

基于人眼视觉特性的嵌入式小波零树编码改进^①

黄 丽 方厚辉 贺才军 (湖南大学 电气与信息工程学院 湖南 长沙 410082)

摘 要: 在分析了嵌入式小波零树编码算法(EZW)的基本理论基础上,提出了一种以 8 个标志位代替原 EZW 算法中 4 个标志位的改进算法。改进算法中,重新定义零树的结构,降低了编、解码复杂度节省了存储的空间,且有利于提高压缩比;重新分类重要系数一方面增加了图像边缘信息编码,另一方面极大的减少了零树根的数量,提高了压缩比。仿真结果表明,改进算法重构图像质量及主观视觉效果明显好于原算法。

关键词: 小波变换; 嵌入式小波零树编码; 图像压缩; 图像边缘信息; 零树结构; 人眼视觉特性

An Improved Image Coding Algorithm Based on EZW and HVS

HUANG Li, FANG Hou-Hui, HE Cai-Jun

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper analyses the basic theory of the EZW algorithm, and proposes an improved EZW based on eight symbols instead of four symbols used in EZW. In this method, giving the definition of zero-tree structure anew does not only reduce the complexity of encoding and decoding, but also saves the storage space and improves compression ratio. In re-classifying the significant symbols, the edge information is considered. At the same time, the number of zero tree roots is greatly reduced and compression ratio is improved. Experimental results show that the improved algorithm performs better than EZW in reconstructing image quality.

Keywords: wavelet transform; embedded zero-tree wavelets image encoding; image compression; edge information of image; zero-tree structure; human visual system

1 引言

随着多媒体技术的不断发展,数字图像和视频数据呈海量增长。很多包含图像、视频数据的文件经常需要在不同用户和系统之间互相交换,这就需要用有效的方法来存储及传递这些大量文件。压缩是其中不可避免的关键技术,正因如此,对高效率且符合人眼视觉特性的图像编码技术的要求越来越高。

由于小波变换具有很好的时、频域局部化特性,因而目前小波变换已广泛应用于图像压缩领域,并取得了很好的压缩效果。特别是 Shapiro 提出的嵌入式零树小波 EZW(Embedded Zerotrees Wavelet)算法^[1]是目前公认最好的静态图像变换压缩编码方法。EZW 算法以零树结构和逐次逼近量化(SAQ)为基础,不仅结

构简单,无需任何训练和图像的先验知识,而且支持多码率,利用小波系数的特点,较好地实现了图像编码的嵌入功能。但是 EZW 算法仍存在一些缺点。本文提出一种改进的算法 IEZW(Improved EZW),通过小波变换,综合重新定义零树结构、考虑人眼视觉特性、重新分类重要系数等措施,针对 EZW 算法以下缺点进行了改进:① EZW 算法未考虑最低频带不同方向之间的相关性,零树结构判断较复杂,影响了压缩比和编码效率;②未充分考虑人眼视觉特性(human visual system, HVS)^[2],影响了图像复原质量(尤其是在低比特率下);③未考虑和处理当重要系数的子孙系数均为非重要系数时,会引起零树根连续出现的特殊情况,影响了压缩比和编码效率^[3]。仿真结果表明,本

