

## 一种基于二进制小波变换的无损图像编码算法

潘泓<sup>①</sup> W C Siu<sup>②</sup> 夏良正<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(东南大学自动化学院 南京 210096)

<sup>②</sup>(香港理工大学电子与资讯工程系 香港)

**摘要:** 该文提出了一种基于二进制小波变换的嵌入式无损图像编码算法——渐进式分裂二进制小波树编码器 (PPBWC)。PPBWC 采用混合系数扫描方法按模值大小排序小波系数得到中间符号序列, 通过非因果的自适应上下文条件编码考虑了不同频带小波系数的自相似特性, 并利用待编码系数的“未来”信息提高了 PPBWC 的压缩编码性能。混合系数扫描和非因果的自适应上下文条件编码是 PPBWC 高效编码的主要因素。实验结果表明, 与其它嵌入式无损算法相比, PPBWC 具有最优的无损编码性能。

**关键词:** 无损图像编码; 二进制小波变换; 嵌入式小波编码器

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1671-05

## A Binary Wavelet Transform-Based Lossless Image Coding Algorithm

Pan Hong<sup>①</sup> W C Siu<sup>②</sup> Xia Liang-zheng<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

<sup>②</sup>(Department of EIE, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract:** A binary wavelet transform-based embedded lossless image coding algorithm called Progressive Partitioning Binary Wavelet-tree Coder (PPBWC) is proposed. In the PPBWC, by using a hybrid coefficient scanning technique, symbols are yielded through the sorting of wavelet coefficients according to the absolute values. The symbols are then encoded using a non-causal adaptive context modeling which takes the advantage of self-similarity between coefficients at different subbands and employs the future information of the encoding coefficient to improve the compression efficiency. Hybrid coefficient scanning and non-causal adaptive context modeling are the major factors that contribute to the compression gain of the PPBWC. Experimental results show that the PPBWC outperforms most of other embedded coders in terms of coding efficiency.

**Key words:** Lossless image compression; Binary wavelet transform (BWT); Embedded wavelet coder

### 1 引言

近年来, 人们提出了许多基于小波变换的图像编码方法<sup>[1-4]</sup>, 这类方法的最大特点是具有高效编码效率和适当的计算复杂度, 能够在不同尺度下描述图像。常用的小波变换是在实数域中进行, 输入信号和变换结果都是实函数。在实际应用中, 图像的灰度值可以用有限位整数表示, 如 256 色灰度图像的灰度值可用 [0,255] 的 8 位整数表示。而基于小波变换的图像编码算法大多采用实数小波变换 (Real Wavelet Transform, RWT), RWT 扩展了小波系数的幅值范围, 使小波系数幅值远远超出原始图像灰度的取值范围, 因而不能很好地反映图像本身的特性, 也不能获得最佳的编码性能。为此, 人们将小波变换从实数域扩展到有限域, 并提出了各种有限域小波变换<sup>[5-7]</sup>。Calderbank 等人<sup>[7]</sup>提出了整数小波变换 (Integer Wavelet Transform, IWT), 将整数信号通过

IWT 映射得到整数小波变换系数, 并将 IWT 引入无损图像编码应用中。但 IWT 依然存在变换系数幅值扩展的问题。Swanson 和 Tawfik<sup>[5]</sup>针对二值图像应用提出了二进制小波变换 (Binary Wavelet Transform, BWT)。与 RWT 相比, 由于输入信号和中间结果都是二值数据, BWT 不会引入量化误差, 而且变换是完全可逆的。此外, 变换中的所有运算都是模 2 运算, 可以用“异或”实现, 因此变换速度得到极大提高。

本文将二进制小波变换从二值图像编码推广到灰度图像的无损编码, 提出了一种基于 BWT 的渐进式分裂二进制小波树编码器 (Progressive Partitioning Binary Wavelet-tree Coder, PPBWC)。PPBWC 采用二进制小波变换去除了图像数据的冗余, 得到图像的小波域描述, 通过混合系数扫描和非因果的自适应上下文条件编码等关键技术得到图像的嵌入式渐进压缩码流。混合系数扫描按模值大小对小波系数进行排序, 优先编码大模值系数, 提高了编码效率。非因果的自适应上下文条件编码采用小波域的空间方向树结构, 充分考虑了不同频带小波系数的自相似特性, 并利用待编码系

