

基于零树和位平面的小波图像压缩算法*

牛建伟, 王 刃, 李 波

(北京航空航天大学 计算机科学与工程系, 北京 100083)

E-mail: niujianwei@263.net

http://www.buaa.edu.cn

摘要: 通过有机结合零树编码、位平面编码和算术编码,提出了一种基于零树和位平面的小波图像压缩算法 ZBP(Zerotree and bit plane).ZBP 不仅充分利用了零树符号之间的相关性,而且从位数据的层面上挖掘出了小波系数值之间的相关性,从而提高了算术编码的性能.实验结果表明,ZBP 的压缩效果优于目前已有的小波图像压缩算法.

关键词: 小波变换;零树编码;位平面编码;算术编码;图像压缩

中图分类号: TP391 文献标识码: A

小波变换^[1]虽然能够去除图像整体上的相关性,但是小波系数之间仍然残存了大量的相关性,而当前的小波图像压缩算法一般都未能对小波系数相关性进行深层次的挖掘和利用.零树编码^[2]、位平面编码^[3]和算术编码^[4]是当前小波图像压缩算法中最常用的 3 种编码技术,三者的有机结合可以极大地提高算术编码的性能,从而提高整个算法的压缩性能.但是,在目前已有的算法中,零树编码和位平面编码都没有能与算术编码很好地结合起来,因此其压缩效率都受到了一定的影响.

零树编码和位平面编码可以看作是 把小波系数值转变为符号流(零树符号、位数据)的过程,而算术编码可以看作是将这些符号流转变为二进制位流的过程.这两个过程都实现了数据的压缩,如何使用算术编码有效地编码符号流是决定整个算法压缩效果的关键.算法编码的性能取决于两个方面:一方面是符号表的大小,算术编码使用的符号表越小,对所编码符号概率的统计和预测越准确;另一方面是频率分布表的使用,算术编码使用频率分布表来记录符号的概率,在编码过程中根据其概率为符号分配位流.把所有需要编码的符号按照其上下文进行分类,并对每一类符号使用一个特定的频率分布表编码,可以极大地提高算术编码的性能,从而提高整个算法的压缩率.

针对传统零树编码和位平面编码的不足,本文提出用“上下文相关的零树编码算法”来编码零树符号图^[2](significance map),用“位平面预测编码算法”来编码系数值(coefficient values).这两个算法充分利用了小波系数之间的相关性,并且将零树编码、位平面编码和算术编码有机地结合起来,通过结合这两个算法就得到了“基于零树和位平面的小波图像压缩算法”.

1 上下文相关的零树编码算法

上下文相关的零树编码(context-sensitive Zerotree,简称 CZ)算法充分挖掘和利用了零树符号之间的相关

* 收稿日期: 2000-04-11; 修改日期: 2000-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69935010;69974005);国家 863 高科技发展计划资助项目(2001AA114142);国家“九五”国防预研基金资助项目

作者简介: 牛建伟(1969 -),男,河南郑州人,博士生,讲师,主要研究领域为视频压缩与流媒体技术,分布式系统;王刃(1974 -),男,重庆人,硕士,主要研究领域为图像压缩技术;李波(1966 -),男,四川南充人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为数字多媒体技术,人工智能.

性,其基本思想是:

- (1) 修改传统的零树符号表,使生成的零树符号图有助于用算术编码进行高效的编码.
- (2) 制订一套预测准则,在编码每个零树符号时,分析其上下文,根据预测准则得到该符号类型的预测值,并根据预测值选择相应的频率分布表来编码该符号.

1.1 零树符号表的修改

传统的零树编码使用了 4 种符号^[3]来表示不同类型的小波系数,这使得算术编码的符号表过大,既不利于提高其性能,也不利于对待编码符号进行预测.因此,本文设计了一种新的零树符号表,其中只包括两种符号:TR(零树根系数),代表所有子系数都为零的小波系数;VAL(值系数),代表拥有非零子系数的小波系数.这样,所有零树根系数的子系数都不用编码,并用一种特殊符号 ZCHI 表示,以便在编码过程中与其他类型的系数相区别.

