

基于整数小波变换和改进嵌入零树编码的图像压缩¹

丁绪星 朱日宏 李建欣

(南京理工大学电光学院 南京 210094)

摘 要: 整数小波变换 (IWT) 具有输入输出都是整数、只需进行位内运算、便于硬件实现等优点, 特别适于图像的无损压缩; 而在有损压缩方面, 其效果通常稍逊于传统的离散小波变换 (DWT)。为了提高 IWT 图像有损压缩的性能, 该文采用基于提升格式的 IWT, 结合基于形态膨胀运算的改进嵌入零树小波编码 (EZW) 方法。实验结果表明, 在没有增加运算复杂度的情况下, 此算法与传统的 DWT 相比, 提高了峰值信噪比 (PSNR), 具有较好的有损压缩效果。

关键词: 整数小波变换, 嵌入零树小波编码, 形态运算, 图像压缩

中图分类号: TN919.8, O177.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)07-1064-06

Image Compression Based on Integer Wavelet Transform and Improved Embedded Zerotree Wavelet Encoding

Ding Xu-xing Zhu Ri-hong Li Jian-xin

(School of Electron. Eng. and Photoelectric Tech., NUST, Nanjing 210094, China)

Abstract The main advantages of Integer Wavelet Transform(IWT) are that the input and output values are all integers, all operations can be done in place, only a small memory is required and easy to be implemented in hardware. In the context of image coding, IWT is well suited for lossless compression. However, it performs a little worse compared to the conventional Discrete Wavelet Transform(DWT) for lossy compression. In this paper, a new algorithm is proposed for improving lossy compression performance of IWT. It is by means of the IWT based on lifting scheme combining with improved Embedded Zerotree Wavelet(EZW) based on morphological dilation operation. Simulation results show the proposed algorithm improves the Peak Signal Noise Ratio(PSNR) compared to conventional DWT without increasing computational complexity.

Key words Integer wavelet transform, Embedded zerotree wavelet coding, Morphological operation, Image compression

1 引言

近年来, 人们对整数小波变换 (IWT) 在图像压缩领域中的应用研究越来越感兴趣^[1-8]。IWT 是一种有限精度的计算, 又是整数到整数的变换, 它具有如下特点: (1) 变换后的系数是整数, 运算速度快; (2) 计算时能最小限度地利用存储器; (3) 能很方便地实现可逆变换; (4) 不依赖傅里叶变换, 能保证重构, 简单可靠; (5) 同时继承了传统小波变换的多分辨率等特征。对于数字图像信号来说, 其原始信号是整数, 因此用 IWT 能较好地实现无损压缩, 且已被 JPEG2000^[9] 标准所采用, 目前的文献大多侧重于此; 虽然有些文献^[1-6] 也对 IWT 的有损压缩进行了研究, 但与传统的离散小波变换 (DWT) 相比, 其压缩效果有一定差距。本文利用

¹ 2003-04-06 收到, 2003-06-19 改回

IWT 的优点, 采取有关措施弥补 IWT 的不足; 采用基于形态膨胀运算的改进的嵌入零树小波 (EZW) 编码算法, 从而获得比 DWT 更好的有损压缩效果。

2 整数小波变换 (IWT)

一般实现 IWT 有两种方法: 一是直接构造二进制数域中的滤波器^[10]; 二是在构造整数到整数的小波分解过程中, 把能完全重构的“信息”隐藏在运算过程中, 即用提升格式^[7,11]实现。前者在满足带宽、消失矩、完全重构等限制条件下, 构造二进有限滤波器, 文献 [10, 12] 给出了一种设计思想和一些关键问题。不幸的是, 到目前为止, 人们还未能设计二进滤波器实现可逆整数小波变换的统一有效的方法。当前比较成熟的方法是后者即基于提升格式的整数小波变换。

众所周知, 在实际应用中 DWT(通常称为第一代小波) 存在一些问题: (1) 信号经过小波变换后, 其输出通常为浮点数, 受计算机有效字长的影响, 难以实现精确重构; (2) 对内存需求大; (3) 对图像信号而言, 不能对所有尺寸的图像进行变换, 图像的恢复质量受变换时边界采取的延拓方式影响较大。Sweldens 等人提出的基于提升算法的小波构造方法^[11](俗称第二代小波) 克服了上述缺点, 其基本思想为任何一个具有有限长度双正交小波滤波器都可分解成基本的构造模块, 分步骤完成小波变换; 其基本步骤为