2006-12-18 收到, 2007-09-17 改回  
香港特区政府 CERG 基金项目和 CERG grant (PolyU 5133/02E) 资助课题

数的“未来”信息提高了算术编码器的概率估计精度，从而极大地改善了PPBWC的压缩编码性能。

## 2 二进制小波变换

离散二进制小波变换<sup>[8]</sup>过程和离散实数小波变换相似，但输入信号和变换结果都是二值信号。离散二进制小波变换的数学模型可描述如下，若 $x$ 表示待变换的 $N$ 维输入二值序列， $T$ 是 $N \times N$ 维的变换矩阵，则离散二进制小波变换的输出结果 $y$ 可由循环卷积计算得到，并可表示为

$$y = Tx = \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} x \quad (1)$$

$$C = (c_{|s=0}, c_{|s=2}, \dots, c_{|s=N-2})^T;$$

$$D = (d_{|s=0}, d_{|s=2}, \dots, d_{|s=N-2})^T \quad (2)$$

$$c = \{c_0, c_1, \dots, c_{N-2}, c_{N-1}\}^T;$$

$$d = \{d_0, d_1, \dots, d_{N-2}, d_{N-1}\}^T \quad (3)$$

式中 $N \times N$ 维变换矩阵 $T$ 由尺度函数系数和小波函数系数组成。 $a_{|s=k}$ 表示由序列 $a$ 中元素循环右移 $k$ 位后得到的向量。 $c_i$ 和 $d_i$ 分别代表尺度函数系数和小波函数系数。

为了使二进制小波变换能实现对信号的多尺度分解并能重构出原始信号，BWT中的低通滤波器和带通滤波器必须满足4个基本约束条件<sup>[5,8]</sup>，即带宽约束、消失矩约束、完备重构约束和垂直约束。带宽约束条件保证了尺度函数的低通滤波特性和小波函数的带通滤波特性。完备重构约束保障了信号可以通过逆变换重构得到，且重构信号和原始信号完全一致。在二值域中，该约束条件可转换为变换矩阵 $T$ 的行列式值等于1。消失矩约束条件反映了滤波器描述缓变信号的紧凑能力。为了使小波函数具有带通滤波特性，其消失矩阶数必须大于1。同时，对于长度为 $N$ 的信号，小波函数最多具有 $N/2$ 阶消失矩<sup>[5]</sup>。垂直约束条件<sup>[8]</sup>保证了逆变换中滤波器系数形式的一致性。

二进制小波变换的滤波器设计需要综合考虑上述4个基本约束条件。文献<sup>[8]</sup>给出了满足这些约束条件的32对长度为8的二值滤波器组，根据低通滤波器系数中‘1’的个数，我们将这些滤波器组分成4类列于表1中。

## 3 灰度图像的二进制小波变换

二进制小波变换(BWT)最初的应用对象是二值信号，对于具有连续色调的灰度图像必须将其分解成一系列二值图像才能使用。为此，本文采用位平面分解方法，把一幅 $K$ 位的灰度图像分解成 $K$ 个二值位平面图像，根据位平面的重要性将其按MSB(最重要位平面)到LSB(最不重要位平面)排序，并对每个二值位平面图像进行二进制小波变换。图1显示了256色灰度图像‘lena’的二进制小波变换和逆变换的结果。BWT中采用的二值滤波器是表1中列出的第1类滤波器。作为比较，图2给出了对相同‘lena’图像进行RWT，IWT和其逆变换结果。实验中使用的RWT核函数及IWT核函数分别是双正交9/7小波<sup>[9]</sup>和双正交5/3小波<sup>[10]</sup>。从图

