

# 低码率下图像压缩 SPIHT 编码的改进方法

何丽花, 郭中华, 陈 卫

(宁夏大学 物理电气信息学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 针对 SPIHT 算法的不足, 为了兼顾图像编解码时间与解码图像质量, 提出了一种改进的 SPIHT 图像压缩算法。采用 LS9/7 提升格式小波变换, 结合人眼视觉系统的特点, 对原算法高低频子带的扫描方式和阈值的确定方法进行了改进; 针对 SPIHT 算法重复扫描的问题, 在编码时使用最大值链表的思想, 大大减少了计算量, 节省了运行时间。实验结果表明, 本文提出的改进算法在图像编解码时间和重构图像质量两方面均优于原算法, 尤其在低码率情况下提高了解码图像的质量。

**关键词:** 提升小波变换; 人眼视觉系统; SPIHT; 图像压缩

中图分类号: TN919.81

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)05-0032-04

## An improved SPIHT algorithm for image compression in low bit rate

He Lihua, Guo Zhonghua, Chen Wei

(College of Physical Electrical Information, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** Aiming at shortage of the SPIHT algorithm, this paper proposes an improved image compression algorithm in order to overcome the shortcomings of decoding image quality and coding time. It adopts LS9/7 lifting wavelet transform. According to the characteristics of the human visual system (HVS), the scanning mode and the method to determine the threshold of algorithm are changed to improve the quality of reconstruction image. On the question of repeating scan of SPIHT algorithm, it uses maximum table thought, which greatly reduces the computation and saves operating time. The experimental results proves that the image decoding time and the quality of reconstruction image of the improved algorithm are better than the original algorithm, especially in the case of low bit rate.

**Key words:** lifting wavelet transform; human visual system (HVS); SPIHT; image compression

小波变换由于具有良好的时域-频域局部化特性, 有效地克服了傅里叶变换在处理非平稳的复杂图像信号时存在的局限性, 并且变换后的各子图像具有很强的相似性, 为后续的编码带来了方便, 因此小波变换广泛应用于图像压缩领域。1993 年 SHAPIRO J M 提出了嵌入式零树小波算法 EZW (Embedded Zero-tree Wavelet)<sup>[1]</sup>, 该算法复杂度不高且产生的码流是嵌入式的, 易于进行压缩比的控制和实现可伸缩编码。1996 年 SAID A 和 PEARLMAN W A 对 EZW 进行了改进, 提出了高效的多级树集合分裂算法 SPIHT (Set Partitioning in Hierarchical Tree)<sup>[2-3]</sup>, 该算法采用空间方向树, 更高效、准确地表示了小波系数的零树结构, 在提高压缩效率的同时进一步降低了编码的复杂度。

SPIHT 算法对最低频子带系数采用了同等重要性,

这样当排序扫描过程利用 LIP 确定小波系数重要性时, 仅有一小部分比特用于编码重要信息, 尤其在低比特率下, 这必然导致恢复图像质量的下降。此外, SPIHT 算法需要大量存储空间, 而且存在多次重复运算等不足。本文针对 SPIHT 算法存在的以上不足加以改进, 结合人眼视觉特性, 降低了算法的中间存储量和时间消耗, 同时在低码率下提高了解码图像质量。

### 1 提升小波变换

利用提升格式 LS (Lifting Scheme) 构造小波变换是 SWELDENS 在 1994 年提出来的, 它的基本思想是通过一个惰性小波 LW (Lazy Wavelet) 逐步构建出一个性质更加良好的新小波<sup>[4-5]</sup>。提升格式给出了一个简单而有效的双正交小波构造方法, 它使用基本多项式插补来获取信号的高频分量, 之后通过构建尺度函数来获取信号

的低频分量。由 SWELDENS 提出的提升格式由分裂、预测和更新 3 个步骤组成。设原始信号为  $x[n]$ , 信号的正交换过程如图 1 所示, 其中,  $s[n]$  为信号  $x[n]$  的低频分量,  $d[n]$  为信号  $x[n]$  的高频分量。

