

文章编号:1001-1595(2011)02-0204-05

一种率失真最优的 JPEG2000 码率自适应控制算法

李其虎^{1,2}, 任国强¹, 吴钦章¹, 韩文俊^{1,2}, 田 园^{1,2}

1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100149

An Adaptive Rate Control Algorithm for JPEG2000 Based on Optimal Rate-distortion

LI Qihu^{1,2}, REN Guoqiang², WU Qinzhang¹, HAN Wenjun^{1,2}, TIAN yuan^{1,2}

1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China

Abstract : In order to solve the problem that there are huge data in the high resolution of aerial image, a novel rate adaptive control algorithm is proposed based on JPEG2000 rate control algorithm. The coefficient of sub-band is modeled as Gaussian distribution after wavelet decomposition of the image and removing the lowest frequency. Each block bit rate of the actual encoding has been achieved based on rate-distortion theory when the overall rate is certain, and the bit rate is real-time truncated in the entropy coding. The sub-band of the lowest frequency has been coded without distortion. This algorithm achieves real-time bit rate truncation and reduces the amount of encoder's computation and memory. Experimental results show that the proposed image compression method is significantly better than the whole band is Gaussian distribution, in conditions that the compression rate is not too high (>0.5 bpp).

Key words : image coding; DWT; rate control; bit rate allocation;

摘 要: 为解决高分辨率航测图像数据量庞大问题,在研究 JPEG2000 码率控制算法的基础上,提出一种新的码率预分配自适应控制算法。对图像进行小波分解后,将去除最低频的子带小波系数建模为高斯分布。基于率失真理论推导出每个码块在总码率一定的情况下编码中实际应当贡献的码率,在熵编码时实时截止,而对最低频子带进行完整无失真编码。该算法实现码流的实时截断,减少编码器的计算量和存储空间,提高编码效率。试验结果表明,在图像压缩码率不是很高的情况下(>0.5 bpp),采用码率预分配自适应控制算法模型,图像压缩效果要明显好于对整个频带都默认为高斯分布时的效果。

关键词: 图像编码; DWT; 码率控制; 码率分配

中图分类号: TP391

文献标识码: A

基金项目: 国家 863 计划(2007AA802401)

1 引 言

JPEG2000 作为新一代的静态图像压缩标准^[1],比传统的 JPEG 标准有着更为优越的图像压缩性能,它可以在保持高压缩比的同时,获得高保真的图像质量,此外它还具有非常好的鲁棒性。JPEG2000 在图像压缩领域有着广泛的应用,尤其是在航测、遥感图像压缩领域应用更为广泛^[2-4]。但是标准的 JPEG2000 在编码时,采用的是 PCRD(post compression rate distortion)码率控制算法,该算法对计算量和存储量的需求非常大,并且在第二阶段将不必要的码率丢失,造成资源的很大浪费。如何减少编码器的运算量和存储器的数量,提高编码效率,减少算法的复杂度就成为了研究重点。这方面国内外学者作了大量的研

究工作,提出了一些算法。文献[5]提出一种 PSOT(priority scan with optimal truncation)算法。该算法在 PSNR(power signal-to-noise ratio)上和 JPEG2000 相近。PSOT 是在 PSRA(priority scanning rate allocation)算法基础上的一种改进。PSRA 主要依据码块在编码中比特平面越高,其所含的信息越重要的特点提出。PSRA 算法虽然在算法的计算量和存储空间上相比 JPEG2000 有所下降,但增加了率失真截取计算。在高比特平面优先编码的前提下,需要在所有码块中循环切换码块进行编码,这需要保存所有码块的上下文状态信息。增加了硬件系统实时实现运行的困难度。文献[6]提出的算法虽然也减少了编码器的运算量和存储量,但是随着压缩比的加大,码率的逐渐提高,编码的冗余也越来越

