

独创性申明

秉承祖国优良道德传统和学校的严谨学风郑重声明：本人所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的成果。尽我所知，除特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人的研究成果。与我一同工作的同志对本文所论述的工作的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并已致谢。

本论文及相关资料若有不实之处，由本人承担一切相关责任。

论文作者签名： 赵凡 2005年 3 月 20 日

保护知识产权申明

本人完全了解西安理工大学有关保护知识产权的规定，即：研究生在校攻读学位期间所取得的所有研究成果的知识产权属西安理工大学所有。本人保证：发表或使用与本论文相关的成果时署名单位仍然为西安理工大学，无论何时何地，未经学校许可，决不转移或扩散与之相关的任何技术或成果。学校有权保留本人所提交论文的原件或复印件，允许论文被查阅或借阅；学校可以公布本论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他手段复制保存本论文。

(加密学位论文解密之前后，以上申明同样适用)

论文作者签名： 赵凡 导师签名： 张 2005年 3 月 27 日

基于整数小波变换的自适应性盲水印算法研究

学科名称：信号与信息处理

答辩日期：2005-3-26

作者姓名：赵凡

签 名：赵凡

导师姓名：张二虎 教授

签 名：张二虎

摘要

近几年来，随着因特网的普及和发展，数字图象的版权问题越来越引起人们的关注，其中数字水印作为保护版权的一种有效手段得到了人们广泛的注意。按检测时是否需要原始作品分为盲水印算法和非盲水印算法，由于盲水印算法更符合所有权验证的需要，所以本文重点研究盲水印算法。

本文在详细分析了小波变换的理论基础上，利用二维离散小波变换（DWT）的时频分析特性和多分辨率分析特性，设计了一种基于嵌入零树编码（EZW）的盲水印算法：根据统计的零子树个数来嵌入和抽取水印信息。在算法中，阈值的确定对嵌入水印的图象的视觉效果和水印提取影响很大，目前大多数的文献基本上都是根据实验而定的。本文提出了一种基于图象特征的自适应阈值确定算法，即结合人类视觉系统（HVS）的特性，对宿主图象的变换块的能量比和方差进行分类，从而自适应地确定各个变换块的水印强度的阈值；又根据区域的一致性测度决定变动系数所在的子带，从而将一幅二值的商标水印图象嵌入到一幅灰度图象中。所提出的算法由于采用的是整数小波避免了传统小波变换过程的精度误差，且提高了计算速度。水印实验结果表明，这种算法是可行的，能很好地保持图象的质量，对压缩、剪切和椒盐噪声有较好的鲁棒性。

关键词：数字水印 嵌入零树编码 整数小波变换 视觉系统特性 鲁棒性

ABSTRACT

STUDY ON ADAPTIVE BLIND WATERMARKING ALGORITHM BASED ON INTEGER WAVELET TRANSFORM

Speciality: Signal and Information Processing

Author: Zhao Fan

Signature: Zhao Fan

Director: Zhang Er-hu

Signature: Zhang Er-hu

ABSTRACT

Recently, with the popularity and the development of Internet, the copyright of digital image has aroused extensive interests, among which digital watermarking which is inserting copyright information into the data is deemed as an effective way for copyright protection. There are two watermarking schemes according to whether or not needing original image at the extraction processing. They are blind watermark schemes and non-blind watermark schemes.

This paper describes in detail the basic theory of wavelet. Applying the good localized features in both the time domain and the frequency domain and the characteristics of multi-resolution analysis of the two-dimension DWT, This paper proposes a new blind watermark technique by adjusting the numbers of zerotrees derived from the integer to integer wavelet transform coefficients to embed and extract watermark based on EZW theory. For setting pre-defined thresholds is very important for performance of host image and in watermark processing, they are determined by experiment in most articles. In this paper, An adaptive blind watermarking algorithm based on image feature is presented. First, the host image is partitioned into 8×8 non-overlapped blocks. Second, we perform integer to integer wavelet transform on the selected blocks. Third, Integrating the Human

ABSTRACT

visual System (HVS), The energy ratio feature and difference feature of each DWT transformed block is classified as different kinds, so the threshold of each block DWT can be adaptively determined. Last, the band where the coefficients will be changed is selected in according to region homogeneity measure. The watermark signal can be recovered without the host image. For applying integer to integer wavelet transform, the algorithm avoid the error in the quantity processing of traditional wavelet transform and works fast. Experiment results show the superior performance in both qualities of the resultant *watermarked image and robustness of the embedded watermark signal against common signal processing such as noise adding, cutting and JPEG compression scheme, etc.*

Keywords: Digital watermarking EZW Integer Wavelet Transform Human Visual System (HVS) Robustness

1. 绪论

1.1 信息安全

随着 Internet 技术与多媒体技术的飞速发展,数字化信息可以以不同的形式在网络上方便、快捷地传输。多媒体通信逐渐成为人们之间信息交流的重要手段,人们通过网络交流各种信息,进行网上贸易等。数字信息与网络给我们带来方便的同时,也给我们带来了隐患:敏感信息可能轻易地被窃取、篡改、非法复制和传播等。因此信息安全已成为人们关心的焦点,也是当今的研究热点和难点^{[1][2][3][4]}。

多媒体数据,尤其是图象,比传统的文字蕴涵更多的信息量,因而成为人类在信息利用方面的重要手段。因此针对多媒体信息安全保护技术的研究也显得尤为重要,多媒体信息安全是集数学、密码学、信息论、概率论、计算复杂度理论和计算机网络以及其它计算机应用技术于一体的多学科交叉的研究课题。

多媒体信息安全技术的研究主要有两种方法:多媒体信息加密和多媒体信息隐藏技术。

多媒体信息加密:传统的加密算法一般是基于文本数据设计的,它把一段有意义的数据流(称为明文)转换成看起来没有意义的数据(称为密文),如 DES 和 RSA。由于将明文数据加密成密文数据,使得在网络传递过程中非法拦截者无法完全获得文本数据的特性。因为目前的传统加密方法如 DES, 3-DES 或 RSA 等很难满足多媒体应用中的实时性等要求,新型的多媒体应用需要新的数据加密技术。近年来,在这方面的研究取得了一些成果,主要针对视频数据和图象数据^{[5][6][7]}。

多媒体信息隐藏技术:信息隐藏(Information Hiding)不同于传统的密码学技术,密码技术主要研究将机密信息进行特殊的编码,形成不

可识别的密码形式(密文)进行传递;信息隐藏主要研究如何将一机密信息秘密隐藏于另一公开的信息中,然后通过公开信息的传输来传递机密信息。对加密通信而言,可能的监测者或非法拦截者可截取密文并对其进行破译,或将密文进行破坏后再发送,从而影响机密信息的安全;但对信息隐藏而言,可能的监测者或非法拦截者难以从公开信息中判断机密信息是否存在或截获机密信息,从而保证机密信息的安全。信息隐藏技术由于其具有的特点和优势,已成为当今多媒体信息安全技术的一大重要研究热点。

信息加密与信息隐藏从不同的角度保证信息的安全,如果我们将信息加密与信息隐藏有机地相结合,可进一步提高信息的安全性,本文所述数字水印技术是信息加密与信息隐藏技术两部分内容的结合。此外,需要注意的是,解决信息安全问题,并不仅仅依赖于技术和算法(如加密芯片、安全协议等)等措施,还依赖于健全的法制措施、道德观念和健全的保密措施,这是一个深刻的问题。

1.2 数字水印技术

数字水印^{[9][10][11][12][13]}技术作为信息隐藏技术在多媒体领域中的一种应用,越来越受到人们的重视。随着网络的日益普及,多媒体信息的交流达到了前所未有的深度和广度,其发布形式愈加丰富。但是其暴露出的问题也十分明显:作品侵权更加容易,篡改更加方便。如何既充分利用 Internet 网的便利,又能有效地保护知识产权,已受到人们的高度重视。

数字水印(Digital Watermarking)是实现数字媒体版权保护的有效方法,已成为多媒体信息安全研究领域的一个热点,也是信息隐藏技术研究领域的重要分支。它通过在原始数据中嵌入秘密信息—水印(Watermark)来证实该数据的所有权。被嵌入的水印可以是一段文字、标

识、序列号等。水印通常是不可见或不可察觉的，它与原始数据(如图象、音频、视频数据等)紧密结合并隐藏其中，成为源数据不可分离的一部分，并可以经历一些不破坏源数据使用价值或商用价值的操作而存活下来。

数字水印技术除具备信息隐藏技术的一般特点外，还有着其固有的特点和研究方法。例如，从信息安全的保密角度而言，隐藏的信息如果被破坏掉，系统可以视为安全的，因为秘密信息并未泄露；但是，在数字水印系统中，隐藏信息的丢失意味着版权信息的丢失，从而失去了版权保护的功能，这一系统就是失败的。因此数字水印技术必须具有较强的鲁棒性、安全性和透明性。

1.2.1. 典型数字水印系统模型

图 1-1 为水印信号嵌入模型，其功能是完成将水印信号加入原始数据中；图 1-2 为水印信号提取模型，完成从水印数据中提取出水印信号；图 1-3 为水印信号的检测模型，用以判断某一数据中是否含有指定的水印信号。水印提取能够显示出作品的版权；而水印检测则只需要判断水印信号中是否嵌入某一水印，比如扩频水印采用的相关检测方法，如果相关值大于某一阈值，则认为水印信号中存在水印。图 1-2、图 1-3 中的虚框部分表示在提取或判断水印信号是否存在时，原始载体数据不是一定必要的。

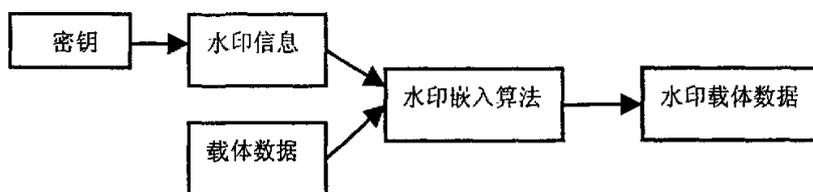


图 1-1 水印信号嵌入模型

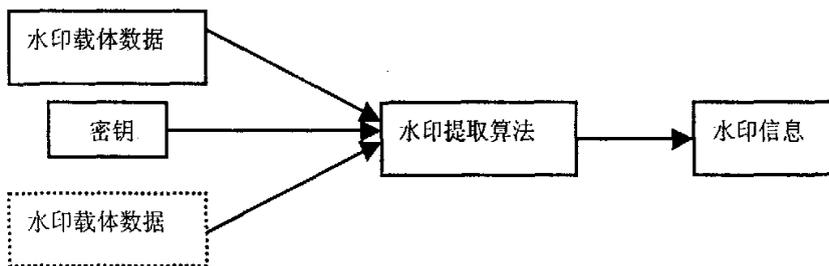


图 1-2 水印信号提取模型

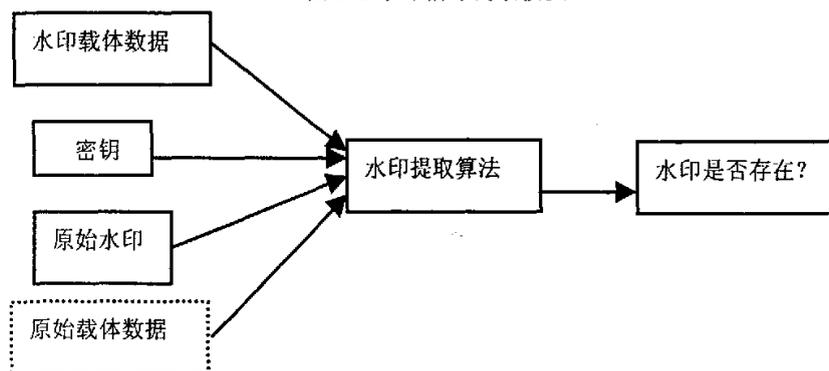


图 1-3 水印信号检测模型

1.2.2 数字水印的分类及其应用

数字水印的分类方法有很多种，分类的出发点不同导致了分类的不同，它们之间是既有联系又有区别的。

a. 最常见的分类方法

(1) 可视水印与不可视水印

如果嵌入的水印强度足够大，能够用肉眼直接观察到，则称之为可视水印。而含有不可视水印的数据通常与原始数据紧密结合在一起，难以用肉眼观察到。

(2) 易损水印和鲁棒水印

易损水印很容易被破坏，主要应用于完整性验证等应用之中，它随着对象的修改而破坏，哪怕细小的修改也会影响数字水印的提取和检测。鲁棒水印则应该经得起一般处理操作而存留下来，应用范围更加广泛，主要应用于版权保护中，是水印研究的重点。

