

基于 HVS 的 DWT 图像压缩混合编码算法

李明, 张华, 王丹丹

(西南科技大学 特殊环境机器人技术四川省重点实验室 四川 绵阳 621010)

摘要: 为提高数字图像在高压比下重构图像的质量, 分析研究现有离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT) 图像压缩的相关算法以及小波系数特性, 提出一种基于人眼视觉系统(human visual system, HVS) 特性对小波系数进行加权, 结合小波各子带系数特性, 采用差分脉冲编码调制(differential pulse code modulation, DPCM) 与多级树集合分裂排序(set partitioning in hierarchical trees, SPIHT) 相结合的编码方法. 经视觉信息保真度分析实验验证, 与传统的嵌入式零树小波(embedded zero-tree wavelet, EZW) 和 SPIHT 算法相比, 在相同的比特率下该算法重构的图像具有更好的主观视觉效果.

关键词: 小波变换; 图像压缩; EZW 算法; SPIHT 算法; 人眼视觉系统; 视觉信息保真度

中图分类号: TP 391.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-6841(2013)04-0046-06

DOI: 10.3969/j.issn/1671-6841.2013.04.010

0 引言

数字图像小波变换的优异时频域特性及良好的去相关特性在图像压缩领域得到了广泛应用. 小波变换图像压缩的基本思想是把图像分解成不同空间、不同分辨率子图像, 然后再对子图像系数进行编码. 目前各种基于小波变换的图像压缩方法不断涌现, 其中基于小波系数零树结构的 EZW 算法和基于小波系数空间方向树结构的 SPIHT 算法^[1] 被认为是比较优秀的编码算法, 并在实际应用中得到进一步的改进和发展. 由 Taubman 等^[2] 提出的分层树编码(layered zero coding, LZC) 算法引入了算术编码算法进行上下文预测编码. 为了进一步提高编码效率, Li 等^[3] 提出了率失真优化嵌入式(rate distortion-optimization embedding, RDE) 算法. 在此基础上, Taubman^[4] 提出了最佳截断嵌入式编码(embedded block coding with optimized truncation, EBCOT) 算法, 该算法已经被 IEEE 引入到 JPEG 2000 标准中. 以上算法均是以一种单一编码策略来提高编码效率, 没有充分考虑多种编码方法的融合, 更没有考虑图像的主观质量.

为了更好地提高图像压缩率, 改善图像的主观质量, 目前很多先进的图像压缩算法中引入了利用人眼视觉特性, 主要包括: ①利用人眼在不同空间频率上的敏感度, 结合小波分解各子带特性加权处理后进行编码. ②利用人眼视觉对图像不同区域的敏感度, 将图像划分为各种不同的视觉重要性区域, 根据任意时间系统对不同区域响应的相互独立和不同敏感度的特性, 对不同区域进行不同的视觉加权、量化.

作者结合小波变换系数的数据结构特性提出一种混合编码方法, 通过综合分析人眼视觉特性, 推导计算出基于小波系数不同子带的掩膜表对小波系数进行加权处理, 使其在提高压缩效率的同时合理地反映 HVS 在不同空间频率上的敏感度, 从而更好地改善了图像的主观质量.

1 EZW 与 SPIHT 算法

EZW 算法是一种非常有效的小波图像压缩编码算法. 它通过不同频带间小波系数数据结构的空间相似性构造零树, 按照比特连续逼近的图像编码方法, 对小波系数的位平面分层进行零树和孤立零点的判决及熵

收稿日期: 2013-06-25

基金项目: 四川省教育厅资助项目, 编号 13ZA0164, 12ZA188; 国防重点实验室资助项目, 编号 11ZXNK02.

作者简介: 李明(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事图像压缩编码与传输、嵌入式系统研究, E-mail: blanch_lee@126.com; 通讯作者: 张华(1969-), 男, 教授, 博士, 主要从事智能控制、机器人技术及应用研究.