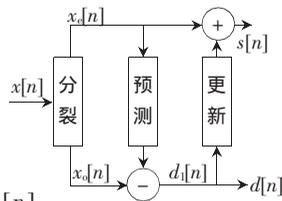


图1 提升算法分解

(1) 分裂。将信号  $x[n]$  分割成相互关联的  $a[n]$  和  $b[n]$  两个部分, 并且  $a[n]$  和  $b[n]$  的相关性越强, 分割效果越好。按照数据的奇偶序号对数据进行间隔采样, 即:  $a[n] = x[2n], b[n] = x[2n+1]$ 。

(2) 预测。利用数据间的相关性, 用  $a[n]$  来预测  $b[n]$ , 采用一个预测算子  $P(\cdot)$ , 使得  $d[n] = b[n] - P(a[n])$ 。

(3) 更新。采用更新算子  $U(\cdot)$ , 用  $d[n]$  来修正  $x[n]$ , 使得修正后的  $x[n]$  (记为  $c[n]$ ) 只包含信号  $x[n]$  的低频部分, 即  $c[n] = a[n] + U(d[n])$ 。

由于 9/7 整数小波提升方案具有良好的能量集中性, 消失矩较大, 因此本文采用 9/7 整数小波提升方案, 如图 2 所示。双正交小波的提升格式系数可以通过已知的 FIR 小波滤波器的时域系数求解。这里直接给出 LS9/7 小波的提升系数:

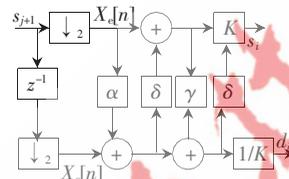


图2 9/7 整数小波提升方案

$$\begin{aligned} (\alpha, \beta, \gamma, \delta, K) = & \\ & (-1.586\ 134\ 342, -0.052\ 980\ 118\ 54, -0.882\ 911\ 076\ 02, \\ & -0, 443\ 506\ 852\ 2, -1.149\ 604\ 398) \end{aligned}$$

取近似值则有:

$$(\alpha, \beta, \gamma, \delta, K) = (-3/2, -1/16, -4/5, -15/32, -4\sqrt{2}/5)$$

## 2 SPIHT 算法<sup>[2-3]</sup>

### 2.1 算法集合划分规则

SPIHT 算法编码思想是通过递减的阈值序列生成一系列重要图 (或称位图) 来逐步逼近每一个小波系数。为了有效地对每一个位图进行编码, 对于任意节点  $(i, j)$  引入如下 4 种集合:

$O(i, j)$ : 节点  $(i, j)$  的 4 个直接后继节点的坐标集合。

$D(i, j)$ : 节点  $(i, j)$  的所有后继节点的坐标集合。

$L(i, j)$ : 节点  $(i, j)$  的除直接后继以外的所有后继节点的坐标集合, 即:  $L(i, j) = D(i, j) - O(i, j)$ 。

$H$ : 在小波塔形分解中的最高层节点的坐标集合。

除了根节点之外, 对所有子节点, 有:

$$O(i, j) = \{(2i, 2j), (2i, 2j+1), (2i+1, 2j), (2i+1, 2j+1)\}$$

(1) 初始分割由集合  $(i, j)$  和  $D(i, j)$  组成, 其中  $D(i, j) \in H$ 。

(2) 如果  $D(i, j)$  重要, 则把它分割成  $L(i, j)$  和 4 个单元集合, 每个元素  $(k, l) \in (i, j)$ 。

(3) 如果  $L(i, j)$  重要, 则分割成 4 个集合  $D(k, l)$ ,

其中  $(k, l) \in O(i, j)$ 。

SPIHT 算法的基本运算是集合测试, 用算子描述为:

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

### 2.2 算法描述

SPIHT 算法采用了不重要集合链表 LIS(List of Insignificant Sets)、不重要像素集合链表 LIP(List of Insignificant Pixels) 和重要像素集合链表 LSP (List of Significant Pixels) 3 个链表来记录编码信息。