(3) 空域水印和频域水印

直接在空域中对采样点的幅度值作出改变来嵌入水印信息的称为空域水印；对变换域中的系数作出改变(傅立叶系数、DCT 系数、小波系数等)而嵌入水印信息的称为频域水印。一般来说频域算法可嵌入的水印数据量大，透明性好，安全性高，但算法复杂度也高。

(4) 盲水印和非盲水印

按水印的检测是否需要原始图象参与分为盲检测水印和非盲检测水印。水印检测时不需要原始图象的水印方案称为盲检测水印方案，反之，称为非盲检测水印方案。

b. 按水印处理技术应用目的分类

(1) 用于版权保护的水印

版权保护可能是水印最主要的应用，其目的是嵌入数据的来源信息或比较有代表性的版权所有者的信息，从而防止其他团体对该数据宣称拥有版权。这样的水印可以用来公正地解决所有权的问题，这种应用要求具有很好的鲁棒性。

(2) 用于盗版跟踪的数字指纹

它的目的是传输合法接收者的信息而不是数据来源的信息，主要用来识别数据的单个发行拷贝。这很象软件产品的序列号，对监控和跟踪流通数据的非法拷贝非常有用。

(3) 用于图象认证的水印

在鉴定应用中，使用水印的目的是对数据的修改进行检测。图象(如人们的指纹)已经被扫描并存储到一个数据库中，所有者希望能够检测到图象的任何更改，而不需要与原始的被扫描图象进行对比。通常这里需

要的是易损水印。

(4) 用于拷贝保护的水印

在多媒体发行系统中，希望存在这样一个拷贝保护机制，即不准许未授权的媒体拷贝。在开放系统中很难实现拷贝保护，然而在封闭或私有系统中，拷贝保护是可行的。这种情况的一个例子是 DVD 系统，一个符合要求的 DVD 播放器不允许重放或拷贝带有‘禁止拷贝’水印的数据，而带有‘一次拷贝’水印的数据可以拷贝，但不允许‘被再进一步制作拷贝’。

1.2.3 数字水印算法

对于数字图象来说，水印技术就是通过改变图象数据的值来加入水印，根据加入方法不同，水印算法主要分为空域算法和频域算法。空域法直接改变图象像素的值，一般是在图象像素的亮度或色度中加入调制的水印信号。频域法利用某种数学变换，将图象用频域表示，通过改变图象某些频域系数来加入水印，然后利用反变换生成含水印的图象。常用的数学变换有离散傅立叶变换、离散余弦变换和离散小波变换。

a. 空域水印

最常用的空域方法主要是 LSB 方法^[14]，也常称为位平面或噪声插入工具，就是试图用水印信息比特替换载体中不重要的部分，以达到嵌入水印的目的。这种方法简单，而且在 LSB 位上的改变是不易觉察的。

Bende 等^[15]提出基于空域的 Patchwork 方法，指将图象分成两个子集，一个子集的亮度增加，另一子集的亮度减少同样的量。这个量以不可见为标准。而子集的位置作为密钥，则水印可以很容易地由两个子集间的差别平均而确定。基于时域的水印系统易受攻击，对载体更改的抵抗力是很脆弱的，健壮性差，目前已经被逐步淘汰。

b. 基于离散余弦变换(DCT)的水印

基于 DCT 的水印处理技术是水印研究的一个热点, DCT 变换是仅次于 K-L 变换的正交变换, 通常使用的图象压缩标准, 如 JPEG, MPEG 等, 采用的图象变换都是 DCT, 因此 DCT 域的水印嵌入规则对 JPEG 压缩具有较强的健壮性, 更容易避免 JPEG/MPEG 压缩攻击。而且, DCT 的快速算法可以使计算时间大幅度减小, 可以实现在压缩时直接实现嵌入操作。

黄继武^[16], 采用对图象进行 8×8 分块的 DCT 变换, 将水印嵌入到每个子块 DCT 系数的直流分量中。

I.J.Cox^[17]采用对整幅图象进行 DCT 变换, 将水印嵌入最大的 N 个低频系数中(不包括直流分量)。

C.J.HSU^[18]采用的水印由取值为 $\{1, -1\}$ 的伪随机序列构成, 大小为图像大小的 $1/4$ 。把图像分成 8×8 的块, 取相邻两块相应系数的差值符号, 若所对应的水印值为 1, 则通过改变两块的值使差值变号; 最后, 通过反 DCT 变换得到水印图象。

牛夏牧等^[19]采用彩色图象作为水印, 对彩色水印进行 JPEG 压缩形成一系列二值 ID 序列, 嵌入到图象的 DCT 系数中。

c. 基于离散傅立叶变换(DFT)的水印

DFT 在信号处理中已经被广泛应用, 在水印领域中也很有用处。比如可以利用 DFT 的仿射不变性, 即对图像的空间坐标平移不敏感的性质来恢复经过了仿射变化的图象当中的水印。

b.Ruanaidh^[20]提出了在水印算法中使用 Mellin-Fourie 变换, 将水印嵌入在只和与傅立叶变换的振幅有关的子空间中。进一步, O.Ruanaidh^[21]提出了一种基于相位调制的水印算法, 以相位信息作为载体, 水印为二维图象。

d. 基于离散小波变换(DWT)的水印

在图象压缩标准 JPEG2000 中, 小波正成为一种关键技术。由于小波压缩的潜在优点, 在小波变换域研究水印是极为必要的。作为一种多分

分辨率的分析方法，小波变换具有很好的时频局部特性，可以充分利用人类视觉特性实现水印嵌入。

Wang 和 Kuo^[22]表明，一种多门限的小波方案可以寻找小波的重要系数，将水印嵌入到这些系数中。与预先确定一组系数(如前面的 DCT 水印技术中把水印嵌入到 DC 分量或者低频分量中)相比较，这种方法依赖于图象来选择系数。

Kunde 等人^[23]采用二维图象作为水印，在不同的分辨率水平下将水印和原始图象的小波系数相加。

e. 扩频水印技术

扩频方法^[24]是通信中经常采用的一种抗干扰抗噪声技术。所谓扩频是指信号传输频带大于实际所需要的频带，且在每个频带中信号都是极微弱且不易觉的，而且频带的扩展与信号无关。图象频域可被看作是信号传输的通道而水印则看作是要传输的信号。水印在任何频带中都是极其微弱的，而且可利用人类视觉特性中的掩蔽效应(Masking)，在某些特定的频带上加入噪声将严重损坏图像的质量。但是图像所有者由于知道水印的位置和内容，在验证水印时很容易把扩散到所有频带上的微弱的信号集中起来得到高信噪比的水印信号。

I.J.Cox^[25]提出了一种基于 DCT 变换域的扩频水印技术。它是把满足正态分布的伪随机序列加入到图象的 DCT 变换系数中，水印的验证是通过相关函数来实现的。

1.2.4 数字盲水印技术研究现状

因为私有水印需要耗费大量的存储资源和计算资源，如果需要认证的数字图象数量很大，那么给定一幅待测图象去查找相应的原图也是很困难的，因为这本身就构成了一个基于内容的图象检索问题。更为严重的是，Crave 在 1997 年提出了著名的“IBM 攻击”方法^{[41][45]}，绝大多数

在解码时需要原图的数字水印算法都不能抵抗 IBM 攻击。Crave 通过一个水印嵌入的逆过程，伪造了一个原始图象，虽然这种操作不能破坏真正的水印，但会造成水印标识的混乱，给司法鉴定带来困难。文献^[46]指出，解决 IBM 攻击的根本途径是使用盲水印算法。近两年来学术界研究的数字水印算法大多数属于盲水印。

Barni 在文献^[47]中提出将水印信息隐藏在 DCT 变换域中固定的中频段，以便在没有原始图象时仍能确定水印隐藏的位置，从而将 Cox 的算法发展成盲水印算法。但是，文献仍然使用线性相关算法检测水印，并没有注意到此时作为“噪声”的 DCT 变换交流系数并不具有高斯分布的统计特性，因而线性相关检测的最优性条件已经失去了。

一般来说，基于小波的水印方法由于可以更好地利用小波分解的多分辨率特性和分级结构以及适合人类视觉特性的特点，在图象的视觉透明性和顽健性方面要优于基于 DCT 的水印方法，而且第二代图象压缩标准将依靠小波变换来得到低码率下的高图象质量，所以小波域的水印算法在水印研究者中引起了强烈兴趣，并被过去几年所提出算法的数目和方法的数量所证实。小波域的水印算法可以直接从大多数常用的基于小波的压缩算法得到启发，其中有代表性的是 C.I.Podichuk 等提出的小波域水印算法^[48]，利用视觉模型来判断水印加在图象上的位置及可加水印强度的上限，既保证水印的不可见性，又能尽可能地增大水印强度来抵抗压缩等攻击。但小波域水印算法在设计时最不易解决的难题是面对几何攻击脆弱和不易实现盲水印，这两年开始出现一些涉及到几何攻击的盲水印研究，如 Ho-Yin Kwo 等提出的在小波域插入六角形水印的盲水印算法^[49]，水印能在大小为 200×200 的裁剪图象中生存。S. Tsekeridou 等提出的在小波域内嵌自相似结构水印的盲水印算法^[50]，主要是针对几何处理中的伸缩攻击。最引人关注的是 M.Barni 等通过考虑图像所有子带纹理和亮度完成像素之间的掩蔽来隐藏水印的盲水印算法^[51]，提出了从小的图像子集中检测到水印的重要性，但其水印的透明性因水印嵌入强度

大而受到影响，水印的检测需要进行大量的同步信息搜索。

1.3 课题的主要内容

本论文主要研究数字图象作品的数字盲水印算法。结合 EZW 的思想，提出一种新的整数小波变换的数字图象盲水印算法，并进行实验研究。课题的主要内容是：

(1) 分析小波变换的基本概念和理论、提升框架和由提升策略得到的几种整数小波变换。通过对图象的小波分解特性的研究给出小波变换在数字水印中的应用优势。

(2) 设计一种基于嵌入零树编码思想的传统小波变换的盲水印算法。对该算法进行实现。

(3) 为了解决设置决定零子树个数的阈值的盲目性，文献基本上都是根据实验而定。本文提出的算法首先对图象进行大小为 8×8 的分块，其次对划分块进行整数小波分解，对宿主图象的变换块的能量比和方差进行分类的基础上，结合人类视觉系统(HVS)的特性从而自适应地确定各个子块的水印强度的阈值。

(4) 为了增加水印嵌入的隐蔽性，在选择要修改的系数方面，根据区域的一致性测度自动地决定变动系数所在的子带。为进一步增加隐蔽性对水印进行嵌入前置乱。

(5) 为了避免传统小波变换过程的精度误差，以及由于划分块小的原故在和大多数传统小波滤波器卷积时由于边界延拓而无法正确重构原始图象，本文的算法采用的是由提升策略得到的整数小波，在很好地保持重构图象的质量的同时提高了计算速度。

2 小波变换理论和提升策略

小波变换是当前数学中一个迅速发展的新领域,它同时具有理论深刻和应用广泛的双重意义。小波分析克服了 Fourier 变换的许多弱点,是一个时间和频率的局域变换,因而能有效的从信号中提取信息,通过伸缩和平移等运算对函数或信号进行多尺度细化分析(Multiscale Analysis),解决了 Fourier 变换不能解决的许多问题,现已广泛应用于很多学科如信号分析、图象处理、计算机识别、CT 成像等等。它是信号分析发展史上里程碑式的进展。

2.1 传统小波变换

2.1.1 连续小波变换

a. 一维连续小波变换

设 $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$, 若其傅立叶变换 $\Psi(w)$ 满足允许条件