编码,其判决方法采用阈值逐层折半递减方法。它主要依据小波图像的树状数据结构特点有效地组织编码小波系数,但 EZW 算法存在以下不足:①EZW 编码算法所采用的是快速小波编码(Mallat)算法,需做大量的卷积运算,运算量比较大,严重影响压缩算法的实时性。②对所有频域进行同等重要编码,没有有效利用 HVS 对不同频率敏感度不同的特性。③不同的小波系数具有不同的数据特性,而 EZW 编码把所有子带系数做统一处理,这必然影响图像的压缩质量和压缩效率。④该算法主要利用不同频带相同空间位置的零树结构,没有充分利用其塔式数据结构以及子带间系数相关性。⑤为了防止输出已被标识过的零树小波系数,该算法必须进行有效的跟踪操作,这无疑要延长图像编码时间,并且要占用大量的存储空间,不利于硬件实现。

Said 等^[5]根据 Shapiro 零树小波编码算法提出了 SPIHT 编码方法。该方法利用子带间不重要系数的相关性,采用空间树分层分割方式,在编、解码阶段采用与 EZW 算法相同的规则对小波系数按照幅值分布区间进行重排。SPIHT 算法在 EZW 算法的基础上采用更高效的集合划分和重要性信息的紧凑性排序,使得在没有后续熵编码的情况下也同样可以取得良好的图像压缩效果。然而 SPIHT 算法也存在一些不足:①SPIHT 算法没有充分考虑 HVS 对不同频率敏感度不同的特性,压缩图像存在基于 HVS 的频率冗余。②该算法对低频子带和高频子带系数采用相同的编码方式,没有考虑不同子带的数据差异性,这将严重影响图像的压缩质量和压缩效率。

上述两种经典的小波变换图像压缩算法,结构都相对简单,压缩编码效率也相对显著,但在图像压缩方面还有相应的改进空间。在此基础上,作者提出了基于 HVS 的 DWT 图像压缩混合编码算法。

2 混合小波图像压缩算法

2.1 人眼视觉特性分析

HVS 是最复杂的图像处理系统之一,心理学研究发现,HVS 在频率方面具有一般的带通特性。人类视觉特性在不同的频带范围内是不同的,可以结合人类视觉的这一特性进一步提高图像压缩的质量和效率。在图像压缩传输过程中提高人眼比较敏感频带信息的权重,降低人眼不敏感频带信息的权重,从而进一步去除基于 HVS 的频率冗余。

HVS 的研究为人类提供了如何看世界的数学模型——对比敏感度函数(contrast sensitivity function, CSF),一般认为对比敏感度在很大程度上依赖于色彩、空间、频率等刺激特征。设空间频率为 f ,人眼对频率的检测门限可以通过实验测得,设为 $C_r(f)$,则 CSF 可以表示为

$$\text{CSF}(f) = \frac{1}{C_r(f)}. \quad (1)$$

随着对 HVS 研究的深入,研究人员提出了多种关于 $\text{CSF}(f)$ 的模型,其中比较通用的模型为

$$\text{CSF}(f) = p(q + rf) \exp(-(sf)^t), \quad (2)$$

式中 p, q, r, s, t 为参数, f 为空间频率, f 也可以表示为

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, \quad (3)$$

其中 f_x 和 f_y 分别是空间频率在水平方向和垂直方向的分量。

基于式(2)模型, Mannos 等^[6]提出如下 CSF 模型:

$$H(f) = 2.6 \times (0.0192 + 0.114f) \exp[-(0.114f)^{1.1}]. \quad (4)$$

为了更加直观地描述 CSF 特性,采用归一化空间频率 f_n 来表示视觉敏感度 H ,其中 $f_n = f/f_s$, f_s 为归一化因子。

经不同频率方向的信号测试表明,人眼对不同频率方向的激励对比敏感度不尽相同。由于式(3)水平和垂直方向的频率分量对 CSF 模型作用比较敏感,随着信号方向与水平轴夹角的增大,敏感度逐渐降低,当角度达到 45° 时,对比敏感度达到最低,而经小波变换各频率子带被分为水平、垂直和与水平成 45° 角方向。图 1、图 2 为 CSF 归一化曲线以及上述 3 个不同方向频率作用的 CSF 归一化曲线,可以看出,CSF 曲线相当于一个带通滤波器,中低频处出现最大值,当频率升高或降低时,敏感度呈下降趋势。