(1) 分裂。该过程将原始信号分解成奇数点和偶数点两个互不相交的子集, 且二者相关性越强越好。

(2) 预测。基于奇偶两子集的相关性, 用一个子集去预测另一子集。一般来说, 预测值与原始值之差要比原始值的信息量少的多。

(3) 更新。经过前两个步骤产生的数据子集的某些整体特征与原始数据中的性质不一致, 采用更新过程用某种算子产生一个更好的子集, 使之保持原始信号的某些特征。对某个子集继续若干次上述步骤的提升, 即可得到具有多分辨率性质的一个低频子集和若干个高频子集。

基于提升算法的小波分解操作, 其输出结果仍然为小数, 如对每一次更新和预测滤波后的数据进行取整就可实现整数小波变换。取整操作相当于对原始小波滤波器的系数作很小的改动, 所以这种变换是完全可逆的。逆变换仅需将分解操作中的“+”、“-”互换即可。图 1 为基于提升格式的整数小波变换示意图。

3 影响基于 IWT 图像有损压缩效果的主要因素

实验发现^[1-6,13]在有损压缩情况下, 在峰值信噪比上, IWT 比 DWT 要差一些; 对高频分量较少的图像, 这种差距更明显, 有时能达几个分贝。造成此情况的原因很复杂, 但主要有以下几个方面:

(1) 由图 1, 基于提升格式的 IWT 是对每一次滤波后的结果取整, 因此取整算子的选取对缩短 IWT 与 DWT 的差距有重要影响。对于取整算子主要考虑其奇偶性和误差特性; 奇偶性能保持信号的对称性, 而误差特性好能保证 IWT 与原变换的逼近程度。根据文献 [1, 5], 本文选用取整算子

$$\text{Int}[x] = \lfloor x + 1/2 \rfloor \quad (1)$$

此算子具有奇对称性。其二进制误差在常用的取整算子中是最小的。有损压缩时, 尤其在低比特率情况下, 其压缩性能与 DWT 相比相差甚小, 主观评价时可以忽略不计。

(2) 研究发现, 在有损压缩情况下, 较低比特率时, IWT 和 DWT 几乎无差距; 但随着比特率越来越高, 差距越来越大。这主要由于取整运算导致 IWT 去相关能力减弱。众所周知, 对于一个实数, 越大对其取整带来的误差越小。因此在对图像进行 IWT 前, 将各像素值乘以一个大于 1 的系数; 显然系数越大, IWT 结果越接近 DWT。表 1 是标准的 512×512×8 的“Women”

