

基于图像边缘度的零树压缩最优分解层的选择

张旗¹⁾ 梁德群²⁾

¹⁾(大连海事大学自动化与电气工程学院,大连 116026) ²⁾(大连海事大学信息工程学院,大连 116026)

摘要 在研究零树图像编码方案的基础上,分析了被压缩图像的空间冗余度(称为图像边缘度)与零树压缩结果的关系,提出了零树压缩存在小波最优分解层的概念,给出了不同压缩比、不同小波分解层与不同类型图像的零树压缩结果的关系,并对相应的压缩时间进行了分析。综合实验结果表明:在进行高比特率压缩时,提倡采用三层小波分解;而进行低比特率压缩时,应采用四层小波分解。这一结论可作为进一步研究具有自适应能力的改进零树算法的基础。

关键词 图像边缘度 零树压缩 小波分解层

中图分类号: TP391.4 TN919.81 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2005)12-1491-07

The Optimal Selection of Decomposition Level in EZW Based on Edge Active Measure

ZHANG Qi¹⁾, LIANG De-qun²⁾

¹⁾(School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026)

²⁾(School of Information Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026)

Abstract Based on the investigation of EZW, the relationship between space redundancy(scaled by edge active measure) of the compressed image and the result of EZW coding is analyzed, and the concept that there exists an optimal wavelet decomposition level in EZW is proposed. The relationship in EZW coding between different compression ratio, different decomposition level and different images is reported. The executing time is also used as a factor for selecting decomposition level. The experimental results indicate that the three-level decomposition in EZW should be adopted for high compression ratio and the four-level decomposition is optimal for low ratio. The results provide a basis for further research on adaptive EZW algorithms.

Keywords image edge active measure, EZW(embedded zerotree wavelets), wavelet decomposition level

1 引言

在基于小波变换的图像压缩方案中,嵌入式零树小波 EZW(embedded zerotree wavelets)^[1]编码很好地利用了小波系数的特性,使得输出的码流具有嵌入特性。该压缩方案中,对小波系数的重要性排序和分级量化的思想被许多编码算法所采用。近年来,在对 EZW 改进的基础上,提出了许多新的性能更好的算法,如多级树集合分裂算法(SPIHT: set partitioning in hierarchical trees)^[2,3]等等。然而,在大部分基于 EZW 压缩算法研究和性能分析中,往往

忽略了以下几方面因素:(1)不同图像本身存在的空间冗余程度(含边缘的多少)对压缩结果的影响;(2)不同的小波分解层对压缩结果的影响;(3)压缩时间与上述两种因素之间的关系等。本文在研究零树图像编码方案的基础上,分析了空间冗余程度不同的图像与 EZW 压缩结果的关系;不同小波分解层对压缩结果的影响以及压缩时间与各因素的关系。

2 图像压缩与图像边缘度

通常,图像可看成是在一个规范正交基 $B = \{g_m\}_{0 \leq m < N^2}$ 下分解的确定性信号 f ^[4]

收稿日期:2003-11-20;改回日期:2005-06-07

第一作者简介:张旗(1960~),女,教授。2004年于大连海事大学获通信与信息系统专业博士学位。主要研究方向为小波在图像处理中的应用、图像检测、模式识别。E-mail:zhqi@newmail.dlmu.edu.cn

$$f = \sum_{m=0}^{N^2-1} f_B[m] g_m, f_B[m] = \langle f, g_m \rangle \quad (1)$$

变换编码量化所有系数并重构可以得到:

$$\tilde{f} = \sum_{m=0}^{N^2-1} Q(f_B[m]) g_m \quad (2)$$

用 R 记编码 N^2 个量化系数 $Q(f_B[m])$ 所用的比特数, 则编码失真为

$$d(R, f) = \|f - \tilde{f}\|^2 = \sum_{m=0}^{N^2-1} |f_B[m] - Q(f_B[m])|^2 \quad (3)$$

设 $\bar{R} = R/N^2$, 则衡量压缩结果的峰值信噪比可表示为

$$\text{PSNR}(\bar{R}, f) = 10 \log_{10} \frac{N^2 \times 255^2}{d(\bar{R}, f)} \quad (4)$$