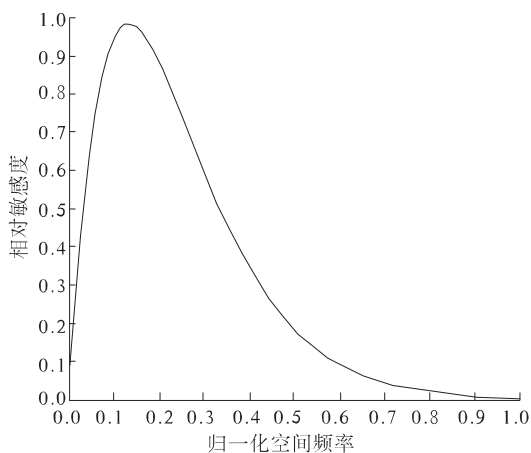


图1 CSF 归一化曲线

Fig.1 CSF normalized curve

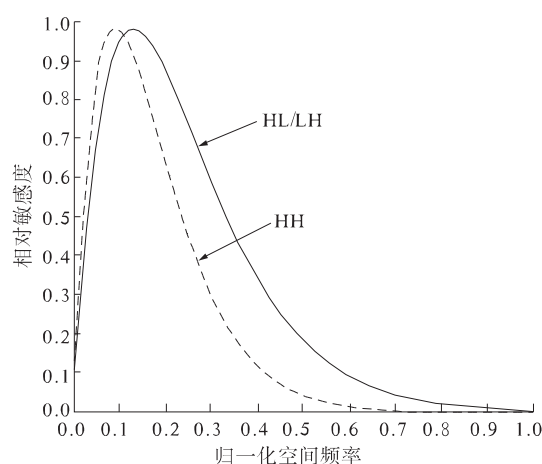


图2 不同方向 CSF 归一化曲线

Fig.2 CSF normalized curve in different directions

2.2 基于 HVS 小波系数加权

由 CSF 模型分析,人眼对图像具有频率选择性,而图像经多级小波变换后被划分为不同分辨率下的不同方向的多个高频子带和一个低频子带,如何将 CSF 模型引入到小波变换系数中是必须要解决的问题.为了在图像压缩中充分利用 HVS 特性,根据 CSF 曲线在不同分辨率下创建 CSF 掩膜度量各子带小波系数的重要性.综合分析多种掩膜方法,作者采用在小波变换图像压缩中具有更好视觉效果峰值均值掩膜,经试验验证,峰值 CSF 掩膜更加符合人眼主观视觉特性.原始图像经 5 级小波分解,根据 CSF 曲线分析 CSF 掩膜具有 6 个不同频带的视觉加权值^[7],如图 3 所示.

然而根据小波分解特性,除最低频子带外,每一级分辨率下均有 3 个不同方向的高频子带,结合公式(3)分析 CSF 模型中频率存在方向性,而 6 权重 CSF 掩膜并没有体现不同方向频率上的敏感度差异.根据 CSF 函数 $H_n L_n$ 与 $L_n H_n$ 的加权值相等并处于 $H_{n-1} H_{n-1}$ 和 $H_{n+1} H_{n+1}$ 的加权值之间.因此对于 5 级小波分解来说,6 权重 CSF 掩膜可以扩展到 11 权重 CSF 掩膜,计算过程如下:

- (1) 图 3 中的分别处理不同频率等级的 6 个加权值由低频到高频分别记为 $P_6, P_5, P_4, P_3, P_2, P_1$.
- (2) $H_n L_n$ 与 $L_n H_n$ 的加权值相等,记为 Q_n .

(3) 用公式 $Q_n = \sqrt{\frac{P_{n+1}^2 + P_n^2}{2}}$ 计算 5 个 Q_n 值 ($n = 1, 2, 3, 4, 5$).

由以上过程计算得 11 权重 CSF 掩膜的加权值与各子带的对应关系,如图 4 所示.由于 DWT 系数中最低频子带的特殊性,为实现更有效的后续编码操作,采用最低频子带为单位 1 的子带权重系数.

