

# 基于小波子带统计特性的图像量化及质量可分级编码研究<sup>\*</sup>

刘 丹<sup>1</sup> 王相海<sup>1,2</sup>

(辽宁师范大学计算机与信息技术学院 大连 116029)<sup>1</sup>

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)<sup>2</sup>

**摘 要** 随着数字电视、网上会议和在线点播的出现,越来越多的图像信息需要在网上进行传输,而此时人们不仅要求编码技术具有较好的压缩效果,还要求信息的传输能够满足渐进传输、多质量服务以及图像数据库浏览等一系列的要求。本文提出了一种基于位平面的图像质量可分级编码方法,结合小波子带图像的系数分布特性,利用样本标准差作为量化的依据,对各分辨率级进行分级量化,并且采用了位平面编码和算术编码,使得在解码时可以根据给定解码的数率不同对位平面进行重构以实现图像的质量可分级性。实验结果表明,本文提出的方法实现简单,编解码速度快,在保证具有很好的编码效果的前提下,可以实现图像的质量可分级编码。

**关键词** 质量可分级编码,统计特性,位平面,提升方案小波,量化,算术编码

## The Research of the Quantization Scheme Based on Wavelet Subband Statistical Characteristic and PSNR Scalable Image Coding

LIU Dan<sup>1</sup> WANG Xiang-Hai<sup>1,2</sup>

(College of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029)<sup>1</sup>

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093)<sup>2</sup>

**Abstract** With the emergence of digital TV, online meeting and Video-On-Demand, more and more image information need to transmit on the net. People at this moment request not only better compression, but also progressive transmission of image and image database browsing, etc. This paper has put forward a PSNR scalable image coding method based on wavelet statistical characteristic and bit-plane technique. Combining lifting scheme wavelet transform and arithmetic coding, the method constructs different bit-planes according to the target bit rates so as to achieve PSNR scalability. The experimental results prove, that the proposed method can be implemented simply and achieve high code/decode speed and good compression quality. Moreover, on the premise of high coding quality, the method can realize image's PSNR scalable coding.

**Keywords** PSNR scalable coding, Statistical characteristic, Bit-plan, Lifting scheme wavelet, Quantization, Arithmetic coding

### 1 引言

多媒体及 Internet 的迅速发展使得人们对图像编码技术的要求越来越高,不仅要求编码技术有较好的压缩效果,而且要求它能够适应图像网上传输的要求,为此提出了图像可分级编码的思想。图像可分级编码思想在 20 世纪 90 年代 JPEG 图像编码标准中便有所体现,即标准中基于 DCT 的分层编码思想,近年来,随着图像编码技术的发展,人们对图像的可分级编码技术进行了进一步的研究。图像编码的比特流具有可分级性是指利用该比特流的一部分(或子集)可以产生对该图像一个有用表示的能力,即解码器能够根据实际情况对码流的一部分进行解码,然后生成在某一分辨率和图像质量级别条件下的解码图像。它通常包括空间分辨率可分级、质量可分级(或称 SNR 可分级)、空间-质量混合可分级和 ROI(Regions of Interest)可分级编码<sup>[1~3]</sup>。可分级的图像编码码流可以满足图像渐进传输、多质量服务以及图像数据库浏览等要求,同时还可以节省图像数据库中因需要存储不同数率图像所占的存储空间,因而如何灵活、方便有效地实现图

像编码的可分级性成为近几年图像编码技术所追求的重要目标之一。近年来,人们在该领域进行了积极的研究,出现了一些较为有效的可分级编码算法,但总体而言,对该领域的研究还处于发展阶段,还有很多问题有待解决,比如编码效率问题和操作的简洁性等。

本文在对图像的提升方案小波<sup>[4]</sup>分解子带统计特性分析的基础上,提出了一种量化方案,进而提出一种统计特性量化的图像质量可分级编码方案,并对该方案的解码效率进行了分析、讨论和仿真试验,试验结果验证了方法的有效性。

