

基于人眼视觉特性的快速图像编码算法*

王向阳⁺, 杨红颖

(辽宁师范大学 计算机与信息技术学院, 辽宁 大连 116029)

A Fast Image Coding Algorithm Based on Human Visual System

WANG Xiang-Yang⁺, YANG Hong-Ying

(School of Computer and Information Technique, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

+ Corresponding author: Phn: 86-411-4258385, E-mail: wxy37@263.net

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

Received 2002-09-25; Accepted 2003-07-02

Wang XY, Yang HY. A fast image coding algorithm based on human visual system. *Journal of Software*, 2003,14(11):1964~1970.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1964.htm>

Abstract: An image coding algorithm ESPIHT (extended set partitioning in hierarchical trees) based on fast lifted wavelet transform and human visual system is proposed in this paper. It can be regarded as an improved version of the SPIHT algorithm. However, unlike SPIHT, the fast lifted wavelet transform (FLWT) is used, the extended zerotree structure is redefined, and the human visual system (HVS) is taken into account sufficiently in the compression algorithm. The experimental results show that the new image compression scheme performs better than that of SPIHT in the aspects of recovery image quality and coding/decoding time.

Key words: image coding; SPIHT(set partitioning in hierarchical trees); fast lifted wavelet transform; zerotree; human visual system

摘要: 提出了一种图像编码算法 ESPIHT(extended set partitioning in hierarchical trees).该算法能够通过以下 3 项措施提高 SPIHT 算法工作效率:(1) 全面引入快速提升小波变换;(2) 重新定义扩充零树结构;(3) 综合考虑人眼视觉特性.实验结果表明, ESPIHT 算法是一种高效的图像压缩算法,其编解码速度、图像复原质量、内存需求量等关键技术指标均优于 SPIHT 等编码算法(特别是在低比特率下).

关键词: 图像编码; SPIHT(set partitioning in hierarchical trees);提升小波变换;零树;人眼视觉特性

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A

自 20 世纪 80 年代末期 S.Mallat 首次将快速小波变换引入图像处理以来,小波变换以其优异的时频局部能力以及良好的去相关能力在图像压缩编码领域得到了广泛应用,并取得了良好的效果^[1-6].其中,由 A.Said 和 W.A.Pearlman 提出的基于嵌入编码思想的 SPIHT 算法^[3]被认为是目前国际上图像变换编码领域最先进的方法之一.该算法以零树结构为基础,能够通过集合定义(A 类集合和 B 类集合)、集合分割等措施,有效完成嵌入编

* 第一作者简介: 王向阳(1965—),男,辽宁铁岭人,教授,主要研究领域为多媒体数据压缩技术,信息隐藏与数字水印,算法设计与分析.

码.SPIHT 编码算法不仅结构简单,无须任何训练,支持多码率,而且具有较高的信噪比和较好的图像复原质量,总体性能优于 J.M.Shapiro 提出的 EZW 算法^[1].然而,理论分析和实验结果表明,该算法也存在一些不足,具体表现为:

- 在快速小波变换过程中,需要与庞大的图像数据作卷积运算,计算复杂,严重降低了编码速度;
- 未充分考虑人眼视觉特性(human visual system),影响了图像复原质量(特别是在低比特率下);
- 需要附加使用 3 个集合链表 LIS(list of insignificant sets)、LIP(list of insignificant pixels)和 LSP(list of significant pixels)来存储已编码信息(已编码过的节点和集合),内存需求量较大,难于硬件实现.

为了有效地克服 SPIHT 算法的上述弱点,人们在其基础上又陆续提出了各种改进方法.例如,W.K.Lin 和 N.Burgess 提出了 LZC(listless zerotree coding)算法^[7].该算法利用 2 个标志位图(flag map)代替原来的 3 个集合链表,不仅简化了原 SPIHT 算法,而且极大地降低了内存需求量,但该算法却在一定程度上降低了编码器性能.F.W.Wheeler 和 W.A.Pearlman 提出了 NLS(no list SPIHT)图像编码算法^[8].该算法以 SPIHT 零树集合及其分割策略为基础,通过采用状态表(status table)记录已编码信息(取代 SPIHT 所使用的 3 个集合链表),按照严格广度优先顺序进行零树重要性测试(取代 SPIHT 所采用的粗略广度优先策略)等措施,降低了内存需求量,提高了图像复原质量(可近似达到 SPIHT 算法所提供的性能),但该算法存在编码速度较慢等弱点.此外,该算法也同样未充分考虑人眼视觉特性.