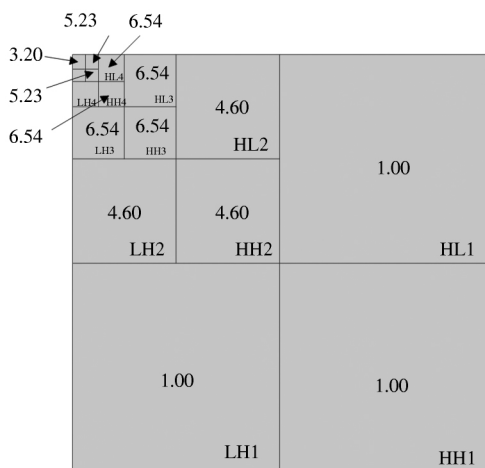


图3 DWT 系数 CSF 6 权重系数

Fig.3 DWT coefficient CSF 6-weighting factor

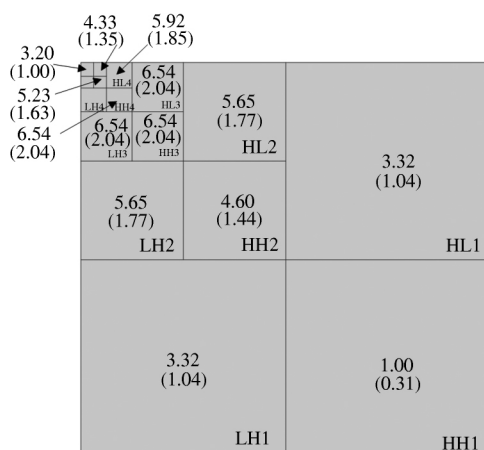


图4 DWT 系数 CSF 11 权重系数

Fig.4 DWT coefficient CSF 11-weighting factor

2.3 混合压缩编码算法描述

原始图像经小波变换后,低频子带的小波系数幅值相对比较大,有统计表明低频子带小波系数携带了整幅图像超过90%的能量^[8],而高频子带的小波系数幅值较小,并且与低频子带间系数的相关性不大.研究发现低频子带系数的行列相关性较大,因此,为了充分利用低频子带与高频子带系数相关性较小和低频子带行列相关性较大的特点,采用单独对低频子带编码的方式对小波系数编码.通过实验发现,低频子带系数经DPCM编码后行列相关性均有所降低^[9],因此,为了降低子带系数内部的空间冗余,对低频子带采用DPCM编码.经DPCM编码后得到的预测误差值相对较小,再将其码流经过一次 Huffman 编码以进一步提高图像压缩效率.

由于小波系数的低频子带要进行 DPCM 编码,在 SPIHT 编码时就不需要对低频小波系数进行二次编码,也就是说,与传统 SPIHT 编码主要的不同是对链表的初始化.小波树的树根为最后一级小波系数子带,由于低频子带无子孙节点,不重要子集表的初始化是最后一级小波分解的3个方向的高频子带.不重要系数表的初始化中需要屏蔽掉最后一级小波分解的低频子带,只取最后一级小波分解的3个方向的高频子带.

改进的编码方法首先根据 CSF 的加权系数对 DWT 各子带系数加权,由于小波变换良好的去相关性,使小波系数的低频子带与高频子带的相关性较弱,因此,将小波系数的低频子带和低频子带分开处理,不仅能够充分利用小波系数在图像压缩方面的良好特性,而且可以提高图像编码的质量和运算速度.作者根据不同频率下的小波系数的特性分别采用 SPIHT 编码和 DPCM 编码以进一步提高图像的压缩性能.图像压缩步骤如下:

- 1) 根据小波函数特性^[10]选择合适的小波函数,通常情况下 Biorthogonal 小波相对于图像压缩适用范围比较广,作者选择双正交小波函数 Bior 3.7 作为小波变换的基函数.
- 2) 对图像进行5级小波分解,得到16个不同系数子带.
- 3) 对不同的子带按照相应 CSF 掩膜系数进行加权处理.
- 4) 对最低频子带进行 DPCM 编码,同时对其他子带小波系数按照 SPIHT 算法进行编码.
- 5) 为了进一步提高图像的压缩效率,分别对 DPCM 码流和 SPIHT 码流进行 Huffman 编码和熵编码,最终组织码流输出.

