

基于小波的图像水印研究进展^{*}

王相海

(辽宁师范大学计算机与信息技术学院 大连116029) (信息安全国家重点实验室 北京100039)

摘要 随着多媒体和 Internet 的迅速发展,对数字产品保护和信息安全的迫切需求使得数字水印技术成为多媒体信息安全研究领域的一个热点问题。基于小波的多媒体水印算法近年来受到人们高度重视,特别是,随着 JPEG2000 将小波变换纳入其中,该领域的研究更加具有实际意义。本文首先分析了有益于图像水印的小波变换的性能,随后对基于小波的图像水印技术进行了综述,对目前常用的水印技术进行了分类和讨论,最后对小波领域图像水印的发展方向进行了展望。

关键词 图像水印,小波变换,次能带,HVS,JPEG2000

Research Progress on Wavelet-Based Image Watermarking

WANG Xiang-Hai

(College of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116019)

(State Key Lab. of Information Security, Beijing 100039)

Abstract With the rapid development of multimedia and Internet, there is a strong need for security services in order to keep the distribution of digital multimedia work both profitable for the document owner and reliable for the customer. The wavelet-based multimedia watermarking algorithms have received much attention in recent years, and with the standardization process of JPEG2000 and the shift from DCT- to wavelet-based image compression methods, watermarking schemes operating in the wavelet transform domain have become even more interesting. In this paper, the properties of the wavelet transform benefiting image watermarking are first analyzed, and an overview of the wavelet-based watermarking techniques available today is given. In particular, these techniques are classified and discussed. Finally, the future development of wavelet-based image watermarking is also analyzed and conjectured.

Keywords Image watermarking, Wavelet transform, Subband, HVS, JPEG2000

1 引言

多媒体及 Internet 的迅速发展使得图像和视频等多媒体信息的交流和传输变得更加简单和快捷,然而数字媒体信息所具有的可复制、易修改和易传播等数字特性同时也给数字产品的版权保护和信息安全提出了新的挑战,这种对数字产品保护和信息安全的迫切需求,导致了数字水印技术成为多媒体信息安全研究领域的一个热点问题^[1,2]。多媒体的数字水印技术是指将数字、序列号、文字、图像等不可见的标志(水印)嵌入到多媒体数据中,以起到版权保护的作用。该技术从实现过程上可分为两类^[3],即空域算法和变换域算法。空域算法的思想是将水印直接嵌入到空间的宿主媒体中。该方法是早期数字水印的主要方法^[4],并且近些年还有较积极的研究。空域算法通常具有较快的速度,但一般鲁棒性较差,且可嵌入水印的容量通常也会受到限制。变换域方法是指宿主媒体在嵌入之前首先被变换到变换域,然后再进行水印嵌入。该类方法具有很多好的特性,像鲁棒性、不可见性等等,并且一些算法还结合了当前图像和视频的压缩标准。在该类方法中,基于小波的多媒体水印技术是近年来一个比较活跃的研究领域^[5],特别是随着 JPEG2000^[6]将小波变换纳入其中,对该领域的研究更加具有实际意义。本文对基于小波的图像水印技

术进行了综述,特别以水印嵌入位置、结合 HVS 模型和结合编码方法等为线索对目前常用的水印技术进行了分类和讨论,最后对小波领域图像水印的发展方向进行了展望。

2 可用于图像水印的小波变换特性

小波变换是20世纪80年代后期发展起来的应用数学分支,很快被法国学者 Daubechies 和 Mallat 等引入到信号及图像处理领域^[7,8]。它具有许多良好的特性,这些性质奠定了小波域水印技术的基础。这些特性主要表现在以下几个方面^[1,3,5]:一是空间-频率定位特性。图像的小波变换域很好地提供了确定诸如图像边缘和纹理等区域的空间-频率位置信息,而这些信息对于保证所嵌入水印的鲁棒性是十分重要的;二是多分辨率特性。小波变换构成了对图像的多尺度视频分解,它将图像分解为低分辨率逼近图像(LL)和各层次的水平、垂直、对角线方向的高分辨率的细节成分(HL、LH、HH),小波域的这种对图像的多分辨率表示对于含有水印图像的渐进传输和可分级解码等具有重要意义,采用该机制进行数字水印检测可以大量节省处理时间^[9];三是小波分解的空间-频率特性与 HVS 某些视觉特性的相似性。该特性是小波变换区别于 FFT 和 DCT 的一个重要方面,根据该特性可以将高强度的水印嵌入到 HVS 不太敏感的区域,这样在保证

^{*}国家自然科学基金项目(项目号:60372071)、辽宁省自然科学基金项目(项目号:20032105)、大连市科技基金项目和辽宁省高等学校优秀人才支持计划资助。王相海 博士,教授,主要研究领域为计算机图形学、图像及多媒体信息处理。

不影响图像视觉质量的前提下可以最大限度地增加嵌入水印的强度^[10]；四是小波变换的自适应性。小波变换的滤波器和分解结构可以根据宿主信息特性进行自适应选择——这种小波变换机制被称作小波包变换，小波包变换最近已被应用到数字水印中^[11]，取得了很好的效果。

3 小波域图像水印技术的发展

小波域图像水印过程一般分为水印嵌入与水印检测(提取)两部分^[12]，其过程见图1和图2，其中小波变换的类型、水印信息的选取、水印的嵌入位置和嵌入强度等因素都会对水印系统的性能产生直接的影响。近年来人们对小波域的图像水印技术进行了积极的研究，提出了许多有效的水印算法^[5,12,13]。以下我们首先对小波域图像水印技术中小波滤波器的一些情况进行分析，然后以水印嵌入位置、结合 HVS 模型以及结合编码方案等为线索，对小波域图像水印的常用技术进行分类和讨论。

