

文章编号:1000-582X(2003)04-0049-05

## 用于图像压缩的小波系数的上下文模型\*

董世都<sup>1</sup>, 杨小帆<sup>1,2</sup>, 刘国金<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 计算机科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**结合 GlicBawls 编码方法的线性预测思想和 CALIC 编码方法通过量化减少上下文个数的思想,提出了一种新的用于图像压缩的小波系数的上下文模型。它通过量化当前系数的线性预测值形成上下文,进行自适应的算术编码。实验结果表明,利用这种模型获得的无损压缩比高于无损的 SPIHT 和用于 JPEG2000 的无损的 EBCOT。另外,这种模型充分利用了小波变换的多分辨率性质,能以渐进分辨率(progressive resolution)方式压缩图片,并且它获得的原图片的各个比例尺(scale)的小图片的压缩比也高于 EBCOT。

**关键词:**小波;上下文模型;无损图像压缩;渐进分辨率

**中图分类号:** TN911.73

**文献标识码:** A

目前,小波变换因具有良好的空域频域局部化特性在图像压缩和视频压缩中已得到广泛的应用, JPEG2000 和 MPEG4 均采用了小波变换。为了充分利用小波系数的特点,已经建立了许多优秀的小波系数模型,如 Shapiro 的 EZW<sup>[1]</sup>, Said 和 Pearlman 的 SPIHT<sup>[2]</sup>,用于 JPEG2000 的 EBCOT<sup>[3]</sup>,及 Xiaolin Wu 的 ECECOW。这些模型具有逐步精细传送图片的功能<sup>[4]</sup>,即可以先传送一幅和原图片同样大小的质量较差图片,然后逐步增补为质量较好的图片,直到完美重建的图片,但是 EZW 和 SPIHT 因利用各层间的系数形成的树形结构进行编码,不能以渐进分辨率方式传送图片<sup>[5]</sup>,即不能先传送一幅较小的图片,然后逐步增加图片的大小,直到完整的图片;4种系数模型都是对位平面进行编码的,而位面中系数的相关性随位平面的降低而减小<sup>[6]</sup>,因此尽管它们有的使用了上下文模型,压缩比还是不很高。

上下文模型因能够降低图像的熵(因为高阶熵小于零阶熵),在无损图像压缩中得到广泛应用。LOCO-I<sup>[7]</sup>,作为 JPEG-LS 的标准算法,就是一种基于上下文模型的图像编码,它的无损压缩比比 JPEG2000 要高。Xiaolin Wu 的 CALIC<sup>[8]</sup>包含了一个自适应的梯度预测器,以预测误差的能量估计(the error energy estimator)的量化值作为上下文,对预测误差(prediction

error)进行编码,它的平均压缩比高于 LOCO-I。最近, Bernd Mayer 提出了 Glicbawls 模型,它和 CALIC 类似,但它利用以前所有的像素来预测当前像素的值,因而获得了比 CALIC 还要高的压缩比。LOCO-I、CALIC 及 Glicbawls 均不含有变换,因此不能以逐步精细的方式或渐进分辨的方式传送图片。

利用 GlicBawls, CALIC、ECECOW 和 EZW 模型的基本思想,充分考虑小波变换后各子带系数的特点,构造了一种新的,用于高频子带的(除 LL 子带以外的子带,本文中称为高频子带,以下相同)小波系数的上下文模型(简称 PCW 模型)。它首先把小波系数映射为正整数,然后用已扫描过的相邻的系数对当前系数进行线性预测,再把预测值量化为 0~7 之间的数  $\alpha$ ,以  $\alpha$  作为上下文。实验结果表明,PCW 的无损压缩比高于无损的 SPIHT、EZW 模型及无损 EBCOT。另外,PCW 是以子带为单位,按照从低频到高频的顺序进行编码的,因而,解码时可以先解码 LL3 子带,获得 1:8 的图片,然后解码 HL3, LH3, HH3 子带,获得 1:4 的图片,……,直至无损的整个图片。也就是说,PCW 实现了以渐进分辨率方式传送图片。这是 GlicBawls、CALIC、LOCO-I、EZW、SPIHT 不具有的功能。尽管 EBCOT 通过一定方式组织编码块可以实现同样的功能,但 PCW 模型不仅无损压缩比高于 EBCOT,而且原图