可见, 图像的压缩结果主要与两个因素有关, 也就是说, 分析一个压缩算法的性能好坏, 不仅要研究不同比特率 \bar{R} 下的压缩结果如何, 还应对图像本身 f 对压缩结果的影响进行分析与探讨。这一点已经受到广大学者的关注, 如 Mallet 将图像分成两大类, 将大部分图像归为“有界变差图像”, 而含纹理较多的图像称为“更不规则图像”^[4], 并指出“有界变差图像”的压缩误差要比“更不规则图像”的压缩误差小的结论。在许多研究图像压缩算法的研究中, 也提出了“压缩性能与图像的特性密切相关”的观点^[5], 但这些研究并没有给出不同的图像类型的定量描述, 也

没有对图像类型与压缩结果的关系进行深入的讨论。

在前期的研究中已对面向图像压缩的图像分类进行了研究^[6], 即在研究了图像小波高频系数的基础上, 提出了面向图像压缩的图像分类的概念, 利用该分类结果可对图像的压缩结果进行预测, 也可以作为分析图像对 PSNR 影响的客观度量。分类的基本原理如下:

原图像分为 $P \times Q$ 个块 (P, Q 分别为水平方向与垂直方向的子图像块的个数), 并根据平滑区、边缘区和纹理区所含块内活动系数的多少定义了第 (m, n) 个图像块的边缘活动度 (edge active measure) $E_{m,n}$, 并在此基础上考虑小波分解的多尺度下小波高频系数, 就可得到用来描述整幅图像边缘程度的图像边缘度为 (以 3 个分解尺度为例):

$$E = \frac{1}{P \times Q} \sum_{m=1}^P \sum_{n=1}^Q \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^3 E_{m,n}^h + \sum_{i=1}^3 E_{m,n}^v \right) \quad (5)$$

其中, $E_{m,n}^h$ 为三尺度下水平方向 (m, n) 子图像的边缘活动度阵, 该阵由水平方向的 $E_{m,n}$ 组成, $E_{m,n}^v$ 为三尺度下垂直方向 (m, n) 子图像块的边缘活动度阵, 该阵由垂直方向的 $E_{m,n}$ 组成。实验结果表明, 各类图像可按含边缘的多少这一本质属性进行分类, 且分类的结果与人的视觉相吻合^[6]。图 1 为部分实验图像。表 1 为相应的分类结果。显然这种分类与目