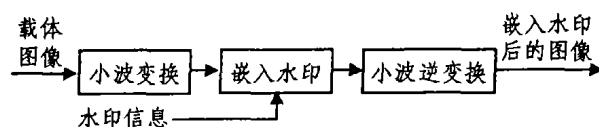


图1 小波域图像水印嵌入的一般过程

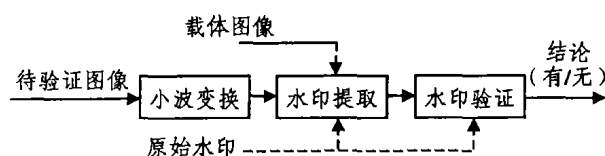


图2 小波域图像水印提取与检测的一般过程

3.1 水印技术中的小波滤波器

数字水印中小波滤波器与图像编码中小波滤波器的选取原则通常不完全相同，图像编码中所使用的滤波器一般希望它能将图像的大多数能量集中在低分辨率的逼近图像中，这样细节子带中的信息可以被舍弃而不会引起重构图像的严重降质，而水印技术通常既要利用细节子带中的冗余信息，同时又要保持图像的质量，这样如果完全采用图像编码中小波滤波器的选取原则势必会影响水印技术的鲁棒性^[14]。目前对于不可见水印中小波滤波器适应性的选取原则正处于探讨之中，一些抗压缩攻击水印的小波滤波器的适应性情况可参看文^[15]。目前人们根据所提出数字水印技术的特点，通常采用 Haar 小波、Daubechies-4、Daubechies-6 或 Daubechies-7/-9 小波等^[16]。此外，为了便于对图像边缘的定位，一般对含有尖锐边缘的宿主图像选用较短的小波滤波器。

3.2 基于小波低分辨率逼近图像的水印技术

与基于细节子带区域的水印方法相比，基于小波低分辨率逼近图像的水印方法相对较少，这主要是由于低分辨率逼近图像的小波系数通常包含了原始图像的大多数能量，该部分信息直接影响到重构图像的质量，这样将大量的水印信息直接嵌入到该区域势必会影响重构图像的质量，然而该类方法比较简单，一些基于空间的和 DCT 域的方法可以很容易地应用到该领域，更重要的是该类方法对诸如压缩、滤波和一些恶意攻击等通常具有很好的鲁棒性^[17]，因而受到人们的重视。以下我们对目前的一些主要方法进行分析 and 讨论。

Liang 等在文^[18]中提出了一种基于 DFT 的低分辨率

逼近图像区域的嵌入方法^[19]，该方法首先对低分辨率的逼近图像进行了 DFT 变换，然后将水印信息线性地嵌入到低分辨率图像的 DFT 域的信息中，文中水印采用的是具有零均值和单位方差的 Gaussian 伪随机序列。由于人眼对图像 DFT 系数的变化不很敏感，这样按此方法所得到的水印图像具有很好的视觉效果，此外由于结合了其它的变换，水印图像对移位操作也具有很高的抵抗性。方案中的水印提取和验证采用了嵌入的逆过程。

Xie 等提出了一种基于非线性变换的低分辨率图像区域的嵌入方法^[19]，该方法利用一个 3×1 的滑动窗口按自顶向下、自左向右的顺序依次在低分辨率图像区域移动，每移动到一处将获得三个系数值，将此三个系数按从小到大的顺序进行排序并通过一种非线性变换^[20]将水印位信息嵌入到中值中，其它两个值保持不变。方法中所采用的水印信息是一个 0、1 二值序列。该方法的水印提取过程与嵌入过程互逆，并且可以不利用原始图像。尽管该方法提出时是应用于图像鉴别，实际上它的鲁棒性使得该方法也能很好地应用于版权保护等应用领域。此外，在文献中作者还将此方法与编码方法结合，提出了相应的水印方案，具体讨论见 3.6 节。

Coriv 等在文^[21]中提出了一种基于可加性嵌入公式的低分辨率区域嵌入方法，该方法首先将宿主图像进行多层小波分解，直到其逼近图像的大小为 32×32 ，然后使用可加性嵌入公式 $f'(m, n) = f_{mean} + (f(m, n) - f_{mean}) \cdot (1 + \alpha w_i)$ ，将水印 w_i 嵌入到 32×32 的低频逼近图像中，其中 f_{mean} 为逼近图像区域的系数平均值。方法中水印信息 w_i 采用了长度为 1024 (32×32) 的伪随机实数的 Gaussian 序列。水印的提取采用的是上述嵌入公式的逆过程。

Tzovaras 等提出一种基于低频区域分割的水印嵌入技术^[22]，该方法首先依据一个伪随机二值序列将低频子带分成两个子集，并将由伪随机数产生器所产生的水印信息添加到两个子集中对应原图像中强纹理信息的那部分系数中，嵌入时，一个子集中的系数增大，而另一个子集中的系数则减小，以保证嵌入水印信息后两个子集中样本平均数差的极大化。该方法在不参照原图像的情况下可以测试出水印的存在性，具体当两个子集合中的平均值相差悬殊时则意味着图像中存在水印，否则水印则不存在。

除了上述方法外，Pereira 等人还提出一种基于 HVS 模型的低频区域水印嵌入方法^[23]，具体情况在下面 3.5 节介绍；Nicchiotti 等人对上述^[21]中的方案进行了改进，实现了一种非可逆的水印技术，具体参见文^[24]。

3.3 基于小波细节子带区域的水印技术

图像小波分解的细节子带区域中大多数系数均接近零，只有很少的一些系数具有大的峰值，这些系数(通常被称为重要系数)通常对应图像中的边缘或纹理信息。基于小波分解的细节子带区域的水印技术正是利用图像小波域的这种空间-频率定位特性，将水印嵌入到这些重要系数中，尽管所嵌入水印信息的强度一般与子带的能量、图像的小波分解层数和子带的方向性等因素有关，但与前面所介绍的基于低分辨率逼近图像水印技术相比，该类方法通常具有较大的水印嵌入量，这样攻击者要去除水印往往会导致重构图像的降质。但该类方法也有自己的不足，即对于诸如图像压缩、滤波、几何变换和噪音等攻击通常鲁棒性较差。下面我们对基于小波细节子带区域的一些主要方法进行讨论。

Dugad 等在文^[25]中提出的一种阈值法将水印嵌入到图

像的小波细节子带区域,该方法首先利用 Daubechies-8小波滤波器对图像进行三层小波分解,然后选择所有细节子带中大于阈值 T_1 的系数作为水印嵌入系数,所嵌入的水印为与各细节子带相匹配的伪随机实数的 Gaussian 序列,嵌入公式为: $V_i = V_i + \alpha |V_i| X_i$, 其中 V_i 是添加水印后的 DWT 系数, V_i 是原图像的 DWT 系数, X_i 为添加的水印;水印的检测采用了另一个阈值 T_2 ,且要求 $T_2 > T_1$,具体检测过程是:首先对待测图像进行 DWT,找出其中大于 T_2 的系数 $\hat{V}_i$ (这些系数可能被加入水印),然后计算这些系数与对应水印间的相关性。该方法的特点是尽管水印所嵌入的位置与原图像有关,但并不需要对小波系数进行排序,此外,检测水印时并不需要原图信息,因而属于盲水印。