### 2 基于小波图像子带统计特性的量化方案

文<sup>[5]</sup>通过对小波子带系数的分析得出如下结论:小波子带图像系数的概率密度函数曲线与高斯分布、拉普拉斯分布的概率密度函数曲线的形状很相似,都是单峰曲线,都相对纵坐标对称,离中心越近系数出现几率越大,离中心越远的系数出现的几率越小。小波系数的概率密度函数曲线更窄、更尖,表明其系数分布更集中。根据拉普拉斯分布和高斯分布的概率密度函数,分别计算不同区间所围成的面积,以定量确定样本在不

<sup>\*</sup> 本文受国家自然科学基金项目(60372071)、辽宁省自然科学基金项目(20032125)、辽宁省高等学校优秀人才支持计划(RC-04-11)和大连市科技基金计划项目资助。王相海 博士,教授,主要研究领域为多媒体信息处理、多媒体数字水印和计算机图形学。

同区间所占的比例,结果如表 1 所示,其中的百分数为系数的绝对值在相应区间的比例。从表 1 可以看出,对服从高斯分布的随机变量而言,有近 69% 的系数包在  $[-\sigma, +\sigma]$  ( $\sigma$  为样本的方差),超过 95% 的系数包含在  $[-2\sigma, +2\sigma]$ ;对服从拉普拉斯分布的随机变量而言,系数更为集中,超过 75% 的系数包含在  $[-\sigma, +\sigma]$ ,约 95% 的系数包含在  $[-2\sigma, +2\sigma]$ ;而系数绝对值大于三倍方差的比例非常小。而由于小波子带图像的系数分布更接近拉普拉斯分布,故其能量分布会更为集中。

表 1 高斯分布和拉普拉斯分布个区间的样本比例

分布	高斯分布	拉普拉斯分布
$[0, 0.25\sigma]$ (%)	19.8	30.0
$[0.25\sigma, 0.5\sigma]$ (%)	18.6	20.9
$[0.5\sigma, \sigma]$ (%)	30.0	25.0
$[\sigma, 2\sigma]$ (%)	27.2	18.4
$[2\sigma, 3\sigma]$ (%)	4.3	4.5
$[3\sigma, \infty)$ (%)	0.3	1.4

根据以上小波图像子带的统计特性,在对图像小波系数进行量化时,应尽可能考虑出现几率大的系数,而对那些出现概率极小的且幅度较大的系数,可采用较为粗略的量化精度。由于方差  $\sigma$  能够确定系数的相对大小,而样本标准差  $\delta$  的倍数  $a\delta$  作为各子带系数的量化因子,由于系数绝对值大于 3 倍方差的比例非常小,这样,我们可以考虑将  $a$  的取值范围选定为  $(0, 3]$ 。因为图像的重构效果 PSNR 通常与其压缩的程度成反比,或者至少是一种近似反比的关系,这样在下面各子带的量化因子的确定过程中,我们定义了性能压缩比  $B = \text{PSNR}/C$  (其中  $C$  为压缩比)作为量化性能参考的度量。各子带具体量化因子的选取过程如下:

首先,通过采用对  $m=1$  分辨率的各子带分别按照相同的量化因子  $a_i\delta$  进行量化(其中  $a_i$  为  $(0, 3]$  内有限个样本点)、而对  $m>1$  分辨率级的子带不予量化的方式,构造其重构图像的性能压缩比曲线,将曲线中性能压缩比较为理想的  $a_{m1}\delta$  (其中  $a_{m1} \in (0, 3]$ ) 作为  $m=1$  分辨率各子带的量化因子;其次,对  $m=2$  分辨率的各子带,在保持前面所确定的  $m=1$  分辨率级各子带量化因子的前提下,同样按照对其各子带分别按照相同的量化因子  $a_i\delta$  进行量化(其中  $a_i$  为  $(0, 3]$  内的样本点)、而对  $m>2$  分辨率级的子带不予量化的方式,构造其重构图像的性能压缩比曲线,将曲线中性能压缩比较为理想的  $a_{m2}\delta$  (其中  $a_{m2} \in (0, 3]$ ) 作为  $m=2$  分辨率各子带的量化因子。按照以上同样的方式可确定其它各分辨率级别子带的最佳量化因子。