1结果可见，256色灰度图像的BWT系数范围仍保持在 $[0, 255]$ ，小波域中大系数对应了图像中的高频突变部分，而低频平滑部分对应的小波系数大多为零或接近于零。RWT和IWT都不同程度地扩展了图像小波系数的范围，其中，RWT系数位于 $(-627.3, 1967.8)$ 之间，IWT系数位于 $[-191, 264]$ 之间。显然RWT和IWT产生的变换系数扩展问题会潜在地影响图像无损编码算法的效率。



图1 256色灰度图像的二进制小波变换及逆变换图像

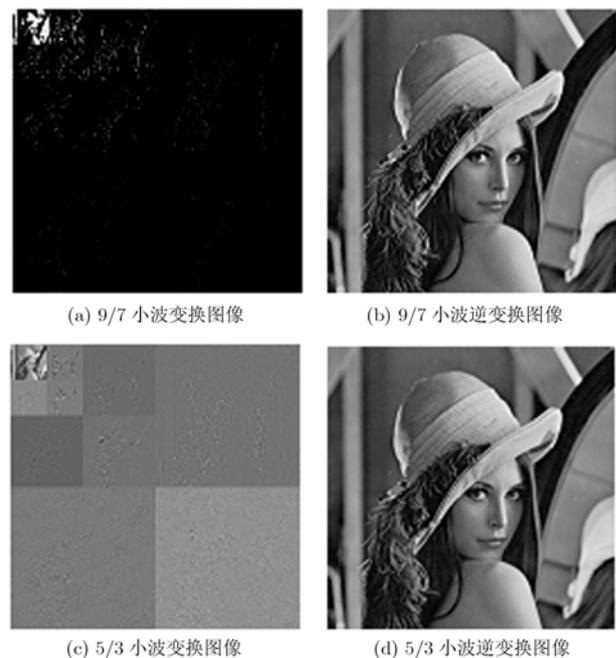


图2 256色灰度图像的实数小波变换、整数小波变换及逆变换图像

表 1 长度为 8 的二值滤波器组

类别	分析滤波器		综合滤波器	
	低通滤波器	带通滤波器	低通滤波器	带通滤波器
第 1 类	{0,1,0,0,0,0,0}	{1,1,0,0,0,0,0}	{1,1,0,0,0,0,0}	{1,0,0,0,0,0,0}
第 2 类	{1,1,1,0,0,0,0}	{1,1,0,0,0,0,0}	{0,0,1,1,0,0,0}	{0,1,1,1,0,0,0}
第 3 类	{1,1,1,1,0,0,0,1}	{1,1,0,0,0,0,0,0}	{0,0,0,0,0,0,1,1}	{1,0,0,0,1,1,1,1}
第 4 类	{1,1,1,1,1,1,1,0}	{1,1,0,0,0,0,0,0}	{0,0,0,0,0,0,1,1}	{0,1,1,1,1,1,1,1}

### 4 渐进式分裂二进制小波树编码器

本文提出的渐进式分裂二进制小波树编码器 (PPBWC) 采用混合系数扫描方法按模值大小排序小波系数得到中间符号序列, 并用非因果的自适应上下文条件编码符号序列得到图像的压缩码流。由于量化过程中使用了渐进方式分裂小波系数, 和 EZW<sup>[1]</sup>及 SPIHT<sup>[2]</sup>算法一样, PPBWC 产生的码流具有渐进传输和嵌入特性。但本文算法不需要进行零树分析, 结构简单易于实现。由于二进制小波变换并不扩展小波系数的数值范围, 对灰度图像编码时不需考虑小波系数的符号信息。PPBWC 输出的码流中只包含 ‘0’ 和 ‘1’ 两个符号, 而 EZW 输出的码流却包含 ‘ZTR’, ‘POS’, ‘NEG’ 和 ‘IZ’ 等 4 个符号。因此, PPBWC 编码时只需保持和更新一个符号变量的概率分布表, 从而极大地提高了编码速度。