\* 收稿日期:2002-11-08

资助项目:重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室访问学者基金资助项目

作者简介:董世都(1973-),男,重庆人,重庆大学硕士研究生,主要从事图像压缩方面的研究。

片的各个比例尺 (scale) 的压缩比也高于 EBCOT。

### 1 预备知识

本文对应的编码器的原理如图 1。

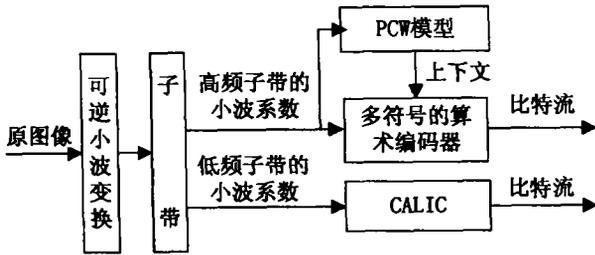


图 1 编码器原理图

在本文中,可逆小波变换用的是 Said 和 Pearlman 的 S+P 变换<sup>[5]</sup>,它是在 Haar 小波的整数版本 S 变换的基础上,通过预测提升高频信号而构成的,其表达式如下所示:

$$h^{(1)}(n) = s(2n + 1) - s(2n) \quad (1)$$

$$l(n) = s(2n) + [h^{(1)}(n)/2] \quad (2)$$

$$h(n) = h^{(1)}(n) - \left[ \sum_{k=-L_n}^{L_n} \alpha_k l(n-k) - \sum_{k=1}^H \beta_k h^{(1)}(n+k) + 1/2 \right] \quad (3)$$

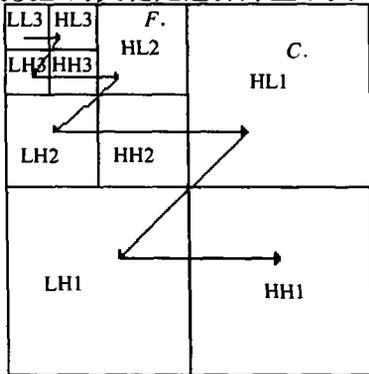
其中  $s(n)$  表示原信号,  $h(n)$  表示高频信号,  $l(n)$  表示低频信号,  $\alpha_k, \beta_k$  的值通过学习获得。实验表明,在  $\alpha_{-1} = -1/16, \alpha_0 = 4/16, \alpha_1 = 6/16, \beta_1 = 4/16$ ,其它为 0 时,大多数自然图片的小波系数的熵较小。

原图像经过小波变换得到多个子带 (subband)。然后,以子带为单位,以图 2 所示的扫描顺序,对小波系数进行基于上下文的熵编码。它的统计模型如下:

$$P(C | cx) \quad (4)$$

其中  $C$  代表当前系数的值,  $cx$  为上下文 (或条件)。

上下文模型的关键是选择好上下文  $cx$ , 使式 (4)



F: 表示 C 的父系数

图 2 子带扫描顺序图

的值尽可能的大,对应的熵尽可能的小。早在 1948 年, Shannon 就证明了熵的阶越高 (上下文个数越多), 熵就越小。但上下文状态的个数 (把  $(C, cx)$  的一组值称为一个上下文状态) 与上下文个数是指数关系, 当上下文个数增大时, 上下文状态的个数增长是惊人的。另外, 由于图像的大小总是有限的, 当上下文状态的个数太多时, 上下文模型会因为缺少足够的样本用于学习, 无法准确估计待编符号的条件概率, 因而降低编码的效率, 这就是所谓的“上下文稀释 (context dilution) 现象<sup>[6]</sup>”。因此, 在图像压缩中, 上下文的个数不能太多; 设计上下文模型时, 应使式 (4) 的状态个数尽可能少的条件下, 使式 (4) 的值尽可能大。