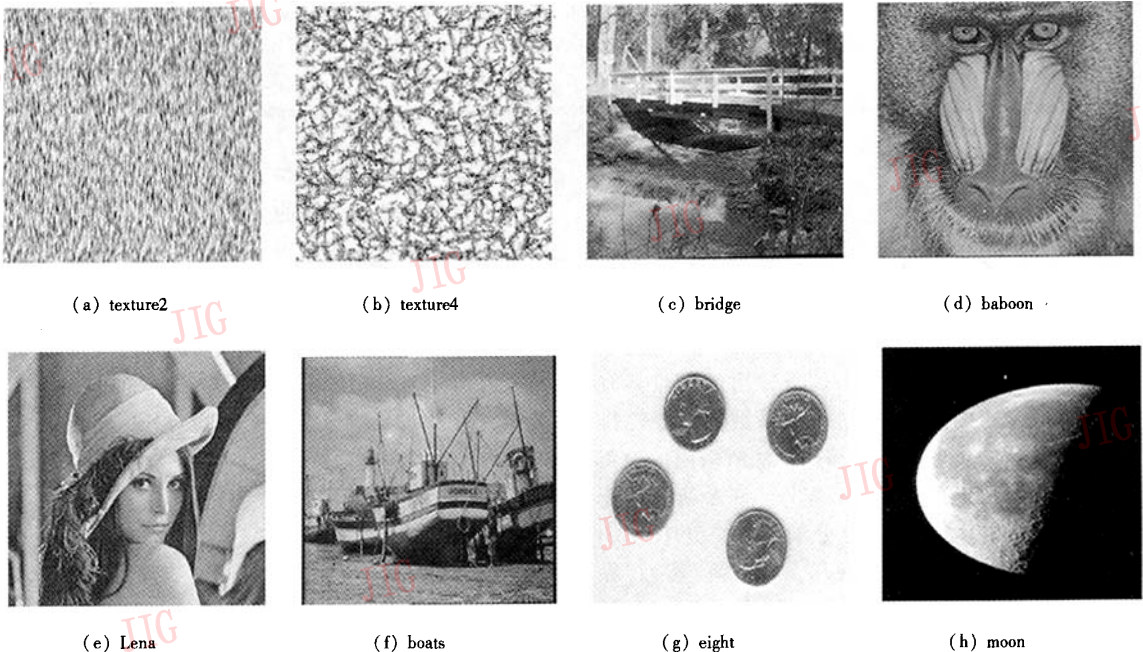


图 1 实验图像例

Fig. 1 Some test images

表 1 图像类别与图像边缘度
Tab.1 Image classes and image EMA's

图像类别	图像特点	边缘度范围	图像例(图像边缘度)	
I 类边缘图像	纯纹理图像	>0.6	texture2(0.7735)	texture4(0.6581)
II 类边缘图像	纹理/边缘图像	0.6~0.4	bridge(0.5530)	baboon(0.5405)
III 类边缘图像	纹理/边缘/平滑图像	0.4~0.2	lena(0.2945)	boats(0.2920)
IV 类边缘图像	边缘/平滑图像	0.2~0.1	moon(0.1895)	eight(0.1200)

前图像研究领域中的“基于内容的图像检索与分类”不同,图像的边缘度是各类图像本质属性的描述,与图像的内容无关。实验结果还表明:图像的类型不同,压缩结果也相差很大。边缘度较大的图像(如纹理图像),压缩效果较差,而边缘度较小的图像(含平滑较多的图像),压缩效果较好。对于零树小波编码算法(EZW),则需要进一步研究小波分解层数与图像边缘度的关系及对压缩结果的影响。

3 嵌入式零树小波编码算法 EZW

零树编码算法(EZW)是目前公认的效率最高的小波系数处理算法^[4,7],可以在相同的压缩倍数下得到最好的复现图像质量,而且其嵌入式编码可以非常精确地控制压缩倍数。

图 2 是图像的小波树结构(假设图像经过三级小波分解)。小波系数的分布特点是越往低频子带系数值越大,包含的图像信息越多,如图中的 LL_3 子带。而越往高频子带系数值越小,包含的图像信息越少。由于低频子带反映的是图像的低频信息,对视觉比较重要,而高频子带反映的是图像的高频信息,对视觉来说不太重要,因此可以对相同数值的系数先选择较低频系数的重要比特,后选择较高频系数的重要比特。

EZW 算法利用小波系数的特点较好地实现了图像编码的嵌入功能,主要包括以下 3 个过程:零树预测,用零树结构编码重要图以及逐次逼近量化。EZW 方法将小波分解系数分为 5 类:无意义系数、零树根、正的有意义系数、负的有意义系数和孤立零点。在设定一个阈值 T 后,开始对系数扫描,扫描先从最低频的 LL_1 开始,然后按 HL_1, LH_1, HH_1 秩序扫描,再转向下一层子带,形成含有以上 5 类元素的表。然后将阈值减半,对尚未判定为有意义的系数重复上述扫描过程。根据压缩比的要求可随时终止

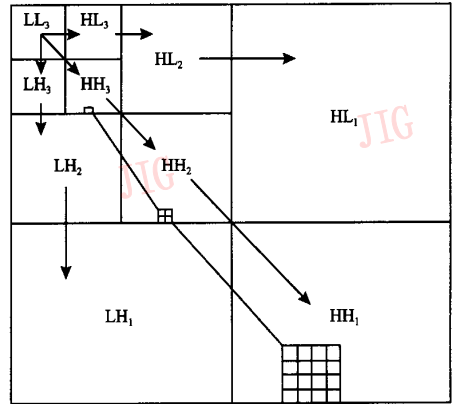


图 2 图像的小波树结构

Fig.2 The zerotree of wavelet

编码过程。

可见,EZW 编码方法的压缩效益主要来自于引入零树的概念,即利用一个符号“零树根”不仅对本系数而且对以它为根的整个子树上的所有系数进行编码。因此当这种零树根数目愈多而且所处的级别愈高时,这种编码方法的压缩率也就愈高。

4 EZW 算法中基与分解层数的选择

如同上述,小波对图像分解的过程就是用子带滤波器对图像信号卷积的过程。一层小波分解就意味着小波的低、高通滤波器分别对图像信号的行和列进行一次滤波。因此,任何实正交的小波对应的滤波器组都可以实现图像的分解与合成。但是并不是任何分解都能满足要求,同一幅图像,用不同的小波基进行分解所得到的压缩效果是不一样的。EZW 算法希望图像经小波分解后,得到的 3 个方向上细节分量具有高度的局部相关性,而整体相关性被大部分甚至完全解除。因此对小波基的选取应考虑以下因素^[4]:

(1) 小波基的正则性阶数和图像数据压缩效果的关系。小波变换要求滤波器具有正则性,正则性是函数光滑程度的一种描述,一般情况下,正则性越强,数据压缩效果越好;

(2) 待处理图像与小波基的相似性;

(3) 小波函数的能量集中特性;

(4) 小波变换的分解层数(变换级数)与图像数据压缩的关系;

(5) 由于在图像处理中数据量特别大,所以不能片面考虑追求高压缩比,而应该综合考虑压缩效率和复杂程度。

从统计数据还可以得到以下结论^[8,9]:(1)随着分解层数的增加,图像能量越来越集中;(2)分解层数越多,无意义系数的数目越少,而幅值(绝对值)越大,也就是说,小波分解层数也是影响 EZW 编码的计算复杂性和重构误差的重要因素。因此,采用 EZW 方法进行图像压缩,只考虑 \bar{R} 、 f 是不够的,还应研究压缩结果与小波分解层 L 的关系。即式(4)应进一步修改为

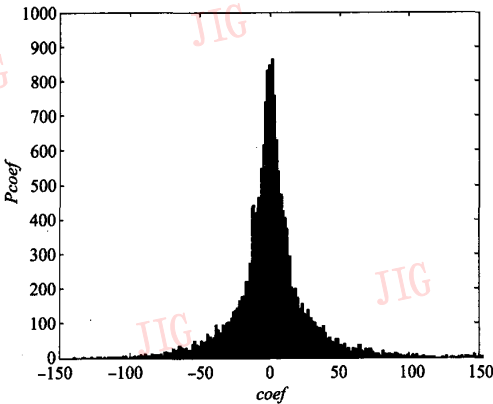
$$PSNR(\bar{R}, f, L) = 10 \log_{10} \frac{N^2 \times 255^2}{d(\bar{R}, f, L)} \quad (6)$$

可以证明^[4],类似 EZW 这样的嵌入式变换编码的失真率实质上依赖与排序后的系数怎样衰减。

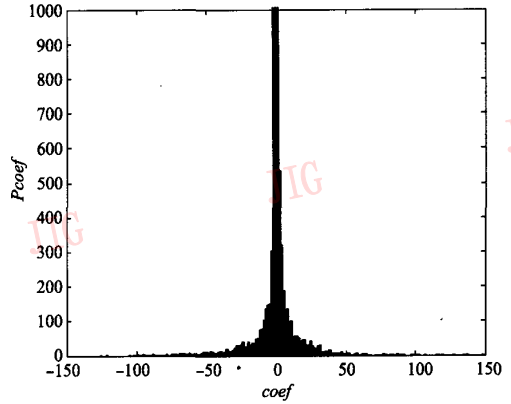
设 $f_B[k]$ 是 f 在正交基 B 下其幅度排序为 k 的分解系数。在信号集合 Θ 上,信号系数的衰减由

$$s(\Theta) = \sup \{s: \exists C > 0, \forall f \in \Theta, |f_B[k]| \leq Ck^{-s}\} \quad (7)$$

刻画。如边缘(或纹理)较少的图像其小波系数的衰减速度比边缘(或纹理)较多的图像小波系数衰减的快^[4]。图 3 给出的图像 Baboon 和 Lena 的小波系数直方图可以表示其衰减是有区别,图中的横坐标为系数幅值用 $coef$ 表示,纵坐标为系数中具有某一幅值的系数的个数与总系数个数比用 $Pcoef$ 表示,它给出了不同小波幅值系数出现的概率。所谓图像的优化变换编码,就必须选择产生尽可能多零化系数的小波基。而在小波基和比特率确定的前提下,根据图像系数排序后的衰减程度调节适当的分解层数,可以得到更好的压缩效果,既能保证较高的 PSNR 值,又不必花费太多的时间。另外,随着小波分解层数的变化,在同一个压缩比特率的条件下,小波分解后零化系数的个数(占总数的百分比)也在发生变化。对于不同类型的图像,这种变化也是不一样的,最终影响到算法的时间。因此算法所需的时间 t 也应作为衡量压缩算法性能的重要因素^[9]。综合考虑 EZW 算法的最优压缩性能,应进一步研究 PSNR 与 4 个元素 (\bar{R}, f, L, t) 的关系,以得到较优的组合。