本文提出了一种新图像编码算法(extended SPIHT,简称 ESPIHT).该算法以 SPIHT 压缩方案为基础,能够通过全面引入提升小波变换、重新定义扩充零树结构、综合考虑人眼视觉特性等措施,在一定程度上克服 SPIHT 算法存在的不足.实验结果表明,本文提出的 ESPIHT 算法是一种高效的图像压缩算法,其图像复原质量、编解码速度、内存需求量等关键技术指标均明显优于 SPIHT 等编码算法,具有广阔的应用前景.

1 SPIHT 算法简介

近年来,以 EZW 算法和 SPIHT 算法为代表的嵌入零树小波编码技术因其特有的优越性在图像压缩领域中得到了广泛关注和应用.其中,由 A.Said 和 W.A.Pearlman 提出的 SPIHT 算法是对 EZW 算法的改进,它以 EZW 算法的零树结构为基础(如图 1 所示),将某一树结点及其所有后继结点划归为同一集合,继而采用适当的集合分割排序策略,通过初始化、排序扫描(sorting pass)、细化扫描(refinement pass)和量化步长更新这 4 个子过程完成嵌入编码.

SPIHT 编码算法^[3]使用了如下零树集合定义: $O(i,j)$ 表示节点 (i,j) 的直接后继节点(即 4 个子女节点)的坐标集合; $D(i,j)$ 表示节点 (i,j) 的所有后继节点的坐标集合; $L(i,j)$ 表示节点 (i,j) 的除直接后继以外所有后继节点的坐标集合,即 $L(i,j)=D(i,j)-O(i,j)$.LIS 表示不重要集合列表(待编码集合);LIP 表示不重要像素集合列表;LSP 表示重要像素集合列表.其具体描述如下,其中 $S_n(\cdot)$ 定义为

$$S_n(\Gamma) = \begin{cases} 1 & \max_{(i,j) \in \Gamma} \{ |C_{i,j}| \} \geq 2^n \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

(1) 初始化.输出 $n = \left\lceil \log_2 \left(\max_{(i,j)} \{ |C_{i,j}| \} \right) \right\rceil$,将 LSP 设置为空表,将所有最高层节点 (i,j) 放入 LIP 表中,并将其中有后继节点的节点放入 LIS 表中,同时标以 A 类.

(2) 排序过程.

对于 LIP 表中所有节点 (i,j) :

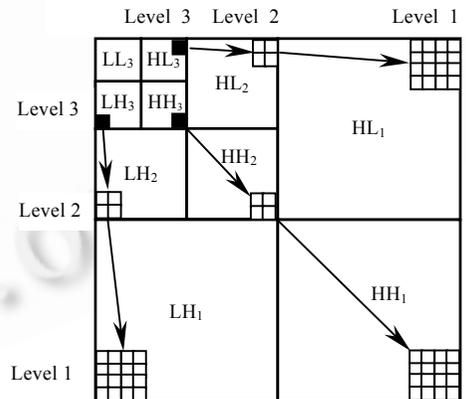


Fig.1 Zerotree in a 3-level decomposition
图 1 小波系数的零树结构(3 级分解)

- I. 输出 $S_n(i,j)$;
 - II. 如果 $S_n(i,j)=1$,则将节点 (i,j) 移到 LSP 表中并输出 C_{ij} 的符号;
- 对于 LIS 表中所有节点 (i,j) :
- ① 如果该节点属于 A 类,则
 - I. 输出 $S_n(D(i,j))$;
 - II. 如果 $S_n(D(i,j))=1$,则对 $O(i,j)$ 中所有节点 (k,l) :
 - 输出 $S_n(k,l)$;
 - 如果 $S_n(k,l)=1$,则将节点 (k,l) 加入到 LSP 表中并输出 $C_{k,l}$ 的符号;
 - 如果 $S_n(k,l)=0$,则将节点 (k,l) 加入到 LIP 表中;
 - III. 如果 $L(i,j)$ 非空,则将节点 (i,j) 移到 LIS 表的尾部,并以 B 类标之,转移至(3);
否则,将节点 (i,j) 移出 LIS 表;
 - ② 如果该节点属于 B 类,则
 - I. 输出 $S_n(L(i,j))$;
 - II. 如果 $S_n(L(i,j))=1$,则将节点 (i,j) 的 4 个直接后继节点以 A 类型加入到 LIS 表中;
 - III. 将节点 (i,j) 移出 LIS 表.