该模型用的熵编码器都为多符号的算术编码器。算术编码器是一种优秀的编码器, 它的压缩结果接近于熵, 优于 Huffman 编码器<sup>[6]</sup>。

### 2 高频子带小波系数的上下文模型 (PCW)

CALIC 模型只适用于比较光滑的自然图片压缩, 而高频子带的小波系数是很不“光滑”的, 因而 CALIC 不能直接用于高频子带系数的压缩。因此, 与 CALIC 不同, PCW 不是用预测误差的能量估计的量化值作为上下文, 而是用当前系数的预测值的量化值作为上下文; PCW 不是对小波系数的预测误差进行编码, 而是直接对经过映射后的小波系数进行编码。

#### 2.1 映射

经过 S+P 变换后的高频子带的小波系数为整数  $C_{x,y}, C_{x,y} \in (-256, 256)$ , 为了便于编码, PCW 利用式 (5) 把高频子带中的所有的小波系数映射为正整数  $I_{x,y}, I_{x,y} \in [0, 512)$ 。

$$I_{x,y} = \begin{cases} 2C_{x,y} & C_{x,y} \geq 0 \\ -2C_{x,y} - 1 & C_{x,y} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

#### 2.2 预测模型

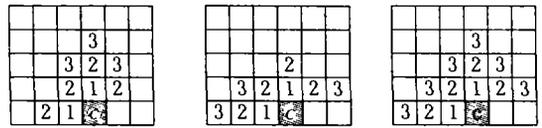
和 GlicBawls 类似, PCW 模型利用离当前系数较近的已扫描过的系数来线性预测当前系数的值。这些系数组成的集合叫预测窗, 它们与当前系数的位置距离不同, 对预测值的“贡献”也不一样。当前系数的预测值为:

$$p = \frac{\sum \sum w_{|i|+|j|} I_{x+i,y+j}}{\sum \sum w_{|i|+|j|}} \quad (6)$$

其中,  $I_{x+i,y+j}$  为预测窗内的小波系数,  $w$  代表权,  $|i|+|j|$  为系数  $I_{x+i,y+j}$  到当前系数  $I_{x,y}$  的距离,  $w_i/w_{i-1} = 2/3$ 。

由于不同子带小波系数有不同的特性, 因而它们的预测窗的形状也不一样 (如图 3)。HL 子带主要展示

了信号的垂直结构,因而在预测窗中,竖直方向的系数较多; LH 子带展示了信号的水平结构,在预测窗中,水平方向的系数较多;HH 子带没有方向性,因此预测窗较对称.考虑到算法的时间复杂度和叙述的方便,本文的预测窗的大小取得不大,如图 3.另外,小波系数与它父系数(如图 2,  $F$  是  $C$  的父系数)有很强的相关性, SPIHT 和 EZW 就是利用它来减少显著性标识符的,因此应该把它放入到预测窗中,并令它与当前系数的距离为 2.



(a) HL 子带 (b) LH 子带 (c) HH 子带  
 $C$  代表当前系数,标有数字的位置表示该系数在预测窗中,数字的大小表示该系数和  $C$  之间的距离.