(a) 图像 Baboon 小波 HH 系数直方图



(b) 图像 Lena 小波 HH 系数直方图

图 3 图像小波系数直方图

Fig. 3 The histogram of HH subband

5 实验结果

为了验证上述分析的正确性,以 2.4GHz Pentium IV CPU、256MB 内存、60GB 硬盘和

Window2000 操作系统为实验平台,使用 Matlab 编程实现了基本零树压缩功能,进行了大量的实验。为了使实验结果具有普遍性,对大量 256 级灰度图像(大小均为 512 × 512)进行了反复实验,得到了各类图像在不同条件下与压缩结果的关系。这里只给

出部分常用图像(见图 1)的实验结果。小波基采用的是常用的 D9/7 双正交小波基,它消失矩较高,可以保证分解后的能量能够更好地集中到低频部分,使匹配信息的损失尽可能降低^[7]。

实验就以下几个方面进行:

(1)不同类型的图像与 PSNR 的关系,即图像边缘度对零树压缩结果的影响;

(2)不同的小波分解层数 L 与 PSNR 的关系;

(3)各相关因素对压缩时间 t 的影响。

图 4 为不同压缩比下,不同类型图像与小波分解层数对压缩结果的影响,图中自下而上的曲线分别对应不同的图像。可以看出:(1)不同类型的图像与压缩结果密切相关,对于 1 类图像(纹理图像见表 1)无论在大比特率还是小比特率的情况下,其压缩结果 PSNR 都远远小于四类图像(含平滑区较多的图像),其差值达 15dB 左右,这与以前的研究结果是一致的^[6];(2)小波的分解层数对压缩结果的影响也很大,层数越少,效果越差。三层分解可以得到较好的结果。因而大部分研究算法都是基于小波的三层分解。但仔细观察图 4 可以发现,四层小

波分解可以使 PSNR 有 5 ~ 10dB 的提高,且对于 IV 类图像提高的幅度要高于 I 类图像,而对于五、六层小波分解则 PSNR 变化不大。

图 5 为不同压缩比下,不同小波分解层数与压缩时间的关系,图中的 8 条曲线分别与 4 类 8 个图像相对应。可以看出:(1)在压缩比较小时(如比特率为 1bpp),压缩时间与图像类型、分解层数关系较大,对于含纹理较多的图像(texture2, texture4:边缘度大于 0.6),压缩时间随分解层增加而增加;而对于中等边缘度的图像(Baboon, boats, Lena:边缘度大于 0.2 小于 0.6),压缩时间在分解层数为二层时达到最小;而平滑区较多的图像(moon, eight:边缘度小于 0.2),压缩时间则具有某些不确定性;(2)压缩比较大时(如比特率为 0.125bpp),压缩时间与分解层数、图像类型的关系不大,因而变化范围趋于减小,在分解层数为三层或四层时,压缩时间几乎相同。对同样的测试图像采用改进的 SPIHT 方法,也可以得到同样的结果。

通过反复实验,可以得出如下结论:

(1)当给定压缩参数 (R, L) 后,恢复图像的

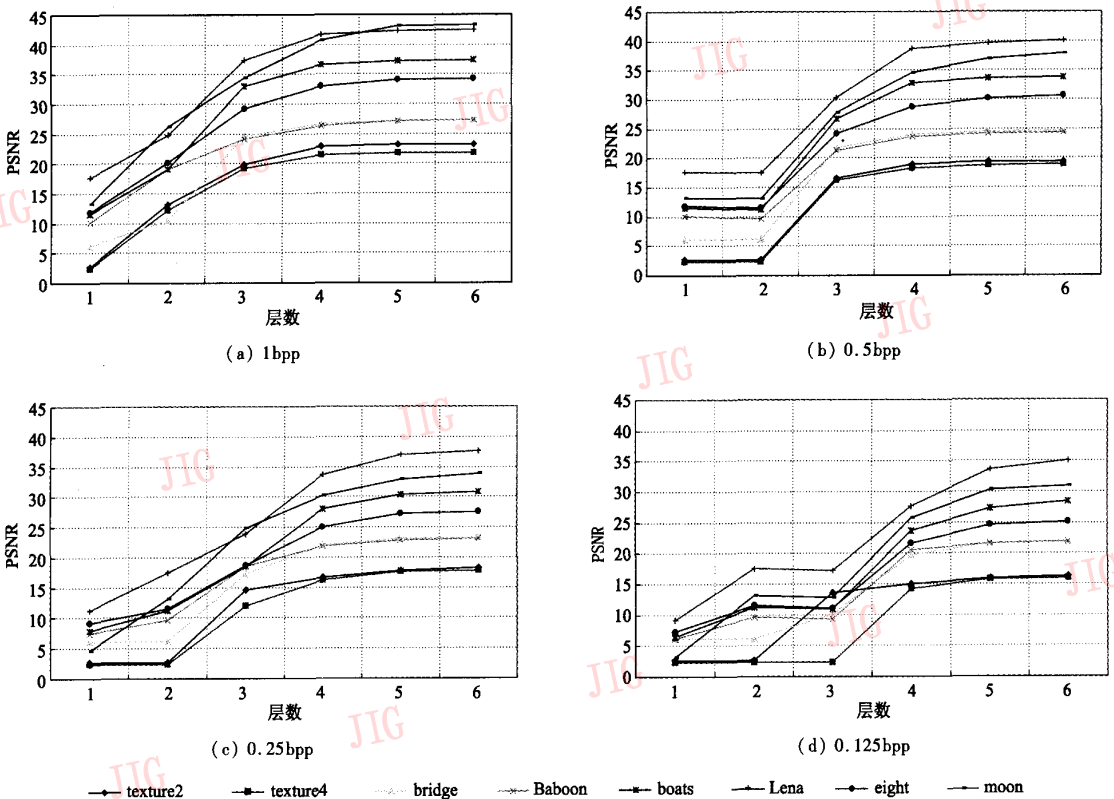


图 4 压缩比、图像类型与分解层数对压缩结果的影响

Fig. 4 The influencing factor to compress ratio

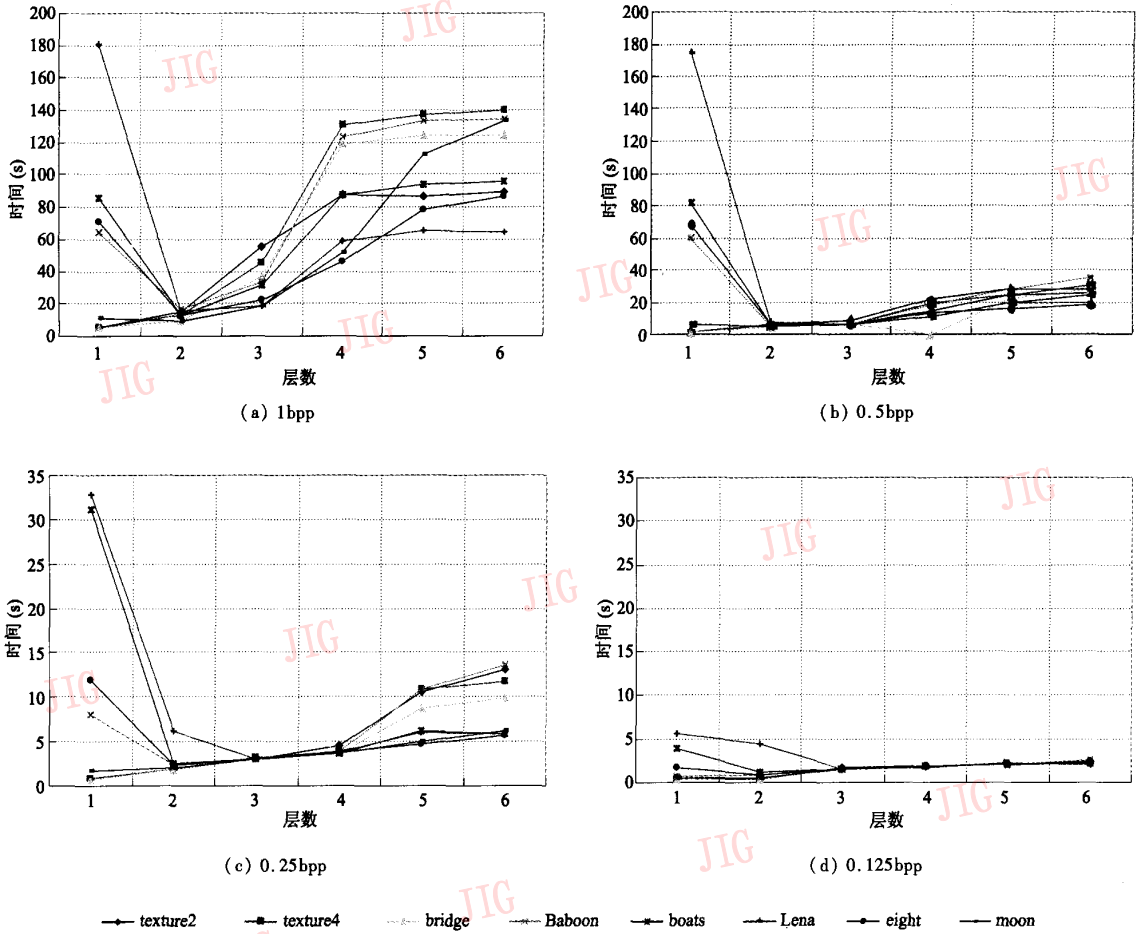


图 5 压缩比、图像类型与分解层数对压缩时间的影响

Fig. 5 The influencing factor to compress time

PSNR 可以预测,且与图像类型有关;

(2) 压缩性能(恢复图像的质量和压缩时间等)不仅与小波分解层数有关,而且与图像类型有关;

(3) 在压缩过程中,EZW 算法存在最优的小波分解层数。它的选取过程是在考虑图像的类型(图像本质属性的客观度量——图像边缘度)和压缩时间的基础上,综合考虑多种因素(\bar{R}, f, L, t)的过程。

6 结论

提出了零树压缩存在小波最优分解层的概念。分析了在对图像基本属性进行客观描述的基础上,进一步确定 EZW 算法的最优分解层是非常必要的。综合实验结果表明:在进行高比特率压缩时,提倡采用三层小波分解;而进行低比特率压缩时,应采用四层小波分解。这样既能保证一定的图像质量,也可

以不需要较多的时间代价。当然在具体使用时,还可以根据图像类型和压缩应用的要求,选则适当的小波分解层,以得到满意的压缩效果。这一结论可作为进一步研究具有自适应能力的改进零树算法的基础。

参考文献 (References)

- 1 Shapiro J M. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3445 ~ 3462.
- 2 Said S, Pearlman W A. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Transactions on Circuits System for Video Technology, 1996, 6(6): 243 ~ 250.
- 3 Zandi A, Allen J, Schwartz E, et al. CREW : Compression with reversible embedded wavelets [A]. In: Proceedings of IEEE Data Compression Conference [C], Snowbird, UT, USA, 1995: 212 ~ 221.