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(w)|^2}{w} dw < \infty \quad \text{或} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2.1)$$

则称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或母小波(Mother Wavelet)。将母函数 $\psi(t)$ 经过伸缩和平移后得

$$\psi_{a,b}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R}; a \neq 0 \quad (2.2)$$

称 $\psi_{a,b}(t)$ 为依赖于参数 a, b 的小波基函数,其中 a 为伸缩因子, b 为平移因子。

对于任意的函数 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 的连续小波变换为

$$W_f(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2.3)$$

其重构公式(逆变换)为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a,b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (2.4)$$

由 CWT 的定义可知, 小波变换同傅立叶变换一样, 都是一种积分变换。同傅立叶变换相似, 我们称 $W_f(a,b)$ 为小波变换系数。由于小波基不同于傅立叶基, 因此小波变换与傅立叶变换有许多不同之处。其中最重要的是, 小波基具有尺度 a , 平移 b 两个参数, 改变 a 的值, 对函数 $\psi(t)$ 有伸展($a > 1$)或收缩($a < 1$)的作用, 改变 b 的值, 可实现函数 $\psi(t)$ 对信号 $f(t)$ 的平移扫描。因此, 将函数在小波基下展开, 就意味着将一个时间函数投影到二维的时间—尺度相平面上, 有利于提取函数的某些本质特征。

b. 二维连续小波变换

设 $\psi(x,y)$ 是一个二维基本小波, $f(x,y)$ 是一个二维函数, 则它的连续小波变换是:

$$W_f(a,b_x,b_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y) \overline{\psi_{a,b_x,b_y}(x,y)} dx dy \quad (2.5)$$

其中 b_x, b_y 表示两个维度上的平移。而二维连续小波逆变换为:

$$f(x,y) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(a,b_x,b_y) \overline{\psi_{a,b_x,b_y}(x,y)} db_x db_y \frac{da}{a^3} \quad (2.6)$$

用同样的方法可以推广到超过两个变量函数的小波变换上。

对一维信号来说, 小波变换的主要思想是: 通常一个信号经过小波变换后被分解为高频和低频两部分, 低频部分集中了信号的主要能量, 表示信号的逼近分量, 而高频部分表示信号的细节分量。低频部分可以进一步被分解为低频和高频两部分, 这个过程可以不断进行下去直达到实际的应用要求为止。同时可以根据小波变换的系数重建原始信号,

这个过程叫做小波逆变换(IDWT)。

2.1.2 离散小波变换

a. 一维离散小波变换

在连续小波变换中, 考虑族

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$$

限制 a, b 都为离散值。对于固定的伸缩步长 $a_0 \neq 0$, 可以选取 $a = a_0^m$ (m 为整数)。当 $m=0$ 时, 取固定的整数 b_0 被离散化为 b , 选取 b_0 使 $\psi(x - nb_0)$ 覆盖整个实数轴, 因此选取 $a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m$ (m, n 取遍整数集合) 而 $a_0 > 0, b_0 > 0$ 是固定的。当然对于 a_0, b_0 适当的选取依赖于小波 $\psi(x)$, 这时相应的离散族就是:

$$\psi_{m,n} = a_0^{-m} \psi\left(\frac{x - nb_0 a_0^m}{a_0}\right) = a_0^{-m} \psi(a_0^{-m} x - nb_0) \quad (2.7)$$

而离散化小波变换系数可以表示为

$$C_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{m,n}^*(t) dt = \langle f, \psi_{m,n} \rangle \quad (2.8)$$

其重构公式为

$$f(t) = c \sum_{m,n} C_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad c \text{ 是一个与信号无关的常数。} \quad (2.9)$$

二进离散小波:

为适合计算机运算, 常采用二进离散小波变换, 既取 $a_0 = 2, b_0 = 1$ 则

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \psi\left(\frac{t - n2^m}{2^m}\right) \quad (2.10)$$

b. 二维离散小波变换

在二维情况下，需要一个二维的尺度函数

$$\varphi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y) \quad (2.11)$$

和三个“方向敏感”的小波函数

$$\Psi^H(x, y) = \Psi(x)\varphi(y) \quad (2.12)$$

$$\Psi^V(x, y) = \varphi(x)\Psi(y) \quad (2.13)$$

$$\Psi^D(x, y) = \Psi(x)\Psi(y) \quad (2.14)$$

每一个都是一维尺度函数和小波函数的乘积，这时，一维 DWT 到二维的扩展就变得很简单。首先定义一个尺度和平移基函数：

$$\varphi_{j,m,n}(x, y) = 2^{j/2} \varphi(2^j x - m, 2^j y - n) \quad (2.15)$$

$$\Psi_{j,m,n}^i(x, y) = 2^{j/2} \Psi^i(2^j x - m, 2^j y - n), i = \{H, V, D\} \quad (2.16)$$

则尺寸为 $M \times N$ 的函数 $f(x, y)$ 的离散小波变换是：

$$\text{近似: } W_\varphi(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \varphi_{j_0, m, n}(x, y) \quad (2.17)$$

$$\text{细节: } W_\Psi^i(j, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \Psi_{j, m, n}^i(x, y), i = \{H, V, D\} \quad (2.18)$$

通常令 $j_0 = 0, j \geq j_0, N = M = 2^J, j = 0, 1, 2, \dots, J-1, m, n = 0, 1, 2, \dots, 2^j - 1$.

离散小波反变换：

$$\begin{aligned} f(x, y) = & \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_m \sum_n W_\varphi(j_0, m, n) \varphi_{j_0, m, n}(x, y) \\ & + \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{i=H, V, D} \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_m \sum_n W_\Psi^i(j, m, n) \Psi_{j, m, n}^i(x, y) \end{aligned} \quad (2.19)$$

2.2 整数小波变换

传统研究的小波变换都是实数域的变换,即使待分析信号本身是整数序列,相应小波变换系数也是实数。由于数字图象一般都是用位数较低的整数表示,最常用的是 8 位,我们也希望图象矩阵的小波变换是整数矩阵,也就是希望有一种“整数-整数小波变换”,将整数序列映射为整数小波系数,并且这种映射是可逆的,具有这种性质的小波变换称为整数小波变换。用提升的方法,很容易构造一般的整数小波变换。

2.2.1 提升算法

1994 年, W. Sweldens 和 I. Daubechies 等学者提出了提升框架理论,用提升方法来构造具有线性相位的小波变换,进而给出整数可逆的提升框架,使得小波变换向实用走了一大步^{[25][26]}。提升框架的核心思想是通过有限步预测和更新来构造小波滤波器。

给定具有 2^j ($j \in \mathbb{Z}^+$) 个采样点的信号 s_j ($j \in \mathbb{Z}^+$),提升算法给出了双正交小波简单而有效的构造方法,使用了基本的多项式插补来获取信号的高频分量 d_{j-1} ($j \in \mathbb{Z}^+$),之后通过构建尺度函数来获取信号的低频分量 s_{j-1} ($j \in \mathbb{Z}^+$)。提升算法的基本思想在于通过一个基本小波(Lazy Wavelet),逐步构建出一个具有更加良好性质的新的小波,这就是提升的基本含义。一个规范的提升算法有 3 个步骤:分割(Split),预测(Predict),更新(Update)。

首先用预测规则计算细节信号,其次用更新规则计算尺度信号。具体细节如下:

分割(Split):这一阶段只是把原信号分割成互不相连的两个部分。一部分由偶数下标采样点 s_{2l} 组成,而另一部分由奇数下标采样点 s_{2l+1} 组成。每一部分的采样点都是原信号的一半。定义算式:

$$(even_{j-1}, odd_{j-1}) := Split(s_j) \quad (2.20)$$

预测(Predict):如果信号具有局部相关结构,奇数和偶数部分将会高度相关。即如果给定其中的一部分,则有可能预测出另一部分,且保持一定的准确度。经常用偶数部分预测奇数部分。定义算式:

$$d_{j-1} = odd_{j-1} - P(even_{j-1}) \quad (2.21)$$

更新(Update):尺度信号的一个重要特性是它包含了原始信号尺度方面信息。定义算式:

$$s_{j-1} = even_{j-1} + U(d_{j-1}) \quad (2.22)$$

所有的这些运算都可以进行在位运算:偶数点的值可以用尺度值进行置位,奇数点的值可以用细节值置位。

我们可以立即建立逆提升框架:

反更新(Undo Update):给定 d_{j-1} ,和 s_{j-1} ,我们可以通过更新的信息获得偶数采样点的值,经由以下操作:

$$even_{j-1} = s_{j-1} - U(d_{j-1}) \quad (2.23)$$

反预测(Undo Predict):给定 d_{j-1} 和 s_{j-1} , , 我们可以通过附加预测信息恢复奇数采样点的值,经由以下操作:

$$odd_{j-1} = d_{j-1} + P(even_{j-1}) \quad (2.24)$$

合并(Merge):重新恢复原始信号序列,即做逆奇偶小波变换。经由以下操作:

$$s_j = Merge(even_{j-1}, odd_{j-1}) \quad (2.25)$$

2.2.2 用提升方法构造一般整数小波变换

得到整数小波变换的方式有几种,最简单的方式是建立在提升方法基础上的整数小波变换。将一个较复杂的小波变换问题转换为一个简单的级联的提升过程的结构图如图 2-1 和 2-2 所示。

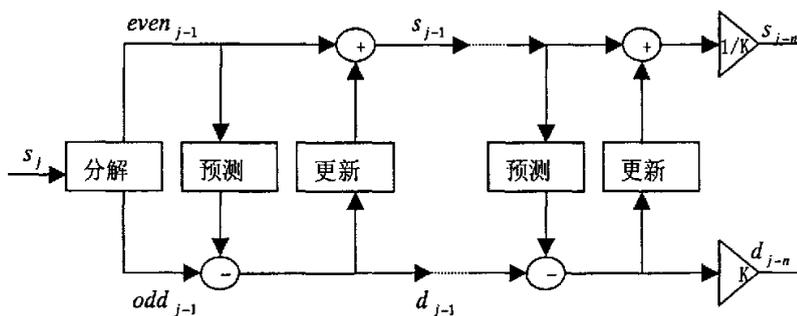


图 2-1 前向离散小波变换的提升实现

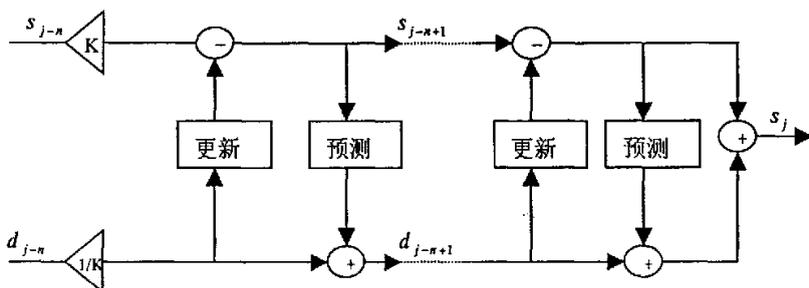


图 2-2 逆向离散小波变换的提升实现

对于提升算法，如果得到了前向变换，就可以立即得到逆向变换，需要做的只是改变加减的符号。这是提升算法的一个很优良的特性。对已有根据提升策略得到的相应整数变换，可以归结为如下伪码形式：