(3) 细化过程.对于 LSP 表中所有节点 (i,j) ,除去那些在最后一次排序过程中出现的节点,输出 $|C_{ij}|$ 的第 n 个最重要位.

(4) 量化步长更新,将 n 减 1,转移至(2).

尽管 SPIHT 编码算法能够产生嵌入式比特流,而且能够提供较好的比特-失真率性能,但理论分析和实验结果仍表明,该算法存在如下一些不足:

- 所采用的快速小波变换,需要与庞大的图像数据作卷积运算,不仅计算复杂,在一定程度上也影响了压缩算法的实时性,而且内存需求量较大,不适于 DSP 芯片的实时实现.

- 嵌入编码的核心问题是小波系数的排序及其按序传输.而 SPIHT 算法在排序小波系数及按序传输小波系数时,未能充分利用小波变换的能量聚集性,从而引起了图像复原质量的降低(特别是在低比特率下).

在 SPIHT 算法中,排序扫描(sorting pass)以确定小波系数重要性程度时,需附加使用 3 个集合链表(即无意义集合链表 LIS、无意义像素链表 LIP 和有意义像素链表 LSP)来存储已编码信息(已编码过的节点和集合).其中,集合链表 LIP 用于逐个分析小波系数,以确定树根结点的重要性程度.集合链表 LIS 用于检查系数集合(由 4 个小波系数组成),以确定整个系数集合的重要性程度.对于 SPIHT 算法来说,排序扫描过程中,若集合链表 LIP 中的 4 个树根结点是不重要的,则需要 4 个二进制位来进行编码,但如果上述 4 个结点被组合为集合链表 LIS 中的一个系数集合,则仅仅需要 1 个二进制位来表示其不重要性.可见,集合链表 LIP 中一个很小的系数就会引起传输多个二进制位来表示其对于多个阈值的不重要性,甚至可能需要更多二进制位去表示该小波系数的后继结点(位于集合链表 LIS 中)也是不重要的.显然,在所产生的比特流中,不重要位信息将占有相当大比例,而这必然引起图像复原质量的明显降低(特别是在低比特率下).

- 尽管 SPIHT 算法有效地降低了均方误差(MSE),但由于均方误差(MSE)仅仅是视觉失真的粗略描述,而 SPIHT 算法并未充分考虑人眼的视觉特性(human visual system),故必然影响复原图像的视觉质量.长期以来,通过对人眼某些视觉现象的观察,并结合视觉生理、心理学等方面的研究成果,人们发现了各种视觉掩盖(masking)效应.因此,如能在图像压缩编码时充分利用人眼的视觉掩盖效应,在每次扫描时优先传输视觉上的最重要系数,则必将极大地提高图像复原质量.

下面将通过全面引入提升小波变换,综合考虑人眼视觉特性,重新定义扩充零树结构等措施,提出一种新嵌入零树小波图像编码算法(即 ESPIHT 算法).

2 快速提升小波变换(FLWT)

尽管快速小波变换算法(即 Mallat 算法)在图像压缩编码领域得到了普遍关注,但在实际应用中,仍不难发

现其自身存在的弱点:(1) 快速小波变换过程中,需要与庞大的图像数据作卷积运算,计算复杂;(2) 内存需求量较大;(3) 对图像的尺寸有要求,并不能对所有尺寸图像进行变换.为此,本文将引入另外一种快速小波变换实现算法——“提升(lifting)”算法^[9].