大,并且该算法增加了最小斜率的搜索计算量。

本文提出一种新的基于率失真最优码率自适应控制算法,其主要特点是根据小波分解图像后,不同频带系数的分布属性不同,将系数建立一种数学模型,依据该模型,可推导出每个码块在编码之前,应当贡献的实际码率。在进行位平面熵编码时,当每个码块的码率达到预先计算值时,则停止对其进行编码。待所有码块编码结束后,将其按照 JPEG2000 文件格式直接打包送出,无需率失真计算和率失真优化截取。

2 算法背景

JPEG2000 熵编码和码率控制都是在小波分解和量化的基础上针对每个码块进行单独的编码。当对一幅图像进行小波变换后,除最低频带系数具有很强相关性外,其他各个频带的系数都可以看作高斯分布^[7-9]。因此,在当系数满足某种分布后,寻找一种精确、有效的码率预测方法,成为问题的关键。

2.1 图像小波变换

传统的基于卷积的小波变换计算复杂度高,内存需求量大,不能满足实际工程需求。第二代小波(提升小波)的提出很大程度上克服了这些难题^[9]。本算法采用了一种适合硬件实现的 5/3 提升小波变换。当对一幅图像进行变换时,只需对行和列进行一次提升就可以实现一级变换。5/3 正向小波变换过程为

$$\begin{aligned} Y(2n+1) &= X_{\text{ext}}(2n+1) - \\ &\quad \left\lfloor \frac{X_{\text{ext}}(2n) + X_{\text{ext}}(2n+2)}{2} \right\rfloor \\ i_0 - 1 &\leq 2n+1 < i_1 + 1 \\ Y(2n) &= X_{\text{ext}}(2n) + \left\lfloor \frac{Y(2n-1) + Y(2n+1) + 2}{4} \right\rfloor \\ i_0 &\leq 2n < i_1 \end{aligned}$$

Y 是一维信号 X 的变换结果。式中, $X_{\text{ext}}(n)$ 是一维信号 X 的对称周期扩展; i_0, i_1 分别是 X 第一个样本和最后一个样本的序号。图像的二维小波变换是基于小波变换进行的^[10], 分别对图像的各行、各列各自进行一维小波变换便得到二维变换。变换后图像将分成四个频带, 分别为 LL 频带、HL 频带、LH 频带、HH 频带, 各个频带反映图像在不同方向上的特性。当进行下一级变换时, 只需要对 LL 频带按照提升算法进行变换即可。

2.2 标准 JPEG2000 的 PCRD 码率控制算法

JPEG2000 采用 PCRD 算法作为其码率控制算法。其核心思想是在给定的目标码率下, 寻找最佳截取斜率 λ_{opt} , 以 λ_{opt} 对每个码块进行率失真截取。然后将所得到的截断码流有效地组织起来, 得到最终 JPEG2000 标准码流。

PCRD 虽然确保了在给定的码率下使图像压缩质量最优, 但是它要对整个图像在第一块层编码(tier1)后才进行优化截断, 在第二层分层配装(tier2)阶段许多被截断的码流也在 tier1 阶段被编码。标准 JPEG2000 的 PCRD 算法增加了系统不必要的存储损耗和编码器的计算量, 使得系统实时性降低, 不易于硬件实现。

3 自适应码率控制算法

由上面内容阐述可知, 对一幅图像进行小波变换, 图像被分解成四个频带。由于最低频带具有很强的相关性, 故对最低频带进行无失真的编码, 在总码率一定的情况下, 用总码率减去 LL 频带所产生的码率, 将余下的码率按照下面的方法分配到每个码块中。

3.1 图像信息熵计算方法

图像熵的评价方法有很多, 采用最常用的 Shannon 公式来衡量。当系数的分布满足正态分布时, 由 Shannon 公式很易得出图像熵为 $H(X) = \frac{1}{2} \ln(2\pi\sigma^2 e)$, 设信源方差为 σ^2 , 其无偏估计值为 $\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2$, m_x 为其均值。在后面的推导过程中, 以及仿真试验中所用到的码块信息熵计算, 都是按照上述方法计算得出。