① 收稿时间:2009-11-04;收到修改稿时间:2009-12-06

文改进算法不仅极大地改善了重构图像主观视觉效果而且提高了图像的压缩比,具有广泛的实用价值。

2 EZW算法介绍

零树结构是基于小波图像压缩编码的一个十分有意义的突破,Shapiro 的 EZW 图像压缩方法成功的关键就是零树结构。零树结构充分利用了小波分解后各子带系数之间的相关性:一幅图像经 M 层小波分解形成 $3M+1$ 个子频带^[4],对给定的阈值 T ,如果一个低频小波系数 X 满足 $|X| < T$,则在空间相同方向、相同位置较高频率上的几乎所有小波系数都满足 $|X| < T$,同时对给定的阈值 T ,如果某一位置上所有的高频小波系数都满足 $|X| < T$,则在空间相同、位置较低频率上的小波系数绝大多数也满足 $|X| < T$ ^[5,6]。EZW 零树结构以最粗尺度 LH,HL,HH 子带内小波系数充当树根结点(对于最低频系数不讨论它是否为零树根),如图 1 所示。零树结构中,每个父系数有 4 个子系数位于高一级子带的相应位置,如果父系数的坐标为 (x,y) ,则其 4 个子系数的坐标分别为: $(2x,2y)$, $(2x,2y+1)$, $(2x+1,2y)$, $(2x+1,2y+1)$ [5,6]。每个子系数像它们的父系数一样,又有 4 个子系数位于高一级子带的相应位置,依次类推,直到最高频子带则没有子系数。依据此原则,如果一个非重要系数(EZW 中,对于一个系数如果它小于给定的阈值 T ,则称为非重要系数)的子孙均为非重要系数,并且它不是同一阈值下更粗尺度某一零树根的子代,则称该系数为零树根。

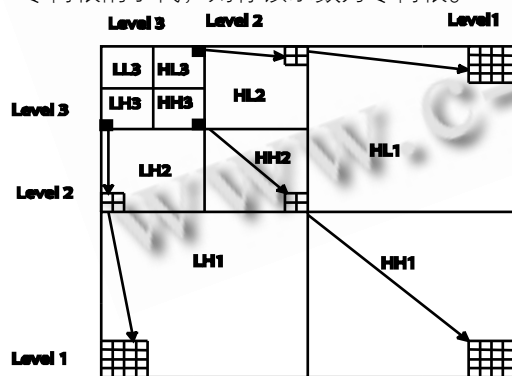


图 1 小波系数的零树结构 (三级分解)

EZW 算法的编码思想就是采用逐次逼近的量化方法不断扫描变换后的小波系数,利用零树结构编码大量的当前阈值下的非重要系数,生成多个零树根,达到图像压缩的目的。EZW 对整幅图像编码一次叫做一

遍扫描。每一遍扫描需要执行两种扫描,并产生两种输出符号。第一种扫描叫主扫描,它的任务是把小波系数 X 与阈值 T 进行比较,然后用正重要系数 P 、负重要系数 N 、孤立零值 Z 、零树根 T 4 个符号之一表示 X 。对整幅图像主扫描之后产生系数符号序列。第二种扫描叫做辅扫描,其任务是对主扫描中输出符号 P 或者 N 的系数进行量化,产生代表对应量化值的符号“0”和“1”。编码在两个过程中交替进行,在每个主扫描前将阈值减半,如此往复下去,不断生成零树根,直至压缩文件达到用户对码流的要求^[1,5]。

3 改进算法(IEZW)

3.1 改进的零树结构

用零树结构编码重要图是 EZW 算法的一个主要过程,然而 EZW 算法的零树结构并非最佳的编码结构,本文提出一种基于最低频带虚拟分解法来扩充零树的划分,提高了编码效率。

最低频带虚拟分解即:将 LL 子带继续分解为 $3N+1$ 个虚拟的子带, N 满足经 N 次分解后 $LL(N+M)$ 子带是一个 1 阶 $\times$ 1 阶图像块,此时原图像相当于有 $3(N+M)+1$ 个子带。假设将图 1 中 LL3 虚拟分裂三次后,使得虚拟子带 LL6 为一个 1 阶 $\times$ 1 阶的图像块,如图 2 所示。此时原图像相当于有 19 个子带。