本文的零树符号表具有以下优点:

- (1) 为算术编码提供一个小符号表(仅两种符号);
- (2) 使得零树符号的分布具有更大的“聚居性”,零树符号之间的相关性更强;
- (3) 使得符号的预测更加简单准确;
- (4) 在最高级频带只有 VAL 和 ZCHI 类型的系数,ZCHI 系数的位置可以通过其父系数的位置推算出来,因此 VAL 系数的位置也就随之确定了,既然所有符号的类别和位置都可以事先推断出来,因此在编码零树符号图时,最高级频带的零树符号就都可以不编码了.

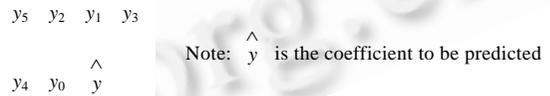
1.2 零树符号的预测

零树符号之间存在着极大的相关性,因此在对每一个符号进行算术编码时,可以利用相关信息对其类型进行预测,并最终根据预测值选择一个特定的频率分布表.这样可以使得每个频率分布表中符号的概率具有更大的相似性,从而能极大地提高算术编码的性能.

下面给出预测算法使用的 3 类最重要的预测信息及其相应的预测准则.

1.2.1 邻居系数信息

待编码系数与周边的邻居系数具有很大的相关性,但是编码和解码是按行序从左到右扫描的,所以在编码时只能使用待编码系数左侧和上方的邻居系数来进行预测,因为在解码时编码系数右侧和下方系数的信息还无法获得.同时,这种相关性也应局限于一定的范围,如果上下文范围太大,反而会引入噪声,影响预测效果.我们的实验证明,采用如图 1 所示的 6 个邻居系数来预测,效果是比较好的.



注:其中符号 \hat{y} 是待预测系数.

Fig.1 The neighbor coefficients for prediction

图 1 参与预测计算的邻居系数

这 6 个邻居系数的重要性并不具有明显的差别,所以,本文使用统计方法来进行预测,也就是说,分别统计邻居系数中 TR 和 VAL 类型系数的数目,并用其中占多数的系数类别(TR 或 VAL)作为待编码系数类别的预测值.

1.2.2 待编码系数在 2×2 系数块中的相对位置

LT	RT
LB	RB

Fig.2 A 2×2 coefficient block

图 2 一个 2×2 系数块

每一频带的所有系数都可以划分为若干个独立的 2×2 系数块,每一个块中的 4 个系数之间都具有比较强的相关性.在 CZ 算法中,用如图 2 所示的 4 种符号来表示在一个 2×2 的系数块中不同位置的系数.其中,LT 代表块中左上角的系数,RT 代表右上角的系数,LB 代表左下角的系数,RB 代表右下角的系数.在绝大多数的 2×2 系数块中,LB 与 LT 之间、RT 与 LT 之间具有很强的相关性,同时 RB 与 RT 之间也具有很强的相关性.

对于不同位置的系数,CZ 算法采取了如下的方法进行预测:

- 如果待编码的 2×2 系数块左侧与零树根系数的子系数(ZCHI 系数)相邻,那么以 TR 作为这个块中 LT 系

数的预测值,以 LT 系数的类型作为 LB 系数的预测值,RT 和 RB 系数的预测按一般情况来处理.

· 如果待编码 2×2 系数块右侧与零树根系数的子系数(ZCHI 系数)相邻,那么以 TR 作为 RT 系数的预测值,以 RT 系数的类型作为 RB 系数的预测值,LT 和 LB 系数的预测按一般情况来处理.