#### 4.1 混合系数扫描

混合系数扫描是一种按优先级顺序进行渐进量化的的小波系数量化方法, 它融合了 DCT 压缩中的 PPC (Partition Priority Coding)<sup>[11]</sup>编码思想和 EZW, SPIHT 等具有嵌入特性的小波编码器中的分层编码技术, 按系数的重要性对其进行逐个编码并按位平面的重要性进行逐层量化。通过这种量化方法, 可以产生较长的零值符号序列, 从而提高编码器的效率。图 3(b)显示了混合系数扫描的过程。所有像素按由 MSB 到 LSB 的顺序扫描。对每个位平面, 首先, 按 zigzag 的方式扫描像素, 当遇到系数为 1 的像素(即重要像素)后, 输出该像素剩余位平面的系数。然后返回到刚才的位平面, 继续扫描后续像素, 直到所有像素都扫描完后, 再转入下个位平面继续扫描。那些在前面已经检测到的重要像素, 在后续的编码过程中将被忽略。当所有的位平面都已扫描结束或压缩码流达到指定大小时, 整个扫描过程结束。对图 3(b)所示的小波系数, 扫描前两个位平面输出的符号序列分别是 {11011011, 0, 0, 0, 0, 11010000, 0, 11001001, 0} 和 {1010001, 0, 1010101, 1001110, 0, 0}。与采用 zigzag 顺序扫描的 PPC 编码方案相比, 混合系数扫描按像素的重要性进行排序, 并优先编码包含最重要信息的像素。与 EZW, SPIHT 算法中的分层编码技术相比, 混合系数扫描方法一检测到重要像素就立刻输出它其余位平面的系数, 而不是等所有位平面都扫描完毕后, 才能传输完该像素的所有位平面系数。因此, 在混合系数扫描中, 越重要的像素就越先被传输。

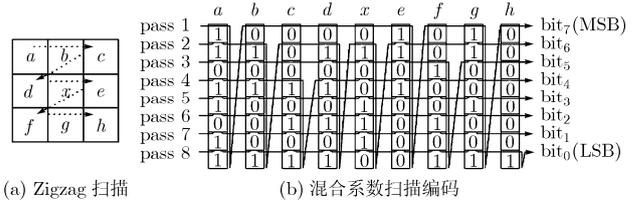
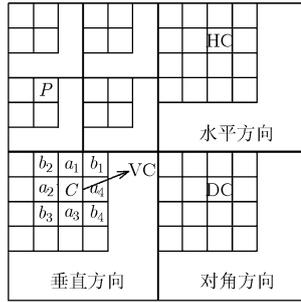


图 3 PPBWC 利用 “未来” 信息进行编码的特性

#### 4.2 非因果的自适应上下文模型

多数嵌入式编码系统采用小波系数值构成上下文来估计编码器中变量的条件概率, 本文提出的 PPBWC 采用待编码小波系数  $C(i, j)$  的重要性状态(包括重要系数、非重要系数和未知状态)来估计变量的条件概率。小波系数  $C(i, j)$  的重要性状态不仅和其邻近系数的重要性状态高度相关, 也和它同一层中兄弟节点及上一层中父节点的重要性状态有关。因此, 如图 4 所示, 在 PPBWC 中小波系数  $C(i, j)$  的 8 邻域像素的重要性状态和兄弟节点以及父节点的重要性状态组成了编码  $C(i, j)$  的重要性状态的非因果上下文模型。根据  $C(i, j)$  所在子带的不同, 模型会自适应地选择不同的兄弟节点。图 3 解释了 PPBWC 利用 “未来” 信息进行编码的特性。若小波系数  $a, b, c, d, x, e, f, g, h$  按图 3(a)所示的 zigzag 顺序扫描, 由于  $a, b, c, d$  在  $x$  之前被扫描, 因此可视为  $x$  的 “过去” 信息, 而  $e, f, g, h$  可视为  $x$  的 “未来” 信息。PPBWC 采用混合系数扫描编码这些系数, 图 4(b)显示了编码过程。编码器起初将所有系数的重要性状态设为未知状态, 并在编码过程中不断更新。系数  $x$  在编码 bit<sub>6</sub> 时被检测为重要系数, 在编码  $x$  的重要性状态时,  $a, b, d, e, g$  已经被识别为重要系数, 其重要性状态将被用来组成编码  $x$  重要性状态的上下文。由于在 zigzag 扫描时,  $e, g$  在  $x$  之后被扫描, 因而它们的重要性状态是编码  $x$  的未来信息。由上可见, 采用非因果的自适应上下文模型编码当前小波系数时, 不仅考虑了已编码系数中包含的过去信息, 也充分利用了待编码系数的未来信息, 从而可以降低编码过程的不确定性, 并提高编码器估计变量的条件概率精度。