#### 2.2.1 初始化

设阈值  $T = 2^n, n = \lfloor \log_2(\max_{(i, j)} |c_{ij}|) \rfloor$ , 其中,  $c_{ij}$  为小波系数。初始化 LSP 为空表,  $LIS = \{D(i, j) | (i, j) \in H\}$  且  $(i, j)$  具有非空子孙,  $LIP = \{(i, j) | (i, j) \in H\}$  为所有树根的坐标集。

#### 2.2.2 分类扫描

该过程仅扫描不重要系数表 LIP 和不重要子集表 LIS, 另对其表项依次做重要性判别和编码。在 LIP 中的每一个节点坐标  $(i, j)$ , 若  $|c_{ij}| < T_n$  ( $T_n$  为量化阈值), 则记  $c_{ij}$  为不重要系数, 同时输出不重要标志“0”; 反之则重要, 输出重要标志“1”和  $c_{ij}$  的符号标志, 并将该表从 LIP 移到 LSP 尾部。对于不重要子集表 LIS, 每个表项对应一个小波系数集  $\{c_{ij}\}$ , 若所有  $|c_{ij}| > T_n$ , 则记  $\{c_{ij}\}$  为重要子集, 同时输出重要标志“1”, 并将该表项所代表的空间方向树分裂成以其第 1 级叶子节点为根节点的若干根子空间方向树, 同时更新 LIP 和 LSP; 反之则输出“0”。

#### 2.2.3 精细扫描

该过程仅扫描重要系数表 LSP, 并对 LSP 中的每个表项  $(i, j)$  (若  $(i, j)$  不是在刚刚进行过的扫描过程中新添加的) 依据当前量化阈值  $T_n$ , 判别该小波系数的最高有效位的大小, 并输出  $|c_{ij}|$  二进表示中的第  $n$  个重要的位。

#### 2.2.4 阈值更新

令  $n = n+1$ , 并量化阈值为  $T_{n+1} = T_n$ , 进行下一次扫描。在图像的解码中采用了与编码过程同样的空间方向树来组织小波系数, 对 LIP、LSP 和 LIS 也用同样的规则进行更新。

SPIHT 算法存在以下不足:

(1) SPIHT 算法对所有频域进行同等重要的编码, 没有充分利用小波变换的特点以及人眼的视觉对不同频域图像敏感度不同的特性。

(2) 小波分解后的低频子带能量较大, 系数幅值比各高频子带系数幅值高许多, 并且由于小波变换良好的去相关性, 低频子带系数与高频子带系数相关性较弱。因此, 在低比特率下, 低频系数不太适宜使用不重要系数判断方法进行压缩处理。

(3) 在排序过程中存在大量的扫描重复, 每次变换阈值时, 对上次遗留的非重要元素还需要逐个与新阈值比较, 增加了编码时间。

## 3 改进的 SPIHT 算法

图像经小波分解后, 大部分能量都集中于低频子

带,在图像信息中起主导作用,因而重要性也很高;而高频子带的数据相对较小,它反映的是图像的细节部分,因而重要性相对较低。根据人眼视觉特性,人眼对高频信息的敏感度远小于对低频信息的敏感度,因此对小波分解后各子带作加权处理。各子带加权系数如表1所示<sup>[6-7]</sup>,编码时各子带乘以加权系数,解码时除以该系数即可。

表1 各子带加权系数

子带标号	LL5	LH5	HL5	HH5	LH4	HL4	HH4	LH3
HVW	1	0.798	0.798	0.684	0.962	0.962	0.849	0.981
子带标号	H13	HH3	LH2	HL2	HH2	LH1	HL1	HH1
HVW	0.981	0.938	0.843	0.843	0.516	0.362	0.362	0.082

(1)分别对低频和高频子带用不同的阈值(即LL层与其他3层采用不同的阈值)实现对最低频子带和其他3个子带编码的自适应比特分配。这样处理使得输出码流给低频系数分配更多的比特,复原图像更接近其均值,在相同码率的情况下将能获得更高的信噪比。而在信噪比相同的前提下,由于提高了细化门限,系统将存在更多的零树,这样可以有效地减少编码运算时间。