Xia 等人提出了一种基于多尺度的水印技术^[26],它首先对图像进行了两层的 Haar 小波分解,然后按公式 $f'(m,n) = f(m,n) + \alpha f^{beta}(m,n)w$, 将水印嵌入到细节子带中,其中 α 是嵌入水印的长度, $beta$ 为对细节子带系数的放大因子。所嵌入的水印 w , 也是伪随机的实数 Gaussian 序列。在水印检测阶段,该方法采用了分层递进的提取方法,即首先对待测图像和原始图像进行一级小波分解,通过计算互相关来比较加入到 HH 尺度上的水印与提取出的 HH 尺度上的水印系数差(提取过程为上述公式的逆过程),如果在互相关中出现了一个峰值,则认为已经检测出了水印,否则需要进行新的一级小波分解,并重复前面的过程。如果水印在早期阶段能被检测出来,便可以节省不必要的计算。

Wang 等人在文[27]中提出了一种利用多阈值法搜索小波系数的水印技术,该技术所采用的水印是一伪随机实数序列,并将其嵌入到一些重要子带的重要系数中,这样所嵌入的水印对于各种信号处理和压缩等攻击,具有很好的鲁棒性。在对嵌入水印的小波系数的选取过程中,该方法采用了一种多阈值方法^[28],即对于每一个细节子带,选择大于当前阈值的小波系数,当水印嵌入后,子带的阈值缩小一半,利用此阈者再来选择小波系数,这个过程一直进行下去,直到有足够的小波系数被选取。子带初始阈值选取为最大绝对值系数的一半。水印嵌入公式为 $f'_i(m,n) = f_i(m,n) + \alpha_i T_i w_i$, 其中 α_i 为子带 s 的添加因子, T_i 为子带 s 的当前阈值,水印的提出为该公式的逆过程。对于卡通图像和地图图像, Su 等修改了嵌入水印的方法^[29],允许位图作为水印被嵌入,具体将被选择的子带分成相等的几块,每一块被嵌入一位位图信息;此外,作者还进一步将此方案拓展到标签图像和 ROI(感兴趣区域)的水印应用中,具体见文[30]。

Hsu 等人在文[13]中提出了一种基于多分辨率的数字水印技术,该技术采用的水印信息是诸如标志或手写签字等有意义的二值图像,在水印嵌入之前首先将宿主图像和水印图像分别进行多尺度分解,前者采用的滤波器为 Daubechies-6^[30],而后者采用的则是 Resolution-Reduction (RR) 函数^[31]将水印图像分解为金字塔结构(RR 函数较一般的二下取样更适合于文本和线条画等二值图像的分解,因为它可以保持细的线条以及其它细节信息),在水印嵌入阶段,将水印分解图像各层的信息经伪随机排列后分别嵌入到宿主图像小波分解的相应分辨率细节子带,具体将水印分量的奇数列信息嵌入到 LH 子带中,而将偶数列信息嵌入到 HL 子带中。该方案在水印抽取和验证阶段需要用到原始图像和加水印后的图像,这样一方面可以获得水印嵌入时的伪随机排列的映射,另一方面可以计算抽取结果与参考水印的相关性。进一步,作者

还给出了对二值水印图像进行二值小波变换^[32]的水印嵌入策略,具体参见文[33]。

此外, Tsekeridou 利用文[34]中的圆形对称水印作为母信号构造了一种自相似水印^[35],然后将该水印嵌入到图像小波分解的第一、二层的三个细节子带的中心位置(图像经 Harr 小波分解四层,水印的大小一般不超过宿主图像的 1/4,嵌入到第二层细节子带的水印则需要原始水印的基础上缩小 1/4)。水印的验证过程采用的是统计的方式,没有用到原始图像。由于该方案采用了自相似水印并且水印的嵌入是分层进行的,从而在很大程度上保证了对诸如滤波、压缩、剪裁、缩放和旋转等操作的鲁棒性。Kundur 在文[36]中提出一种 RRW (Robust Reference Watermarking) 算法,该算法通过对宿主图像小波分解同一层三个细节子带中相同位置的三个系数进行排序,然后通过对中间的系数进行量化以嵌入水印。Inoue 等在文[37]中提出一种将水印信息嵌入到 LH 和 HL 的盲水印方法。

3.4 基于小波低分辨率逼近图像与细节子带区域的水印技术

同时在小波低分辨率逼近图像和细节子带区域嵌入水印信息通常可以保证水印在宿主图像中的“均衡性”,这样既可以克服单纯将大量水印嵌入到低分辨率逼近图像中所带来的可见性差的缺点,又可以避免单独将水印嵌入到细节子带中的低鲁棒性的不足。近几年出现了许多这方面有效的算法,以下我们对目前常用的一些技术进行分析和讨论。

J. R. Kim 等在文[38]中提出了一种基于分层的自适应阈值方案的水印技术,该方法利用 Box-Muller 变换获得一长度为 N 的 Gaussian 分布的随机向量并将其作为嵌入水印,水印嵌入之前,首先将宿主图像进行小波分解(文中图像被分解为 3 层),然后根据各个子带所在的层数确定阈值,进而寻找子带中知觉上重要的小波系数,并将水印嵌入其中,具体对于第 i 层各子带,取阈值 $T_i = 2^{\lfloor \log_2 C_i - 1 \rfloor}$, 其中 C_i 为三个子带中的最大系数,子带中大于 T_i 的系数被看作重要系数,水印将嵌入在这些系数中,嵌入公式为: $V_i = V_i + \alpha V_i X_i$, 其中 V_i 为所选择的小波系数, X_i 为 Gaussian 分布的随机向量, α 为每一个子带的逼近因子,对于 LL 子带, α 取 0.04,而对于第一、二、三层的其它子带,分别取 0.1、0.2 和 0.4。水印的验证利用了原图像并采用了与嵌入相反的过程,同时使用了向量投影技术。利用该方案所嵌入的水印通常具有不可见性以及图像压缩、图像滤波和几何变换等攻击的鲁棒性。然而,该方案并不具有渐进的、多尺度的水印检测机制。