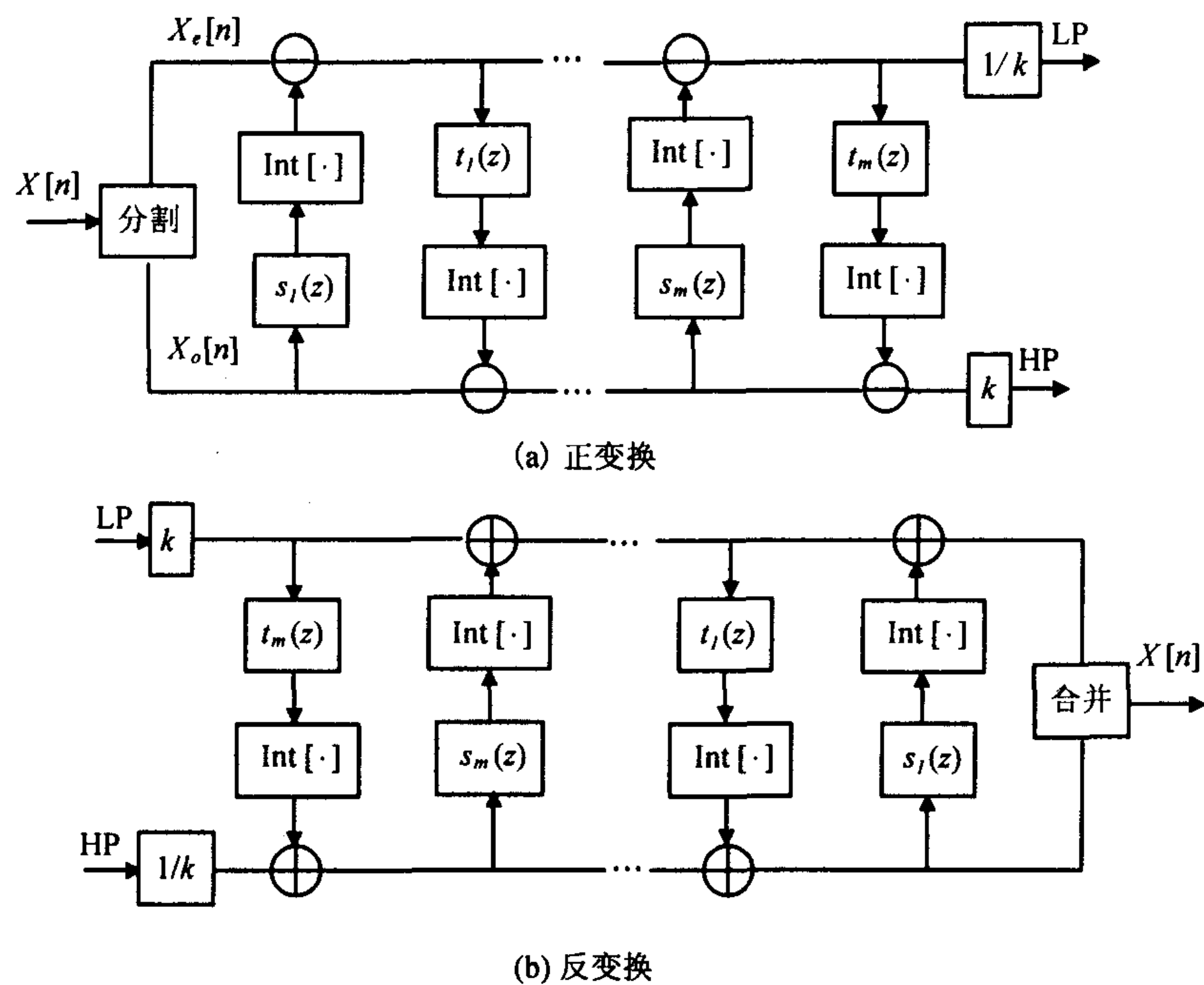


图 1 基于提升格式的整数小波变换 (Int[·] 为取整运算)

表 1 DWT 和不同系数 IWT 的 PSNR 值 (dB)

类型	像素比特率 (bpp)			
	1.0	0.5	0.1	0.05
IWT(不乘系数)	35.82	30.54	25.14	21.80
IWT(乘以系数 8)	36.20	31.02	25.60	21.87
IWT(乘以系数 16)	36.92	31.63	26.16	21.98
IWT(乘以系数 64)	37.15	32.10	26.76	22.04
IWT(乘以系数 128)	37.18	32.18	26.78	22.04
DWT	37.18	32.20	26.79	22.06

图像乘以不同系数再用 DB9/7 整数小波变换及原图经 DWT 后的 PSNR 值 (均经过标量量化和 EZW 编码)。

此方法的缺点是由于像素值乘以系数后图像的动态范围大了, 从而在运算时需更多的存储开销, 也会影响运算的速度。采取改进的 EZW 编码器可以利用此特点, 弥补这一不足, 下一节将详细介绍。

(3) 由于 IWT 的非线性, 其性能依赖于所选的小波滤波器多项式的因式分解, 而因式分解是不唯一的, 这就需要一种标准来选择最好的分解 (在给定的误差指标下, 如 PSNR)。最直接的方法为产生所有可能的分解, 从中选择有最好处理结果的一种; 但此法的缺点是计算量大, 且依赖所选的具体图像。目前被证明有效的方法有 3 种^[5], 通常这 3 种方法相互配合使用。

(a) 最小非线性迭代函数^[14]。定义第 i 级迭代函数:

$$\psi^{(i)}(t) = 2^{i/2} g^{(i)}[n] \quad (2)$$

其中 $n/2^i < t < (n+1)/2^i$, $g^{(i)}[n]$ 为第 i 级迭代合成高通滤波器的冲激响应, 且 $\lim_{i \rightarrow \infty} \psi^{(i)}(t)$ 收敛于合成离散小波 $\psi(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - k)$ (其中 $k, m \in \mathbb{Z}$)。有损压缩的性能有赖于 $\psi^{(i)}(t)$ 的正则性, 且与所选择的具体图像有关。注意到 $\psi^{(i)}(t)$ 对单位冲激响应 ($x[n] = \delta[n]$) 的正则性