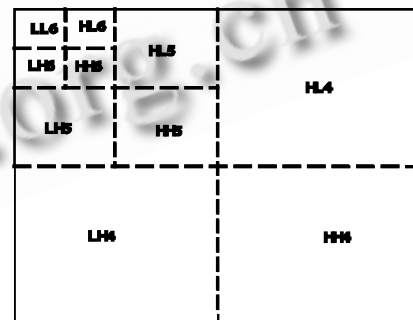


图 2 LL3 三层虚拟分解

改进零树结构特点具体表现为:根节点由原 LL 子带内的小波系数来定义,具体如下:以虚拟最粗尺度 $HL(N+M)$, $LH(N+M)$, $HH(N+M)$ 子带内小波系数充当树根结点,对于虚拟的最低频子带 $LL(N+M)$ 系数不讨论它是否为零树根。这样,对于 LL 子带小波系数来说,只有一个小波系数无后继结点;同时简化了对零树结构的判定,可降低编、解码复杂度和存储空间。另外,基于最低频带虚拟分解法的零树结构不

仅考虑了原算法相同方向不同尺度子带之间的相关性,而且还考虑了最低频带不同方向之间的相关性,有利于提高压缩比、编码效率以及重构图像的质量。

3.2 重新分类重要系数

3.2.1 边缘图像信息

由于图像信息是通过人的视觉来获取的,所以在图像处理中,应充分考虑人眼的视觉特性。经国内外研究者研究表明:人眼对图像边缘区域的信息失真很敏感^[2]。为了使解码后的图像人眼视觉效果更好,本文改进算法增加了对图像边缘信息系数的编码,将图像边缘信息系数视为重要系数,即使这个系数小于当前阈值。因此改进算法中,对于一个系数如果它大于给定的阈值 T ,或者属于边缘信息系数则称为重要系数。

由于小波变换具有良好的空频局域性的特点,因此方差可以反映对应空间域中相邻像素的灰度值或颜色值的波动情况:方差较大,说明相应空间域中相邻像素的值波动较大,则对应像素极有可能处在图像的边缘。反之,方差较小,说明对应的像素处于图像的平坦区域。

定义 1. 一个小波系数 X 的 4 个孩子 X_1, X_2, X_3, X_4 的方差定义为如下:

$$D(X) = \sum_{i,j \in \{1,2,3,4\} (i \neq j)} (X_i - E(X))^2 \quad (1)$$

$$\text{其中, } E(X) = 1/4 \sum_{i=1,2,3,4} X_i \quad (2)$$

对于小于当前阈值 T 的系数 X ,改进算法采用边缘阈值确定该小波系数是否处于图像的边缘。当方差 $D(X)$ 大于边缘阈值时,认为该小波系数对应图像的边缘,边缘阈值 $= T/4$ 。此时,根据系数的正负情况分别用 E_p 、 E_n 两个符号表示,以区别于大于当前阈值的重要系数,并对其进一步的量化编码。反之,对应图像的平坦区域,不对其量化编码,与原 EZW 处理非重要系数方式一样。

3.2.2 细分大于当前阈值的重要系数

根据 EZW 算法原理,随着扫描次数的增多,多个零树根连续出现的情况越来越频繁,针对连续存在的零树根的现象,改进算法分别增加两个符号 P_t 、 N_t ,用于表示大于当前阈值且子孙系数均为非重要的系数。由此,原算法需要用一个重要系数 P 或 N ,加上四个零树根 Z 表示的图像信息,改进算法只需要用一