图 3 不同子带的预测窗(没有包括父系数)

因此, HL 子带中的系数的预测值为( $I_{px,py}$  表示当前系数的父系数,如图 2):

$$p = \frac{9I_{x-1,y} + 9I_{x,y-1} + 6I_{x-2,y} + 6I_{x-1,y-1} + 6I_{x,y-2} + 6I_{x+1,y-1} + 4I_{x-1,y-2} + 4I_{x,y-3} + 4I_{x+1,y-2} + 6I_{px,py}}{60}$$

LH 子带中的系数的预测值为:

$$p = \frac{9I_{x-1,y} + 9I_{x,y-1} + 6I_{x-2,y} + 6I_{x-1,y-1} + 6I_{x,y-2} + 6I_{x+1,y-1} + 4I_{x-2,y-1} + 4I_{x-3,y} + 4I_{x+2,y-1} + 6I_{px,py}}{60}$$

HH 子带中的系数的预测值为:

$$p = \frac{9I_{x-1,y} + 9I_{x,y-1} + 6I_{x-2,y} + 6I_{x-1,y-1} + 6I_{x,y-2} + 6I_{x+1,y-1} + 4I_{x-2,y-1} + 4I_{x-3,y} + 4I_{x+2,y-1} + 4I_{x-1,y-2} + 4I_{x,y-3} + 4I_{x+1,y-2} + 6I_{px,py}}{72}$$

### 2.3 量 化

如果直接用预测值作为上下文,上下文状态个数仍然太大,如第 1 节所述,它会产生上下文稀释现象.因此,有必要对预测值  $p$  进行量化,进一步减少上下文状态的个数.

令  $q_{-1} = 0 < q_0 < q_1 < q_2 < q_3 < q_4 < q_5 < q_6 < \infty$ ,  $p$  的量化值为:

$$Q(p) = i \quad \text{if } q_{i-1} \leq p < q_i \text{ and } 0 \leq i < 8 \quad (6)$$

由于高频子带系数的绝对值一般集中在数值较小的区域,因而  $q_i$  的值大多数取得较小,在本文中它们分别为  $q_0 = 1, q_1 = 2, q_2 = 4, q_3 = 8, q_4 = 16, q_5 = 32, q_6 = 128$ .这样小波系数的统计模型为:

$$P(I_{x,y} | Q(p)) \quad (7)$$

显然,  $Q(p) \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ . 因此, PCW 只有 8 个上下文.

### 2.4 编 码

算术编码器就是利用上面这个模型对高频子带的小波系数进行编码的.虽然高频子带经过映射后的小波系数  $I_{x,y} \in [0, 512)$ ,但它集中在很小的区域(例如 0 到 32 之间),如果用 512 种符号的算术编码器,不仅会浪费内存空间,还会产生零频现象,从而降低编码的效率<sup>[8]</sup>.因此,和 CALIC 一样,根据不同上下文  $\delta = Q(p)$  值,采用  $N_\delta + 1$  ( $N_\delta + 1 < 512$ ) 个符号的算术编码器.如果小波系数  $I_{x,y} \geq N_\delta$ ,首先编码一个 escape 符号  $N_\delta$  (代表的值为  $N_\delta - 1$ ),然后对新符号  $x - (N_\delta - 1)$  进行编码<sup>[8]</sup>.  $N_\delta$  的值可以通过学习获得,在本文中它

们分别为:

$$N_0 = 28, N_1 = 28, N_2 = 30, N_3 = 32,$$

$$N_4 = 32, N_5 = 32, N_6 = 32, N_7 = 32$$

这种编码方法同时也减少了上下文的状态个数.

另外,由于 LL 子带的图像比较平滑,这里采用 CALIC<sup>[9]</sup> 模型进行编码.

## 3 实验结果

在对比实验中,EBCOT 完全按照 JPEG2000 的标准编写<sup>[3]</sup>,编码块(Code - block)的大小和它所在的子带的大小相同,它用的小波变换也是 S + P 变换,参数也相同( $\alpha_{-1} = -1/16, \alpha_0 = 4/16, \alpha_1 = 6/16, \beta_1 = 4/16$  其余为 0);无损的 SPIHT 和 LOCO - I 用的是它们的作者提供的程序,它们可以从网上下载.实验中的所有数据都是根据压缩后实际文件的大小计算获得.