如果一个编码系数块两侧都不与零树根系数的子系数(ZCHI 系数)相邻,那么就利用上文提到的邻居系数信息来预测,同时也要考虑 2×2 系数块中各系数之间的相关性.具体的预测方法是:

- 首先分别统计待编码系数 \hat{y} 的邻居系数 $y_0 \sim y_5$ 中 TR 和 VAL 系数的数目;
- 如果待编码系数在其所属的 2×2 系数块中是 LT 系数,什么也不做;
- 如果是一个 LB 或者是 RT 系数,因为 LT 系数与它们具有较强的相关性,所以 LT 系数的类型(TR 或 VAL)要再一次添加到刚才的统计结果中;
- 如果是一个 RB 系数,因为 RT 系数与它有较强的相关性,所以 RT 系数的类型要再一次添加到刚才的统计结果中.

1.2.3 待编码系数所处的频带信息

在不同频带中,零树根系数和值系数的分布差异很大.低级频带中 VAL 系数占有绝对的优势,在高级频带中 TR 系数有占有较大的优势,最高级频带则全部是 VAL 系数了.因此,在进行预测时,系数所处的频带信息可用于提高预测的准确率.具体的预测准则如下:

- 如果系数处于第 1 级频带,则直接就被预测为 VAL 系数;
- 对于第 2、3 级频带的系数,如果预测数据中 TR 系数的数目大于 VAL 系数的数目,则该系数被预测为 TR 系数;否则,预测为 VAL 系数;
- 对于第 4、5 级频带的系数,如果预测数据中 TR 系数的数目大于或等于 VAL 系数的数目,则该系数被预测为 TR 系数;否则,预测为 VAL 系数.

2 位平面预测编码算法

在使用上下文相关零树编码完零树符号图以后,本文使用位平面预测^[5](bit plane predicting,简称 BPP)来编码零树根系数和值系数的值.BPP 算法从位数据的层面挖掘和利用了小波系数之间的相关性,其主要思想是:

- (1) 根据位数据在系数中的重要性将其分为 3 类;
- (2) 在编码每一类位数据时,使用相应的预测信息和准则对其进行预测,并根据预测值选择频率分布表.

BPP 算法不仅为算术编码提供了小符号表(仅两种符号),而且使用多个频率分布表来提高算术编码的性能,从而实现了位平面编码与算术编码的有机结合.

2.1 位数据的分类

对每一个系数 x ,按二进制从低位到高位表示为

$$b_0 b_1 b_2 \dots b_{h(x)} b_{h(x)+1} \dots b_{N-1}, \quad b_{s(x)} \text{ 为符号位}$$

└──────────┘
均为 0

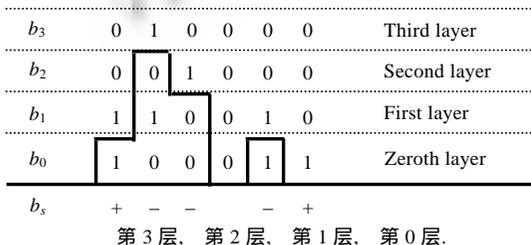


Fig.3 Classification of bits data
图 3 位数据的分类

这里, N 表示系数的位长,用 $h(x)$ 表示 x 最高非零位的下标,则 $b_{h(x)}$ 表示其最高位, $b_{h(x)-1}$ 表示其次高位.其中 $b_{h(x)}, b_{h(x)+1}, \dots, b_{N-1}$ 表示系数的位长信息,包含了关于系数大小最重要的信息,所以称为 x 的主要位(dominant bits,如图 3 黑框以外的位数据); $b_0, b_1, \dots, b_{h(x)-1}$ 表示了关于系数大小更精细的信息,称为 x 的次要位(subordinate bits,如图 3 黑框以内的位数据);而符号位 $b_{s(x)}$ 表示了系数的正负信息.3 种位数据的重要性依次为:主要位>符号位>次要位.相关系数的主要位之间、次要位之间和

符号位数据之间都具有很强的相关性,利用这些相关性可以取得远优于传统位平面编码的效果。

2.2 位数据的编码

在编码每一类位数据时,BPP 算法都使用了不同的预测信息和准则,这可以看作是对位数据之间相关性的发掘和利用.如图 4 所示,在不同系数的位数据之间存在两种相关性:

(1) 同一频带邻居系数的位数据之间存在着邻居相关性,邻居系数又分为远邻居系数和近邻居系数两类;

(2) 同一方向相邻频带系数的位数据之间存在着父子相关性,每一个低级频带的父系数对应着其次高一级频带的 4 个子系数。

近邻居系数、远邻居系数和父系数的位数据对于待编码位数据的预测具有不同的重要性,首先定义几个变量来进行表示:

(1) neighbor:表示根据近邻居系数 $Nn(x)$ 的已编码位对待编码位数据 b_i 的预测值,其求值准则如下:

```
neighbor = 0
for  $\forall y \in Nn(x)$  do
    if  $y$  处于 2/4/5/7 and  $i < h(y)$  then neighbor = neighbor+4
    if  $y$  处于 1/3/6/8 and  $i < h(y)$  then neighbor = neighbor+2
    if  $y$  处于 2/4/5/7 and  $i = h(y)$  and  $b_{h(y)}$  已编码 then neighbor = neighbor+2
    if  $y$  处于 1/3/6/8 and  $i = h(y)$  and  $b_{h(y)}$  已编码 then neighbor = neighbor+1
    if (dir = LH and  $y$  处于 4/5) or (dir = HL and  $y$  处于 2/7) then
        if  $i < h(y)$  then neighbor = neighbor+4
        if  $i = h(y)$  and  $b_{h(y)}$  已编码 then neighbor = neighbor+2
    endif
endfor.
```

其中 $h(y)$ 是 y 的(非 0)最高位 $b_{h(y)}$ 的下标,“ y 处于 2/4/5/7”表示 y 处于如图 5 所示 2、4、5 或 7 的位置。

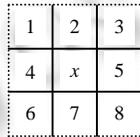


Fig.5 The position of the near neighbor coefficients of x

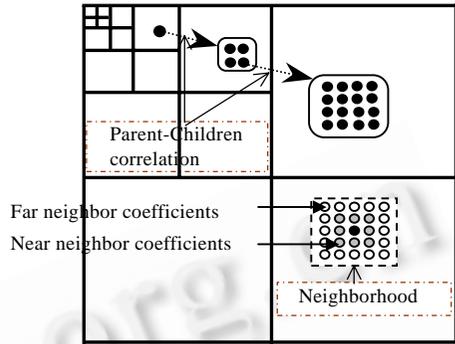
图 5 x 的近邻居系数的位置

(2) farNeighbor:表示远邻居系数 $Nf(x)$ 的已编码位对 b_i 的预测值,其求值准则如下:

```
farNeighbor = 0
for  $\forall y \in Nf(x)$  do
    if  $i < h(y)$  or ( $i = h(y)$  and  $b_{h(y)}$  已编码) then farNeighbor = 1; end
endfor.
```

(3) parent:表示父系数 $P(x)$ 的已编码位对 b_i 的预测值,其求值准则如下:

```
parent = 0
for  $\forall y \in P(x)$  do
    if  $i < h(y)$  then parent = 2; end
```



父子相关性, 远邻居系数, 近邻居系数, 邻居相关性。

Fig.4 The correlation among bit data

图 4 位数据之间的相关性

```

    if  $i=h(y)$  and  $b_{h(y)}$ 已编码 then  $parent = 1$ ; end
endfor.

```

下面分别给出 3 类位数据的最终预测准则.若待编码位 b_i 是主要位,即 $i \geq h(x)$,则用 x 的相关系数中的已编码位对其进行预测,设预测值为 $predict1$,其求值准则如下:

```

if  $neighbor \geq 8$  then  $predict1 = 7$ ; end
if  $neighbor \geq 4$  then  $predict1 = 6$ ; end
if  $neighbor \geq 2$  then  $predict1 = 5$ ; end
if  $neighbor \geq 1$  then  $predict1 = 4$ ; end
if  $parent=2$  then  $predict1 = 3$ ; end
if  $farNeighbor=1$  then  $predict1 = 2$ ; end
if  $parent=1$  then  $predict1 = 1$ ; end
 $predict1 = 0$ .