(2)对低频子带编码的改进:将N层分解的最低层系数LLN作为精细扫描后的码流优先输出,解码端首先收到此信息,依据此信息正确还原扫描过程并解码。采用这一优化措施,保证优先传输视觉上的重要系数,也就是频率优先的准则,低频信息应比高频信息优先传输,而且当两个原则(频率优先与绝对值优先)发生冲突时,采用频率优先“大于”绝对值优先原则,即解码时系数按照低频优先,同一子带按照绝对值大小输出系数。附加传输处理后的最低频子带LLN最大绝对值系数出现的位平面信息,即最大值绝对值系数的最高有效位所在的第n位平面的n值,在分类排序过程中,大量的 $S_n$ 判决信息可以不输出,在较低码率条件下,提高了图像复原质量。

(3)对高频子带编码的改进:其他3个高频子带,大量化阈值的确定应该依据该子带的最大小波系数的值。参考文献[9]采用最大值列表,思想如下:在初始化过程中,建立最大值链表MAX,将LIS链表中对应元素的子孙节点中的系数最大值存入,如果最大值数大于阈值,则对在LIS里放入的相应系数位置进行扫描;反之,则在当前阈值下不考虑。所建立的最大值链表与链表LIS大小相同,并且随着LIS大小的变化而变化。在以后的过程中,只将最大值表中的值与阈值比较,不需要逐个元素比较,从而减少了大量的计算量。改进的编码的算法初始化如下:

$$n_{max1} = \lfloor \log_2[\max_{(i,j)}\{|C_{LL}(i,j)|\}] \rfloor$$

$$n_{max2} = \lfloor \log_2[\max_{(i,j)}\{|C_{HL}(i,j)|\}] \rfloor$$

$$n_{max3} = \lfloor \log_2[\max_{(i,j)}\{|C_{LH}(i,j)|\}] \rfloor$$

$$n_{max4} = \lfloor \log_2[\max_{(i,j)}\{|C_{HH}(i,j)|\}] \rfloor$$

$$n = n_{max1}$$

$$n_{max1} = \max(n_{max2}, n_{max3}, n_{max4})$$

#### 4 实验结果分析

实验对象为256 pix×256 pix×8 bit和512 pix×512 pix×8 bit的灰度Lena图像,实验环境为Pentium(R)Dual-Core T4400 2.20 GHz CPU、2.00 GB内存,编程环境为MATLAB 7.0。

(1)不同分解层数和编解码级数对测试性能的影响测试图像为256 pix×256 pix×8 bit Lena图像,结果如表2所示。

表2 取不同分解层数和编解码级数时改进算法的实验数据

分解层数	编解码级数	PSNR/dB
3	6	37.111 5
	7	42.899 0
	8	50.463 5
4	6	36.141 9
	7	41.983 9
	8	49.356 2
5	6	35.36 4
	7	41.368 1
	8	48.753 8

由表2可以看出,不同分解层数和编解码级数对性噪比有一定的影响,这是由于小波分解/重构的级数越多,对频带的划分越细,越有利于编码。但是上一级频带分解的信号输出又作为下一级频带分解的输入,级数增多则意味着级联的滤波器增多,造成的信号移位也越大。另一方面,由于每次小波系数分解/重构都要进行边界延拓,级数越多引起的边界失真就越大。由实验可得,选3层小波分解、8级编解码最好。

(2)本文改进算法与基本算法性能比较

本实验测试图像为512 pix×512 pix×8 bit的灰度Lena图像,采用3层小波分解、8级编解码,结果如表3所示。

表3 两种算法编码性能比较

码率/(b/s)	本文算法			基本算法		
	PSNR/dB	编码时间/s	解码时间/s	PSNR/dB	编码时间/s	解码时间/s
0.015 625	25.435	0.140	0.016	17.320	0.140	0.063
0.03 125	26.876	0.187	0.031	21.668	0.321	0.092
0.0 625	30.704	0.328	0.062	28.390	0.650	0.120
0.125	32.997	0.547	0.125	31.100	0.910	0.180
0.25	35.580	0.906	0.269	34.110	1.260	0.270
0.5	37.460	1.563	0.465	37.210	1.670	0.480