在实验 I 中,用近 100 幅标准测试图片对 PCW、EBCOT、SPIHT、LOCO - I 的无损压缩比作了比较,对于所有的图片,PCW 的压缩比高于 EBCOT、SPIHT;有近 80% 的图片,PCW 的压缩比比 LOCO - I 稍低.表 1 是 ISO/IEC 10918 - 1 图片测试集的实验结果.

在实验 II 中,分别在 8 : 1, 4 : 1, 2 : 1 比例尺下对 PCW 和 EBCOT 的压缩比作了比较.如表 2,对于所有的图片,PCW 在各种比例尺下的压缩比均高于 EBCOT.

表1 ISO/IEC 10918 - 1 图片测试集  
(576 \* 720 单色图片) 的压缩结果 bits/pixel

测试图 片名 <sup>[9]</sup>	无损			LOCO -
	PCW <sup>[10]</sup>	EBCOT <sup>[10]</sup>	SPIHT <sup>[11]</sup>	I <sup>[12]</sup>
Balloon	2.972	3.062	2.979	2.904
Barb	4.531	4.621	4.586	4.691
Barb2	4.690	4.809	4.742	4.686
Board	3.786	3.824	3.822	3.675
Boats	4.041	4.112	4.059	3.933
Girl	3.959	4.049	3.990	3.925
Gold	4.545	4.641	4.594	4.477
Hotel	4.541	4.610	4.579	4.382
Zelda	3.810	3.929	3.865	3.888
平均	4.097	4.184	4.135	4.062

表2 在不同比例尺下 PCW 和 EBCOT 的压缩比

测试 图片	PCW			EBCOT		
	1:8	1:4	1:2	1:8	1:4	1:2
Balloon	111.11	33.06	9.83	82.47	30.08	9.43
Barb	90.91	24.69	6.62	76.19	23.32	6.47
Barb2	98.77	24.92	6.71	80.81	24.17	6.49
Board	115.94	30.30	8.42	91.22	28.88	8.38
Boats	101.27	27.12	7.56	83.33	25.64	7.40
Girl	94.12	24.84	7.21	81.22	23.74	7.05
Gold	95.92	25.40	6.80	80.81	24.17	6.65
Hotel	92.17	24.24	6.74	80.08	23.53	6.67
Zelda	101.52	30.89	8.72	78.43	28.17	8.34
平均	101.19	27.83	7.96	82.62	26.30	7.76

#### 4 结束语

到目前为止,没有绝对好的图像的压缩方法, JPEG2000 具有非丰富的功能,但它的无损压缩比却比 JPEG - LS 差;而 JPEG - LS 虽具有较高的无损压缩比,却不以逐步精细方式和渐近分辨率方式传送图片。笔者提出的 PCW 也是如此,虽然它不能同 SPIHT 和 EBCOT 一样,具有较好的嵌入式编码功能,它的无损压缩比也不如用于 JPEG - LS 的 LOCO - I,但是,由于它通过上下文模型充分利用子带之间和同一子带内相邻系数的相关性,它的无损压缩比 SPIHT 和 EBCOT 要高;由于它充分利用小波变换的多分辨率性质,能以渐近分辨率方式传送图片(这是 SPIHT 和 JPEG - LS 不具有的功能),并且在各个比例尺下的压缩比也比 EBCOT 要高。另外,如果同 GlicBawls 一样(GlicBawls 用以前所有的像素来预测当前像素,是目前无损压缩

中压缩比较高之一),牺牲一点 PCW 的执行时间,把预测窗扩大,PCW 的压缩比会进一步提高,它的无损压缩比甚至可能高于 JPEG - LS。PCW 因具有较高的压缩比和能以渐近分辨率方式传送图片,适用于屏幕大小不同或网络带宽不同的终端访问相同图片的领域。