整数小波正变换伪码描述：

$$s_{1,l}^{(0)} := s_{0,2l}$$

$$d_{1,l}^{(0)} := s_{0,2l+1}$$

for $i = 1:(1):M$

$$\forall l: d_{1,l}^{(i)} = d_{1,l}^{(i-1)} - \left[\sum_k p_k^{(i)} s_{1,l-k}^{(i-1)} + \frac{1}{2} \right]$$

$$\forall l: s_{1,l}^{(i)} = s_{1,l}^{(i-1)} - \left[\sum_k u_k^{(i)} d_{1,l-k}^{(i)} + \frac{1}{2} \right]$$

end

for $i = M : (-1) : 1$

$$\forall l: s_{1,l}^{(i-1)} = s_{1,l}^{(i)} + \left[\sum_k u_k^{(i)} a_{1,l-k}^{(i)} + \frac{1}{2} \right]$$

$$\forall l: d_{1,l}^{(i-1)} = d_{1,l}^{(i)} + \left[\sum_k p_k^{(i)} s_{1,l-k}^{(i-1)} + \frac{1}{2} \right]$$

end

上标 i 表示第 i 级提升, $p_k^{(i)}, u_k^{(i)}$ 表示提升计算使用的系数, 设级联共有 M 级。

下面列出几个由提升方法得到的整数小波正变换公式。

(1) 5/3, (2, 2) 插值变换为:

$$\begin{aligned} d_{1,l} &= s_{0,2l+1} - \left[\frac{1}{2} (s_{0,2l} + s_{0,2l+2}) + \frac{1}{2} \right] \\ s_{1,l} &= s_{0,2l} + \left[\frac{1}{4} (d_{1,l-1} + d_{1,l}) + \frac{1}{2} \right] \end{aligned} \quad (2.26)$$

(2) 9/7, (4, 2) 插值变换为:

$$\begin{aligned} d_{1,l} &= s_{0,2l+1} - \left[\frac{9}{16} (s_{0,2l} + s_{0,2l+2}) - \frac{1}{16} (s_{0,2l-2} + s_{0,2l+4}) + \frac{1}{2} \right] \\ s_{1,l} &= s_{0,2l} + \left[\frac{1}{4} (d_{1,l-1} + d_{1,l}) + \frac{1}{2} \right] \end{aligned} \quad (2.27)$$

(3) 13/7-T, (4, 4) 插值变换为:

$$\begin{aligned} d_{1,l} &= s_{0,2l+1} - \left[\frac{9}{16} (s_{0,2l} + s_{0,2l+2}) - \frac{1}{16} (s_{0,2l-2} + s_{0,2l+4}) + \frac{1}{2} \right] \\ s_{1,l} &= s_{0,2l} + \left[\frac{9}{32} (d_{1,l-1} + d_{1,l}) - \frac{1}{32} (d_{1,l-2} + d_{1,l+1}) + \frac{1}{2} \right] \end{aligned} \quad (2.28)$$

(4) (2+2, 2) 变换:

$$\begin{aligned} d_{1,l}^{(1)} &= s_{0,2l+1} - \left[\frac{1}{2} (s_{0,2l} + s_{0,2l+2}) + \frac{1}{2} \right] \\ s_{1,l} &= s_{0,2l} + \left[\frac{1}{4} (d_{1,l-1}^{(1)} + d_{1,l}^{(1)}) + \frac{1}{2} \right] \\ d_{1,l} &= d_{1,l}^{(1)} - \left[\alpha \left(-\frac{1}{2s_{1,l-1}} + s_{1,l} - \frac{1}{2s_{1,l+1}} \right) + \beta \left(-\frac{1}{2s_{1,l}} + s_{1,l+1} - \frac{1}{2s_{1,l+2}} \right) + \gamma d_{1,l+1}^{(1)} + \frac{1}{2} \right] \end{aligned} \quad (2.29)$$

要求: $8\beta + 3\gamma = 1$ $4\alpha + 4\beta + \gamma = 1$

典型的一组参数是： $\alpha = \frac{1}{8}, \beta = \frac{1}{8}, \gamma = 0$.

(5) D4 正交变换：

$$\begin{aligned} d_{1,l}^{(i)} &= s_{0,2l+1} - \left[\sqrt{3}s_{0,2l} + \frac{1}{2} \right] \\ s_{1,l} &= s_{0,2l} + \left[\frac{\sqrt{3}}{4d_{1,l}^{(i)}} + \frac{(\sqrt{3}-2)}{4d_{1,l-1}^{(i)}} + \frac{1}{2} \right] \\ d_{1,l} &= d_{1,l}^{(i)} + s_{1,l+1} \end{aligned} \quad (2.30)$$

比例因子项为 $\frac{1}{K} = \frac{(\sqrt{3}+1)}{\sqrt{2}} \approx 1.577$.

(6) (7, 9) 双正交变换：

$$\begin{aligned} d_{1,l}^{(i)} &= s_{0,2l+1} + \left[\alpha(s_{0,2l} + s_{0,2l+2}) + \frac{1}{2} \right] \\ s_{1,l}^{(i)} &= s_{0,2l+1} + \left[\beta(d_{1,l}^{(i)} + d_{1,l-1}^{(i)}) + \frac{1}{2} \right] \\ d_{1,l} &= d_{1,l}^{(i)} + \left[\gamma(s_{1,l}^{(i)} + s_{1,l+1}^{(i)}) + \frac{1}{2} \right] \\ s_{1,l} &= s_{1,l}^{(i)} + \left[\delta(d_{1,l} + d_{1,l-1}) + \frac{1}{2} \right] \end{aligned} \quad (2.31)$$

常数是 $\alpha \approx -1.586134342$, $\beta \approx -0.05298011854$, $\gamma \approx 0.8829110762$,

$\delta \approx 0.4435068522$, $\gamma_K \approx 1.149604398$.

2.3. 小波域图象水印技术

2.3.1 图象的小波变换

小波变换在图象的应用就是对图象进行多分辨率分解，把图象分解成不同空间不同频率的子图象，然后再对子图象的系数进行处理。离散小波变换将原始图象数据按不同频带宽度分解成为四个子带图象：的图象分解图示 LL(垂直和水平方向均为低频); LH(水平方向低频垂直方向高频); HL(水平方向高频垂直方向低频); HH(垂直和水平方向为高频)。LL 为分析信号，其余三个子带为细节信号。分析信号又可以进一步分解

成四个子带，若 K 为分解的层数那么总的子带数为 $3K+1$ 个。

分别在水平方向和垂直方向上对图象进行小波变换即得到图象的多分辨率分解表征。图 2-3 描述了图象进行 2 级多分辨率分解的情况，可不断重复这个过程直到满足所需的分辨率。这种多分辨率分解方式符合人类的视觉特性。

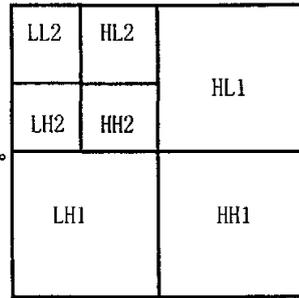


图 2-3 多级离散小波变换

2.3.2 小波域嵌入水印的优点

(1) 小波的多分辨率思想和 HVS(人眼视觉特性)是一致的。一般，人眼的视觉较敏感于图象的平滑部分信息的细微变化，而对图象边缘或纹理等部分信息的细微变化不太敏感。图象经小波变换分解成小波子图后，图象的信息得到了很好的分类，图象的边缘或纹理等部分信息主要集中到中高频细节子图的较大小波系数上，通常我们把大能量的水印加入到大的小波系数中，影响的正好是图像的纹理区域和图像变化的边缘区域，而这些区域也正是人眼对之变化不敏感的区域。大多数小波域的水印算法都是根据 HVS 选择水印嵌入位置和嵌入强度。

(2) 可以保证在新一代压缩标准 JPEG2000 有损压缩下嵌入的水印不会被去除；也可以在压缩域中直接嵌入水印。

(3) 由于小波的多分辨率特性，可以不需要整幅图象进行水印的验证。

3. 基于 EZW 小波变换的盲水印算法

目前大多数的数字水印方案都是需要原始图象进行水印的检测,应用原图象进行水印检测的技术研究已经比较成熟,但是这种方法在实际应用显然有一定的局限,因为有时候不一定能保证可以提供原始图象,例如视频应用中的 DVD 产品等,利用原图象进行水印检测的可能性不大。更重要的是,有时候无法证实所提供的“原始图象”不是伪造的。所以非盲水印虽然比盲水印的安全性、稳健性更强,但盲水印更符合所有权验证的需要,是水印算法研究发展的方向。本文提出的水印算法是盲水印算法。

由于 DWT(Discrete Wavelet Transform)良好的空间-频率局部特性以及具有的和人眼视觉特性相同的变换机制,使它成为新一代静止图象压缩标准 JPEG2000 的核心技术,在数字水印中也越来越受到重视,并逐渐替代 DCT 成为变换域数字水印算法的主要工具。所以本文的算法是基于嵌入零树编码的小波域盲水印算法。

3.1 嵌入零树小波编码思想(EZW)

在基于小波变换的图象压缩方案中,EZW 是一种将量化过程隐含在编码过程中的嵌入式编码。所谓嵌入式编码,就是它可逐步进行编码或译码,可在任何时候结束编码/译码过程,从而可以精确地控制比特率。EZW 算法利用小波系数的特点较好地实现了图象编码的嵌入功能,其重要性排序和分级量化的思想被许多编码算法所采用。

一幅图象经过三级小波分解后形成了 10 个子带,如图 3-1 所示。小波系数的分布特点是越往低频子带系数值越大,包含的图象信息越多;越往高频子带系数值越小,包含的图象信息越少。在数值相同的情况下,由于低频子带反映图象的低频信息,对视觉比较重要,而高频子带反映图象的高频信息,对视觉不太重要,因此对相同数值的系数选择上先传

输较低频系数的重要比特，后传输较高频系数的重要比特。可见小波系数非常适合于嵌入式图象的编码算法。在 JPEG2000 标准中以小波变换作为图像编码的变换方法。

EZW 算法利用小波系数的特点较好地实现了图像编码的嵌入功能，主要包括以下三个过程：零树预测、用零树结构编码重要图、逐次逼近量化。

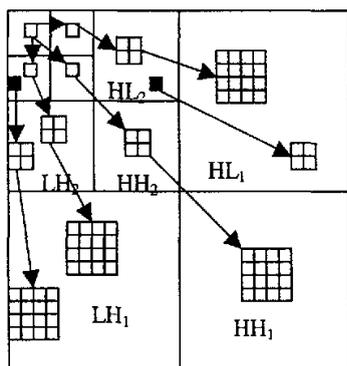


图 3-1 三级 DWT 时的父子依赖关系

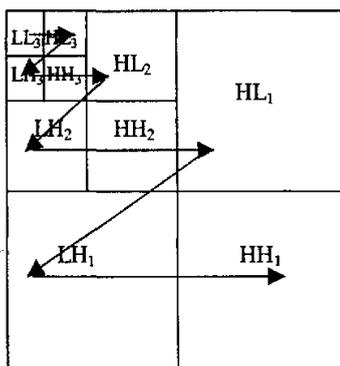


图 3-2 三级 DWT 的扫描顺序

(1) 零树预测

图象经过小波多分辨率分解后，能量几乎总是集中在较低频的子图象上，并从低频到高频呈递减分布，在倍频分解下，由不同频带、代表同一空间位置的系数构成了一种树型结构，并且高频部分存在大量的零，故称为“零树”。

零树方案基于如下假设：一个小波系数 x ，对于一个给定的阈值 T ，如果 $|x| < T$ ，则称小波系数 x 是不重要的。如果一个小波系数在一个粗的尺度上关于给定的阈值 T 是不重要的，在较细尺度上同样的空间位置中的所有小波系数相对于阈值 T 也是不重要的，则称小波系数形成了一个零树。尽管缺乏严格的数学模型描述，但统计结果表明这种假设是成立的。如图 3-1 所示，图中箭头表明了节点的父子关系，除了 LL 频带的根节点具有 3 个节点外，其它父节点具有在更高分辨率下的 4 个子节点。

为了获得理想的比特率，零树根符号的概率必须很高。各系数扫描的顺序如图 3-2 所示，扫描从最低频率子带 LL_3 (假定是三级分解)开始，结束于 HH_1 。在移到下一子带之间，要把当前子带的系数全部扫描完，即所有父节点先于子节点被扫描。显然这种扫描方式在编码端和译码端都是一样的。