个 P_t 或 N_t 就可以表示了。因此,极大地减少了零树根的数目,提高了压缩比。

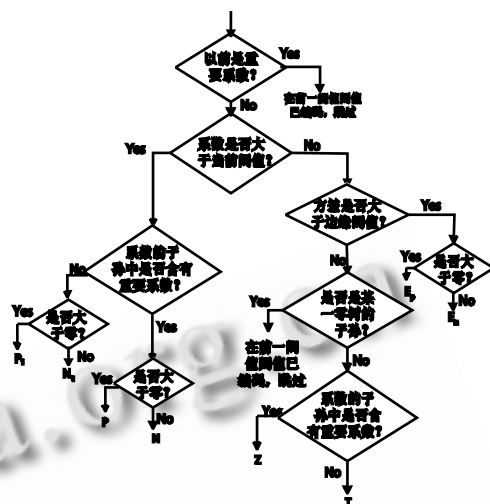


图3 系数编码流程图

由 3.2.1、3.2.2 得出,改进算法中主扫描产生八种符号 $\{P, N, T, Z, P_t, N_t, E_p, E_n\}$,其中 P, N, P_t, N_t, E_p, E_n 六种符号表示的系数都为重要系数。图 3 所示为八种符号的产生过程。八种符号构成了一个完整的有效值映射,其具体含义如下所述:

P : 如果系数幅度大于阈值 T 且为正数,子孙中有重要系数;

N : 如果系数幅度大于阈值 T 且为负数,子孙中有重要系数;

P_t : 如果系数幅度大于阈值 T 且为正数,子孙中无重要系数;

N_t : 如果系数幅度大于阈值 T 且为负数,子孙中无重要系数;

E_p : 如果系数幅度小于阈值 T 且为正数,但是它的孩子的方差大于边缘阈值;

E_n : 如果系数幅度大于阈值 T 且为负数,但是它的孩子的方差大于边缘阈值;

T : 如果系数不是重要系数,且子孙中无重要系数;

Z : 如果系数不是重要系数,且子孙中有重要系数。

3.3 改进算法的编解码描述

IEZW 与 EZW 算法一样,编码器从最低分辨率图像开始编码,编码的次数由用户对码流的要求决定。每进行一次编码,阈值 T 降低 $1/2$,并执行主扫描和

副扫描两个过程。

主扫描: 边缘阈值 $=T/4$, 但是为了避免扫描过程中值过小降低算法的编码效率, 需要给设一个下限, 这个下限根据需要可自行设置。主扫描在改进零树结构的理论基础上, 根据系数本身及其子孙的情况相应输出 $\{P, N, T, Z, P_t, N_t, E_p, E_n\}$ 这八种符号之一。如果系数被编为重要码 P, N, P_t, N_t, E_p, E_n 其中之一, 则在该系数位置上置零, 并且进行标注, 在进行下一轮扫描时, 将在这一轮扫描中被编为重要码的系数“剔除”, 只对剩下的系数进行编码输出符号流, 进行零树判断时(它不位于树根)只判断它是小于阈值的数, 因为这个数已经被编码了。

辅扫描: 量化本次扫描被编码为 P, N, P_t, N_t, E_p, E_n 的重要系数, 且进一步细化以前主扫描被编码为重要码的系数。对于 P, N, P_t, N_t 的量化与细化, 与原算法量化及细化 P, N 方法相同。而对于符号 E_p, E_n , 分两种情况: 一是在本次编码为 E_p 或 E_n , 或者先前被编码为该重要码, 若它小于当前阈值, 则假设当前的阈值是 T_{i-1} , 对于幅度值大于 $T_{i-1}/2$ 的孩子节点, 量化器输出为 1, 重建后的幅度值为 $T_{i-1}/2$; 对于幅度值小于 $T_{i-1}/2$ 的孩子节点, 量化器输出为 0, 重建后的幅度值为 $T_{i-1}/2 - T_{i-1}/4$; 二是随着扫描次数增加, 阈值的降低, 先前被编码为 E_p 或 E_n 的系数如果大于当前阈值, 此时细化方法转换成与原算法量化 P, N 相同的方法。

由于改进算法主扫描中标志位有 8 个, 需要 3 比特来编码, 仿真试验中又发现八个标志位的概率并不相同, 零树根 T 和孤立零 Z 的概率占了很大部分, 而重要系数的概率相对比较小。因而, 不同于 EZW 算法, 为了取得较高的压缩比, 对主扫描的标志位本文选用哈夫曼编码^[5]。最后对主表编码和副表细化后的二进制码流再用游程编码进行无损压缩^[5]。