快速提升小波变换算法的基本思想是,将 Mallat 算法中的每一级滤波运算分解为分裂(split)、预测(predict)和更新(update)3 个过程,如图 2 所示.其中:

分裂是将输入信号根据其序数的奇偶性分为以下两组:

$$X_0^0(n) = x(2n); X_1^0(n) = x(2n+1). \tag{2}$$

预测是将滤波器 P 作用于偶信号 $X_0^0(n)$ 得到奇信号的预测值 $X_1^p(n)$,再将该预测值与奇信号 $X_1^0(n)$ 相减以得到奇信号的预测误差 $X_1^1(n)$.

$$X_1^p(n) = \sum_k p_k X_0^0(n-k); X_1^1(n) = X_1^0(n) - X_1^p(n). \tag{3}$$

更新是将滤波器 U 作用于奇信号的预测误差,得到偶信号 $X_1^1(n)$ 的预测值 $X_0^p(n)$,然后用来对偶信号进行校正.

$$X_0^p(n) = \sum_k u_k X_1^1(n-k); X_0^1(n) = X_0^0(n) - X_0^p(n). \tag{4}$$

式(3)和式(4)中 k 的取值范围分别对应于滤波器 P 和 U 的阶数.

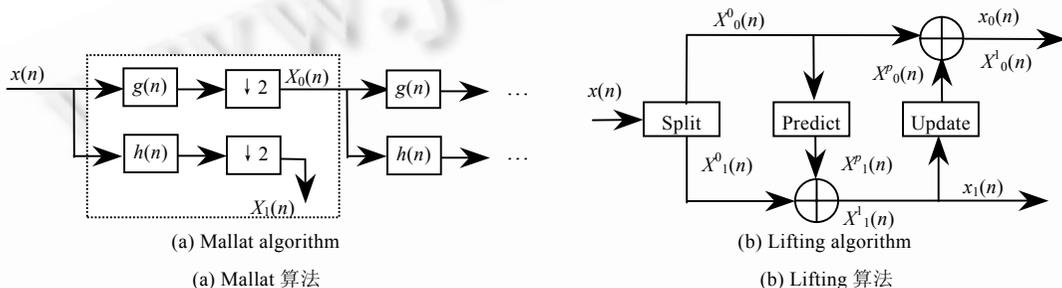


Fig.2 The relation of Mallat algorithm and Lifting algorithm

图 2 Mallat 算法与 Lifting 算法的相互关系

Mallat 算法中任何一组小波滤波器($h(n),g(n)$),均可以通过因式分解得到相应的一组或多组预测滤波器(P)和更新滤波器(U),并可在分裂以后进行多次的预测和更新操作.图 2(b)仅表示了一组滤波器,其最后结果为

$$x_0(n) = X_0^1(n); x_1(n) = X_1^1(n). \tag{5}$$

显然,快速提升小波变换具有计算更快捷、能够在当前位置完成小波变换,从而节省内存,能对任意尺寸图像进行变换等优点.

3 人眼视觉特性(HVS)

长期以来,通过对人眼某些视觉现象的观察,并结合视觉生理、心理学等方面的研究成果,发现了各种视觉掩盖(masking)效应.若能在图像编码过程中充分利用人眼的视觉掩盖效应,则可以在主观感觉图像失真相同的条件下允许更大的实际失真,从而根据 Shannon 率失真理论,采用更低的编码比特率使得图像的主观质量保持不变.研究表明:(1) 人眼对图像边缘区信息的失真很敏感;(2) 人眼对图像平滑区信息的失真比较敏感;(3) 人眼对图像纹理区信息的失真不敏感.

人眼对于图像边缘区、平滑区、纹理区敏感程度的不同,意味着 3 种不同区域内图像信息的重要性(对于图像编码)存在差别,因此完全可以通过给 3 种不同区域内图像信息所对应的小波系数赋予不同视觉权值(敏感区内小波系数赋予大视觉权值)的方法,来保证优先传输视觉上的最重要系数,以便进一步提高图像复原质量.

全面引入人眼视觉特性(HVS),对小波系数赋予不同视觉权值需完成以下主要任务:

(1) 将小波图像的高频子带划分成图像子块 $B_k(k=1,2,\dots,S)$,如图 3 所示.其中, $a_1\sim a_4$ 是一个图像子块, $b_1\sim b_{16}$ 是一个图像子块, $c_1\sim c_{64}$ 也是一个图像子块,它们的大小分别为 $2\times 2, 4\times 4, 8\times 8, \dots$,依次类推.

