

一种基于整数小波变换的图像编码算法*

张立保⁺, 王珂

(吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130025)

An Image Compression Algorithm Based on Integer Wavelet Transform

ZHANG Li-Bao⁺, WANG Ke

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

+ Corresponding author: Phn: 86-431-5701948, E-mail: libaozhang@163.com

<http://www.jlu.edu.cn>

Received 2002-07-13; Accepted 2002-09-11

Zhang LB, Wang K. An image compression algorithm based on integer wavelet transform. *Journal of Software*, 2003,14(8):1433~1438.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1433.htm>

Abstract: Integer wavelet transform (IWT) and IWT-Based image-compression offer many advantages over traditional wavelet. But every subband coefficients of the IWT-Image have smaller dynamic change value and worse energy compaction than the first generation wavelet. Those reduce efficiency of embedded zerotree wavelet (EZW) coding. This paper proposes “integer square quantization threshold from 1” instead of “2 of integer power quantization threshold” during EZW coding. It shortens the distances of every quantization threshold, reduces probability of the important coefficients in the lower quantization threshold area and increases zerotrees. It reduces the coding signs and does not code the zerotrees of the most high-frequency subbands. The experiments results show that integer square zerotree wavelet (ISZW) coding algorithm solves the low efficiency of EZW based on IWT and improves the performance of compression algorithm. It may be used in still picture compression and transmission.

Key words: integer wavelet transform; zerotree coding; integer square zerotree wavelet coding; 2 of integer power; quantization threshold

摘要: 针对静止图像经整数小波变换(integer wavelet transform)后,各子带系数的幅值动态变化范围小,不利于零树编码(embedded zerotree wavelet coding)的缺点,采用“从1开始的整数平方”代替“2的整数次幂”作为零树编码的量化阈值,缩短了量化阈值间隔,通过减少重要系数在较低量化阈值中出现的次数,增加了编码过程中的零树数量;同时通过减少参与编码的字符数及对最高频带零树不编码,简化了编码过程。实验结果表明,整数平方量化阈值下的零树编码(integer square zerotree wavelet coding)解决了整数小波变换中零树编码的低效问题,提高了静止图像的编码效率。

关键词: 整数小波变换;零树编码;整数平方零树编码;2的整数次幂;量化阈值

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.59638220 (国家自然科学基金)

第一作者简介: 张立保(1977-),男,河北保定人,博士生,主要研究领域为图像压缩编码,模式识别,多媒体技术。

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

整数小波变换^[1]作为新一代图像压缩标准 JPEG 2000^[2]的核心部分已经得到广泛研究.零树编码则是当前小波图像压缩算法中最常用的编码技术.如果将整数小波变换与嵌入式零树编码有机地结合起来,不仅可以发挥整数小波变换的优点,还能大幅度提高图像的压缩效率.

由 J.M.Shapiro 等人首先提出来的嵌入式零树编码(EZW)^[3]是第一个使用零树编码的小波图像压缩算法.它利用小波图像中各级子带间的相似性,可根据图像清晰度要求在任何地方停止编码.SPIHT 算法^[4]通过改进零树编码取得了更好的压缩效果.文献[5]进一步给出了将 EZW 编码与位平面编码相结合的小波压缩算法.

在提升格式^[6](lifting scheme)下建立的整数小波变换具有变换可逆、整数存储及只有加减和移位运算等优点.文献[7]将整数小波变换中截断取整看成对图像加噪的过程,从修改整数小波变换的角度改善了压缩效果,虽然改进了编码算法,但该算法立足于整数小波变换的调整,提高了编解码的复杂度和不可靠性.

本文从零树编码自身的特点出发,引入整数平方零树编码(integer square zerotree wavelet coding)算法,通过对嵌入式零树编码中“2的整数次幂”量化阈值改为“从1开始的整数平方量化阈值”,缩短了各阈值间的距离,使各阈值间的重要系数分布更适合整数小波变换中的小波系数的分布特点,解决了整数小波变换下零树编码的低效问题,同时不增加编解码算法的复杂度.实验结果表明,在相同压缩比下,ISZW 算法较 EZW 算法和 SPIHT 算法在重建图像的信噪比方面有所提高.