Chae 等提出一种基于膨胀水印图像分解系数的水印方案^[39],该技术采用的水印为宿主图像 1/4 大小的灰度级图像,在水印嵌入之前,宿主图像和水印图像均被进行一层小波分解(方案中采用的是 Harr 小波),水印图像分解系数将被嵌入到宿主图像的每一个分解系数中,具体嵌入过程如下:首先将宿主图像的分解系数和水印图像的分解系数进行线性放缩,使得每个系数均用 24 位来表示,对于放缩后的每个水印图像系数,记 A 、 B 和 C 分别为其高 8 位、中 8 位和低 8 位,将 A 、 B 和 C 分别作为高 8 位产生三个具有 24 位的数据 A' 、 B' 和 C' (低 16 位填 0),将 A' 作为 HH 和 LL 子带的元素,将 B' 和 C' 分别作为 LH 和 HL 的元素,这样一个水印图像系数便膨胀为 2×2 的系数块,这样膨胀后的水印图像系数子带则与宿主图像的系数子带具有同样的大小;完成上述工作后,便可利用公式 $w(m,n) = ah(m,n) + s(m,n)$ 进行水印嵌入,其中 $h(m,n)$ 和 s

(m, n) 分别为上述膨胀后的宿主图像与水印图像系数, $w(m, n)$ 为嵌入水印后的新图像, α 为尺度因子, 它决定了新图像中宿主图像与水印图像信息的比例。该方案水印的检验采用的是嵌入的逆过程。该方案具有嵌入信息量大、不可见性好等优点, 并且对低通滤波、有损压缩等攻击具有很好的鲁棒性。虽然文中采用的水印图像为宿主图像的 $1/4$, 实际可通过增加图像的分解层数和利用小波分解系数的多尺度特性去掉该限制。

Y. S. Kim 在文[40]中提出了一种加权的水印嵌入方法, 该方法所嵌入的水印为一伪随机 Gaussian 实数序列 w_i , 作者建议宿主图像被分解为三层, 嵌入到 LL 子带中水印与其它子带中的水印信息量的比为 $1:9$, 嵌入到 9 个细节子带中的 w_i 的数量与子带的能量成正比, 除了子带 HL_1 、 LH_1 和 HH_1 外, 其它子带水印被添加到的系数中, 添加公式为 $f'(m, n) = f(m, n) + \alpha \cdot w_i \cdot f(m, n) \cdot w_i$, 其中 α 为各子带的添加因子, 对于 LL 该值较小, 一般为其它子带的 $1/100$, w_i 为与各子带的能量成比例的可视觉权 (Visual Weight)。水印的检验采用的是嵌入的逆过程。该方案具有一定的鲁棒性, 并且通过引入 w_i 保证所嵌入水印的不可见性。

3.5 基于 HVS 模型的小波域水印嵌入方法

人类视觉系统 (HVS) 不同于照相机的感光设备, 它对视觉信息的感知通常是不均衡的, 比如对于图像所表现的信息, HVS 可能对一些信息的敏感程度要高于其它的信息, 即 HVS 通常具有光亮度掩蔽效应、纹理掩蔽效应、空间掩蔽效应、频率掩蔽效应和颜色掩蔽效应等等, 利用这些掩蔽效应人们对基于 HVS 模型的图像编码方法进行了积极的研究, 提出了许多有效的图像编码方案^[41]。实际上, 数字水印方案的一个关键要求就是水印的不可见性, 而图像小波变换的多分辨率特性和各频带处理的独立性使得在小波域更加容易将 HVS 模型结合到水印嵌入系统中, 这样在保证不影响图像视觉质量的前提下可以最大限度地增加嵌入水印的强度。采用 HVS 模型进行数字水印的总体想法是利用 JND (Just Noticeable Difference) 阈值 (即一个图像频带的变化只要低于某个阈值就不会被 HVS 注意到, 该阈值即为 JND 阈值), 来确定图像各个子带中所能容忍的水印信息的最大限量。有关对 JND 的进一步讨论可参见文[42, 43]。

Barni 等人在文[44]中提出了一种基于 HVS 的盲水印方案, 该方案采用了文[45]中的 HVS 模型, 所嵌入的水印为一伪随机的二值序列 $x_i \in \{+1, -1\}$, 其中 $i = 1, \dots, 3mn-1$ (图像的大小设为 $2m \times 2n$), 图像被分解为四层, 所采用的小波为 Daubechies-6^[17], 所选择嵌入水印的区域为三个最高分辨率的子带 HL 、 LH 和 HH , 嵌入公式为:

$$\begin{cases} I_0^{HL}(i, j) = I_0^{HL}(i, j) + \alpha w^{HL}(i, j) x_{iN+j} \\ I_0^{HL}(i, j) = I_0^{HL}(i, j) + \alpha w^{HL}(i, j) x_{2MN+iN+j} \\ I_0^{HH}(i, j) = I_0^{HH}(i, j) + \alpha w^{HH}(i, j) x_{2MN+iN+j} \end{cases}$$

其中 α 为用于说明水印长度的一个参数, $w(i, j)$ 是与 HVS 模型有关的一个权函数, 用以描述相应子带中对噪音的敏感度。水印的检测没有用到原始图像, 通过确定加水印图像与水印序列的相关性来确定是否含有水印。该方案具有很好的鲁棒性, 特别对图像剪切攻击后的水印检测更加有效。

Podilchuk 等人在文[46]中提出一种基于小波的图像自适应的水印方案 (IA-W), 该方案中, 图像被 Daubechies 7/9 小波^[16]分解为 4 层, 所嵌入的水印为一满足不可见性约束的具有最大长度和最大能量的自适应伪随机实数序列 $w_1, w_2, \dots$,

w_{nl} , 其中长度 nI 和元素值的大小可根据 HVS 模型确定 (I 表示图像)。所确定的水印序列将分别被嵌入到各子带中大于所在位置 JND 阈值的那些系数中, 嵌入公式为:

$$X_{u,v,l,f}^* = \begin{cases} X_{u,v,l,f} + t_{l,f}^F w_{u,v,l,f}, & \text{if } X_{u,v,l,f} > t_{l,f}^F \\ X_{u,v,l,f}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中 $X_{u,v,l,f}$ 为分辨率层为 l ($l = 1, 2, 3, 4$) 和方向为 f ($f = 1, 2, 3$) 的子带中位置 (u, v) 的系数, $X_{u,v,l,f}^*$ 为加水印后的系数, $w_{u,v,l,f}$ 为水印序列, $t_{l,f}^F$ 为对应于相应子带的 JND 阈值。水印的检测将利用原始图像首先分别计算水印图像与原始图像相应子带的相关性, 然后计算各层子带相关性的平均值。该方案具有很好的鲁棒性和水印的不可见性。此外作者还讨论了另外一种基于 DCT 的自适应水印方案 (IA-DCT), 同时对所提出的两个方案进行了比较。