差, 但对于放大的冲激响应 ($x_A[n] = A\delta[n]$, $A > 1$) 有光滑的趋势, 设 $\psi_{j,A}^{(i)}$ 为第 j 种因式分解的第 i 级冲激响应, 则一个能够度量非线性程度的 L_2 范数定义如下:

$$\varepsilon_{j,A}^{(i)} = \|A\psi^{(i)}(t) - \psi_{j,A}^{(i)}(t)\|_{L_2} \quad (3)$$

根据式 (3) 选择使 $\varepsilon_{j,A}^{(i)}$ 最小的因式分解为最佳因式分解。

(b) 最少提升步数。此判据简单、直接。主要是选择使因式分解的提升步数最少, 亦即使取整运算最少; 从而导致变换的非线性最弱, 并且在软、硬件实现时可提高运算速度, 节省存储空间。

(c) 使图 1 中的归一化因子 k 接近于 1。由文献 [7] 知, 尽可能使 k 接近于 1 可以去除提升分解的非奇异性。当 $k = 1$ 时, 无需对变换的系数进行归一化操作, 从而减少计算复杂度。文献 [5] 证明, k 越接近于 1, 其有损压缩效果越好。

根据以上分析, 采取相应的改进措施可以弥补 IWT 相比于 DWT 的不足。

4 基于形态运算的改进 EZW 编码

EZW 编码^[15] 采用空间零树结构来有效表示同一空间位置上不同子带的“零值”, 导致重要性映射图的紧凑描述, 进行空间小波树递归编码, 有效剔除了对高频系数的编码, 极大提高了小波系数的编码效率, 算法复杂度低, 它打破了长期以来人们认为只有通过高复杂度的算法才能获得高效编码器的错误观点, 在数据压缩史上具有里程碑意义。然而此算法仍然有尚待改进的地方。如其不能对子带单独编码, 没有充分利用子带内重要系数的相关性和不同子带间重要系数的相似性, 而是将“零值”与重要系数混在一起逐行扫描编码。在产生一个新的重要系数时, 其所有的子系数都被编码, 即使其孙系数可能都是“零值”。根据上述分析, 本文对 EZW 进行改进。算法的主要思想为利用文献 [16] 的条件形态膨胀算法, 在小波分解后的每个子带中, 针对每个主通符号 (在一定阈值下, EZW 编码产生的符号, 它隐含有意义的小波系数的正、负号和所在的位置信息, 详见文献 [15]), 对量化后的小波系数进行划分以获得重要系数聚集的区域, 对这些区域优先编码, 紧接着再对剩余系数 (主要为“零值”及少数分散的重要系数) 编码。编码时不像 EZW 那样逐行进行, 而是逐个区域进行。具体的编码过程包括若干步, 每步都有一个改进主通符号和次通符号。改进主通符号用来根据当前的量化域值找出新的重要系数; 次通符号用来细化主通符号的重要系数。改进主通符号和 EZW 的主通符号的区别在于前者不但对重要系数进行编码, 且在形态膨胀过程中的一些“零值”也编码。对每个改进主通符号, 其对应的系数用一系列嵌入式量化器 $\{Q_0, Q_1, \dots, Q_{n-1}\}$ 进行量化^[17]:

$$Q_i(x) = \begin{cases} Z, & |x| < T/2^{i+1} \\ P, & T/2^{i+1} \leq x < T/2^i \\ N, & -T/2^i < x \leq -T/2^{i+1} \end{cases} \quad (4)$$

i 表示通道数, $i = 0, 1, \dots, n-1$, T 为小波系数的最大值。 Z 表示“零值”, P 表示正的重要系数, N 表示负的重要系数。子带编码的顺序如图 2。