1 基于提升格式的整数小波变换

提升格式^[6](lifting scheme)作为整数小波变换的基础,分为分裂(split)、预测(predict)和更新(update)3个步骤.由于提升模型实现了真正意义上的无损可逆小波变换,因此在图像压缩传输领域得到广泛应用,并成为 JPEG2000 标准的核心部分.此外,提升模型避免了一般小波变换借助快速傅立叶变换完成卷积操作的步骤,仅含有移位运算和加减运算,便于硬件实现.提升格式的框架如下:

分裂:此过程是将信号 s_j 分裂成两个互不相交的子集 $s_{j,2l}$ 和 $s_{j,2l+1}$,通常是将一个数列分为偶数序列和奇数序列,即

$$s_{j,2l} = \text{even}(s_j), \quad (1)$$

$$s_{j,2l+1} = \text{odd}(s_j). \quad (2)$$

预测:针对数据间的相关性,采用一个与数据结构无关的预测算子 P .先将 P 滤波器作用于偶信号上得到奇信号的预测值 $P(s_{j,2l})$,再将该预测值与原奇信号 $s_{j,2l+1}$ 相减得到奇信号的预测误差 d_{j-1} .预测过程的表达式如下:

$$d_{j-1} = s_{j,2l+1} - P(s_{j,2l}). \quad (3)$$

更新:由于第1步生成的偶信号 $s_{j,2l}$ 在某些整体性质上并不和原始数据一样,因此需要采用更新的过程.故引入更新算子 U 通过对 $s_{j,2l}$ 作预测以生成更好的子数据集,并保持 s_j 的一些特性. s_{j-1} 的定义如下:

$$s_{j-1} = s_{j,2l} + U(d_{j-1}). \quad (4)$$

式(5)与式(6)给出了基于提升框架的整数小波变换的基本公式:

$$d_{j-1} = s_{j,2l+1} - \text{int}[P(s_{j,2l})], \quad (5)$$

$$s_{j-1} = s_{j,2l} + \text{int}[U(d_{j-1})], \quad (6)$$

式中 $\text{int}[\cdot]$ 为四舍五入取整运算.

2 EZW 编码算法及其缺陷

2.1 传统的零树编码算法

传统的嵌入式零树编码充分发掘和利用了各级小波子图像的自相似特性,其基本步骤如下:

- (1) 按照 2 的整数幂从高到低排列量化阈值.
- (2) 规定扫描顺序为:从最低尺度下的各子图开始,同一尺度下从低频子图经水平子图再经垂直子图到高

频子图,然后开始扫描下一尺度的子图,直至最高尺度.

(3) 从最高量化阈值开始比较各小波系数与该量化阈值的大小,并结合低尺度系数与高尺度系数分布关系,生成 4 种符号,即正重要系数(POS)、负重要系数(NEG)、孤立零点(IZ)和零树根(ZTR).

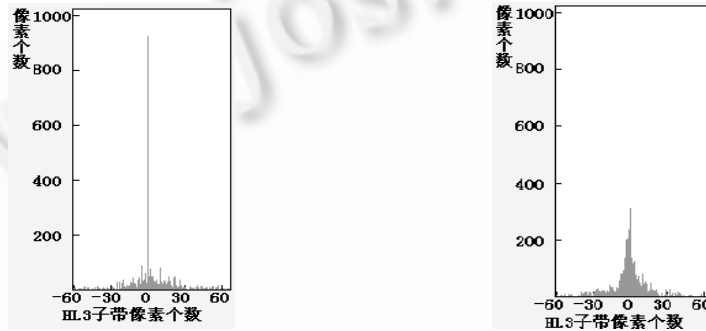
(4) 逐级递减小量化阈值,按扫描顺序搜索重要系数,根据搜索结果形成重要系数坐标序列,输出索引.