Kundur 等人在文[47]中提出了一种结合多尺度融合技术与 HVS 模型的水印方案, 该方案中所嵌入的水印可以是一二值标志图像或具有噪音性质的整数或实数的二维数组, 水印的大小通常较宿主图像小得多, 比如可以是宿主图像的 2^M 之一, 其中 M 为任何不小于 1 的整数, 并设水印图像的大小为 $2N_{wx} \times 2N_{wy}$ 。整个嵌入过程首先对宿主图像和水印图像进行小波分解, 水印图像被分解为 1 层, 宿主图像被分解为 L 层, 其中 L 为小于或等于 M 的任何正整数, 第 l 层的细节子带记为 $f_{k,l}(m, n)$ ($k = 1, 2, 3; l = 1, 2, \dots, L$); 水印图像则只进行一层小波分解并且各细节子带的大小均为 $N_{wx} \times N_{wy}$, 其细节子带记为 $w_{k,l}(m, n)$; 将宿主图像小波分解域各个细节子带进行 $N_{wx} \times N_{wy}$ 大小的非重叠矩形分块, 记为 $f_{k,l}(m, n)$ ($i = 1, 2, \dots, 2^{2(M-l)}$), 对于每一个分块, 根据 HVS 模型, 计算其可视觉重要性的数值测度 S (具体可参见文[48]), 然后按下列公式将水印嵌入到各个矩形块中:

$$g_{k,l}^i(m, n) = f_{k,l}^i(m, n) + \gamma_{k,l} \sqrt{S(f_{k,l}^i(m, n))} w_{k,l}(m, n)$$

其中 $g_{k,l}^i(m, n)$ 为嵌入水印的矩形块, $\gamma_{k,l}$ ($l = 1, \dots, L$) 为每一层中用以折衷可见性和鲁棒性的平衡因子, 其取值为: $\gamma_{k,l} = \alpha / \max_{\text{over all } (m, n)} \sqrt{S(f_{k,l}^i(m, n))}$, α 为宿主图像灰度均值的 $10\% \sim 20\%$ 。水印的检测要用到宿主图像, 采用的是嵌入的逆过程。该方案对于压缩、添加性噪音以及中值线性滤波通常具有很好的鲁棒性。

Pereira 等人在文[23]中提出一种基于约束优化的分块低频区域水印嵌入方法, 该方法所嵌入的水印为 0, 1 序列, 水印嵌入前, 宿主图像被分成 16×16 的非重叠矩形块, 每个矩形块被进行一层小波分解 (文中试验中采用了 Haar 小波和 Daubechies 4 小波^[16]), 水印信息被嵌入到 8×8 的 LL 子带中, 在嵌入的过程中, 采用了一个广义 Gaussian 模型 (Generalized Gaussian Model) 来确定优化水印鲁棒性的 JND 阈值。嵌入过程是通过选择 LL 子带中一个 2×2 相邻的系数块而进行的, 整个嵌入过程被看成是适应于 JND 阈值限制的最大化水印长度的线性规划问题, 信息嵌入采用的是差分编码的方式。该方案对于诸如 JPEG 压缩和其它不改变图像几何形状的滤波的攻击通常具有很好的鲁棒性。

上面所介绍的基于 HVS 模型的水印方案大都是“显式”地使用 HVS 模型, 实际上有很多水印方案也在以“隐式”的方式在使用。比如前面文[26, 27, 39]所介绍的在一定程度上利用了纹理、频率等掩蔽效应。

3.6 结合编码方法的水印策略

图像编码和图像水印方法有很多相似的性质, 比如图像

编码中一些重要的频率系数在编码方案中通常被首先编码以保证重构图像的可视效果,而在水印方案中,为了保证鲁棒性通常也将水印嵌入到一些重要系数中。随着图像编码技术的迅猛发展^[49]和 JPEG2000标准的颁布,结合编码方法的水印技术研究更加受到人们的重视并成为当前的一个研究热点问题。以下我们对一些典型技术,特别对基于 JPEG2000标准的水印技术进行分析和讨论。

Inoue 等在文[50]中提出了基于小波域零树结构^[51]的两种水印嵌入方案,方案中所嵌入的水印为通过一二值序列所对应的一组正、负值序列(值的大小称为强度)。文中利用 SSKF 滤波器^[52]将宿主图像分解为3层。第一种方法将水印嵌入到零树结构中,具体过程如下:选取子带序列 (LH_3, LH_2, LH_1) 、 (HL_3, HL_2, HL_1) 、 (HH_3, HH_2, HH_1) 的任何一组,取阈值 $T = \alpha C_{\max}$,其中 $C_{\max}$ 为所选子带序列的最大振幅, $0.01 < \alpha < 0.2$, 给出水印强度 m , 对于阈值 T 下的零树 $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$ (N 为零树的个数), 确定一组 0,1 序列 $W(k)$, ($k=1, 2, \dots, N$) 对于每一个 $W(k)$, 当其值为 0 时, 将零树 Z_k 的所有系数填 $-m$, 否则填 m , 同时保存零树的根。水印的检测过程是对于每个树根 Z_k , 计算其从上至下的 5 个系数的平均值 M_k , 当 $M_k < 0$, 则确定所嵌入的数据为 0, 而 $M_k \geq 0$ 则表示嵌入的数据为 1。

第二种方法是水印嵌入到 LH_3, HL_3 和 HH_3 中的重要系数中, 具体首先选取阈值 T_1, T_2 , 使 $T_2 > T_1 > \alpha C_{\max}$ (α 与 $C_{\max}$ 的取法与上同), 然后寻找满足 $T_1 < |C_k| < T_2$ 的 C_k , 依据所确定的 0,1 序列 $W(k)$, ($k=1, 2, \dots, N$), 对 C_k 进行如下修改:

$$C_k = \begin{cases} T_2, & \text{if } (W(k)=1 \text{ and } C_k > 0) \\ T_1, & \text{if } (W(k)=0 \text{ and } C_k > 0) \\ -T_2, & \text{if } (W(k)=1 \text{ and } C_k < 0) \\ -T_1, & \text{if } (W(k)=0 \text{ and } C_k < 0) \end{cases}$$

水印的检测过程根据子带标记和嵌入位置进行判断: 当系数 C_k 的绝对值小于 $(T_1 + T_2)/2$ 时, 表示所嵌入的信息为 0, 否则为 1。

两种方法对于 JPEG 图像压缩、增加噪音和一般的平滑操作等攻击均具有很好的鲁棒性, 但第一种方法对于依赖于信号的平滑操作通常鲁棒性不是很好, 同样第二种方法对于图像放缩操作的鲁棒性也不是很好。此外, 两种方法的水印检测均无需原图像, 但需要记载相应的一些位置信息, 故只能称其为半盲水印。