```

若待编码位 b_i 是次要位,即 $i < h(x)$,这时分两种情况:如果 b_i 是次高位(即 $i=h(x)-1$),则用 $Nn(x)$ 中系数的已编码位对其进行预测,设预测值为 $predict2$;如果 b_i 低于次高位(即 $i < h(x)-1$),则直接存储 b_i ,因为实验证明,再预测并编码这些位数据对压缩效果提高不大. $predict2$ 的求值准则如下:

```

if  $neighbor \geq 8$  then  $predict2 = 4$ ; end
if  $neighbor \geq 4$  then  $predict2 = 3$ ; end
if  $neighbor \geq 2$  then  $predict2 = 2$ ; end
if  $neighbor \geq 1$  then  $predict2 = 1$ ; end
 $predict2 = 0$ .

```

若待编码位是符号位 $b_{s(x)}$,设其预测值为 $predict3$,其求值准则如下(位置关系如图 5 所示):

```

 $positiveNumber = 0$ ;  $negativeNumber = 0$ 
for  $\forall y \in Nn(x)$  do
    if  $y$  处于 2/4/5/7 then
        if  $b_{s(y)}$ 为+ and  $b_{s(y)}$ 已编码 then  $positiveNumber = positiveNumber+1$ 
        if  $b_{s(y)}$ 为- and  $b_{s(y)}$ 已编码 then  $negativeNumber = negativeNumber+1$ 
        endif
    if ( $dir = LH$  and  $y$  处于 4/5) or ( $dir = HL$  and  $y$  处于 2/7) then
        if  $b_{s(y)}$ 为+ and  $b_{s(y)}$ 已编码 then  $positiveNumber = positiveNumber+1$ 
        if  $b_{s(y)}$ 为- and  $b_{s(y)}$ 已编码 then  $negativeNumber = negativeNumber+1$ 
        endif
    endif
endfor
if  $positiveNumber > negativeNumber$  then  $predict3 = 2$ ; end
if  $positiveNumber = negativeNumber$  then  $predict3 = 1$ ; end
 $predict3 = 0$ .

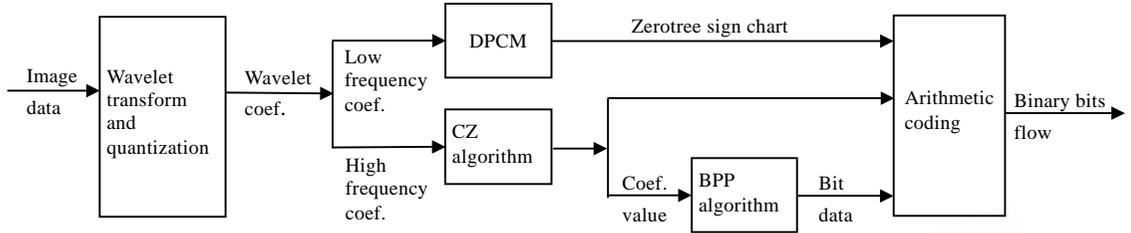
```

BPP 算法对于系数值的编码顺序如下:按照位平面的高低,从高位平面到低位平面逐层编码.每一位平面上的编码分为两遍:第 1 遍编码主要位,如果该位是最高位 $b_{h(x)}$,则附带处理其符号位;分别根据其预测值 $predict1$ 和 $predict3$ 选择特定的频率分布表;第 2 遍编码次要位,根据其预测值 $predict2$ 选择特定的频率分布表;在每一遍内从低级频带到高级频带逐级编码,并在每一频带内都按行从左到右扫描.

3 基于零树和位平面的小波图像压缩算法

将“上下文相关零树编码(CZ)算法”和“位平面预测编码(BPP)算法”结合起来,就得到了“基于零树和位平面的小波图像压缩算法(image compression algorithm based on Zerotree and bit plane,简称 ZBP)”.ZBP 算法的压缩

过程如图 6 所示.