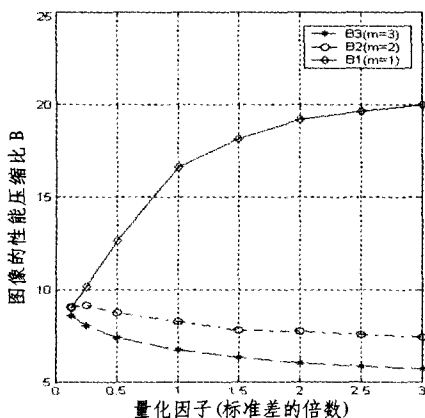


图 1 不同分辨率级子带量化因子与性能压缩比曲线

图 1 为 Lena 图像进行三级小波分解时按照上述过程所确定的各分辨率级子带的性能压缩比曲线,其中  $m$  为分辨率级别。从图中可以看出,分辨率  $m=1, 2$  和 3 级各子带的量化因子分别取  $3\delta, 0.25\delta$  和  $0.125\delta$  时,其图像的性能压缩比最好。

### 3 本文提出的图像质量可分级编码方案

#### 3.1 位平面编码的概念

在文[5]中提出了位平面(Bit-Plane)编码的概念,即将每一个量化的 DCT 系数看成是一个有若干个 bit 组成的二进制数,对每一个  $8 \times 8$  的 DCT 块,64 个绝对值系数被沿着“Z”字形的顺序排成一个序列,所谓一个块的 Bit-Plane 是指这 64 个系数的具有相同重要位置的比特位所形成的数组。基于 Bit-Plane 模式的编码首先从最重要的 bit-plane(MSB)开始,形成(RUN, EOP)符号,其中“RUN”表示一个“1”之前连续“0”的个数,而“EOP”取“0”或“1”则分别表示该 bit-Plane 中自该“1”后没有“1”和存在“1”;然后再对这些(RUN, EOP)符号连同其符号位进行变长编码。

#### 3.2 方案的总体结构

本文所提出可分级编码方案的编、解码结构如图 2、3 所示,其中“基于统计特性的子带量化”方案参见第 2 节。

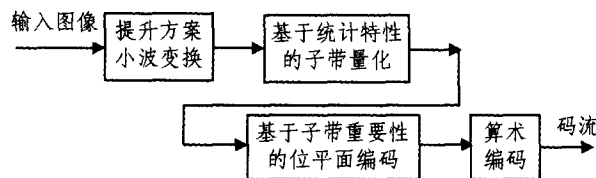


图 2 编码器总体结构

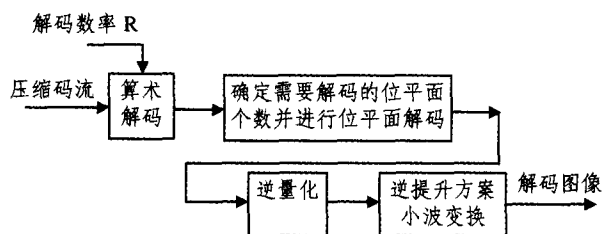


图 3 解码器总体结构

#### 3.3 基于子带重要性的位平面编码方案

对量化后子带系数的位平面编码,本文提出一种基于子带重要性的位平面编码方案,具体过程如下:

(1) 将量化后各子带按重要性顺序(见图 4)划分为  $(LL_3)$ 、 $(HL_3, LH_3, HH_3)$ 、 $(HL_2, LH_2, HH_2)$  和  $(HL_1, LH_1, HH_1)$  四个子带组;

(2) 对每组子带独立进行如下位平面编码:

① 首先确定量化后各子带中系数的最大绝对值  $\max$ , 进而确定位平面的个数  $\lceil \log_2 \max \rceil$ , 此外,为了存储各系数的符号,还需再建立一个符号位平面,这样编码一幅图像所需的位平面总数为  $1 + \lceil \log_2 \max \rceil$ ;