(2) 按照一定分类规则,将上述图像子块划分为边缘块、平滑块、纹理块 3 类.其分类过程为:

- 计算每个图像子块 $B_k(k=1,2,\dots,S)$ 的熵值和方差.熵值较小的图像子块应该是平滑块,而熵值比较大的图像子块是纹理块或边缘块.纹理块对应的方差较小,边缘块对应的方差较大;
- 选取合适的熵阈值和方差阈值,求得相应的边缘块、平滑块和纹理块.

(3) 确定边缘块、平滑块和纹理块内小波系数的不同视觉权值.为简化视觉权值选取过程,本文首先将图像划分为如下 3 类(见表 1):

- 纹理图像(如标准图像 Mandrill 等),其特点为图像中纹理块所占比例最大;
- 边缘图像(如标准图像 Barbara 等),其特点为图像中边缘块所占比例最大;
- 平滑图像(如标准图像 Lena 等),其特点为图像中平滑块所占比例最大.

Table 1 Percentage of edge, smooth, and texture blocks in three images

表 1 3 类图像中的边缘块、平滑块和纹理块比例

Image block	Texture image (Mandrill)	Edge image (Barbara)	Smooth image (Lena)
Texture	48.9	10.3	7.4
Edge	29.2	54.9	43.2
Smooth	21.9	34.8	49.4

接下来,就可以结合实验,给出不同尺度下高频子带中边缘块、平滑块和纹理块内小波系数的不同视觉权值了.表 2 给出了 4 级小波分解后最粗尺度下高频子带内小波系数的不同视觉权值.

Table 2 Perceptual weights at the coarsest scale

表 2 最粗尺度下高频子带内小波系数的不同视觉权值

Image block	Texture image	Edge image	Smooth image
Texture	0.6	1.1	1.1
Edge	2.2	2.2	2.2
Smooth	1.6	1.6	1.8

视觉权值的选取与小波分解尺度密切相关,一般应按照小波系数能量递减的特点,由粗尺度到细尺度递减视觉权值.根据实验,本文所提 ESPIHT 算法将视觉权值的递减因子选取为 3/5.

4 扩充零树结构

在 SPIHT 算法中,当排序扫描过程利用集合链表(LIP 和 LIS)确定小波系数重要性程度时,效率非常低,仅仅有一小部分比特用于编码重要信息(特别是在低比特率下),所导致的结果必然为低比特率复原图像质量不高.本文所提 ESPIHT 算法将采用不同于 SPIHT 的扩充零树结构,以便更加有效地表示重要小波系数.该扩充零树结构具有两方面优势:首先,可以有效缩短集合链表 LIP 的长度,节省宝贵内存空间;其次,可以缩短集合链表 LIS 长度,不仅能更加有效地捕获不重要信息,而且能够大幅度提高集合链表 LIS 中重要系数集合的比例.而集合链表 LIP 和 LIS 长度的缩短,意味着排序扫描过程所耗费的时间更少(相对于 SPIHT 算法来说),而这必将引起阈值对分速度加快及更多重要信息尽早出现在比特流中.

扩充零树结构定义如图 3 所示,其鲜明特点具体表现为:

- 与传统零树结构最粗尺度 LH,HL,HH 子带内小波系数充当树根结点不同(如图 1 所示),扩充零树结构的根节点只能由 LL 子带内的小波系数来定义.
- 与 EZW 算法相类似,LL 子带内小波系数在同一分解层的不同方向子带中均有后继结点.
- LL 子带内的小波系数被进行了统一分组.每组含有 2×2

个小波系数.显然,对于 LL 子带的任何一组小波系数来说,只有一个小波系数无后继结点.

采取以上扩充零树结构定义,相应的 ESPIHT 图像编码算法将在以下 3 个方面得到改善:

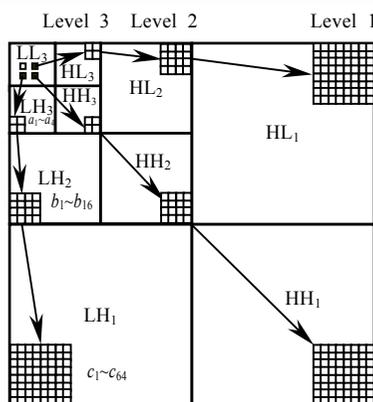


Fig.3 Extended zerotree structure
图 3 扩充零树结构

(1) 集合链表 LIP 长度将缩短 3/4(相对于 SPIHT 算法).因为此时 LIP 仅含有 LL 子带小波系数而非所有最低频子带小波系数.同样,集合链表 LIS 长度也将缩短 3/4,其成员也仅来自于 LL 子带.