通过对比分析发现,改进算法与基本算法相比,性噪比有所提高,尤其在低码率的情况下更为明显,在编解码时间上也快0.1 s~0.3 s左右。

图3(a)、图3(b)、图3(c)分别为原始图像、基本算法和本文改进算法在码率为0.062 5 b/s时的重构图像,图3(d)是3级小波分解8级解码后的图像及重构的图

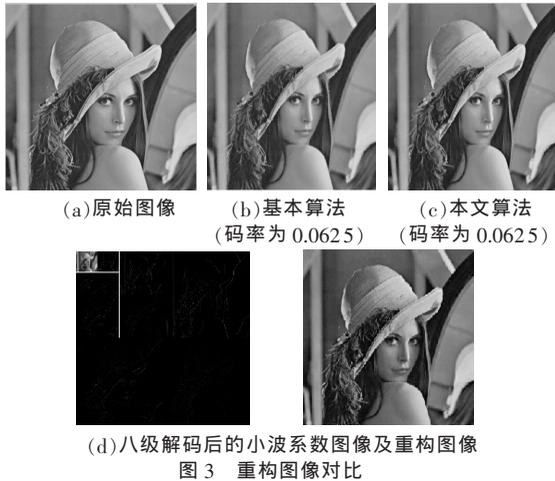


图3 重构图像对比

像。通过观察发现,改进算法在解码图像质量上明显优于基本算法。

本文针对 SPIHT 算法的不足,提出了一种改进的 SPIHT 图像压缩算法,采用了 LS9/7 提升格式小波变换,提高了运算速度并降低了计算的复杂度。针对人眼视觉系统 HVS 的特点,对原算法的分集排序和阈值的确定方法进行了改进,首先输出人眼敏感的低频信息码流,提高了解码图像的质量。针对 SPIHT 算法重复扫描的问题,本算法在编码时使用最大值链表的思想,大大减少了计算量,节省了运行时间。实验证明,该改进算法在图像编解码时间和重构图像质量均优于原算法,尤其在低码率情况下提高了解码图像的质量。

#### 参考文献

[1] SHAPIRO J. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3445-3462.

- [2] ANTONINI M, BORLANGEM, MATHIEN P. Image coding using wavelete transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, 1(2): 205-220.
- [3] SAID A, PEARLMAN W. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Transactions on Circuit and System for Video Technology, 1996, 6(3): 243-250.
- [4] Fan Wenbing, Chen Jing, Zhen Jina. SPIHT algorithm based on fast lifting wavelet transform in image compression[J]. LNAI3802, 2005, CZS(2): 838-844.
- [5] 杨云峰, 苏志勋, 钟似玢. 一种改进的基于小波零树的图像编码算法 [J]. 中国图象图形学报, 2001, 6A(6): 542-546.
- [6] 李玲远, 詹翠丽, 黄林. 基于 9/7 提升小波的 SPIHT 编码算法 [J]. 通信技术, 2007, 40(11): 362-363.
- [7] 余平, 马小虎, 李建国. 基于 LS9/7 小波的图像压缩算法研究 [J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(9): 110-111.
- [8] 潘志刚, 高鑫. 针对纹理图像压缩的改进 SPIHT 算法 [J]. 中国科学院研究生院报, 2010, 27(2): 222-227.
- [9] 龚劬, 阮华. 基于改进的 SPIHT 整数提升小波变换的图像压缩 [J]. 计算机仿真, 2009, 26(3): 195-197.
- (收稿日期: 2011-12-14)

#### 作者简介:

何丽花, 女, 1987 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像压缩处理。

郭中华, 男, 1973 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 计算机网络与多媒体通信。

陈卫, 男, 1963 年生, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向: 网络与通信。