(5) 小波系数幅值逐级细化,在每一级量化阈值上,根据重要系数坐标序列输出这些坐标在该阈值上的 1 比特值.

2.2 传统零树编码的缺陷

从零树编码的基本步骤可知,该算法的高效性是建立在小波系数分布特征和幅值变化特点基础之上的,若小波变换的形式发生变化而导致小波系数分布和幅值均发生较大变化,则有理由对传统 EZW 算法的高效性提出质疑.

整数小波变换于采用提升格式使各子带系数幅值的动态变化范围低于第一代小波变换,这不利于 EZW 算法中的第 1 步——按照 2 的整数幂从高到低排列量化阈值.图 1 给出了对(256×256×8bit)Lena 图像作一般小波变换和整数小波变换后,HL₃子带小波系数的分布情况,由图可见,后者的小波系数变化幅度较前者低很多.



(a) HL₃ subband pixels histogram based on DWT

(b) HL₃ subband pixels histogram based on IWT

(a) DWT 变换下 HL₃ 子带的像素分布图

(b) IWT 变换下 HL₃ 子带的像素分布图

Fig.1 HL₃ subband pixels histogram of 256×256×8 bit Lena based on different wavelet transform

图 1 不同小波变换下 256×256×8 bit Lena 图像 HL₃ 子带像素分布直方图

因此,对传统的 EZW 编码作适当调整,则可以在不增加编码复杂度的情况下提高编码效率.进一步分析可知,采用 EZW 编码方案中“2 的整数次幂”作为小波系数编码的量化阈值有如下 3 个弊端:

(1) 由于阈值以 2 的整数幂形式上升,使整数小波系数中幅值接近的系数大量集中在同一重要图中,既减少了重要图的层数,也减少了零树的数量.

(2) 在一般小波变换中因为较高阈值下的重要系数很少,并且系数幅值很高,因而相对误差较小,而在整型小波变换中较高阈值下存在较多的重要系数,如果有很多系数量化误差较大,则总的相对误差会很大.

(3) 采用 2 的整数次幂,前后两个较高阈值间的相对距离较大,两阈值间的重要系数经过处理后在下一两个量化阈值中出现的概率很大.

本文给出一种新算法——基于整数平方量化阈值的小波零树编码(ISZW).通过调整零树编码过程中量化阈值的选取方案,改进了整体编码算法的效率,同时没有增加编码的复杂度,便于硬件实现.

3 基于 ISZW 的编码算法

ISZW 算法的核心思想是:用“从 1 开始的正整数平方”取代一般嵌入式零树编码中所用的“2 的整数次幂”作为编码过程中的量化阈值.相对降低相邻阈值区间的距离,对于整数小波变换后各子带系数而言,除了最低量化阈值区间以外,每个量化阈值区间内的重要系数个数随着量化阈值的降低近似线性增加,同时在每一级中,重要系数的取值更接近于原系数值.最大限度地增加了编码过程中零树的数量,大大提高了编码效率.

具体算法步骤如下:

- (1) 建立数组 $s(k)$, 令 $s(k)=k^2, k=(0,1,2,3\dots)$, 数组中的数值即为各级量化阈值, 找出所有子带中绝对值最大的像素幅值 f_{\max} , 将其与 $s(k)$ 作比较, 如果 $f_{\max} > s(k)$, 则 $k=k+1$, 依次循环, 直到 $f_{\max} < s(k)$, 此时令 $s(k-1)$ 为最大量化阈值.
- (2) 规定和 EZW 算法同样的扫描顺序.
- (3) 在新阈值下按扫描顺序和 EZW 编码中相邻父子子带系数的相关性, 生成重要系数图和零树根.
- (4) 对正负重要系数与孤立零树根合并, 用 IVAL 表示; 对零树根的子系数不作编码, 用 ZERO 表示. 降低编码所用的字符数, 同时最高频带的零树符号不参与编码.
- (5) 完成同一阈值下的编码后重复步骤(2), 直至量化阈值为 1.