图像解码是图像编码的逆向操作,如图5所示,这里需要指出的是,由于在图像编码前对小波系数基于 CSF 掩膜系数进行加权处理,为保证重构图像的真实性,在图像解码端也必须将解码的小波系数进行逆向的 CSF 反加权操作.

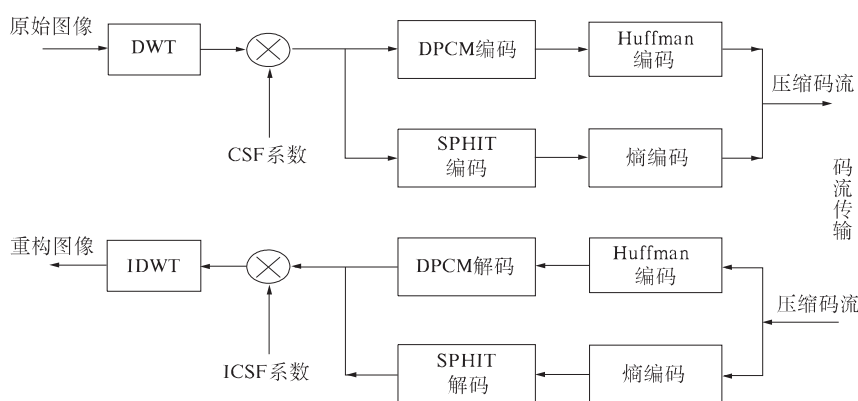


图5 算法编、解码框图

Fig. 5 Codec algorithm block diagram

3 实验结果分析

为了验证改进后小波变换图像压缩算法的压缩效果,选择运行 Windows XP 操作系统的 PC 和 Windows XP 版本的 Matlab 7.1 测试仿真软件,分别选择3幅大小为 512×512 的 8 bit 且具有不同纹理的 lena、bridge

和 aerial 灰度图像,进行实验对比评价分析.在图像评价中通常使用峰值信噪比(PSNR),它表示的是到达噪声比率的顶点信号,但它对于评价图像相对于人眼视觉特性的指标有很大的局限性,不能够准确地体现出人眼主观看到图像的视觉效果.由于图像的最终“消费者”是人眼,采用一种更加接近人眼视觉特性的评价方法才能更加真实地反应图像质量.作者采用更接近主观视觉效果的评价指标——视觉信息保真度(visual information fidelity,VIF)^[11-13],衡量各种算法重构图像的实际主观质量,VIF值越大则重构图像的主观效果越好.对 lena、bridge 和 aerial 图像分别采用 EZW、SPIHT 和改进算法在不同比特率下进行压缩,并对重构图像进行 VIF 值分析,结果如表 1~3 所示.

表 1 lena 图像不同算法下的 VIF 值

Tab.1 The VIF of each codec algorithm compression of the “lena”

比特率	EZW 算法	SPIHT 算法	改进算法
1.0	0.68	0.79	0.83
0.9	0.65	0.76	0.80
0.8	0.60	0.71	0.78
0.7	0.58	0.67	0.73
0.6	0.54	0.64	0.69
0.5	0.50	0.59	0.64
0.4	0.41	0.50	0.57
0.3	0.32	0.43	0.49
0.2	0.25	0.32	0.39
0.1	0.17	0.21	0.27

表 2 bridge 图像不同算法下的 VIF 值

Tab.2 The VIF of each codec algorithm compression of the “bridge”

比特率	EZW 算法	SPIHT 算法	改进算法
1.0	0.36	0.52	0.58
0.9	0.35	0.49	0.55
0.8	0.32	0.46	0.52
0.7	0.30	0.42	0.48
0.6	0.28	0.36	0.43
0.5	0.24	0.33	0.39
0.4	0.21	0.29	0.34
0.3	0.17	0.24	0.29
0.2	0.12	0.17	0.22
0.1	0.08	0.10	0.15

表 3 aerial 图像不同算法下的 VIF 值

Tab.3 The VIF of each codec algorithm compression of the “aerial”

