅测试表 5 压缩比为 8:1 时采用 HTJ2K-RPRD 算法的压缩耗时

Table 5 Running time of image compression using HTJ2K-RPRD algorithm at 8:1

图像	预测耗时/s	总耗时/s	预测耗时占比/%
lena	0.004	0.277	1.44
mars	0.004	0.274	1.46
ice	0.088	4.466	1.97
solar	0.025	1.154	2.17

试图像在压缩比为 8:1 进行 100 次压缩。采用两种算法对 4 幅测试图像压缩总耗时平均值的比较结果如图 7 所示。显然 HTJ2K-PCRD 算法耗时更长,平均耗时是本文算法的 3 倍。HTJ2K-PCRD 算法耗时的主要原因是在于对每个位平面都作为候选截断位平面进行一次编码,虽然可获得更精细的率失真曲线,但是严重降低了编码效率。

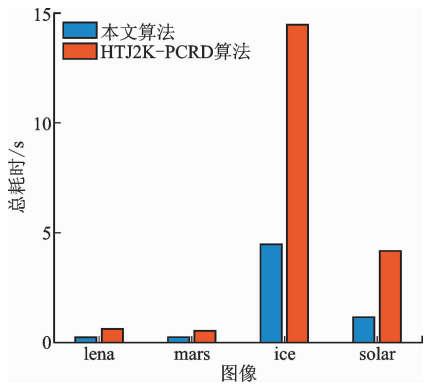


图 7 采用两种算法的总耗时比较

Fig. 7 A comparison of total running time between two algorithms

4 结 论

提出了一种高精度的自适应码率控制图像压缩 (HTJ2K-RPRD) 算法。针对不同图像的不同目标压缩码率,采用基于高斯统计模型和清理通道编码规则两种预测方法分别对小波高、低频子带数据进行码率预测,从而获得基础截断位平面。基于基础截断位平面和低一位平面的编码产生多个编码通道,并采用 PCRD-opt 算法实现精确的码率控制。

对不同位深、不同像素大小的图像上进行多种压缩比测试,结果表明提出的算法的码率控制精度可达 99.997%,实现了精确码率控制的图像压缩。

参考文献:

[1] GUO Hongwei, ZHU Ce, XU Mai, et al. Inter-block dependency-based CTU level rate control for HEVC [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2020, 66 (1): 113-126.

[2] BRUNS V, MARTÍNEZ-DEL-AMOR M Á, SPARENBERG H. Evaluation of GPU/CPU co-processing models for JPEG 2000 packetization [C] // 2017 IEEE 19th International Workshop on Multimedia Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-6.

[3] YEUNG Y M, AU O C. Efficient rate control for JPEG2000 image coding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2005, 15 (3): 335-344.

[4] 王超, 王炯. 一种有效的 JPEG2000 压缩率控制算法 [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2011, 37(1): 76-80.

WANG Chao, WANG Jiong. An efficient rate control scheme for JPEG2000 [J]. Journal of Donghua University(Natural Science), 2011, 37(1): 76-80.

[5] LI Qihu, REN Guoqiang, WU Qinzhong, et al. Rate pre-allocated compression for mapping image based on wavelet and rate-distortion theory [J]. Optik, 2013, 124(14): 1836-1840.

[6] VALSESIA D, MAGLI E. A novel rate control algorithm for onboard predictive coding of multispectral and hyperspectral images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6341-6355.

[7] CONOSCENTI M, COPPOLA R, MAGLI E. Constant SNR, rate control, and entropy coding for predictive lossy hyperspectral image compression [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(12): 7431-7441.

[8] VALSESIA D, MAGLI E. Fast and lightweight rate control for onboard predictive coding of hyperspectral images [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(3): 394-398.

[9] BARTRINA-RAPESTA J, MARCELLIN M W, SERRA-SAGRISTÁ J, et al. A novel rate-control for predictive image coding with constant quality [J]. IEEE Access, 2019, 7: 103918-103930.