图 2 分别给出了 EZW 与 ISZW 编码方案的传输过程. 其中 f_{\max} 代表所有子带中绝对值最大的像素幅值, 且有 $2^n > f_{\max} > 2^{n-1}$ 和 $k^2 > f_{\max} > (k-1)^2$.

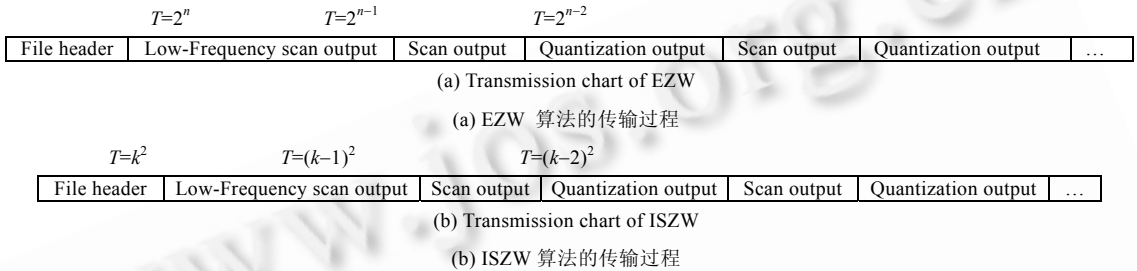


Fig.2 Comparison between the transmission chart of EZW and ISZW

图 2 EZW 与 ISZW 的传输过程比较

表 1 给出了 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ Lena 图像经(4,2)双正交小波滤波器组(形式见式(7)与式(8))的六级整数小波变换后, 高频子带系数在 EZW 算法中的“2 的整数幂”量化阈值下各量化区间重要系数分布与 ISZW 算法中的“整数平方”量化阈值下各量化区间重要系数分布的比较.

$$d_{j-1,l} = s_{j,2l+1} - \text{int}[9/16(s_{j,2l} + s_{j,2l+2}) - 1/16(s_{j,2l-2} + s_{j,2l+4}) + 1/2]. \tag{7}$$

$$s_{j-1,l} = s_{j,2l} + \text{int}[1/4(d_{j-1,l-1} + d_{j-1,l}) + 1/2]. \tag{8}$$

Table1 Comparison between the distribution of important coefficients of high-frequency coefficients of ISZW and EZW based on six-level IWT of $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ Lena

表 1 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ Lena 作六级整数小波变换后高频子带系数采用 ISZW 和 EZW 算法后各阈值区间重要系数分布的比较

(a) The distribution of important coefficients of high-frequency coefficients of ISZW algorithm based on integer square quantization threshold

(a) 基于整数平方量化阈值的 ISZW 算法中高频子带重要系数的分布

Image	Quantization scale											
	144~168	121~143	100~120	81~99	64~80	49~63	36~48	25~35	16~24	9~15	4~8	1~3
Lena	2	34	51	106	260	650	1 280	2 424	5 023	12 494	47 195	130 512

(b) the distribution of important coefficients of high-frequency coefficients of EZW algorithm based on 2 of integer power quantization threshold

(b) 基于“2 的整数幂”量化阈值的 EZW 算法中高频子带重要系数的分布

Image	Quantization scale							
	128~255	64~127	32~63	16~31	8~15	4~7	2~3	1~2
Lena	28	424	2 625	7 040	18 020	44 098	56 526	58 037

对比可知, 采用本文的整数平方量化阈值算法使 Lena 的小波系数在每一个量化阈值区间内近似呈线性分布, 同时每一个量化阈值区间内的零树数量也趋于合理. 对无损压缩来说, 这更有利于生成更多的零树, 从而提高压缩效率. 对有损压缩来说, 还可以避免解码过程中在某一时刻停止解码后图像质量出现较大的波动.