图像数据, 小波变换、量化, 低频系数, 小波系数, 高频系数, CZ 算法, 零树符号图, 系数值, BPP 算法, 位数据, 算术编码, 二进制位流.

Fig.6 Flow chart of ZBP compression algorithm
图 6 ZBP 压缩算法流程图

4 实验结果

EZW^[2]是第一个使用零树编码的小波图像压缩算法,在小波图像压缩算法研究领域有着重要地位.SPIHT^[6]使用了改进的零树编码,取得了很好的压缩效果,并得到了广泛的应用,可以认为它代表了当前零树小波编码的最高水平.因此,将本文的ZBP算法与这两种算法进行比较,对于验证ZBP算法压缩效果有重要的参考依据.表 1 是 ZBP 算法与这两种算法压缩灰度图像的实验结果比较.

Table 1 Comparison among the results of ZBP, EZW and SPIHT
表 1 ZBP 与 EZW,SPIHT 的实验结果比较

Image (512 × 512)	Compression rate (bpp)	EZW(dB)	SPIHT(dB)	ZBP(dB)
Lena	0.125	30.23		31.36
	0.15		31.9	32.42
	0.25	33.17	34.11	34.48
	0.50	36.28	37.21	37.48
Barbara	0.125	24.03		25.99
	0.25	26.77	27.58	28.36
	0.50	30.53	31.39	32.34
Goldhill	0.25		30.56	30.73
	0.50		33.12	33.42

图像, 压缩率.

Table 2 Comparison between the results of ZBP and MPEG-4 VM805
表 2 ZBP 与 MPEG-4 VM805 的实验结果比较

Image	Compr. rate (bpp)	Y PSNR		Cb PSNR		Cr PSNR		Average PSNR	
		ZBP	VM 805	ZBP	VM 805	ZBP	VM 805	ZBP	VM 805
Big_Sky	0.250	48.34	46.20	45.27	46.78	46.49	47.32	46.98	46.77
	0.125	44.05	42.31	43.26	43.01	44.33	43.55	43.88	42.96
	0.062 5	40.75	39.50	40.99	40.06	42.02	40.59	41.25	40.05
Rockies	0.25	36.08	34.56	35.93	36.42	38.71	38.02	36.90	36.33
	0.125	32.75	31.32	34.72	34.26	37.48	36.21	34.98	33.93
	0.062 5	29.91	28.64	33.48	32.34	35.95	33.82	33.11	31.60
Thai_Boat	0.250	37.73	35.85	41.42	40.49	39.83	39.85	39.66	38.73
	0.125	33.26	31.37	39.14	37.09	37.86	36.38	36.75	34.94
	0.062 5	29.81	28.04	36.28	35.26	35.19	33.40	33.76	32.23
Bottles	0.250	36.36	34.22	36.52	36.01	35.39	36.23	36.09	35.49
	0.125	30.54	28.45	34.09	31.91	32.86	32.23	32.50	30.86
	0.062 5	26.23	24.21	30.41	29.54	29.36	28.46	28.66	27.40
Wilderness	0.250	52.00	49.86	51.20	51.18	50.89	50.97	51.36	50.67
	0.125	48.13	46.33	49.78	48.65	49.58	48.76	49.16	47.91
	0.062 5	44.69	42.71	48.33	45.89	48.19	45.95	47.07	44.85
Waterskier	0.250	46.86	44.88	47.90	47.02	45.62	46.72	46.79	46.21
	0.125	41.01	39.52	44.87	42.49	43.23	41.84	43.06	41.28
	0.062 5	36.10	34.46	40.76	38.69	40.09	37.98	38.98	37.04

图像, 压缩率, 平均 PSNR.