Xie 等在文[19]中还提出了一种结合 SPIHT 编码^[53]的水印方法, 该方法中用 $c_{i,j}$ 表示位置 (i, j) 上的系数, $B_{i,j}$ 表示 $c_{i,j}$ 的兄弟(与 $c_{i,j}$ 有相同父亲的系数的集合)。在编码端, 首先执行 SPIHT 算法, 为了确定嵌入水印的位置, 2×2 非重叠窗口依次扫描通过所有的兄弟集合, 每到一处将窗口内具有最大绝对值的三个系数按升序排序, 序列为: $b_{(1)}, b_{(2)}, b_{(3)}$ 。定义: 当 $(b_{(3)} - b_{(1)}) \geq 2^m$ 时, $W(B_{i,j})$ 为 1, 否则为 0, 其中 m 为编码器中用于确定重要系数的最后的 bit Level, 2^m 为量化常量。对于满足 $W(B_{i,j})$ 为 1 的系数 $c_{i,j}$ 将被选中嵌入 0,1 信息。此外, 作者还讨论了 Multi-bit 嵌入问题, 即当 $(b_{(3)} - b_{(1)}) \geq 2 \cdot 2^m$ 时, 信息 0,1 或 2 可以考虑被嵌入。

EBCOT 编码方案是一种具有优化截取特性的基于分块的编码方法^[54], 已被 JPEG2000 标准采纳。Su 等在文[55, 56]中提出了一种基于 EBCOT 的水印技术。该方案所选择的水印为 1、-1 随机序列, 水印信息被嵌入到量化后的小波系数中。根据 EBCOT 编码的特点, 水印嵌入以各子带所划分的编

码块为基本单位, 具体选择子带 s 的块 b_s 中绝对值大于等于 2^s 的系数 $I_{b_s}(x, y)$ 作为嵌入系数, 嵌入公式为: $I_{b_s}(x, y) = I_{b_s}(x, y) + (W_{b_s}(x, y) \times 2^{\delta_{b_s}})$, 其中 $W_{b_s}(x, y)$ 为水印信息, δ_{b_s} 为与编码优化精度和水印能量有关的 bit-shift 数。水印的检测在图像解码过程中进行, 基本原理是如果子带各块中满足大于等于 2^s 的系数序列与水印序列的内积接近 0, 则说明没有水印, 否则如果内积接近一个峰值, 则说明有水印。该方法对于压缩、滤波等多种图像处理具有很好的鲁棒性, 并且它可以适应于 JPEG2000 中所提出的可分级编码和 ROI 编码机制中的水印需求。此外, 该方法水印检测无需原始图像, 因而属于盲水印。

Chen 等也在文[57]中提出了一种基于 EBCOT 和 JPEG2000 的水印方案, 该方案与文[56]的不同在于将水印信息嵌入到低频比特流的最后一层, 并采用了一种“优化层”的技术保证有较高的信息量被嵌入。该方法具有检测速度快、嵌入水印不可见性好等特点。

Grosbois 等人在文[58]中提出一种在 JPEG2000 图像压缩框架下基于扩频的水印技术。方案中所选用的水印为由 1、-1 所形成的伪随机序列 $\{b_k\}_{0 \leq k \leq m-1}$, m 为信号长度。水印的整体嵌入方案与文[55, 56]相似, 但方案中增加了一些控制参数因子, 具体嵌入第 k 个信号的公式为: $w'_k[i] = w_k[i] + \alpha[i] \times n_{b_k}[i]$, 其中 $n_{b_k}[i]$ 为由 b_k 产生的零均值伪随机数, $\alpha[i]$ 是一个正的强度因子, 具体形式为: $\alpha[i] = \lceil M_{d_{ys}}[s] \times \rho_{act}[c] \times \rho_{mask}[i] \rceil$, 这里 $M_{d_{ys}}[s]$ 可粗略地表示量化后的小波系数对位平面的影响因子, 其值为关于量化步长、分辨率级别和子带 s 方向的函数; $\rho_{act}[c]$ 为 $[0, 1]$ 之间的实数, 它粗略地表示包含在码块 c 中水印的鲁棒性, 实际应用中可取其为码块 c 中大于一个确定阈值的系数的百分比; $\rho_{mask}[i]$ 为系数 i 的可屏蔽强度因子, 其取值为 $[0, 1]$ 之间的实数, 利用该参数可控制水印的可见度, 由于 JPEG2000 中码块的处理是独立的, 无需考虑子带间的参数, 并且对于 LL 子带中的码块, 可将其值取为 1。水印检测公式为:

$$\text{corr}[b_k] = \sum_i \alpha[i] \times n_{b_k}[i] \times w'_k[i] / b_k,$$

其中 $\alpha[i] = r_{M_{d_{ys}}}[s, c] \times \rho'_{act}[c] \times \rho'_{mask}[i]$, 这里 $r_{M_{d_{ys}}}[s, c]$ 为 $M_{d_{ys}}[s]$ 的对偶因子, $\rho'_{act}[c]$ 和 $\rho'_{mask}[i]$ 分别为解码块的鲁棒性控制因子和可屏蔽强度因子, 其取值与 $\rho_{act}[c]$ 和 $\rho_{mask}[i]$ 大致相同。该方案通过一系列控制因子的使用, 可以保证对 JPEG2000 压缩参数进行调整时的水印效果, 同时对典型的图像攻击具有很高的鲁棒性。

基于 JPEG2000 编码框架的水印技术是以独立的、非重叠码块为单位的, 这样依靠子带间关系和分层多尺度关系的水印方案通常不能直接用于基于 JPEG2000 的编码方案中, 此外, 利用原图像进行水印提取的水印技术, 也不能适应该领域。

4 讨论与展望

尽管在过去的几年中基于小波的图像水印技术得到了迅速的发展, 出现了许多有效的水印方案, 但总体而言, 它还处于不断的发展阶段, 还有许多问题需要解决, 特别是随着多媒体技术的发展以及 JPEG2000 标准的实施, 一些新的应用目标被提出, 伴随而来的对水印技术也提出了新的需求, 综合前面的分析和讨论, 我们认为今后基于小波域的图像水印技术可能会在以下几个方面得到更好的发展:

(1) 水印方案中小波滤波器的适应性选取原则

由于图像水印方案通常需要对于压缩等攻击具有很好的鲁棒性,这样适应于图像编码小波滤波器的选取原则很难直接用于不可见水印方案中。目前所采用的选取原则通常是经验性的,尽管最近小波包已被应用到图像水印中,但还只是处于探索中,因而对小波滤波器的适应性原则的研究将成为今后的一个重要问题。