对每个新的改进主通符号, 最低频子带用当前通道的量化器对每个系数进行量化, 产生的符号根据每个区域的概率特性选用不同的模型进行算术编码^[16]。对每个高

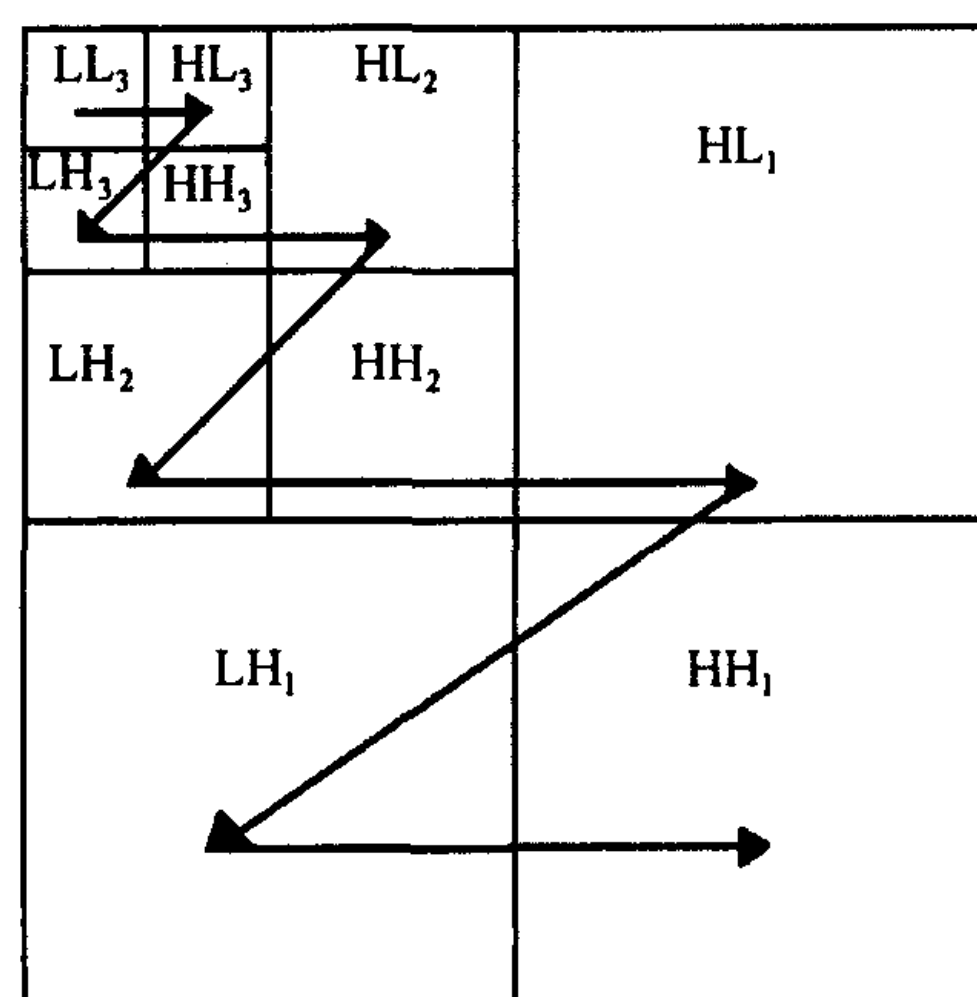


图 2 子带编码顺序

频子带, 首先根据当前的量化域值用形态膨胀运算获得重要系数区域, 接着对剩余系数用零树编码^[15]。高频子带的编码具体分为如下几步:

第 1 步 把以前通道中被标记为重要的系数作为形态膨胀运算的种子, 根据当前的量化域值查找新的重要系数, 如此往复, 直至重要系数区域不再增加。

第 2 步 由小波分解后的重要系数在不同层次上, 相同空间滤波方向上的分布具有相似性, 根据量化域值, 当前子带的所有重要系数的位置可由同一空间滤波方向上较粗尺度的子带上的重要系数预测得到。逐个扫描这些预测的位置, 如以前未被处理过, 则进行编码; 当发现新的重要系数后, 它再次被用作形态膨胀算法的种子进一步确定下一个新的重要系数 (如遇到“零值”, 且其父系数是零树的根, 则跳过)。

第 3 步 对剩余系数用零树编码。

将上述 3 个步骤发现的重要系数添加到次通量列表中。在改进主通符号编码后, 用相同的域值对次通符号进行编码, 使前面的改进主通符号的重要系数被细化, 依次下去, 实现性能比传统 EZW 更好的嵌入式编码, 使图像的压缩效果更佳。

5 实验结果

为了实现基于 IWT 的图像有损压缩效果能与传统的 DWT 媲美甚至超过它, 根据第 3 节的论述和文献 [5] 的实验结果, 选用 DB9/7 整数小波滤波器。由表 1 知, 当与像素相乘的系数小于 16 时, 性能改进不大; 当系数大于 128 时, 相乘后像素值的动态范围太大, 能从几十到几千, 这不但增加存储开销, 且影响后续的压缩性能, 因此综合各个因素, 在小波分解前, 与原始图像的各个像素相乘的系数折衷取 64; 经 DB9/7 整数小波的 5 级分解, 再对变换后的小波系数进行第 4 节所述的改进 EZW 编码, 用 16 种标准的 $512 \times 512 \times 8$ 图像 (Camera, Café, Finger, Bike, Women, Cats, Couple, Bird, Bamboo, Mountain, Peppers, Mandrill, Bridge, Lenna, Barbara, Goldhill) 进行测试, 限于篇幅这里只给出具有代表性的 Lenna, Barbara 和 Goldhill 图像的实验结果。