② 将量化后的图像小波系数按照位平面由高到低的顺序依次存储各位平面的信息,形成码流,从而保证了将相对重要的比特位排在码流的前端。

③ 在码流的生成过程中,首先将第一组子带的全部位平面信息排在最前端,其次第二组子带的全部位平面信息紧跟

其后,以此类推。

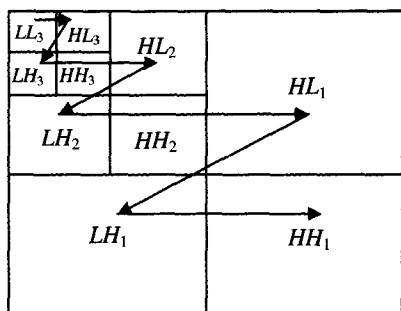


图4 各子带的重要性顺序

### 3.4 位平面的分解与重构

(1)位平面的分解 约定编码图像共需要  $N$  个位平面。对于某个小波系数,若当前已经编码到第  $n(0 \leq n \leq N-1)$  个位平面,则将该系数右移  $n$  位,并与 1 进行逻辑与操作,即分解出第  $n$  个位平面的值。对上述两种位平面编码方案中的每个系数都重复上面的操作,即可实现位平面的分解。具体位平面分解的伪代码如下:

```
for(n=N-1;n>0;n--) //记录编码到第几个位平面
for(i=0;i<Height;i++) //控制当前的像素的位置
for(j=0;j<Width;j++)
plane[(N-n)*Width*Height+i*Width+j]
=(Origin[i][j]>>n) & 1;
```

(2)位平面重构 将位平面数据按位依次读入,对于某个小波系数,若当前已经解码到第  $n$  个位平面,则将读入的 0 或者 1 左移  $n$  位,即得到该系数第  $n$  个位平面的值。然后将这个值与该系数已经解码出的值进行逻辑或操作,进而重构出系数前  $(N-n)$  个位平面的值。按照位平面递减的顺序重复以上操作,即可渐进而精确地重构出位平面分解前的系数。具体实现的伪代码如下:

```
for(int n= N-1;n>0;n--)
for(i=0;i<Height;i++)
for(j=0;j<Width;j++)
Origin[i][j]|=(tempbyte<<n);
```

其中 tempbyte 表示读入码流的缓冲区。

### 3.5 质量可分级编、解码的实现

综合上面各个小节,我们给出所提出的质量可分级编、解码算法如下:

#### (1)编码算法

- step1. 对原图像进行提升方案小波分解;
- step2. 按照 3.2 节所述的基于子带统计特性的方法对变换后的小波系数进行量化,并保存量化因子;
- step3. 按照 3.3 节所述的方案对量化后的小波系数进行位平面分解;
- step4. 对分解后的位平面信息进行算术编码<sup>[7]</sup>,并生成编码码流。
- step5. 算法结束。

#### (2)解码算法

- step1. 根据给定的码率  $R$ (单位为 bpp),确定解码图像所需要的比特数  $B$ ;
- step2. 利用算术解码器,按照由高至低的顺序,解码出一个位平面;
- step3. 计算当前已经解码出的比特位数,并计算已解码

比特数与目标位数  $B$  的差  $D$ ;

- step4. 将  $D$  与某一阈值  $T$  进行比较(其中  $T$  的选取见下面说明),若  $D$  大于  $T$ ,则转入 step 2;否则,转入 step 5;
- step5. 根据编码过程中保存的量化因子对图像进行逆量化;
- step6. 对图像进行逆提升方案小波变换;
- step7. 算法结束。

在上述解码过程中,根据给定码率所计算出的目标比特数  $B$  有时不会恰好等于位平面的整数倍,这样在解码过程中就需要根据一个阈值  $T$  来决定是否有必要多解出一部分数据,或者丢弃一些数据,以使得解出的比特数为位平面的整数倍,当然前一种情况的解码数率可能会较给定的数率  $R$  有一些超出,但会相对提高一些解码图像质量,而后一种情况不会超出给定的码率  $R$ ,但可能会牺牲一些解码质量。阈值  $T$  可以根据实际应用中解码质量和网络传输带宽的需求来进行折衷选取。

## 4 实验结果与分析

为了对所提出算法的有效性进行验证,我们对 Lena 图像进行了大量的实验。实验对所提出方案在不同码率下图像的解码的质量进行了测试,采用了峰值信噪比作为评价;同时对方案中位平面的解码个数与图像的解码质量和压缩比之间的关系进行了统计。