(2) 用零树结构编码重要图

重要图包括三种要素：重要系数、孤立零和零树根。其中对于一个给定的阈值 T ，如果系数 x 本身和它的子孙都小于 T ，则该点就称为零树根；如果系数本身小于 T ，但其子孙有一个大于或等于 T ，则该点就称为孤立零点；重要系数即系数本身及各级子系数均为重要系数。在编码时分别采用三种符号与之对应。当编码到最高分辨率的层数时，由于它们没有子孙，零树根不再存在，只需其余两种符号即可。为了有利于内嵌编码，将重要系数的符号与重要图一起编码，这样就要定义五个符号：POS, NEG, IZ, ZTR 和 Z，其中 POS 表示系数大于给定阈值且为正；NEG 表示系数绝对值大于给定阈值且为负；IZ 表示此系数的绝对值小于阈值，但其子孙结点中存在大于给定阈值的系数；ZTR 表示该结点为零树根；Z 表示系数绝对值小于给定的阈值且无子孙。

(3) 逐次量化逼近(Successive-Approximation Quantization,SAQ)

内嵌编码的核心在于使用了逐次逼近的量化方法(SAQ)，SAQ 按顺序使用一系列阈值 T_0, T_1, \dots, T_{N-1} 以决定重要系数，其中门限序列的选取是 $T_i = T_{i-1} / 2$ ，而初始门限 T_0 选择得使对于所有系数 x_j 有 $|x_j| < 2T_0$ 。为了计算方便，一般取 $T_0 = M 2^E$ ，其中 E 是整数， M 是固定常数。在编译码过程中，始终保持两个分离的列表：主表和辅表。主表对应于编码中不重要的集合或系数，其输出信息起到了恢复各重要值空间位置结构的作用，而辅表是编码的有效信息，输出为各重要系数的二进制值。编码分为主、辅两个过程。在主过程中，设定阈值为 T_i ，按上述原理对主表进行扫描编码，若是重要系数，则将其幅值加入辅表中，然后将该

系数在数组中置为零，则当阈值减小时，该系数不会影响新零树的出现；在辅过程中，对辅表中的重要系数进行细化，细化过程类似于比特平面编码。对阈值 T_i ，重要系数的所在区间为 $[T_i, 2T_i]$ ，若辅表中的重要系数位于 $[T_i, 3/2T_i]$ ，则用符号“0”表示，否则用符号“1”表示。编码在两个过程中交替进行，在每个主过程前将阈值减半。

3.2 基于零树结构的水印算法分析

Inoue 提出的使用小波零树编码进行水印嵌入的算法^[46]是一种比较具有代表性的小波数字水印算法。该算法中利用了小波零树结构提出了两种水印嵌入的方法，一种是把水印嵌入到小波域的不重要系数中，通过用一个小的正数或者负数代替零树中不重要系数来嵌入水印。一种是将水印嵌入到小波域的重要系数中。

在不重要系数中嵌入水印具体做法是：首先对原始图象进行 3 级小波分解，选用 3 个子带组 (LH_3, LH_2, LH_1) ， (HL_3, HL_2, HL_1) 和 (HH_3, HH_2, HH_1) 构造零树。最低频子带 (LL_3) 不变。水印的嵌入算法如下：

- (1) 选取 3 个子带组中任意一组来嵌入水印。设定阈值 T ， $T = \alpha \cdot C_{\max}$ 其中 C_{\max} 是选定的子带组中小波系数的最大值。且 $0.01 < \alpha < 0.1$ 。
- (2) 在阈值 T 下，找到不重要的系数构建成零树，设 Z_1, Z_2, \dots, Z_N 代表零树，其中 N 为零树的个数。
- (3) 将需要嵌入的水印信息编码为二值比特序列 $W(k)$ ， $k = 1, 2, \dots, N$ 。
- (4) 对于 $k = 1, 2, \dots, N$ ，如果 $W(k) = 0$ 使用 $-m$ 代替零树 Z_k 中的所有元素，如果 $W(k) = 1$ 使用 m 代替零树 Z_k 中的所有元素。 m 是水印嵌入的强度，在试验中可根据水印嵌入后图像的失真程度进行调节。
- (5) 保存零树根 Z_1, Z_2, \dots, Z_N 的位置，然后进行小波逆变换，获得嵌入水印的图象。

在水印检测时，首先对待检测图象进行小波分解，小波基和分解的

级数和水印嵌入时相同，然后根据水印嵌入时所保存的零树根的位置进行水印的检测，方法如下：

(1) 根据 Z_k 零树根的位置，获得 Z_k 的父系数和 4 个子系数的值，计算它们的均值。

(2) 如果均值小于 0，则水印值为 0，否则为 1。

在不重要系数嵌入水印，嵌入的区域主要是图像中变化比较平坦的部分，由于人类视觉系统对这部分的变化十分敏感，所以随着水印嵌入强度的增加，图象的失真就越明显。Inoue 提出的另一种水印嵌入方法，嵌入的位置主要是图象的细节部分，也就是图象的边缘或纹理复杂区域。

Inoue 提出的两种水印算法，能嵌入的水印比特数少，数据载荷量小，而且在高压缩比的情况下水印容易被除去。

Chuan-Fu Wu^[42] 提出了一种利用分块 DCT 变换的零子数个数嵌入水印的算法。若要嵌入的水印值为 1，则调整该变换块的零子树个数使其达到奇数个数的要求；若要嵌入的水印值为 0，则调整该变换块的零子树个数使其达到偶数个数的要求。具体方法如下：

(1) 把宿主图象分成 8×8 互不重叠的块，对各个块进行 DCT 变换，根据缺省的量化表进行量化后，把系数重新排列成 3 级小波金子塔结构形式。

(2) 根据预先设定的阈值，确定每个块的零子树个数。为了降低图象失真，每个子带的阈值分别确定， LH_3, HL_3, HH_3 为 T_3 ， LH_2, HL_2, HH_2 为 T_2 ， LH_1, HL_1, HH_1 为 T_1 ，它们的关系为 $T_2 = T_3/2$ ， $T_1 = T_3/4$ 。

(3) 因为一个零子树里的元素相对而言是不重要的，所以它们是水印嵌入的合适位置，但改变的并不是零子树的所有的元素，而是改变其中的一个元素，系数选择的原则是该元素和相应的阈值差别最小。

(4) 反量化，逆 DCT 变换，得到含水印图象。

水印的检测如下：水印的抽取不需要原始图象，同样把变换图象分成 8×8 互不重叠的块，每块进行 DCT 变换，量化，重新排列，统计变换块里零子树的个数，如果为奇数，水印位为 1；如果为偶数，水印位为 0。

3.3 基于零树结构的小波域盲水印算法

结合上述两种算法，本文提出一种基于零树结构的小波域盲水印算法。把水印嵌入到小波域的不重要系数中，通过用一个小的正数或者负数代替零树中不重要系数来嵌入水印。阈值的选择采用 Chuan-Fu Wu 提出的方法。

3.3.1 分块小波变换

把宿主图象按 8×8 的大小进行分块，每块进行3级小波变换。为免由于边界延拓效应引起的图象重构偏差，实验选取Harr小波。

3.3.2 水印的嵌入

本文的水印方案是按块的零子树个数进行水印位的嵌入和提取的。

一、水印的选择和生成

作为水印信息，不管采取何种形式，所构成水印的序列应该具有不可预测的随机性，这使得水印经受多拷贝联合攻击的能力大大增强。因此，所加入的水印应该是具有与噪声相同的特性，如高斯噪声、随机分布的序列均可作为水印。

为了让水印携带更多的版权信息，有些系统是以图象（譬如8位灰度图象甚至彩色图象）等有意义的信号为水印信息，即二维水印，因为这些图象可以表达更多的版权信息，例如产品的logo、商标、所有者等等，同时也对系统提出了更高的要求。首先由于二维水印的信息数据量较大，如一幅 32×32 的8位灰度图象，共有1024字节，将其不留痕迹的嵌入到 256×256 图象中是很不容易作到的。一般在采用图象作为水印的时候会对水印信息进行处理，去除水印信息的相关性，也有些方案将二维水印信息采用编码的方式转换成一维 $\{0,1\}$ 序列。

因为在实际应用中多需要有意义的水印，因而本文选择二值商标图象作为水印图象对水印的嵌入策略进行研究。对于 $m \times n$ 大小的宿主图象，采用 8×8 大小的子块，可嵌入的水印容量为 $\frac{(m \times n)}{(8 \times 8)}$ bit。

二、统计零子树个数

每个划分块进行 3 级小波变换后，可根据预先设定的阈值对每个变换块统计零子树个数。首先定义一个 8×8 大小的数组 $ff(8,8)$ 存储各个变换块对应的矩阵，对于树结构，变换矩阵的 HL_1, LH_1, HH_1 的子带结点都为叶子结点，不可能为零树根结点，在统计零子树个数时，不可能进行到这一层。所以定义一个 4×4 大小的数组 $T(4,4)$ 来存储结点属性。根据小波系数特点，设子带 LH_3, HL_3, HH_3 的阈值为 T_3 ，子带 LH_2, HL_2, HH_2 的阈值为 $T_2 = \text{MAX}(T_3 / 2, 1)$ ，子带 LH_1, HL_1, HH_1 的阈值为 $T_1 = \text{MAX}(T_3 / 4, 1)$ 。这样选取是为了降低图象失真。具体算法如下：

第一步：首先根据相关阈值给数组 $T(4,4)$ 赋值：

对 HL 方向：

```
//1
IF(abs(ff(0,2))<T2)
    {IF ((abs(ff(0,4))<T1) and (abs(ff(0,5))<T1) and (abs(ff(1,4))<T1) and
        (abs(ff(1,5))<T1))
        T(0,2)='ZTR' ELSE T(0,2)='IZ' }
ELSE
    IF(ff(0,2)<0.00) T(0,2)='NEG' ELSE T(0,2)='POS'
//2
IF(abs(ff(0,3))<T2)
    {IF ((abs(ff(0,6))<T1) and (abs(ff(0,7))<T1) and (abs(ff(1,6))<T1) and
        (abs(ff(1,7))<T1))
        T(0,3)='ZTR' ELSE T(0,3)='IZ' }
ELSE
```

```

IF(ff(0,3)<0.00) T(0,3)='NEG' ELSE T(0,3)='POS'
//3
IF(abs(ff(1,2))<T2)
  {IF ((abs(ff(2,4)<T1) and (abs(ff(2,5)<T1) and (abs(ff(3,4)<T1) and
    (abs(ff(3,5)<T1))
    T(1,2)='ZTR' ELSE T(1,2)='IZ' }
ELSE
  IF(ff(0,2)<0.00) T(1,2)='NEG' ELSE T(1,2)='POS'
//4
IF(abs(ff(1,3))<T2)
  {IF ((abs(ff(2,6)<T1) and (abs(ff(2,7)<T1) and (abs(ff(3,6)<T1) and
    (abs(ff(3,7)<T1))
    T(1,3)='ZTR' ELSE T(1,3)='IZ' }
ELSE
  IF(ff(0,2)<0.00) T(1,3)='NEG' ELSE T(1,3)='POS'
//5
IF(abs(ff(0,1))<T3)
  {IF((T(0,2)='ZTR') and (T(0,3)='ZTR') and (T(1,2)='ZTR') and
    (T(1,3)='ZTR'))
    {T(0,1)='ZTR',T(0,2)='W',T(0,3)='W',T(1,2)='W',T(1,3)='W' }
  ELSE T(0,1)='IZ' }
ELSE
  IF(ff(0,1)<0.00) T(0,1)='NEG' ELSE T(0,1)='POS'

```

当 HL_3 子带的系数为零树根时, HL_2 子带的系数尽管小于相应的阈值也不再是零树根,而是零树根下面的子结点,因此属性记为'W'。

对 LH,HH 方向也采取同样的方法对数组 $T(4,4)$ 剩余的元素赋值。

第二步:统计该子块零子树的个数

统计数组 $T(4,4)$ 中元素值为 'ZTR' 的元素个数，即为零子树的个数。

三、根据零子树个数嵌入水印

水印的嵌入如图 3-3 所示，把宿主图象分成 8×8 互不重叠的子块，首先对各个子块进行 3 级离散小波变换，根据 2 值水印位来改变每个子块零子树的个数。假如该子块的零子树的个数为偶数，若要嵌入的水印位为 1，调整该转换块的小波系数直到该块零子树的个数为奇数；若要嵌入的水印位为 0，则系数值不变。同理，假如该子块的零子树的个数为奇数，若要嵌入的水印位为 0，调整该转换块的小波系数直到该子块零子树的个数为奇数；若要嵌入的水印位为 1，则系数值不变。这里，系数选择的原则是该元素和相应的阈值差别最小。