3.2 算法原理

设总的目标码率为 R_{max} , $R_{i,j}$ 为第 j 分解级中第 i 个码块应当分配的码率。 L 表示小波分解的级数, R_L 表示最低频子带编码产生的码率, 令

$$R'_{\text{max}} = \sum_{j=1}^{L-1} \sum_i R_{i,j} \quad (1)$$

相应地, 设均方失真总和为 D_{max} , 则 $D_{\text{max}} = \sum_{j=1}^{L-1} \sum_i D_{i,j} + D_L$, $D_{i,j}$ 为各子带的失真; D_L 为最低频带失真, 其值为 0。令

$$D'_{\text{max}} = \sum_{j=1}^{L-1} \sum_i D_{i,j} \quad (2)$$

考虑在总码率一定情况下, 失真最小, 并结合人眼视觉系统对不同空间频率敏感度不同的特性

$w_{i,j}^{[11]}$,以及不同频带的能量增益因子 $G_{i,j}^{[12]}$,将式(2)改写为

$$D'_{\max} = \sum_{j=1}^{L-1} \sum_i w_{i,j} G_{i,j} D_{i,j} \quad (3)$$

为了在限定性码率下,使得误差最小,引入拉格朗日因子 λ ,将问题转化为无约束问题,则目标函数为

$$L = D'_{\max} + \lambda R'_{\max} = \sum_i \sum_j (w_{i,j} G_{i,j} D_{i,j} + \lambda R_{i,j}) \quad (4)$$

依据上面假设,及 Shannon 率失真编码理论^[13],每个码块的率失真函数可以写为

$$R_{i,j} = H_{i,j}(x) - \frac{1}{2} \log_2(2\pi e D_{i,j}) \approx H_{i,j}(x) - \frac{1}{2} \log_2(17 D_{i,j}) \quad (5)$$

$H_{i,j}(x)$ 表示为第 j 分解级中第 i 个码块的信息熵,将式(5)改写 $D_{i,j}$ 为 $R_{i,j}$ 的函数,则有

$$D_{i,j} = \frac{1}{17} 2^{2(H_{i,j}(x) - R_{i,j})} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4),等式两边对 $R_{i,j}$ 求导得

$$R_{i,j} = H_{i,j}(x) + \frac{1}{2} \log_2(w_{i,j} G_{i,j}) - \frac{1}{2} \log_2\left(\frac{17}{2} \lambda \log_2(e)\right) \quad (7)$$

令 $\lambda' = \frac{1}{2} \log_2\left(\frac{17}{2} \lambda \log_2(e)\right)$,则式(7)变为

$$R_{i,j} = H(x)_{i,j} + \frac{1}{2} \log_2(w_{i,j} G_{i,j}) - \lambda' \quad (8)$$

式(8)即为每个码块在编码中实际应当贡献的码率。将式(8)累加得

$$\sum_i \sum_j (H_{i,j}(x) + \frac{1}{2} \log_2(w_{i,j} G_{i,j})) - \sum_i \sum_j R_{i,j} = \sum_i \sum_j \lambda'$$

设码块数为 N ,结合式(1)可得

$$\lambda' = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j (H_{i,j}(x) + \frac{1}{2} \log_2(w_{i,j} G_{i,j})) - \frac{1}{N} R'_{\max} \quad (9)$$

此时式(8)中的每个参数即可算出,故每个码块的码率也可以得出。从式(8)可以看出,如果 λ' 过大, $R_{i,j}$ 可能会出现负值。由信息论理论解释为,当某个码块的信息量无法满足实际要求的信息量时,在理论上只能提供一个负的信息量,以弥补其不足的信息量。所以该码块的实际贡献码率为 0,该码块的码率贡献就应由其他码块来平均分配。因此实际中必须进行反复修正。该算法具

体步骤描述如下:

步骤 1,对图像预处理、小波变换、量化,对 LL 频带进行无失真编码。

步骤 2,用总码率减去由 LL 频带产生的码率,计算除去 LL 频带外其余子带熵,以及各个码块的 $H(x)_{i,j} + \frac{1}{2} \log_2(w_{i,j} G_{i,j})$ 值。根据式(9)算出 λ' 。

步骤 3,对于每个码块按照式(8),计算每个码块的码率。统计所有码率小于 0 的码块,将其码率归为 0,并累加码率为负的和 S ;统计所有正码率的码块数量 M ,对所有码率为正的码块都减去 $(-S/M)$,直到所有码块的码率为非负。

步骤 4,对各个码块进行位平面熵编码,当码率达到预先分配的码率时截止编码。

步骤 5,结束编码,按照 JPEG2000 文件格式打包输出。

4 试验结果与分析

试验采用分辨率大小为 2048×2048 的某地城区(city)航测图像进行对比,图像经过 4 级 5/3 小波变换,码块大小为 32×32 ,分别采用本文码率控制算法(算法 A)、标准 JPEG2000 的 PCRD 算法(算法 B),以及将变换后所有子带系数都默认为高斯分布时采用本文码率控制算法(算法 C)。在不同压缩比情况下从图像编码时间和 PSNR 两个方面对这三种算法进行比较。在码率不是很高的情况下(>0.5 bpp)本文提出的码率控制算法图像压缩质量比 JPEG2000 略低(0.4 db),人眼不能区分出任何差别,但是比 C 算法明显要好。图 1 是城区图像在压缩码率为 0.5 bpp 时 A、C 两种码率控制算法的解压缩图像。取出图像中的某一小块区域,对比原始分辨率大小下的图像质量,人眼能够明显地看出图像间的差别。

在实现过程中,存储量的大小不可能随机分配,因此对于标准的 JPEG2000 算法,需要按照码块的总数与单个码块所提供的最大码率来预分配存储空间,存储量需求巨大。故存储空间分配原则可以描述为码块总数越大,存储空间就会越多。本文的算法是对独立码块实时编码并直接打包输出,因此只需预分配一个码块的存储空间即可。本文算法的存储量减少率可以用式(10)计算得出。

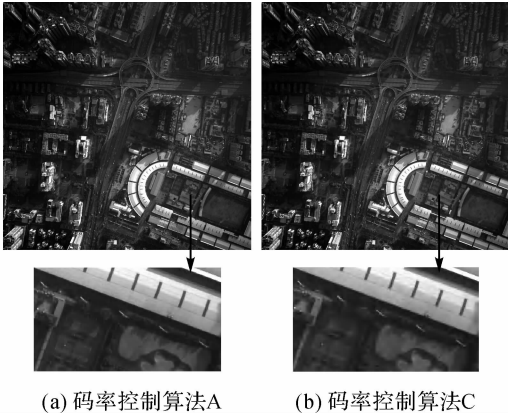


图 1 码率在 0.5 bpp 下图像质量比较
Fig. 1 Image quality comparison in 0.5 bpp of the rate

存储量减少率 = $\frac{\text{码块总数} - 1}{\text{码块总数}}$ (10)

由图 2 可见,本文算法相对于标准 JPEG2000 的存储量减少是非常巨大的。算法的计算量主要由两部分组成,一是 tier1 部分的三通道扫描位平面编码,二是 tier2 部分的率失真斜率计算和率失真优化截取计算。本文算法无需率失真斜率计算和率失真优化截取计算。而 tier1 部分的编码计算量大小取决于编码通道数,所以本文算法 tier1 编码计算量相对 JPEG2000 减少量的百分比可以用式(11)计算

tier1 编码计算减少量 = $\frac{\text{通道数}_{\text{JPEG2000}} - \text{通道数}_{\text{proposed}}}{\text{通道数}_{\text{JPEG2000}}}$ (11)