实验中所使用图像的大小为  $512 \times 512$ ,图像被提升方案小波分解了三层;阈值  $T=w \times h \times \alpha \times \beta$ ,其中,  $w$  和  $h$  分别表示当前预解码的位平面宽度和高度,  $\alpha$  表示在多种解码条件下的“折衷”因子,实验中取为 0.5,  $\beta$  表示算术编码预解码位平面时的压缩比,实验中取 0.5。图 5~8 分别给出了方案对 Lena 图像在码率为 2.32bpp、1.11bpp、0.25bpp 和 0.04bpp 时的可分级解码图像,其 PNSR 分别为 38.9610、32.6631、26.0056 和 21.2860。



图5 码率为 2.32bpp 的解码图像



图6 码率为 1.11bpp 的解码图像



图7 码率为 0.25bps 的解码图像



图8 码率为 0.04bps 的解码图像

表 2、3 分别给出了实验中 Lena 图像在不同码率下,利用所给出方案解码出的位平面数量与解码 PSNR 以及压缩比之间的关系。

从实验结果可以看出,本文提出的图像质量可分级编码方案具有实现简单、编解码速度快和编码效果好等特点,并且在低码率下同样具有很好的视觉效果。随着解码码率的提高,图像重构的位平面数目增加,解码后的图像质量亦随之提高,可以满足图像渐进传输等应用的需求。

**结束语** 图像的可分级性编码在保持压缩特性的前提下可以满足图像网上渐进传输、多质量服务和图像数据库浏览等方面的需求,因而受到人们的重视。本文提出了一种基于提升方案小波子带系数的统计特性量化和位平面下的图像质量可分级编码方案,结合小波变换的良好空间-频率特性,对图像进行位平面编码,在解码时根据不同的解码码率进行相应的位平面重构以实现图像的质量可分级性。实验结果验证了所提出方案的有效性。

表 2 方案中位平面个数与 PSNR 值的对应关系

位平面数	1	2	3	4	5	6
PSNR(dB)	11.2617	17.0110	21.2860	23.6773	24.4438	24.6450
位平面数	7	8	9	10	11	12
PSNR(dB)	24.6826	24.6896	24.6896	24.8187	26.0056	27.1198
位平面数	13	14	15	16	17	18
PSNR(dB)	27.7854	28.1109	28.2404	28.2899	28.2899	28.3140
位平面数	19	20	21	22	23	24
PSNR(dB)	28.5527	29.6475	31.0617	32.0585	32.6551	32.9619
位平面数	25	26	27	28	29	30
PSNR(dB)	32.9817	33.4673	34.7496	36.5832	38.9610	38.9610

表 3 方案中位平面数与压缩比的对应关系

位平面数	1	2	3	4	5	6
传输码率(bpp)	0.014	0.03	0.04	0.06	0.08	0.10
位平面数	7	8	9	10	11	12
传输码率(bpp)	0.12	0.14	0.19	0.20	0.21	0.22
位平面数	13	14	15	16	17	18
传输码率(bpp)	0.24	0.26	0.40	0.53	0.55	0.62
位平面数	19	20	21	22	23	24
传输码率(bpp)	0.66	0.76	0.87	0.91	1.36	1.45
位平面数	25	26	27	28	29	30
传输码率(bpp)	1.68	2.22	2.24	2.24	2.25	2.32

### 参 考 文 献

- 1 ISO/IEC JTC1/SC29/WG 1, ISO/IEC FCD 15444-1; Information technology JPEG 2000 image coding system; Core coding system [WG 1 N 1646R], march 2000, <http://www.jpeg.org/FCD15444-1.htm>
- 2 王相海. 基于小波的图像和视频可分级编码研究:[南京大学博士后研究报告]. 2001, 6
- 3 王相海. 基于小波的图像可分级编码研究. 小型微型计算机系统, 2003, 24(9): 1677~1681
- 4 Sweldens W. The lifting Scheme: A Construction of Second Generation Wavelets. Technical Report. Industrial Mathematics Initiative, Department of mathematics, University of South Carolina, 1995
- 5 Barland M. Wavelet in image communication. P. O. Box 211, 1000 AE Amsterdam, the Netherlands, 1994
- 6 Li W. Overview of fine granularity scalability in MPEG-4 video standard. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11(3): 301~317
- 7 Witten I H, Neal R, Clear J C. Arithmetic coding for data Compression [J]. Communication of the Association for Computing Machinery, 1987, 30(6): 520~540