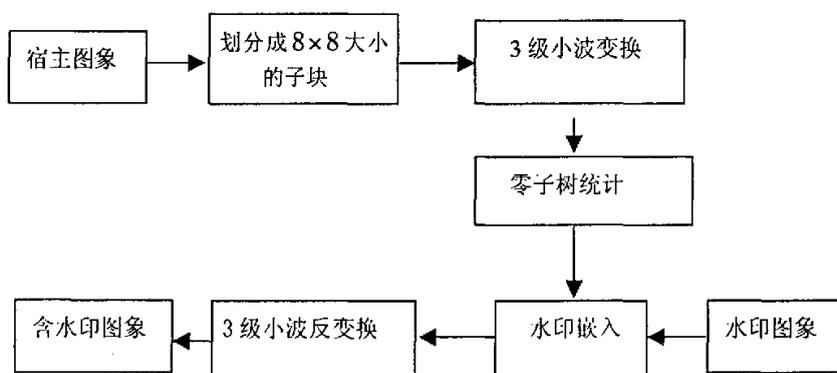


图 3-3 水印的嵌入框图

四、获取含水印图象

对每个加过水印位的子块进行 3 级小波反变换，最后拼接成含水印的图象。

3.3.3 水印的提取

一、含水印图象的小波变换

把含水印图象划分成 8×8 互不重叠的子块，对每个子块进行 3 级小波分解，根据前面设定的阈值对每个子块统计零子树个数。

二、根据零子树个数提取水印

水印的提取如图 3-4 所示，水印的提取不需要原始图象，把含水印图象分成 8×8 互不重叠的子块，小波基选取和同嵌入过程一样，首先对每个子块进行 3 级小波变换，根据嵌入时设定的阈值来统计各个子块对应的零子树的个数，如果零子树的个数为奇数，水印位为 1；如果零子树的个数为偶数，水印位为 0。

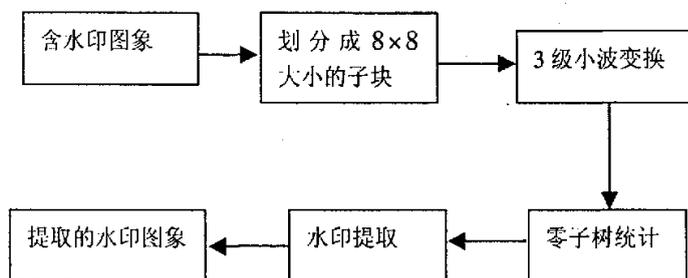


图 3-4 水印的抽取框图

3.4 水印的评价

在图象处理中，一个重要而又应首先考虑的问题是重建后的图象质量问题，通常用峰值信噪比 $PSNR$ 来定量评价含水印图象的质量，那么数字图象峰值信噪比的定义是：

$$PSNR = 10 \lg \left[\frac{M \times N \times 255^2}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [f(i,j) - g(i,j)]^2} \right] \quad (3.1)$$

其中 $f(i,j)$ 为原始图象， $g(i,j)$ 为加水印图象。

由 PSNR 的经验可以知道, 两幅图象在视觉效果上不可察觉, 那么两幅图象的 $PSNR$ 应满足^[43]: $PSNR \geq 35$ 。

水印的客观评价是抽取的水印信号和原水印信号的相关系数, 相关系数的定义为:

$$NC = \frac{\sum_i \sum_j w(i,j) \times w'(i,j)}{\sum_i \sum_j [w(i,j)]^2} \quad (3.2)$$

其中 $w(i,j)$ 为原水印信号, $w'(i,j)$ 为抽取的水印信号。

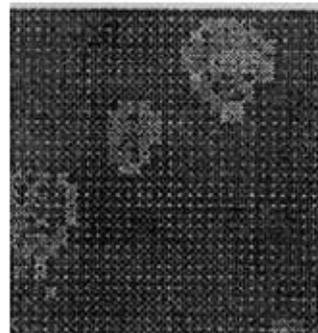
3.5 实验结果及分析

实验 1 采用的是如图 3-5 所示的 256×256 大小的“Balloons”图象作为宿主图象, 水印图象采用 32×32 大小的 2 值西安理工大学的校标图象。实验中选取 $T_3 = C_{\max} \cdot \alpha$, $\alpha = 0.02$, 这里 C_{\max} 为子带 LL_3 的系数绝对值。计算所得的 $PSNR = 32.6, NC = 0.9$ 。

实验 2 采用的是如图 3-6 所示的 256×256 大小的“Lena”图象作为宿主图象, 水印图象采用 32×32 大小的 2 值商标图象。实验中选取 $T_3 = C_{\max} \cdot \alpha, \alpha = 0.01$, 这里 C_{\max} 为子带 LL_3 的系数绝对值。计算所得的 $PSNR = 23.6, NC = 0.88$ 。



(a) Balloons 原图



(b) Balloons 分块 3 级小波分解图



(c) 含水印的重构图象



(d) 水印图象



(e) 提取的水印图象

图 3-5 实验 1 图象: (a) 宿主图象 (b) 3 级分块 Harr 小波变换图 (c) 含水印的重构图象 (d) 水印图象 (e) 提取的水印图象。



(a) Lena 原图



(b) Lena 分块 3 级小波分解图



(c) 含水印的重构图象



(d) 水印图象



(e) 提取的水印图象

图 3-6 实验 2 图象: (a) 宿主图象 (b) 3 级分块 Harr 小波变换图 (c) 含水印的重构图象 (d) 水印图象 (e) 提取的水印图象。

以上两个实验对每一个小波变换后的子块实施相同的阈值选取方法，即 α 取相同的值，发现即使在水印正确嵌入的情况下，提取出的水印和原始水印图象也有很大的偏差；每一个划分块的大小取值比较小，是 8×8 ，由于实行别的小波变换无法正确重构图象，实验采取的是 3 级传统 *Harr* 小波变换，由于没有考虑图象子块本身的特征，发现以相同的强度在平滑区叠加的水印信号在视觉上表现得很明显，又加上变换过程产生的精度误差，导致宿主图象和含水印图象这两副图象的 *PSNR* 不能令人满意。

为了克服上述算法的缺陷，下面提出一种自适应性的盲水印算法。

4 基于图象特征的自适应性盲水印算法

上一章的小波域数字水印技术是通过改变小波系数来达到嵌入水印信息的目的。但小波系数无论发生多大的改变，都会使图象退化，尤其在图象的平滑区域。一般情况下，如果嵌入水印能量大，稳健性就好，反之，稳健性相对就差一些。但是如果嵌入的水印能量过大，又会使图象的质量发生较大的退化，从而导致又不能满足不可察觉性这个要求。怎样才能嵌入较大能量的水印而又不使图象质量有可察觉的变化？这就要求我们充分利用人眼的视觉特性，合理地选择一个平衡点，即在可觉察阈值高的地方，譬如图象的纹理区域，嵌入较多的信息；而在平滑区域，则嵌入较少的信息。

文献^{[26][29]}提出了一种有效的基于零子树的盲水印技术。该技术通过调整宿主图象的小波变换块零子树的个数来嵌入和抽取水印。但没有提出决定零子树的参考阈值的选取方法，实验结果会因为图象内容的不同而出现很大的偏差。

黄继武^[30]对图象分成 8×8 大小的子块，按每块纹理强弱不同在各个子块 DCT 直流系数中嵌入不同强度水印，实现了一种 DCT 域自适应鲁棒水印。

基于零子树和分块的水印算法，基本上都要考虑块阈值的选取问题，为了克服参考阈值选取的盲目性，本章提出了一种基于图象特征的子适应性盲水印算法。在基于整数小波变换的基础上，结合人的视觉特性(HVS)，根据提取的宿主图象的特征参数，对各子块进行分类，从而自适应地决定阈值的选取；并在选择要调整的系数时，根据区域的一致性测度自适应地选择系数要变动的子带。相对于一般的基于零子树的盲水印技术，水印嵌入位置是算法自动选取的，这无疑增加了水印嵌入的隐蔽性，水印提取也很简单。由于整数小波变换能去除像素间的相关性、运算速度快并且能够维持传统小波层间的树结构，尺度间的相似性和方向性因而取得了更好质

量的含水印图象。

4.1 人眼视觉特性 (HVS) 分析

水印系统设计的关键问题是寻找不可觉察性和鲁棒性的平衡点。而人是图象信息的最终接收者，也是图象质量的最终评审者，所以对图象信息的处理，应该考虑人眼的视觉特性以及图象的统计特性，以期在保证图象质量的前提下，尽可能地嵌入更多的水印信息。视觉遮罩(visual masking)对水印嵌入非常重要，视觉遮罩指利用图象本身的一些特性来掩盖图象被修改的痕迹。例如给一幅图象加入噪声，会发现平坦区域的噪声比复杂区域(纹理区)的噪声更明显。根据上一章的嵌入法则，水印嵌入可理解为在强背景下迭加一个弱信号，根据视觉系统特性，仅当迭加的信号超过一定的强度时，它才可以被检测到。迭加信号的可见阈值受到背景亮度、背景纹理复杂性和频率方向性等影响。

视觉的空间频率特性是人类视觉系统的一个重要性质。在电信号的传输系统中，常常用输入激励和输出相应之间的关系表示系统的特征。最常用的是相位特征和频率特征。根据各种空间频度数测出的视觉空间调制转移函数 MTF (Modulation Transfer Function)的一种可能的数学表达式为：

$$|H(u, v)|^2 = (1 + 0.05w^2) \exp[-(w/50)^2] \quad (4.1)$$

其中 $w^2 = u^2 + v^2$ ， u 和 v 是图象的频率变量。曲线如图 4-1 所示。

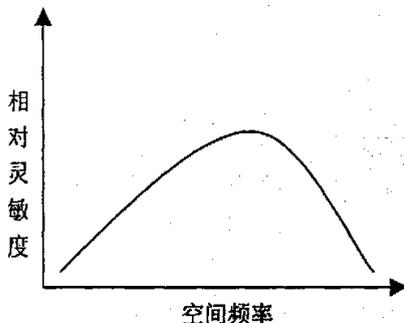


图 4-1 视觉系统
调制转移函数

从图 4-1 中可以看出,人眼视觉的空间频率响应在高频和低频均较低,整个特性类似于带通滤波特性。

在 HVS 中^{[31][32][33][34]},有许多特性可以用于数字水印的方案中。人类视觉系统可以从以下四个方面来描述:

(1) 亮度特性:图象的背景亮度越高,所能嵌入的附加信息就越多,即可见阈值越高(照度隐蔽)。

(2) 频率特性和方向敏感度:图象的低频信号对应于图象的轮廓信息,高频信号对应于细节信息。频率越高,人眼的分辨能力就越低,频率越低,人眼的分辨能力就越高。方向敏感度,即人眼对不同方向的图象细节具有不同的敏感度。例如,对水平方向和垂直方向的细节敏感度大于对角线方向的细节敏感度。

(3) 图象类型特性:图像可分为大块平滑区域和纹理密集区域,视觉效应随图象内容的改变而变化,在光滑区域阈值低,对失真比较敏感;而在边缘区和纹理区,视觉存在掩盖效应,对失真不敏感。

(4) 颜色敏感性:对于彩色图象,人眼对绿色最敏感,其次是红色,再次是蓝色。因而可将水印嵌入在彩色图象的蓝色分量中,或者将 RGB 分量转换到 YUV 空间,将水印嵌入到 Y 分量(亮度分量)上。

4.2 图象的置乱技术

置乱技术是随着信息的安全与保密被重视而发展起来的图象加密技术。该技术早期是对模拟图象的位置空间做置换,它可以看作是从经典密码学中的单表系统扩展而来的。对于数字化的图象,置乱过程不仅可以在数字图象的空间域上进行,还可以在其频率域上进行。数字图象置乱即是一种加密方法,算法设计者可以自由控制算法的选择、参数的选择以及使用随机数技术,从而达到非法攻击者无法破译图象内容的目的。