表 2 是 ZBP 算法和 MPEG-4 VM805^[7]对于彩色图像压缩的实验结果比较.VM805 是 MPEG-4 标准^[8]的软

件实现,其中所使用的都是 MPEG-4 标准目前采纳的最新技术,代表了相关国际标准的最高水平.因此,将 ZBP 算法与 MPEG-4 VM805 进行比较,能够反映 ZBP 算法与国际标准之间的水平差异.

从表 1 中可以看出,对于 3 幅标准灰度图像,在任何一种压缩率下 ZBP 的结果都要优于 EZW 和 SPIHT 算法.从表 2 中也可以看出,对于 6 幅标准彩色图像,在任何一种压缩率下 ZBP 的结果都要优于 VM805.而表 1 与表 2 中图像内部的相关性各不相同,这说明 ZBP 算法不仅具有更好的压缩效果,而且适合于不同的图像.因此,可以认为 ZBP 算法是一个通用性强、压缩效果好的小波图像压缩算法.

分析 ZBP 算法的成功原因,主要有以下 3 点:(1)“上下文相关的零树编码(CZ)算法”不仅充分利用了邻居系数之间的相关性,也利用了 2×2 系数块中各系数之间的相关性,实现了零树编码与算术编码的有机结合,通过提高算术编码的性能,降低了零树符号图的编码开销;(2)“位平面预测编码(BPP)算法”按照位数据的重要性对其分类,从位数据的层面挖掘和利用了小波系数之间的相关性,将邻居系数和父系数的相关信息充分利用到位数据的编码中,对于不同类别的位数据也设计了相应的预测准则.这些都有利于提高算术编码的性能,从而提高了整个算法的压缩效果;(3)作为 CZ 算法和 BPP 算法相结合的结果,ZBP 充分利用了小波系数之间的相关性和算术编码的特性,将零树编码、位平面编码和算术编码有机地结合起来,取得了优于 EZW、SPIHT 和 MPEG-4 VM805 的压缩效率.

References:

- [1] Cui, Jin-tai. The Introduction to Wavelet Analysis. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995 (in Chinese).
- [2] Shapiro, J.M. Embedded image coding using Zerotrees of wavelet coefficients. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12):3445~3462.
- [3] Sodagar, Iraj, Lee, Hung-Ju, Hatrack, P., *et al.* Scalable wavelet coding for synthetic/natural hybrid images. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1999,9(2):244~254.
- [4] Witten, I.H., Neal, R.M., Cleary, J.G. Arithmetic coding for data compression. Communications of the ACM, 1992,30(6):520~540.
- [5] Wang, Hai, Li, Bo, Li Wei. Bit plane prediction image compression based on wavelet packet transform. Chinese Journal of Advanced Software Research, 1999,6(3):21~28.
- [6] Said, A., Pearlman, W.A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996,6(3):243~249.
- [7] Sikora, T. The MPEG-4 video standard verification model. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1997, 7(1):32~51.
- [8] Overview of the MPEG-4 Standard. ISO/IEC JTC1/SC29/WG11/N2323, Ireland, Dublin, 1998.

附中文参考文献:

- [1] 崔锦泰.小波分析导论.西安:西安交通大学出版社,1995.

An Image Wavelet Compression Algorithm Based on Zerotree and Bit Plane*

NIU Jian-wei, WANG Ren, LI Bo

(Department of Computer Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

E-mail: niujianwei@263.net

http://www.buaa.edu.cn

Abstract: By combining Zerotree, bit plane and arithmetic coding together, a new image compression algorithm based on Zerotree and bit plane called ZBP is presented in this paper. ZBP exploits the correlation among the Zerotree symbols and the bit data of wavelet coefficients, so the efficiency of arithmetic coding is improved. Experimental results demonstrate that ZBP performs better compression than the existing wavelet image compression algorithms.

Key words: wavelet transform; Zerotree coding; bit plane coding; arithmetic coding; image compression

* Received April 11, 2000; accepted September 11, 2000

Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.69935010, 69974005; the National High Technology Development 863 Program of China under Grant No.2001AA114142; the Defense Pre-Research Project of the 'Ninth Five-Year-Plan' of China