(2) 由于来自最粗尺度的小波系数已包含在集合链表 LIS 中,因此只需要 1 个二进制位就可以表示小波系数集合的不重要性.而在 SPIHT 算法中,因为来自最粗尺度的小波系数包含在集合链表 LIP 中,故需要 4 个二进制位来表示每个小波系数的重要性.

(3) 如果某个最粗尺度的 LIS 系数集合是不重要的,则在这一点上无须进一步剪切其后继结点.但对于标准 SPIHT 算法来说,由于小波系数被安放在集合链表 LIP 中,因此即使它们是不重要的,其后继结点仍需要进一步检查.显然,扩充零树结构及相应集合分割策略不仅可以减少用于表示最粗尺度小波系数重要性的二进制位数,而且可以使得粗尺度上更多重要小波系数被优先编码.

5 ESPIHT 图像编码算法框架

基于提升小波变换与人眼视觉特性的图像编码(ESPIHT)过程如图 4 所示.

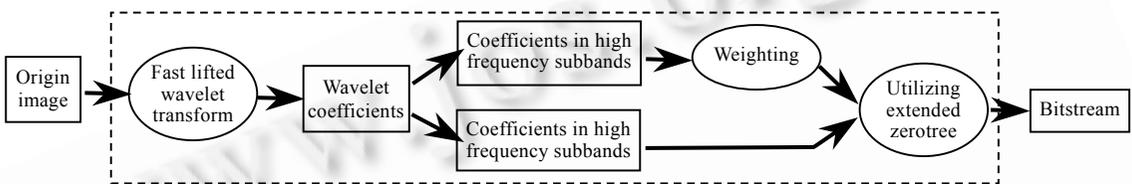


Fig.4 ESPIHT image coder block diagram

图 4 ESPIHT 图像编码算法流程图

可见,该 ESPIHT 图像压缩编码算法主要包含 3 部分:(1) 对原始图像进行快速提升小波变换;(2) 根据人眼视觉特性,给小波图像高频子带内的小波系数赋予不同的视觉权值;(3) 利用本文提出的扩充零树结构进行 SPIHT 压缩编码.

6 实验结果与分析

为了验证本文所提 ESPIHT 图像编码算法的高效性,下面在 Pentium II /350 计算机上,以 512×512×8bit 标准图像 Lena,Barbara,Mandrill 为例,进行 4 级分解与重构实验,并与 SPIHT 算法、NLS 算法进行了比较,实验结果见表 3~表 5 和图 5.其中,小波分解重构采用了常见的双正交 9/7 小波滤波器.

Table 3 PSNR comparison for the standard image coded at different bit rate (dB)

表 3 不同码率下重构图像的峰值信噪比 (dB)

Bit rate (bpp)	Lena			Barbara			Mandrill		
	ESPIHT	SPIHT	NLS	ESPIHT	SPIHT	NLS	ESPIHT	SPIHT	NLS
0.062 5	33.49	28.39	28.08	26.72	23.35	23.01	23.04	21.83	21.72
0.125	34.86	31.10	30.77	25.59	24.86	24.42	22.97	23.03	22.78
0.25	35.83	34.11	33.71	27.58	27.58	27.13	24.33	24.55	24.21
0.5	37.23	37.21	36.78	31.01	31.39	30.90	26.59	27.02	26.59

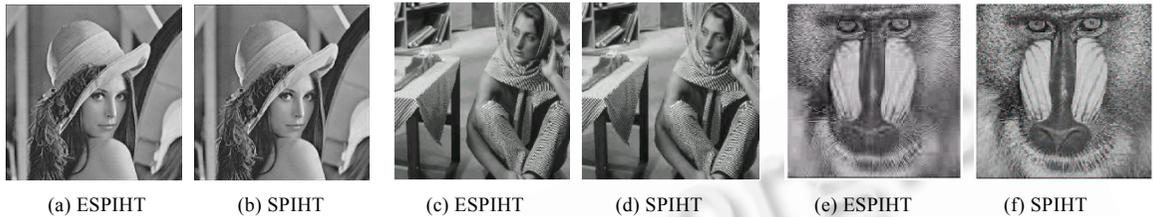
Table 4 The effect on PSNR and coding time for different improved steps (Lena image)