置乱技术的方法主要有以下几种:Arnold 变换^[35]、幻方、Hilbert 曲线

和 IFS 模型等。在水印算法中使用置乱技术应考虑两个要求：(1) 尽可能小的计算量；(2) 尽可能大的置乱度。本文采用 Arnold 变换对上章的 32×32 的水印图象产生的二进制矩阵作置乱。

V.J.Arnold 在遍历理论的研究中提出了一类变换：设有平面点集 $S = [0,1] \times [0,1], (x, y) \in S$, 则

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \pmod{1} \quad (4.2)$$

点集 S 在计算机屏幕上表现为单位正方形上离散象素组成的矩阵，如果象素的坐标 $x, y \in \{0,1,2,3, \dots, N-1\}$, 那么坐标 (x, y) 变到另一个坐标 (x', y') 上的变换就转化为：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \pmod{N} \quad x, y \in \{0,1,2,3, \dots, N-1\} \quad (4.3)$$

记变换中的矩阵为 A ，反复进行这一变换，则有迭代公式：

$$p_{ij}^{n+1} = Ap_{ij}^n \pmod{N}, n = 0,1,2,3, \dots \quad (4.4)$$

其中 $p_{ij}^n \in S, p_{ij}^n = (x, y)^T$ 为迭代第 n 步时点的位置。

Arnold 变换可以看作是剪切和拼接的过程，通过这一过程将离散化的数字图象矩阵 S 中的点重新排列。这种反复逐次变换的结果是将图象的明确意义隐藏于混乱之中，达到信息保密的目的。虽然经过 Arnold 变换后的图象会变得面目全非，但继续使用 Arnold 变换，一定会出现一幅与原图相同的图象。也就是说，Arnold 变换具有周期性。对于不同的 N ，Arnold 变换有不同的周期，如表 4-1 所示：

表 4-1 不同阶数 N 下二维 Arnold 变换的周期

N	2	4	6	8	10
周期	3	3	12	6	30
N	12	16	24	32	48
周期	12	12	12	24	12

图 4-2 是对一幅水印图象的置乱变换结果, n 表示迭代步骤, 图象大小为 32×32。



图 4-2 水印图象置乱

4.3 基于图象特征的自适应性水印算法

4.3.1 整数小波变换

传统小波变换都是实数域的变换, 即使待分析信号本身是整数序列, 相应小波变换系数也是实数。这对小波变换应用于图象压缩产生了一定的限制。首先是变换系数矩阵需要浮点存储, 一般需要更大的存储空间, 其次是难以产生良好的无失真编码器。因此, 在许多应用中希望有一种“整数—整数小波变换”, 即将整数序列映射为整数小波系数, 并且这种映射是可逆的, 具有这种性质的小波变换称为整数小波变换, 其变换过程允许有浮点运算。

在本文上一章的基于嵌入零树编码的小波域盲水印算法中, 由于考虑到水印信息的容量大小, 把宿主图象分成了大小为 8×8 的子块, 通过实验发现在基于传统小波变换中, 只有 *Harr* 小波能够较好的恢复出原始图象, 但仍使嵌入水印后的图象出现了一些明显的视觉失真。所以本章采用的是整数小波变换。

得到整数小波变换的方式有几种, 最简单的方式是建立在提升基础上的整数小波变换。实验采用小波基是 5/3 的小波, 插值正变换公式为:

$$d_{1,j} = s_{0,2l+1} - \left\lfloor \frac{1}{2} (s_{0,2l} + s_{0,2l+2}) + \frac{1}{2} \right\rfloor \quad (4.5)$$

$$s_{1,j} = s_{0,2l} + \left\lfloor \frac{1}{4} (d_{1,j-1} + d_{1,j}) + \frac{1}{2} \right\rfloor \quad (4.6)$$

4.3.2 基于小波变换的特征提取

Mallat^[36]的实验证明,小波变换图象的一次灰度分布统计特性的信息足以对图象进行纹理分割。图象通常由平滑区和纹理区组成,实验研究表明,图象的纹理区的高频成分较多,而平滑区的低频成分较多,二者的能量存在着明显的差别。由于小波分解得到的子图象相互正交独立,于是我们定义以下的特征量来描述图象的纹理^[37]。

(1) 低频能量和高频能量之比

$$F_1 = \frac{e_1}{e_2+e_3+e_4+e_5+e_6+e_7} \quad (4.7)$$

其中 e_n $n=1,2,\dots,7$ (图 4-3)为各个频带内图象的能量,即

$$e_n = \frac{1}{M^2} \sum \sum |x(i, j)|$$

(2) 5、6 通道的方差

$$F_2 = \frac{1}{M} \sum (x(i, j) - \bar{m})^2 \quad (4.8)$$

其中 \bar{m} 是图象块所有象素的均值。

首先把宿主图象分成大小为 8×8 互不重叠的子块,对每块进行 2 级整数小波变换,分别计算每个变换块的特征值 F_1 和 F_2 。将其存入象素大小为 32×32 的图象从而得到 2 副特征图象,即能量比特征图象和方差特征图象。

4.3.3 基于聚类的图象子块划分

得到特征图象后,先对图象进行灰度级调整,把特征图象变换到 0~255 范围内,然后对图象作直方图统计分析。对于能量比特征图象,由

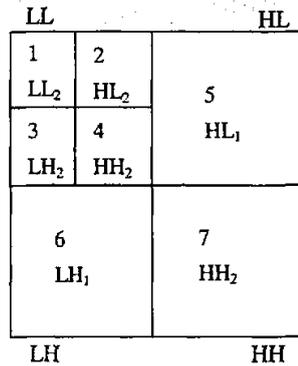


图 4-3 2 级小波分解图

于图象的纹理区域高频成分较多,因此能量较大,表现在特征图象上为暗区;平滑区域的低频成分较多,因此能量较小,表现在特征图象上为亮区。对于方差特征图象,图象的边缘区域对应于较大的方差,非边缘区域对应于较小的方差。在灰度直方图统计时,特征图象必然存在一个波谷,在波谷处选择一灰度阈值则可将特征图象二值化,特征图象的暗、亮区域分别对应着二值图象的黑、白部分。对于比较平滑的图象可以采取这样的方法分为两类,但对于纹理比较复杂的图象,用特征空间聚类法把相应的特征图象按照纹理复杂度,边缘强弱分成需要的类别。但是在聚类分割算法中,初始值的选择是随机的。这样很容易使分割结果陷入局部最优解,尤其是对硬聚类算法,如果初始值选择的偏差较大,将会导致错误的分割结果。下面根据一种初始值优选法^[38]选择初始化聚类中心,可以在很大程度上避免陷入局部最优解且计算简便、适用面广。

基于灰度直方图,用像素点较多的灰度值,即选择直方图的峰值对应的灰度值作为初始聚类中心,但是各峰周围常常参差不齐,出现许多毛刺,如果简单地选择像素点最多的 C 个灰度值作为初始聚类中心,很可能致使各初始值集中在一个峰周围,未能达到优化初始值的目的。同时注意到:一类像素总占有一定的范围,其各峰之间存在一定的间隔,所以提出的初始值优选法步骤如下:

- (1) 计算特征图象的灰度直方图 $h(i), i = 0, 1, \dots, 255$ 。
- (2) 取合适的 θ , 将直方图分为 $256/\theta$ 段。
- (3) 将直方图各段的 $h(i)$ 排序, 选出各段的峰值 h_1, h_2, h_3, \dots 。
- (4) 将 h_i 按大小重新排序, 取前 C 个灰度值 h_1, h_2, h_3, \dots 。
- (5) 将 h_1, h_2, h_3, \dots 作为初始化聚类中心。

实验采取 K-均值聚类方法对“Lena”图象的能量比特特征图象按照纹理度分为 3 类,对方差特征图象按照边缘强弱分为 2 类。对任何灰度图象可以根据视觉效果分为不同的类别数。

K-均值聚类方法是要最小化如下的指标:

$$E = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in Q_i^i} \|g(x) - u_j^{i+1}\|^2 \quad (4.9)$$

其中, Q_i^j 代表第 i 次迭代后赋给类 j 的像素集合, u_j 表示第 j 类的均值, 该式给出了每个像素与其对应类均值的距离和, h_1, h_2, h_3, \dots 为初始类均值, 即为 u_j^1 。

4.3.4 自适应性阈值选取

对能量比特特征图象, 我们应用 K-均值聚类方法将其划分为强纹理和弱纹理; 对方差特征图象, 将其划分为强边缘和弱边缘。从而结合 HVS, 根据宿主图象每个转换块对应的能量比特特征图象和方差特征图象中的像素值的类别来自适应性地选取决定对应子块零子树个数的阈值 T_3 。例如:

IF 块为强纹理块

$$\{ \text{IF 块为弱边缘块 } T_3 = I_{LL3} \times 2^{-1} \text{ ELSE } T_3 = I_{LL3} \times 2^{-2} \}$$

ELSE

IF 块为弱纹理块

$$\{ \text{IF 块为弱边缘块 } T_3 = I_{LL3} \times 2^{-4} \text{ ELSE } T_3 = I_{LL3} \times 2^{-5} \}$$

ELSE

$$\{ \text{IF 块为弱边缘块 } T_3 = I_{LL3} \times 2^{-3} \text{ ELSE } T_3 = I_{LL3} \times 2^{-4} \}$$

这里 I_{LL3} 为 LL_3 子带的系数。

4.4 自适应性盲水印算法实现

一、水印嵌入

水印嵌入的具体步骤如图 4-4 所示:

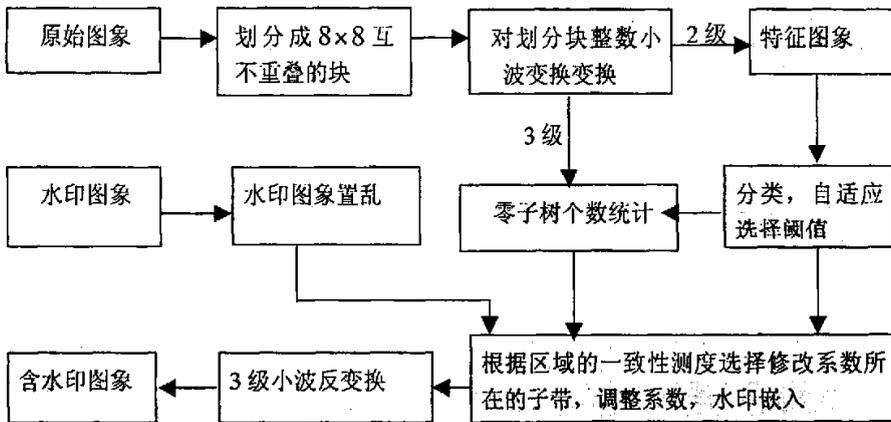


图 4-4 水印的嵌入框图

(1) 小波变换: 把原始图象分成大小为 8×8 互不重叠的子块, 对每个子块用提升策略作三级离散小波变换, 并将变换系数按图 3-1 所示的树结构存放。

(2) 分类: 计算各个子块的能量比和方差特征参数, 存入特征图象, 根据纹理复杂度和边缘强度进行分类。

(3) 确定阈值 T_3 : 根据每块的分类情况确定相应块决定零子树的阈值。

(4) 根据每块的阈值 T_3 统计各个子块的零子树个数。

(5) 水印图象置乱: 读水印图象, 做 Arnold 13 次变换。

(6) 调整宿主图象的每个子块零子树的个数来嵌入水印。调整的原则是: 假如子块的零子树的个数为偶数, 若要嵌入的水印位为 1, 调整子块的小波系数直到该子块的零子树的个数为奇数; 若要嵌入的水印位为 0, 则系数值不变。同理, 假如子块的零子树的个数为奇数, 若要嵌入的水印位为 0, 调整子块的小波系数直到该子块的零子树的个数为偶数; 若要嵌入的水印位为 1, 则系数值不变。