比特率	EZW 算法	SPIHT 算法	改进算法
1.0	0.37	0.57	0.64
0.9	0.35	0.55	0.60
0.8	0.33	0.52	0.56
0.7	0.31	0.48	0.52
0.6	0.29	0.42	0.47
0.5	0.26	0.36	0.41
0.4	0.23	0.31	0.36
0.3	0.19	0.25	0.30
0.2	0.12	0.18	0.23
0.1	0.08	0.10	0.15

通过对比可得,改进算法在同一比特率下重构图像的 VIF 值相对 SPIHT、EZW 算法均有显著提高,在不同压缩率下改进算法的重构图像的主观质量均有有效提升.实验证明,引入 HVS 到图像压缩中并采用混合编码方法,在相同压缩率下相比一般的基于 SPIHT 算法的 DWT 图像压缩编码方法,重构图像的 VIF 值提升 0.05~0.1.由此可见,改进算法在有效去除图像视觉冗余信息的同时,提高了图像压缩效率,增强了图像的对比度,显著改善了图像的主观质量.

4 结论

通过分析研究现有流行小波图像压缩算法,围绕当前亟待解决的高压缩比下重构图像质量差的问题,将 HVS 特性的 CSF 曲线引入到图像压缩中,提出了一种混合的小波变换图像压缩算法.通过对 VIF 性能的实验验证,证明了基于 HVS 对小波图像进行加权,并采用多种编码方法协同编码的算法能够很好地提高图像的压缩效率,其重构图像的主观效果得到有效提高.由于图像压缩领域的需要,为了进一步提高图像压缩的效率和重构图像的质量,结合人眼视觉特性的以及多种编码算法相结合的混合编码方式将成为图像压缩的主要研究方向.

参考文献:

- [1] 邓宸伟,赵保军.一种快速改进型 SPIHT 算法[J].北京理工大学学报,2010,30(4):478-482.
- [2] Taubman D,Zakhor A. Multirate 3-D subband coding of video[J]. IEEE Transactions on Image Processing,1994,3(5):572-

- 588.
- [3] Li J, Lei S. An embedded still image coder with rate distortion optimization [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(7): 913–924.
- [4] Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(7): 1158–1170.
- [5] Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(3): 243–250.
- [6] Mannos J L, Sakrison D J. The effects of a visual fidelity criterion on the encoding of images [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, 20(4): 525–536.
- [7] Singh P, Singh P. Implementation of SPIHT and WDR algorithms for natural and artificial images using wavelets [C]//The Fourth International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks. Mathura, 2012: 359–363.
- [8] 张砾佳. 基于小波变换的图像压缩编码研究 [D]. 西安: 中国科学院研究生院, 2007.
- [9] 武永红. 基于小波变换的图像无损压缩算法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [10] 朱玉清, 卫艳荣, 程正兴. 具有整数伸缩因子的多变量向量值双正交多小波包 [J]. 郑州大学学报: 理学版, 2012, 44(3): 61–65.
- [11] Sheikh H R, Bovik A C. Image information and visual quality [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(2): 430–444.
- [12] Senapati R K, Pati U C, Mahapatra K K. A novel hybrid HVS based embedded image coding algorithm using DTT and SPIHT [C]// International Conference on Devices and Communications. Mesra, 2011: 1–5.
- [13] 华东, 余宏生. 基于视觉信息保真度的图像增强质量客观评价方法 [J]. 微计算机信息, 2012, 28(1): 173–175.

DWT Image Compression Hybrid Coding Algorithm Based on HVS

LI Ming, ZHANG Hua, WANG Dan-dan

(Special Environment Robot Technology Key Laboratory of Sichuan Province,
Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to improve the reconstructed image quality of digital images at high compression ratio, the existing discrete wavelet transform (DWT) algorithms for image compression and wavelet coefficient features were studied. Encoding method was based on human visual system (HVS) characteristics of the wavelet coefficients weighted, combined with wavelet coefficient characteristics of each sub-band, using differential pulse code modulation (DPCM) and set partitioning in hierarchical trees (SPIHT). The visual information fidelity (VIF) analysis experiment showed that the reconstructed image of the proposed algorithm had better subjective visual effect, compared with the traditional embedded zero-tree wavelet (EZW) and the SPIHT algorithm at the same bit rate.

Key words: wavelet transform; image compression; EZW algorithm; SPIHT algorithm; HVS; VIF