(2) 第二代水印技术的研究

如果将目前基于像素处理的水印方法看作第一代水印,则将基于图像重要数据特征的水印方案称为第二代水印,它可以看成是第一代水印中基于 HVS 模型水印方案的延伸,它所具有的数据特征通常包括边界特征、角特征、纹理区域特征等等。第二代水印方案较第一代水印方案具有更高的鲁棒性,对基于小波域的该类水印技术的理论和算法研究将可能成为未来的一个研究重点。

(3) 适应于 JPEG-2000 特性的水印技术的研究

新颁布的 JPEG-2000 标准不仅在编码效率上要优于传统的 JPEG 标准,更重要的是它所规定的码流格式和解码方式将支持多种可分级解码,诸如分辨率可分级、质量可分级以及 ROI 可分级等等,这些特性可以满足图像网上渐进传输、多质量服务等实际应用的需求。尽管目前已经出现了一些结合 JPEG-2000 编码方案的水印技术,但大多还只是适应于 JPEG-2000 的分块处理,远远没有满足 JPEG-2000 在实际应用中对数字水印技术的需求,相信对这一领域的研究将成为一个研究热点。

(4) 抗几何变换攻击的水印技术的研究

从目前基于小波域的水印方案来看,对诸如旋转、下取样、放缩等几何攻击的鲁棒性不是很好,对这方面的研究也是今后的一个研究重点。

(5) 基于 HVS 模型的水印技术研究

尽管目前基于 HVS 的图像水印技术的研究已经成为了一个研究热点,但有关图像和视频的进一步掩蔽性质正处于研究之中,相信随着研究的深入,会有更加有效的水印方案出现。

(6) 基于第二代小波图像水印技术的研究

基于 Lifting Scheme 的第二代小波^[60]已被应用于图像编码中,目前还很少见到有关以此为工具的水印方案。但相信利用该工具的水印方案会有许多好的性质。

参考文献

- Ferrill E, Moyer M. A survey of digital watermarking, 1999. <http://elizabeth.ferrill.com/papers/watermarking.pdf>
- 易开祥,石教英,孙鑫. 数字水印技术研究进展. 中国图像图形学报, 2001, 6(2): 111~117
- Hartung F, Kuatter M. Multimedia watermarking Techniques. In: Proc. of the IEEE, 1999, 8(7): 1079~1107
- Pitas I. A Method for signature casting on digital images. In: Proc. of 1996 int. Conf. On Image Processing, 3: 215~218
- Meerwald P, Uhl A. A survey of wavelet-domain watermarking algorithms, SPIE Symposium, Electronic Imaging. In: Conf. on Security and Watermarking of Multimedia Contents, San Jose, CA, USA, 2001. 181~190
- ISO/IEC JTC1/SC29/WG 1, ISO/IEC FCD 15444-1: Information technology JPEG 2000 image coding system: Core coding system [WG 1 N 1646R], march 2000. <http://www.jpeg.org/FCD15444-1.htm>
- Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674~693
- Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. IEEE Transactions on IT, 1990, 36(5): 961~1005
- Zhu W, Xiong Z, Zhang Y Q. Multiresolution watermarking for images and video: a unified approach. In: Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Image Processing, ICIP'98, Chicago, IL, USA 1998. 465~468
- Langelaar G, Setyawan I, Lagendijk R L. Watermarking digital Image and video data. IEEE Signal Processing Magazine, 2000, 17: 20~43
- Véhel J L, Manoury A. Wavelet Packet Based Digital Watermarking. In: Intl. Conf. on Pattern Recognition. Barcelona, Spain. 2000, 3: 3417~3420
- 汪小帆, 戴跃伟, 茅耀斌. 信息隐藏技术. 北京: 机械工业出版社, 2001
- Coviello C. A survey of digital watermarking for images. CSE/EE585 Image Processing term paper., 2002. <http://www.cse.psu.edu/~cg585/termPaper>
- Hsu C T, Wu J L. Multiresolution watermarking for digital images. IEEE Transactions on Circuits and Systems II, 1998, 45(8): 1097~1101
- Wolfgang R B, Podilchuk C I, Delp E J. The effect of matching watermark and compression transforms in compressed color images. In: Proc. of the IEEE ICIP'98, Chicago, IL, USA, 1998. 4~7
- 彭玉华. 小波变换与工程应用. 科学出版社, 1999
- Cox I J, Kilian J, Leighton F T, Shamoon T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. IEEE Trans. on Image Processing, 1997, 6(12): 1673~1687
- Liang J, Xu P, Tran T D. A universal robust low frequency watermarking scheme. Submitted to IEEE Trans. on Image Processing, 2000. <http://citeseer.nj.nec.com/correct/340428>
- Xie L, Arce G R. Joint wavelet compression and authentication watermarking. In: proc. of the ICIP'98, Chicago, IL, USA, 1998. 427~431
- Xie L, Arce G R. Blind wavelet based digital signature for image authentication. In: Proc. of the 9th European Signal Processing Conf. EUSIPCO'98, Island of Rhodes, Greece, 1998. 21~24
- Corvi M, Nicchiotti G. Wavelet-based image watermarking for copyright protection. In: Scandinavian Conf. on Image Analysis SCIA'97, Lappeenranta, Finland, June 1997. 157~163
- Tzovaras D, Karagiannis N, Strintzis M G. Robust image watermarking in the subband or discrete cosine transform domain. In: EUSIPCO'98, Ninth European Signal Processing Conf. 1998. 2285~2288
- Pereira S, Voloshynovskiy S, Pun T. Optimized wavelet domain watermark embedding strategy using linear programming. In SPIE AeroSense 2000: Wavelet Applications I. H. H. Szu, ed., Orlando, FL, USA, 2000. 26~28
- Nicchiotti G, Ottaviano E. Non-invertible statistical wavelet watermarking. In: Proc. of the 9th European Signal Processing Conf. EUSIPCO'98, Island of Rhodes, Greece, 1998. 2289~2292
- Dugad R, Ratakonda K, Ahuja N. A new wavelet-based scheme for watermarking images. In: Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Image Processing, ICIP'98, Chicago, IL, USA, Oct. 1998. 4~7
- Xia X G, Boncelet C G, Arce G R. Wavelet transform based watermark for digital images. Optics Express, 1998, 3(12): 497~511
- Wang H J, Su P C, Kuo C C J. Wavelet-based digital image watermarking. Optics Express, 1998, 3(12): 491~496
- Wang H J, Kuo C J. A multi-threshold wavelet coder (MTWC) for high fidelity image compression. In: Proc. IEEE ICIP, 1997. 652~655
- Su P C, Kuo C J, Wang H J. Blind Digital Watermarking for Cartoon and Map Images. SPIE International Symposium Electronic Imaging, 1999. 25~29
- Su P C, Wang H J, Kuo C J. Digital image watermarking in regions of interest. In the IS&T Image Processing, Image Quality, Image Capture, Systems Conference, PICS, Savannah, GA., USA, 1999. 295~300
- Information Technology - Coded Representation of Pictures and Audio Information - Progressive Bi-Level Image Compression, ITU-T T. 82, May 1993
- Swanson M D, Tewfik A H. A binary wavelet decomposition of binary images. IEEE Trans. Image Processing, 1996, 5(12): 1637~1650