4 实验结果

作为传统零树编码算法的改进,ISZW 算法在对静止图像的处理效果上较 EZW 算法和 SPIHT 算法有一定的提高,因为 SPIHT 算法代表了目前国际最先进的小波零树编码思想,通过与 SPIHT 的比较,能够反映 ISZW 与 SPIHT 间的水平差异.实验采用了 JPEG2000 压缩标准中采用的 5-3 整数小波变换(形式见式(7)与式(8)).

表 2 给出了 ISZW 算法与 EZW 算法和 SPIHT 算法在不同压缩比下对 3 幅 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ 标准灰度图像压缩后实验结果的比较.

Table 2 Comparison among the compression results of ISZW, EZW and SPIHT based on different images

表 2 ISZW 与 EZW,SPIHT 基于不同图像的压缩结果比较

Image $512 \times 512 \times 8$	ISZW		EZW		SPIHT	
	PSNR(dB)	bpp	PSNR(dB)	bpp	PSNR(dB)	bpp
Lena	40.59	1.00	39.55	1.00	40.45	1.00
	37.33	0.50	36.28	0.50	37.24	0.50
	34.44	0.25	33.17	0.25	34.13	0.25
Goldhill	33.71	0.50			33.12	0.50
	30.81	0.25			30.56	0.25
Barbara	32.23	0.50	30.53	0.50	31.39	0.50
	28.19	0.25	26.77	0.25	27.58	0.25
Baboon	24.22				23.87	0.50
	22.08				21.97	0.25

图 3 列出了 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ 的 Goldhill 和 Lena 采用 ISZW 算法压缩后不同压缩比下的重建图像.



PSNR=33.71, bpp=0.50



PSNR=30.81, bpp=0.25

(a) Compression Goldhill images of different compression rates

(a) 不同压缩比率下的 Goldhill 压缩图像



PSNR=40.59, bpp=1.00



PSNR=37.33, bpp=0.50



PSNR=34.44, bpp=0.25

(b) Compression Lena images of different compression rates

(b) 不同压缩比率下的 Lena 压缩图像

Fig.3 Compression images of different compression rates

图 3 不同压缩比下重建的压缩图像

分析 ISZW 算法可知,其优越性主要表现在以下 4 个方面:

(1) 充分结合了整数小波变换与嵌入式零树编码的优点,引入“整数平方量化阈值”代替“2 的整数次幂量化阈值”,缩短了量化阈值的距离,大大增加了零树数量.

(2) 通过降低编码所用的字符数并对最高频带的零树符号不编码,进一步提高了编码效率.

(3) 从软件编程角度考虑,本文算法在提高编码效率的同时没有增加新的算法步骤,有效控制了编程的复杂度.

(4) 由于采用了整数小波变换,使得硬件电路仅通过加法和移位电路即可实现,便于硬件实现.

本文的算法是基于整数小波变换提出的一种图像压缩编码算法,既对今后小波图像的压缩编码有积极意义,也可直接应用于图像压缩与传输领域.

References:

- [1] Sweldens W. The lifting scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelets. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 1996,3(2):186~200.
- [2] ISO/IEC, ISO/IEC 15444-1. Information technology-JPEG 2000 image coding system-part 1: Core coding system. 2000. <http://www.jpeg.org>.
- [3] Shapiro JM. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993,41(12): 3445~3462.
- [4] Said A, Pearlman WA. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Transactions on Circuit and Systems for Video Technology*, 1996,6(3):243~249.
- [5] Niu JW, Wang R, Li B. An image wavelet compression algorithm based on zerotree and bit plane. *Journal of Software*, 2002,13(3):460~466 (in Chinese with English abstract).
- [6] Sweldens W. The lifting scheme: A construction of second generation wavelets. *SIAM Journal of Mathematical Analysis*, 1998, 29(2):511~546.
- [7] Reichel J, Menegaz G, Nadenau MJ, Kunt M. Integer wavelet transform for embedded lossy to lossless image compression. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001,10(3):383~392.

附中文参考文献:

- [5] 牛建伟,王刃,李波.基于零树和位平面的小波图像压缩算法.软件学报,2002,13(3):460~466.