图 4 显示了 PPBWC 编码系数  $C(i, j)$  重要性状态时使用的参考系数集合  $U$ , 集合  $U$  中的系数构成了编码  $C(i, j)$  的上下文模型。

图4 系数  $C(i, j)$  的上下文模型

(1)若  $C(i, j)$  位于水平或垂直方向的子带中, 则  $U = \{a_i, b_i, P, DC \mid i = 1, 2, 3, 4\}$ ;

(2)若  $C(i, j)$  位于对角方向的子带中, 则  $U = \{a_i, b_i, P, HC, VC \mid i = 1, 2, 3, 4\}$ 。其中  $\{a_3, a_4, b_3, b_4, DC\}$  组成了  $C(i, j)$  的“未来”信息。HC、VC 和 DC 分别表示  $C(i, j)$  的同一层中水平方向、垂直方向和对角方向的兄弟节点。P 表示  $C(i, j)$  上一层中的父节点。

研究表明<sup>[11]</sup>, 将一个信号分割成多个具有不同概率分布的子信号有助于降低信号传输的成本。为此, 本文将 PPBWC 产生的码流根据编码的内容分成两个子码流, 即重要位码流和细化位码流。重要位码流传输系数的重要性状态, 并采用前文所述的非因果自适应上下文模型进行算术编码。细化位码流传输重要系数除重要位之外的其余各位, 采用单独的自适应算术编码。为了防止上下文数目过多造成上下文稀释, 影响编码器的概率估计精度, 本文采用文献[3]的 Magnitude-Set Variable-Length Integer (MS-VLI) 模型进行上下文量化, 简化重要位编码中的上下文数目。在下面的叙述中, 用  $MS(x)$  表示 MS-VLI 模型算子。考虑到人眼视觉对水平和垂直方向的结构比较敏感, 在上下文量化时可给水平和垂直方向系数赋予较大的权值。根据待编码系数的不同位置, 其重要位编码的上下文模型可构造如下:

(1)若待编码系数  $C(i, j)$  位于水平或垂直方向的子带中, 则量化后的上下文

$$m = MS \left( 3 \sum_{i=1}^4 a_i + 2 \sum_{j=1}^4 b_j + 3DC \right) \quad (4)$$

(2)若待编码系数  $C(i, j)$  位于对角方向的子带中, 则量化后的上下文

$$m = MS \left( 3 \sum_{i=1}^4 a_i + 2 \sum_{j=1}^4 b_j + 3(HC + VC) \right) \quad (5)$$

若待编码系数  $C(i, j)$  有父节点, 则量化后的上下文

$$\left. \begin{aligned} m &= MS \left( 3 \sum_{i=1}^4 a_i + 2 \sum_{j=1}^4 b_j + 3(DC + P) \right), \\ &C(i, j) \text{ 位于水平或垂直方向子带中} \\ m &= MS \left( 3 \sum_{i=1}^4 a_i + 2 \sum_{j=1}^4 b_j + 3(HC + VC + P) \right), \\ &C(i, j) \text{ 位于对角方向子带中} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

## 5 实验结果

本实验的测试图像来自 JPEG 标准图像和 JPEG2000 测试图像, 所有图像的尺寸都是  $512 \times 512$ 。本文比较了提出的 PPBWC 与 CALIC<sup>[12]</sup>, LJPEG<sup>[13]</sup>, JPEG-LS<sup>[14]</sup>, SPIHT<sup>[2]</sup> 和 CREW<sup>[4]</sup> 等主要无损算法编码测试图像所用的比特率 (bit per pixel, bpp)。为了比较 BWT 和 IWT 对灰度图像的无损编码效果, 我们用 5/3 小波对测试图像进行 IWT, 并用 SPIHT 算法对 IWT 系数进行无损编码得到 IWT-SPIHT 的无损压缩码率。