适应渲染策略在上述的四种算法之间调整,从而能达到视觉效果最佳,速度最快的三维场景渲染效果。



图6 偏向坐标系算法生成的地形

结束语 我们开发了一个基于分形和快速动态渲染的地形生成系统,在系统中使用了上述四种渲染算法(参见图5和

图6的地形生成效果图),并设计了一种新的动态的根据不同视觉和场景因素的 LOD 细节层次自适应策略,动态地在四种地形渲染算法中选择最优化的算法,通过 Direct3D(Direct Graphics)硬件图形接口实现三维地形场景的快速动态渲染,同时还解决了 LOD 技术相关的插值以及实际编程中遇到的一些与 Direct3D SDK 相关的问题。

参考文献

(上接第207页)

- 33 Hsu C T, Wu J L. Image watermarking by wavelet decomposition. *Academy of Information and Management Sciences Journal*, 2000,3(1):70~86
- 34 Solachidis V, Pitas I. Circularly Symmetric Watermark Embedding in 2-d dft domain. In: *Proc. of ICASPP'99*, Phoenix, Arizona, USA, 1999. 15~19
- 35 Pitas S T. Embedding self-similar watermarks in the wavelet domain. In: *Processings of the IEEE ICASSP*, Istanbul, Turkey. 2000,4:1967~1970
- 36 Kundur D. Improved digital watermarking through diversity and attack characterization. In: *Proc. of the ACM Workshop on Multimedia Security* Orlando, FL, USA. 1999. 53~58
- 37 Inoue H, Miyazaki A, Katsura T. An image watermarking method based on the wavelet transform. In: *Proc. of 6th Intl. Conf. on Image Processing*. Held: Kobe, Japan, 1999. 24~28
- 38 Kim J R, Moon Y S. A robust wavelet-based digital watermark using level-adaptive thresholding. In: *Proc. of the 6th IEEE Intl. Conf. on Image Processing*, ICIP'99, Kobe, Japan, 1999. 2:226~230
- 39 Chae J J, Manjunath B S. A robust embedded data from wavelet coefficients. In: *Proc. of SPIE, Electronic Imaging, Storage and Retrieval for Image and Video Database*, San Jose, CA, USA, 1998. 3312:308~317
- 40 Kim Y S, Kwon O H, Park R H. Wavelet based watermarking method for digital images using the human visual system. In: *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*, Orlando, FL, USA, 1999, 4: 80~83
- 41 Shi Y Q, Sun H. Image and video compression for multimedia engineering. Boca Raton, London New Work Washington, D. C., CRC Press, 2000
- 42 Carlson C R, Cohen R. A simple psychophysical model for predicting the visibility of displayed information. In: *Proc. of the Society for Information Display*, 1980, 21: 229~245
- 43 Delaigle J F, Devleeschouwer C, Macq B, Langendijk I. Human visual system features enabling watermarking. <http://www-it.et.rudelft.nl/~inald/pubs/Watermarking/ICME2002.pdf>
- 44 Barni M, Bartolini F, Cappellini V, Lippi A, Piva A. A DWT-based technique for spatio-frequency masking of digital signatures. In: *Proc. IS&T/SPIE Conf. Security and watermarking of multimedia contents*, 1999, 3657:31~39
- 45 Lewis A S, Knowles G. Image compression using the 2D wavelet transform. *IEEE Trans. Image Processing*, 1992(1): 244~250
- 46 Podilchuk C I, Zeng W. Image adaptive watermarking using visual models. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998, 16(4): 525~539
- 47 Kundur D, Hatzinakos D. A robust digital image watermarking method using wavelet-based fusion. In: *Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Image Processing*, ICIP'97, Santa Barbara, California, USA, 1997, 1:544~547
- 48 Wilson T A, Rogers S K, Myers L R. Perceptual-based hyperspectral image fusion using multiresolution analysis. *Optical Engineering*, 1995, 34(11):3154~3164
- 49 王相海, 张福炎. 静态图像编码研究进展. *计算机研究与发展*, 2001, 38(11):1315~1326
- 50 Inoue H, Miyazaki A, Yamamoto A, Katsura A. A digital watermark technique based on the wavelet transform and its robustness on image compression and transformation. *IEICE Transactions, Special Section on Cryptography and Information Security*, 1999, 82(1):11~20
- 51 Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3445~3462
- 52 Gall D L, Tabatabai A. Subband coding of digital images using symmetric short kernel filters and arithmetic coding techniques. In: *Proc. IEEE Int. Conf. On Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1988. 761~764
- 53 Said A, Pearlman W. An new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Transactions Circ. Sys. Video Tech.*, 1996, 6(3): 243~249
- 54 Taubman D. Report on coding experiment codeff22: EBCOT. ISO/IEC JTC1/SC 29/WG1 N1020R, Oct. 1998
- 55 Su P S, Wang H J, Kuo C J. Digital watermarking on EBCOT compressed images. In: *Proc. of SPIE's 44th Annual Meeting, Applications of Digital Image Processing XXII*, 1999, 3808:313~324
- 56 Su P C, Wang H J, Kuo C J. An integrated approach to image watermarking and JPEG-2000 compression. *Journal of VLSI Signal Processing*, 2001, 27:35~53
- 57 Chen T S, Cheng C Y. A new scheme of image data hiding based on EBCOT and Jpeg2000 lossy compression. <http://www.bohr.idv.tw/pdf>
- 58 Grosbois R, Ebrahimi T. Watermarking in the JPEG2000 domain. In: *Proc. of the IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing*, 2001. 3~5
- 59 Kutter M, Bhattacharjee S K, Ebrahimi T. Towards second generation watermarking schemes. In: *IEEE-ICIP'99*, Kobe, Japan, 1999, 1: 320~323
- 60 Sweldens W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets. *SIAM J. Math. Anal.*, 1997, 29(2):511~546