- 4 Mallat Stephane. A Wavelet Tour of Signal Processing (Second Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Machine Industry, 2002:429. [Mallat Stephane 著. 信号处理的小波导引(第2版) [M]. 杨力华等译. 北京:机械工业出版社,2002:429.]
- 5 Yuan Jing, Feng Qian-jin, Chen Wu-fan, et al. A new fast fractal coding approach based on wavelet decomposition[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(4):392~397. [袁静,冯前进,陈武凡等. 基于小波分解的快速分形图象压缩算法[J]. 中国图象图形学报,2003,8(4):392~397.]
- 6 Zhang Qi, Liang De-qun, Li Wen-ju. Image classification for image compression and compression result forecast[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(4):409~414. [张旗,梁德群,李文举. 面向图象压缩的图象分类及压缩结果预测[J]. 中国图象图形学报, 2003,8(4):409~414.]
- 7 Conben A, Daubechies I, Feauveau J C. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets [J]. Communication of Pure and Applied Mathematics, 1992, 45(5):485~560.
- 8 Cheng Zheng-xing. Wavelet Analysis Arithmetic and Application [M]. Xi'an: Publishing House of Xi'an JiaoTong University, 1998:184~203. [程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,1998:184~203.]
- 9 Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. Digital Image Processing (Second Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electron Industry, 2002:491~492. [冈萨雷斯. 数字图像处理(第2版)(英文版)[M]. 北京:电子工业出版社,2002:491~492.]