从表 2 中结果可见, PPBWC 的无损编码性能比 LJPEG 提高了 9.72%, 比 CREW 提高了 6.00%, 比 IWT-SPIHT 提高了 2.36%, 比 JPEG-LS 提高了 2.45%。由第 3 节实验结果可知, 对一幅  $k$  位灰度图像的整数小波变换扩展了 IWT 系数的取值范围, 进行无损编码时每个 IWT 系数都要输出符号信息, 整个编码过程所需的系数扫描次数通常大于  $k$  次。而图像的 BWT 系数仍保持在  $[0, 2^k - 1]$ , 最多只需  $k$  次扫描即可完成无损编码, 由于编码时不需输出 BWT 系数的符号信息, 可以节省大量的码流 (对本实验的测试图像, IWT-SPIHT 的平均符号码流约占总输出码流的 18%), 用于编码更多的 BWT 系数。此外, 在基于 lifting scheme 的 IWT 方法中, 每次 lifting 环节后都要对所得结果进行四舍五入得到 IWT 系数。显然, 这样的取整函数会引入量化误差, 且误差随着 lifting 次数的增加而积累, 这种 IWT 分解过程中产生的系统误差对无损编码性能影响较大<sup>[10]</sup>。而 BWT 分解过程中, 所有运算都是“异或”运算, 不会引入量化误差。因此 PPBWC 比 IWT-SPIHT 具有更好的无损编码效果。PPBWC 的编码性能优于无损编码的国际标准 JPEG-LS, 原因在于为了降低算法的复杂度, JPEG-LS 放弃了基于高阶上下文模型的算术编码方法, 只使用了较为简单的预测模型和逐个系数编码方式。这样使其具有较快的编码速度, 但编码性能也受到了一定程度的限制。

PPBWC 的无损编码性能稍逊于 CALIC 3.57%。由于 CALIC 针对不同码流采用复杂的上下文建模、选择和量化技术, 因此其编码性能略好于 PPBWC。为了获得高效的编码效率, CALIC 使用 4 个能量误差上下文和 144 个空间纹理上下文一共组合成 576 个复合上下文模型, 对非线性预测算子进行条件编码; 而 PPBWC 仅使用 9 个上下文模型进行重要位条件编码。因此, PPBWC 中上下文建模和量化等模块的计算复杂度远远低于 CALIC。此外, PPBWC 使用简单的 MS-VLI 模型进行上下文量化, 而 CALIC 的上下文量化过程极为复杂, 需要从大量的实验数据中离线训练出最优量化系数。还须值得指出的是, PPBWC 具有嵌入式编码特点, 可以在高效编码的同时保持渐进传输的特性, 而 CALIC 却没有上述优点。

表2 PPBWC与其它编码器的无损编码性能比较

测试图像	嵌入式编码器			非嵌入式编码器		
	PPBWC	IWT-SPIHT	CREW	LJPEG	CALIC	JPEG-LS
Lena	4.145 bpp	4.192 bpp	4.512 bpp	4.694 bpp	4.042 bpp	4.237 bpp
Airplane	3.915 bpp	3.859 bpp	4.319 bpp	4.403 bpp	3.830 bpp	3.793 bpp
Boat	4.077 bpp	4.736 bpp	4.504 bpp	4.663 bpp	3.778 bpp	4.795 bpp
Pepper	4.551 bpp	4.607 bpp	4.718 bpp	4.978 bpp	4.391 bpp	4.513 bpp
Barbara	4.677 bpp	4.747 bpp	5.077 bpp	5.491 bpp	4.493 bpp	4.863 bpp
Mandrill	5.927 bpp	6.048 bpp	6.212 bpp	6.381 bpp	5.987 bpp	6.038 bpp
Goldhill	4.544 bpp	4.634 bpp	4.762 bpp	4.985 bpp	4.387 bpp	4.712 bpp
Hotel	4.504 bpp	4.615 bpp	4.885 bpp	5.063 bpp	4.224 bpp	4.350 bpp
Lax	5.745 bpp	5.815 bpp	5.970 bpp	6.025 bpp	5.625 bpp	5.763 bpp
Seismic	2.887 bpp	2.889 bpp	2.924 bpp	3.083 bpp	2.960 bpp	3.027 bpp
Target	2.748 bpp	2.734 bpp	2.887 bpp	3.085 bpp	2.291 bpp	2.824 bpp
平均比特率	4.338 bpp	4.443 bpp	4.615 bpp	4.805 bpp	4.183 bpp	4.447 bpp