- [10] CAI Chunlei, CHEN Li, ZHANG Xiaoyun, et al. Efficient variable rate image compression with multi-scale decomposition network [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2019, 29(12): 3687-3700.
- [11] HAN Chaoyi, DUAN Yiping, TAO Xiaoming, et al. Toward variable-rate generative compression by reducing the channel redundancy [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2020, 30(7): 1789-1802.
- [12] TAUBMAN D S, NAMAN A T, MATHEW R, et al. High throughput JPEG 2000 (HTJ2K): new algorithms and opportunities [J]. SMPTE Motion Imaging Journal, 2018, 127(9): 1-7.
- [13] TAUBMAN D. High performance scalable image compression with EBCOT [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(7): 1158-1170.
- [14] International Organization for Standardization, International Electrotechnical Commission. Information technology: JPEG 2000 image coding system: part 15 high-throughput JPEG 2000: 15444-15: 2019 [S]. Switzerland: Telecommunication Standardization Sector of ITU, 2019.
- [15] TAUBMAN D, NAMAN A, MATHEW R. FBCOT: a fast block coding option for JPEG 2000 [C]//Applications of Digital Image Processing XL 2017. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2017: 143-159.
- [16] 黄绪, 梁煜, 张为, 等. 高性能的图像无损压缩知识产权核设计 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(5): 102-108, 123.
HUANG Xu, LIANG Yu, ZHANG Wei, et al. Design of intellectual property core for high-performance image lossless compression [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(5): 102-108, 123.
- [17] TAUBMAN D, NAMAN A, MATHEW R. High throughput block coding in the HTJ2K compression standard [C]//2019 IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 1079-1083.
- [18] 张朔, 王霞. 一种基于FPGA与ADV212的图像压缩系统设计 [J]. 激光杂志, 2021, 42(5): 57-61.
ZHANG Shuo, WANG Xia. Design of image compression based on FPGA and ADV212 [J]. Laser Journal, 2021, 42(5): 57-61.
- [19] NAMAN A T, TAUBMAN D. Encoding high-throughput JPEG2000 (HTJ2K) images on a GPU [C]//2020 IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 1171-1175.
- [20] 李维, 任鹏, 赵凡, 等. 高效视频编码中帧内码率控制改进算法 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(4): 79-84.
LI Wei, REN Peng, ZHAO Fan, et al. A modified method for intra-coding rate control in high efficiency video coding [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(4): 79-84.
- [21] 孙文方, 赵亦工, 石自民, 等. 基于JPEG2000渐进过程数截断编码算法 [J]. 计算机工程, 2006, 32(20): 213-215.
SUN Wenfang, ZHAO Yigong, SHI Zimin, et al. Progressive passing-number truncation coding algorithm based on JPEG2000 [J]. Computer Engineering, 2006, 32(20): 213-215.
- [22] SHANBHAG N R, VERMA N, KIM Y, et al. Shannon-inspired statistical computing for the nanoscale era [J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(1): 90-107.
- [23] MALLAT S, FALZON F. Analysis of low bit rate image transform coding [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(4): 1027-1042.
- [24] KIVANC MIHCAK M, KOZINTSEV I, RAMCHANDRAN K, et al. Low-complexity image denoising based on statistical modeling of wavelet coefficients [J]. IEEE Signal Processing Letters, 1999, 6(12): 300-303.
- [25] NAMAN A T, TAUBMAN D. Decoding high-throughput JPEG2000 (HTJ2K) on a GPU [C]//2019 IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 1084-1088.
- [26] WATANABE O, TAUBMAN D. A matlab implementation of the emerging HTJ2K standard [C]//2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 491-495.
- [27] YEH P S, ARMBRUSTER P, KIELY A, et al. The new CCSDS image compression recommendation [C]//2005 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 4138-4145.

(编辑 刘杨)