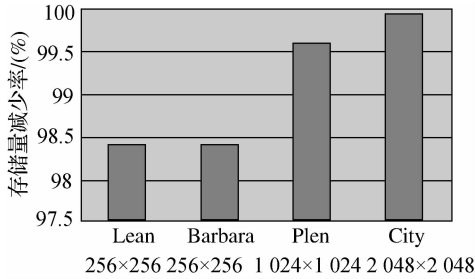


图 2 本文算法相对标准算法的存储量减少率
Fig. 2 Memory decrease percent of proposed algorithm relative to JPEG2000

图 3 为三种算法的压缩速度对比曲线。从图中可以看出标准 JPEG2000 所采用的 PCD 码率控制算法编码速度几乎不随压缩比大小改变而变化。而本文码率控制算法和 C 算法编码速度在压缩比发生变化时,会随着压缩比的提高而加快。这是因为 A 和 C 两种码率控制算法都是在编码

前预先给每个码块分配相应码流,确定其截断点,当编码过程中达到需要的码率后立即停止对其进行编码,从而使得编码时间、存储数据也相应地减少,致使速度也会随着压缩比的增大而变快。

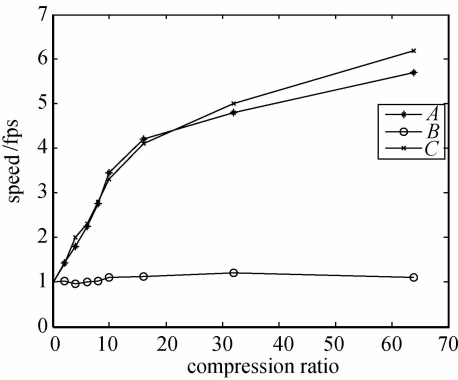


图 3 三种码率控制算法编码速度比较
Fig. 3 Coding speed comparison of three bit code control algorithm

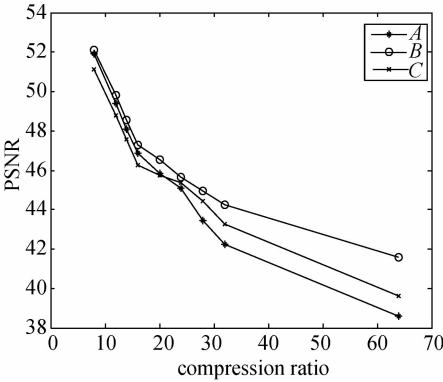


图 4 三种算法图像质量比较
Fig. 4 Image quality comparison of three algorithm

图 4 是三种算法在相同压缩比情况下图像质量比较曲线图(PSNR)。从图中可以看出当压缩比不高时,本文码率控制算法和标准算法几乎一致,但是比 C 算法明显要好。而在低码率情况下,本文压缩算法效果不明显。造成这种情况的原因有两点:一、当压缩比较高时,压缩后的码率可能会小于最低频提供的码率,则完全忽略了其他频带提供的信息量,致使图像质量相对下降,解决这个问题一个途径是可以增加小波分解的级数来降低最低频提供的码率;二、整个算法的推导都是基于将小波分解后的图像系数,在去除最低频的子带后建模为高斯分布这一前提下进行推导得出最终结论。所以解决这个问题的关键是

必须针对图像的特点建立更为近似的模型,从而得到更为精准的码率分配。

5 结 论

本文提出的算法首先对图像进行小波分解,将除去最低频的系数建模为高斯分布,基于信息论理论推导出每个码块在编码中实际贡献的码率。与标准算法相比,在保证图像质量的前提下,算法有效地减少了编码器的计算量和存储量,提高了编码效率。与将所有子带系数都建模为高斯分布相比,采用本文算法在图像质量上有了比较大的提高。试验结果表明本文码率控制算法,码率分配精准,算法复杂度低,适用于高质量图像压缩的高速硬件实现。

参考文献:

- [1] TAUBMAN D. High Performance Scalable Image Compression with EBCOT[J]. IEEE Trans Image Processing, 2000, 9(7): 1158-1170.
- [2] WANG Jing, JIANG Gangwu. Researching and Realization of Quick Compression Method Aimed at the Non-topology Vector Data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(2): 173-177. (王静, 江刚武. 无拓扑矢量数据快速压缩算法的研究与实现[J]. 测绘学报, 2003, 32(2): 173-177.)
- [3] TRENSCHEL T, BRETSCHNEIDER T, LEEDHAM G. Using JPEG2000 on-board Mini-satellites for Image-driven Compression[C]// 2003 IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium Proceedings. Toulouse: IGARSS 2003: 2033-2035.
- [4] NICHOLSON D, KAJFASZ P. An Effective Satellite on-board JPEG2000 Image (De)Coding Implementation Based on PIRANHA Systematic-DSP[C]// Proceedings of 20th AIAA International Communication Satellite Systems Conference and Exhibit. Montreal: AIAA, 2002: 1-6.
- [5] YEUNG Y M, AU O C. Efficient Rate Control for JPEG2000 Image Coding[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 2005, 15(3): 335-344.
- [6] KIM T, KIM H M, TSAI P S. Memory Efficient Progressive Rate-distortion Algorithm for JPEG2000[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 2005 15(1): 181-187.
- [7] XU Yong, XU Zhiyong, ZHAO Rujin, et al. Pre-coding RDo Rate Allocation Algorithm for JPEG2000[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 10(35): 81-85. (徐勇, 徐智勇, 赵汝进, 等. JPEG2000 的一种编码前码率预分配算法[J]. 光电工程, 2008, 10(35): 81-85.)
- [8] FRANCESC A L, JOAN S S, JOSE LINO M P, et al. Efficient Rate Control for JPEG2000 Coder and Decoder[C]// Proceedings of the Data Compression Conference. Snowbird: IEEE, 2006: 282-291.
- [9] SWELDENS W. The Lifting Scheme: A Construction of Second Generation Wavelets [J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1997, 29(2): 511-546.
- [10] WANG Xiangyang, YANG Hongying. The Embedded Zerotree Wavelet Image Coding Based on Fast Lifting Wavelet Transform and Multi-threshold. [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(4): 333-338. (王向阳, 杨红颖. 基于快速提升小波变换的多阈值嵌入零树小波图像编码算法[J]. 测绘学报, 2002, 31(4): 333-338.)
- [11] TANG Yihua, WANG Zhenhua, TIAN Jinwen, et al. Multi-resolution Wavelet Image Coder with Optimal Ratedistortion [J]. Journal of Image and Graphic, 2004, 8(9): 927-933. (谭毅华, 王振华, 田金文, 等. 率失真最优的多分辨率小波图像压缩方法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 8(9): 927-933.)
- [12] TAUBMAN D, MICHEAL M. JPEG2000 Image Compression Fundamentals, Standards and Practice[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001: 130-135.
- [13] JIANG Dan. Information Theory and Coding[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2004: 255-263. (姜丹. 信息论与编码[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004: 255-263.)
- [14] LEI Jie, KONG Fanqiang, WU Chengke, et al. Hardware-oriented Rate Control Algorithm for JPEG2000 and its VLSI Architecture Design[J]. Journal of Xi Dian University, 2008, 4(35): 645-648. (雷杰, 孔繁强, 吴成柯, 等. 适合硬件实现的 JPEG2000 码率控制算法及其 VLSI 结构设计[J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 4(35): 645-648.)
- [15] WANG Xiangyang, YANG Hongying. A New Wavelet Packet Coding Algorithm for Texture-rich Images[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 33(3): 239-243. (王向阳, 杨红颖. 一种基于小波包变换的纹理图像压缩算法[J]. 测绘学报, 2004, 33(3): 239-243.)

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2010-02-23

修回日期: 2010-09-06

第一作者简介: 李其虎(1983—),男,博士生,研究方向为小波理论与高分辨率测绘图像编码技术。

First author: Li Qihu(1983—), male, PhD candidate, majors in wavelet theory and high resolution image coding technique.

E-mail: lqihu07@126.com