表 4 部分改进措施对图像编码质量与速度的影响(Lena 标准图像)

Bit rate (bpp)	Using fast lifted wavelet transform only		Using extended zerotree structure only		Using the visual weight only	
	PSNR (dB)	Coding time (s)	PSNR (dB)	Coding time (s)	PSNR (dB)	Coding time (s)
0.062 5	28.37	0.62	29.01	0.62	33.47	0.67
0.125	31.12	0.88	31.78	0.87	34.33	0.92
0.25	34.12	1.23	34.88	1.21	35.52	1.29
0.5	37.20	1.61	37.21	1.56	37.22	1.68

Table 5 Coding/decoding time comparison for three different algorithms (Lena image)**表 5** 3 种不同算法的编解码时间比较(Lena 标准图像)

Bit rate (bpp)	Coding time (s)			Decoding time (s)		
	ESPIHT	SPIHT	NLS	ESPIHT	SPIHT	NLS
0.062 5	0.61	0.65	0.98	0.11	0.12	0.14
0.125	0.86	0.91	1.45	0.17	0.18	0.21
0.25	1.19	1.26	1.98	0.27	0.27	0.29
0.5	1.54	1.67	2.71	0.47	0.48	0.51

**Fig 5** Compression comparison for standard image (Lena,Barbara,Mandrill)**图 5** 标准图像(Lena,Barbara,Mandrill)重构复原效果对照(0.125bpp)

本文通过全面引入提升小波变换、重新定义扩充零树结构、综合考虑人眼视觉特性等措施,提出了一种基于提升小波变换与人眼视觉特性的新图像编码算法.实验结果表明:(1)利用 ESPIHT 算法所得到的复原图像不产生任何方块效应,图像复原质量较高;(2)在相同压缩比下,ESPIHT 算法的图像复原质量明显优于 SPIHT 算法和 NLS 算法(特别是在低比特率下);(3)ESPIHT 算法的编码速度略快于 SPIHT 算法,且明显快于 NLS 算法.

References:

- [1] Shapiro JM. Embedd image coding using zerotrees of wavelet coefficients. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993,41(12): 3445~3462.
- [2] Wang XY, Yang HY. An enhanced image coding algorithm based on embedded zerotree wavelet. *Journal of Computer Research & Development*, 2002,39(6):737~742 (in Chinese with English abstract).
- [3] Said A, Pearlman WA. 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):243~250.
- [4] Servetto SD, Ramchandran K, Orchard MT. Image coding based on morphological representation of wavelet data. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999,8(9):1161~1174.
- [5] Wang XY, Yang HY. Image coding based improved SAQ and complex modeling. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2002,14(6):586~589 (in Chinese with English abstract).
- [6] Wang XY, Yang HY. A new embedded zerotree wavelet image coding algorithm. *Journal of China Institute of Communications*, 2002,23(8):113~116 (in Chinese with English abstract).
- [7] Lin WK, Burgess N. Low memory color image zerotree coding. In: *Proceedings of the 32nd Asilomar Conference on Signal, Systems and Computer*. 1998. 231~235.
- [8] Wheeler W, Pearlman W. A. SPIHT image compression without lists. In: *Proceedings of the IEEE ICASSP 2000*. 2000. <http://citeseer.nj.nec.com/ cachedpage/297755/1>.
- [9] Daubechies I, Sweldens W. Factoring wavelet transforms into lifting steps. *Journal of Fourier Analysis & Its Applications*, 1998,4(3):245~26.

附中文参考文献:

- [2] 王向阳,杨红颖.一种改进的嵌入零树小波图像编码算法. *计算机研究与发展*,2002,39(6):737~742.
- [5] 王向阳,杨红颖.基于改进逐次逼近量化与复杂关联模型的零树图像编码算法. *计算机辅助设计与图形学学报*,2002,14(6):586~589.
- [6] 王向阳,杨红颖.一种新的嵌入零树小波图像编码算法. *通信学报*,2002,23(8):113~116.