## 6 结束语

以二进制小波变换为代表的有限域小波变换充分考虑了有限位灰度图像本身的特性,它不仅能去除图像数据的冗余,将图像能量集中在少数变换系数上,而且变换系数可以用有限位整数表示。由于变换过程不引入量化误差,并存在快速算法,因而有限域小波变换可以较好地提高图像的编码效率。

本文将二进制小波变换推广到灰度图像的无损编码应用中,提出了一种基于BWT的渐进式分裂二进制小波树编码器—PPBWC。PPBWC采用混合系数扫描方法优先量化包含最重要信息的小波系数并利用非因果的自适应上下文模型对小波系数的重要性状态进行条件编码,因此具有渐进传输和嵌入式编码等特点。与其它嵌入式无损算法相比,PPBWC不仅结构简单易于实现,而且具有最优的无损编码性能。

## 参考文献

- [1] Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelets coefficients. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3445-3462.
- [2] Said A and Pearlman W A. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, 6(3): 243-250.
- [3] Said A and Pearlman W A. An image multiresolution representation for lossless and lossy compression. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1996, 5(9): 1303-1310.
- [4] Zandhi A, Allen J D, Schwartz E L, and Boliek M. CREW: Compression with reversible embedded wavelets. 1995 IEEE Proc. Data Compression Conference., Snowbird, Utah, 1995: 212-221.
- [5] Swanson M D and Tewfik A H. A binary wavelet decomposition of binary images. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1996, 5(12): 1637-1650.
- [6] Caire G, Grossman R L, and Poor H V. Wavelet transform associated with finite cyclic groups. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1993, 39(4): 1157-1166.
- [7] Calderbank A R, Daubechies I, Sweldens W, and Yeo B L. Wavelet transform that map integers to integers. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 1998, 5(3): 332-369.
- [8] Law N F and Siu W C. Issue of filter design for binary wavelet transform. 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Salt Lake City, Utah, 2001: 3649-3652.
- [9] Antonini M, Barlaud M, Mathieu P, and Daubechies I. Image coding using wavelet transform. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1992, 1(2): 205-220.
- [10] Adams M D and Kossentini F. Reversible integer-to-integer wavelet transform for image compression: performance evaluation and analysis. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 8(6): 1010-1024.
- [11] Huang Y, Driezen H M, and Galatsanos N P. Prioritized DCT for compression and progressive transmission of images. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1992, 1(4): 477-487.
- [12] Wu X and Memon N. Context-based, adaptive lossless image coding. *IEEE Trans. on Communications*, 1997, 45(4): 437-444.
- [13] Huang K. Lossless JPEG Codec Ver. 1.0. <ftp://ftp.cs.cornell.edu/pub/multimed/ljpg/>
- [14] Lossless and near-lossless coding of continuous tone still images (JPEG-LS). ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1. FCD 14495-public draft. 1997.

潘泓: 男, 1974年生, 博士, 副研究员, 研究领域为图像编码、信号处理、小波变换、计算机视觉、模式识别。

W C Siu: 男, 讲座教授, 研究领域为多媒体信号处理、图像/视频编码、模式识别。

夏良正: 男, 1943年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为图像处理、计算机视觉、数字视频处理、自动目标识别。