4 仿真结果

为了验证改进算法的优越性, 以大小为 256×256 的灰度图像 $Model$ 为例, 在 $Matlab$ 中, 使用 $Daubechies 9/7$ 双正交小波^[5,7,8]三级分解与重构进行原算法和改进算法的仿真。表 1 列出了不同压缩比、不同码率下 EZW 算法与 $IEZW$ 算法重建图像的峰值信噪比($PSNR/db$)。从表中可以观察到, 除了最低比特率时, 改进算法的峰值信噪比稍微小于原算法外, 在

同一比特率下, 改进算法的峰值信噪比都大于原算法。不仅如此, 经仿真试验发现, 在同一比特率下, 不管是低比特率还是高比特率, 改进算法恢复图像的主观视觉效果都好

表 1 原算法与改进算法峰值信噪比比较

Compression ratio	BBP	EZW(PSNR)	IEZW(PSNR)
1024:1	0.007812	16.6790	16.6649
512:1	0.015625	18.8081	20.3615
256:1	0.03125	20.5423	22.1683
128:1	0.0625	21.9354	23.6002
64:1	0.125	23.5713	25.0446
32:1	0.25	25.9294	26.9451
16:1	0.5	28.4948	30.4128
8:1	1	32.5863	34.6011

于原算法, 特别是低比特率时, 恢复图像视觉效果明显优于原算法。本文截取了最低比特率和较高比特率两种情况下, 仿真的恢复图像作为代表, 图 4 中(a),(b)分别是比特率为 0.007812 bps 时 EZW 算法恢复图像($PSNR = 16.6790$)和 $IEZW$ 算法的恢复图像($PSNR = 16.6649$), 从图中可以看到, 在如此低的比特率下, 改进算法恢复图像还能基本分辨出原图像的轮廓, 而原算法的恢复图像已经十分模糊。图 5 中(a)和(b)分别是比特率在 0.125 bps 下 EZW 算法的恢复图像($PSNR = 23.5713$)和 $IEZW$ 算法的恢复图像($PSNR = 25.0446$), 可以看到改进算法恢复图像的视觉效果较原算法好。



(a)原算法重构图像



(b)改进算法重构图像

图 4 比特率为 0.007812bps 时重构图像比较



(a)原算法重构图像



(b)改进算法重构图像

图 5 比特率为 0.125bps 时重构图像比较

5 结语

本文考虑了人眼对图像边缘区域信息失真敏感这一特点,通过定义新的零树结构,重新分类重要系数这些方法,提高了解码图像主观视觉效果、图像质量、压缩比、编码效率。经过仿真实验证明,该方法在总体编码性能上高于 Shapiro 的 EZW 算法。

参考文献

- 1 Shapiro JM. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients. IEEE Trans. on Signal Processing, 1993,41(12):3445 – 3462.
- 2 Lewis AS, Knowles G. Image compression using the 2-D wavelet transformation. IEEE Trans. on Image Processing, 1992,1(4):244 – 250.
- 3 Quafi A, Ahmed AT, Baarir Z, Doghmane N. Color Image Coding by Modified Embedded Zerotree Wavelet (EZW) Algorithm. IEEE International Conference on Information & Communication Technologies, Syria, 2006, 1451 – 1456.
- 4 Said A, Pearlman WA. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology, 1996,6(3):243 – 250.
- 5 张旭东,卢国栋,冯建.图像编码基础和小波压缩技术原理、算法和标准.北京:清华大学出版社,2004.
- 6 李自光,孙天野.嵌入式小波零树图像编码算法的 Matlab 编程实现.中国工程机械学报,2007,5(4):466 – 475.
- 7 Antonini M, Barlaud M, Mathieu P, Daubechies I. Image coding using wavelet transform. IEEE Trans. on Image Processing, 1992,1(2):205 – 221.
- 8 飞思科技产品研发中心.MATLAB6.5 辅助小波分析与应用.北京:电子工业出版社,2003.