总之,不同的图像压缩方法有不同的优缺点,应该根据实际需要选取合适的图像压缩方法。

#### 参考文献:

- [1] SHAPIRO J. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993,41(12):3445-3462.
- [2] SAID A, PEARLMAN W A. A New fast and efficient image coder based on set partitioning on hierarchical trees[J]. IEEE Trans Circuits and Systems for Video Technology, 1996,6(6):243-250.
- [3] ISO/IEC FCD15444 - 1, JPEG 2000 Part I Final Committee Draft Version 1.0[S].
- [4] 杜学明,杨万年.关于小波子空间上的具有紧支撑的采样定理[J].重庆大学学报,2002,25(2):79-82.
- [5] SAID A, PEARLMAN W A. A image multiresolution for lossless and lossy compression[J]. IEEE Trans Circuits and Systems for Video Technology, 1996,5(9):1303-1310.
- [6] WEINBERGER J MARCELO, RISSANEN J JORMA, APRS B RONALD. Application of universal context modeling to lossless compression of gray - scale images[J]. IEEE Trans On Image Processing, 1996,5(4):575-585.
- [7] WEINBERGER M, SEROUSSI G, SAPIRO G. The LOCO - I lossless Image compression algorithm: principles and standardization into JPEG - LS[J]. IEEE Trans Image Processing, 2000,9(8):1309-1324.
- [8] WU X, MEMON N D, SAYOOD K. A context based, adaptive, lossless image coding[J]. IEEE Trans Commun, 1997,45(4):437-444.
- [9] WU X. ISO/IEC 10918 - 1 图片测试集的标准测试图片[EB/OL]. ftp://ftp.csd.uwo.ca/pub/from\_wu/images, 2002-5-20.
- [10] 董世都. PCW 和 EBCOT 的演示程序[EB/OL]. http://www30.brinkster.com/cqdsd,2002-5-20.
- [11] SAID A. 无损 SPIHT 的演示程序[EB/OL]. http://www.cipr.rpi.edu/research/SPIHT/EW\_Code/SPIHT.zip,2002-5-20.
- [12] HP Labs. LOCO - I(JPEG - LS)的演示程序[EB/OL]. http://www.hpl.hp.com/loco,2002-5-20.

## A Context Model of Wavelet Coefficients for Image Compression

*DONG Shi-du<sup>1</sup>, YANG Xiao-fan<sup>1,2</sup>, LIU Guo-jin<sup>1</sup>*

- (1. College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Key Laboratory of Opto-electronic Technology and Systems Under the State Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Through the combination of the idea of the linear prediction used in the GlicBawls coding scheme and the idea of the quantization taken in the CALIC coding scheme to reduce the number of contexts, a new context model of wavelet coefficients for image compression is proposed. Wavelet coefficients are encoded by the arithmetic encoder, with the contexts formed by quantizing linear prediction values. Experimental results show that the model achieves higher lossless compression rate of image than lossless SPIHT and lossless EBCOT used in JPEG2000. In addition, by exploiting the multiresolution property of wavelet, the model can compress the transformed image for progressive resolution and earn higher compression rate for each scale of the image than EBCOT.

**Key words:** wavelet; context model; lossless image compression; progressive resolution

(责任编辑 张 苹)

(上接第45页)

## Technological Measures for Reducing Two-Stroke Motorcycle Exhaust Emissions

*RUAN Deng-fang, DENG Zhao-xiang, FANG Zi-fan*

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The main technological measures for reducing two-stroke motorcycle exhaust emission in China and foreign country are introduced. The characteristics of the measures in structure, effect, cost, etc., are analysed. The results show that the enleanment of conventional carburetor mixture and the improvement of the carburetor intake passage shape is a simple and effective measure, the adoption of the electronically controlled in-cylinder direct fuel injection technique is a unique measure to completely improve emissions from two-stroke motorcycles. The structure and cost of a stratified scavenging system is lower than that of in-cylinder direct fuel injection, but its effect is better than that of the enleanment of carburetor mixture, so, it is worth investigating further. The factories of two-stroke motorcycles may select the reduction measures of the exhaust emission by referring to the analyses and comparisons.

**Key words:** two-stroke motorcycle; emission, measure

(责任编辑 张小强)