表 2 为在不同比特率下, 分别用本文算法 (DB9/7 小波, 改进的 EZW 编码) 和传统 DWT 进行有损压缩编码的 PSNR 差值。

表 2 本文的 IWT 算法和传统 DWT 编码的 PSNR 差值 (dB)

比特率 (bpp)	Lenna	Barbara	Goldhill
1.0	0.14	0.21	0.28
0.75	0.29	0.27	0.39
0.5	0.32	0.29	0.46
0.25	0.46	0.31	0.49
0.125	0.51	0.38	0.67

由表 2 的实验结果可见, 采用本文的基于 IWT 和改进的 EZW 算法对图像进行有损压缩, 可以取得较好的效果, 在 PSNR 上, 好于传统 DWT 编码, 特别在低比特率时, 效果更明显。

6 结论

将整数小波变换和基于形态膨胀运算的改进的 EZW 编码相结合, 应用于图像的有损压缩, 在一定程度上提高了 PSNR, 同时利用了整数小波变换运算速度快, 存储开销小, 便于硬件实现等优点。由于 IWT 的诸多独特优点, 使得如何提高 IWT 的有损压缩效果成为热门研究课题。本文下一步的工作将继续研究整数小波变换方法和与之相匹配的编码方法, 以获得更好的压缩效果。

参 考 文 献

- [1] Adams M D. Reversible integer-to-integer wavelet transforms for image compression. Ph.D. Thesis, Vancouver, Canada. University of British Columbia, 2002.
- [2] Astumi E, Farvardin N. Lossy/lossless region-of-interest image coding based on set partitioning in hierarchical trees. Proc. of IEEE International Conference on Image Processing, Chicago, USA, 1998, 1: 87-91.
- [3] Kim H, Li C C. Lossless and lossy image compression using biorthogonal wavelet transforms with multiplierless operations. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, 1998, 45(8): 1113-1118.
- [4] Said A, Pearlman W A. An image multiresolution representation for lossless and lossy compression. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1996, 5(9): 1303-1310.
- [5] Grangetto M, Magli E, Olmo G. Optimization and implementation of the integer wavelet transform for image coding. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2002, IP-11(6): 596-604.
- [6] Reichel J, Menegaz G, Nadenau M J, et al.. Integer wavelet transform for embedded lossy to lossless image compression. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2001, IP-10(3): 383-392.
- [7] Calderbank A R, Daubechies I, Sweldens W, et al.. Wavelet transforms that map integers to integers. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 1998, 5(31): 332-369.
- [8] Jung H Y, Prost R. Lossless subband coding system based on rounding transform. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1998, SP-46(9): 2535-2540.
- [9] ISO/IEC 15444-1: JPEG2000. <http://www.jpeg.org/FCD-1441-1.html>.
- [10] Swanson M S, Tewfik A H. A binary wavelet decomposition of binary images. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1996, IP-5(12): 1637-1650.
- [11] Sweldens W. The lifting scheme: A construction of second generation wavelets. *SIAM J.Math Anal.*, 1997, 29(2): 511-546.
- [12] Law N F, Siu W C. Issues of filter design for binary wavelet transform. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Salt Lake City, UT, USA, 2001, 6: 3649-3652.
- [13] Sheng F, Bilgin A, Sementilli P J, et al.. Lossy and lossless image compression using reversible integer wavelet transform. In Proc. of IEEE International Conference on Image Processing, Chicago, IL, USA, 1998, 3: 876-880.
- [14] Grangetto M. Minimally non-linear integer wavelets for image coding. Proc. ICASSP, Istanbul, Turkey, 2000, 6: 2039-2042.
- [15] Shaprio J M. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1993, SP-41(12): 3345-3462.
- [16] Servetto S D, K. Ramchandran, Orchard M T. Image coding based on a morphological representation of wavelet data. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1999, IP-8(9): 1161-1174.
- [17] Taubman D, Zaknor A. Multirate 3D subband coding of video. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1994, IP-3(5): 572-588.

丁绪星: 男, 1971 年生, 博士生, 研究方向: 图像压缩与传输、光纤通信等。

朱日宏: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向: 图像处理、光电信号分析等。

李建欣: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向: 图像处理。