为了增加水印的隐蔽性, 系数的改变不是固定在低频、中频或高频, 而是根据零子树的分布情况和区域的一致性测度来确定。原始图象划分块 3

级小波分解后, 构成如图 3-1 所示的 3 个子带组 (LH_3, LH_2, LH_1) , (HL_3, HL_2, HL_1) , (HH_3, HH_2, HH_1) 。统计各个子带组的零子树的个数, 它们的和就是整个变换块的零子树个数。具体做法是: 对于 T_3 , 如果 $T(0,1)='ZTR'$ & $T(1,0)='ZTR'$ & $T(1,1)='ZTR'$, 改变 LH_3, HL_3, HH_3 任何一个子带的系数使其绝对值大于 T_3 , 这样减少了一个大的零子树的同时增加了 3 个小的零子树, 零子树个数的奇偶性因此就发生了改变。否则 $T(0,1), T(1,0), T(1,1)$ 至少有一个不是零子树, 又因为视觉的方向敏感性不同, 即人眼对水平和垂直方向的敏感度大于对对角方向的敏感度, 所以依据这样的次序选择不是零子树的子带, 根据尺度 2 的 T 数组元素的取值情况调整尺度 2 和同一方向上尺度 1 的系数, 调整系数的原则是该系数和相应的 T_2 或 T_1 的距离最小。按以下方式修改系数 $C_k, k=1, 2, k=1$ 表示尺度 1, $k=2$ 表示尺度 2, $k=3$ 表示尺度 3。

$$C_k = \begin{cases} T_1 + C_k \times 0.01 & C_k > 0, k=1 \\ T_2 + C_k \times 0.01 & C_k > 0, k=2 \\ T_3 + C_k \times 0.01 & C_k > 0, k=3 \\ -T_1 + C_k \times 0.01 & C_k < 0, k=1 \\ -T_2 + C_k \times 0.01 & C_k < 0, k=2 \\ -T_3 + C_k \times 0.01 & C_k < 0, k=3 \end{cases} \quad (4.10)$$

对于 LH_3, HL_3, HH_3 子带的选择根据 LH_1, HL_1, HH_1 区域一致性测度^[40]。区域的一致性测度就是对区域内特征是否存在差异的度量。如果区域内特征是一致的, 就认为是平滑区; 如果特征有差异, 则判断是边缘区。

定义: 对于邻域 $R = \{(i, j) \mid |i - c_i| \leq L, |j - c_j| \leq L\}$, (c_i, c_j) 是邻域中心像素点, L 是邻域的长度, 取过中心点 (c_i, c_j) 以方向 $\theta_k (0 \leq \theta_k \leq 180, k=1, 2, \dots, N)$ 将 R 划分为两半 S_1 和 S_2 , 如图 4-5 所示, 令

$$g_{S_1} = \sum_{(i,j) \in S_1} g_{ij} \quad g_{S_2} = \sum_{(i,j) \in S_2} g_{ij} \quad g_\theta = |g_{S_1} - g_{S_2}| \quad (4.11)$$

其中 g_{ij} 是像素点 (i, j) 的灰度值, 将 l 绕 (c_i, c_j) 从 0 旋转到 180, 得到 N 个方向 θ_k 的划分结果, 每一次划分得到一个 $g_{\theta_k}, k=1, 2, \dots, N$, 令

$$R_h = \max_k g_{\theta_k}, k=1,2,\dots,N \quad (4.12)$$

R_h 的值可以反应区域内特征是否一致，也就是存在边缘的可能性。若 (c_i, c_j) 处在平滑区内， l 的 N 个方向都是将同一个区域划分为两半，其 g_{θ_k} 都比较小，从而 R_h 的值也就比较小；若 (c_i, c_j) 是有效边缘点， R_h 的值也就比较大。实验针对 LH_1, HL_1, HH_1 子带，根据图 4-6 所示 l 的旋转图示，从位置 ① 顺时针旋转到位置 ⑧ 分别计算它们的一致性测度，即各自的 R_h 值，按从小到大排序，若哪个子带的 R_h 最大，就选择尺度 3 相应的子带修改系数。

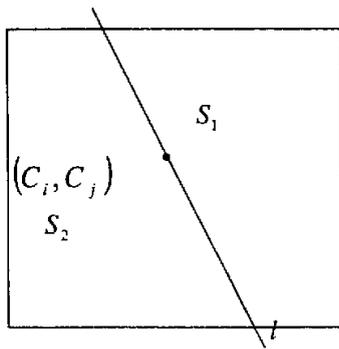


图 4-5 邻域划分图

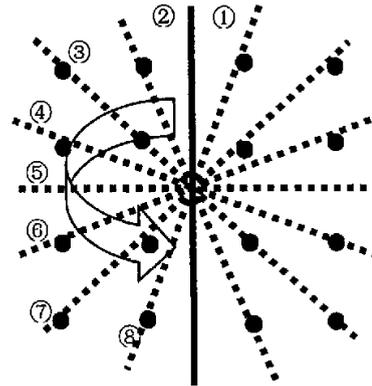


图 4-6 子带子带 HL_1, LH_1, HH_1 的 4×4 矩阵的 l 划分旋转图

(7) 存贮各个变换块的阈值 T_3 ，对调整过系数的变换块进行 3 级整数小波反变换，得到含水印的图像。

二、水印提取

水印提取得具体的步骤如图 4-7 所示：

水印的提取不需要原始图象，同样把含水印图象分成大小为 8×8 互不重叠的块，对每个子块进行和嵌入算法相同的 3 级离散整数小波变换，根据每块嵌入算法决定的阈值来统计该子块对应的零子树的个数，如果零子树的个数为奇数，水印位为 1；如果零子树的个数为偶数，水印位为 0。因为嵌入算法中，水印信号在嵌入前进行了 Arnold 置乱，所以对提取的水印信号要反置乱，即再进行 11 次 Arnold 变换，两次变换的次数之和为 $N = 32$

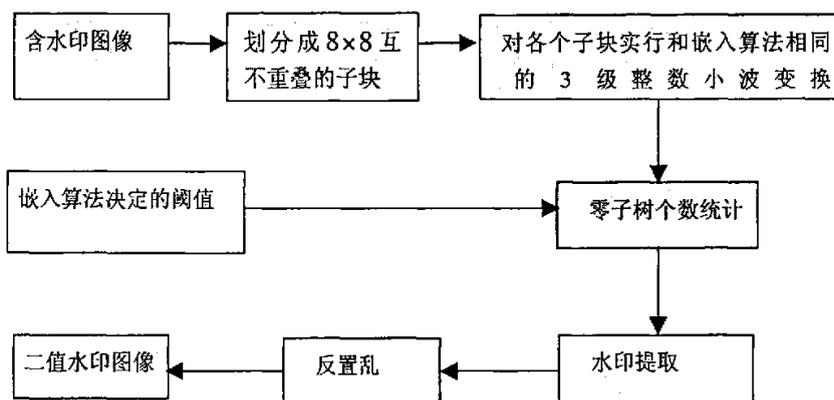


图 4-7 水印的提取框图

对应的周期 24，最后得到含水印的图象。

4.5 实验结果及分析

为检验上述算法的有效性，采用大小为 256×256 的灰度级图象“Lena”图象作为原始图象，采用大小为 32×32 的黑白二值商标图象作为水印图象。同样，通过定性观察和峰值信噪比 (PSNR) 来评价水印嵌入过程造成的图象失真；用提出的水印图象和原始水印图象的相关系数来衡量它们的相似性。

计算所得 $PSNR = 43.48db$, $NC = 0.98$ 。



(a) 宿主图象



(b) 分块 3 级整数小波变换图象

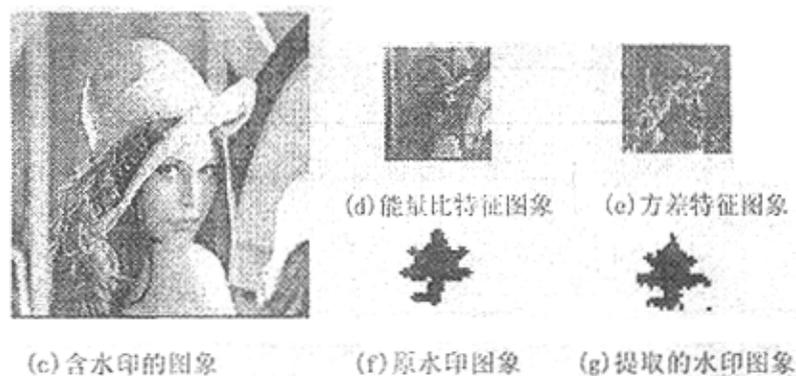
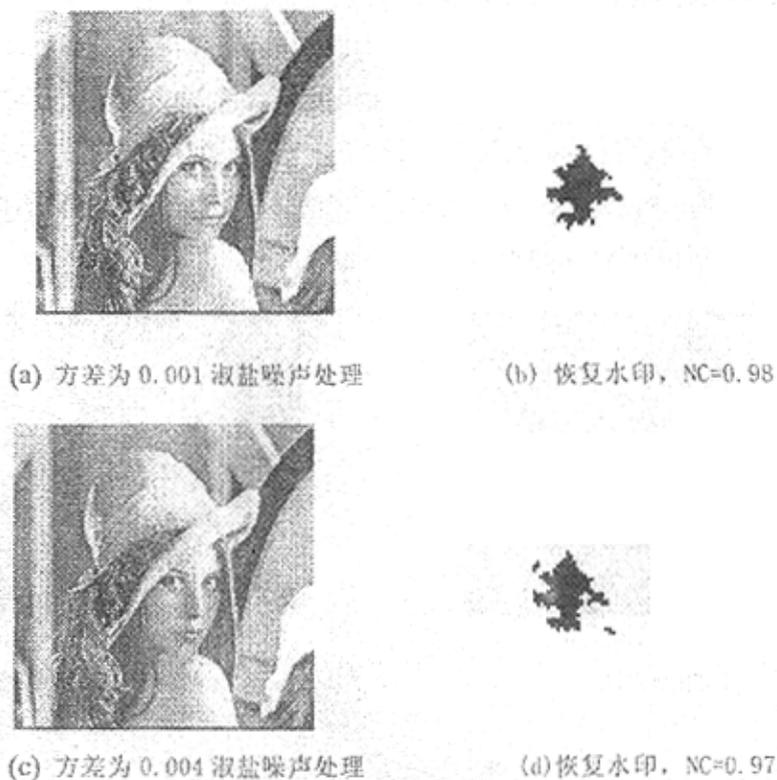


图 4-8 实验图象: (a) 宿主图象 (b) 分块 3 级整数小波变换图象 (c) 含水印的图象 (d) 2 级整数小波变换得到的能量特征图象 (e) 2 级整数小波变换得到的方差特征图象 (f) 商标作为的原水印图象 (g) 提取的水印图象

(1) 椒盐噪声攻击, 实验结果如图 4-9 所示。





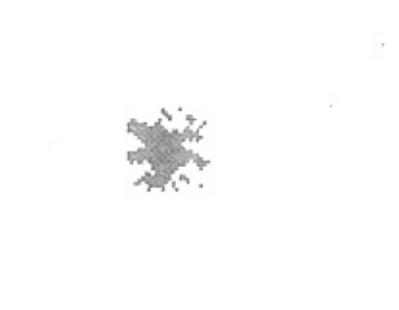
(i) 方差为 0.007 椒盐噪声处理



(j) 恢复水印, NC=0.95



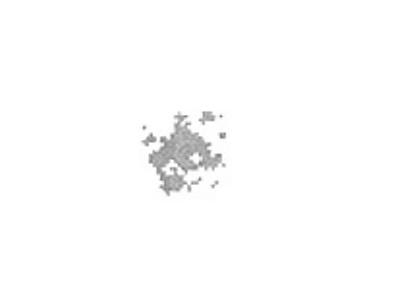
(l) 方差为 0.009 椒盐噪声处理



(m) 恢复水印, NC=0.89



(n) 方差为 0.01 椒盐噪声处理



(o) 恢复水印, NC=0.89

图 4-9 椒盐噪声攻击测试图

由图 4-9 可见,当方差 ≤ 0.007 的时候,水印的提取结果是比较理想的;当方差加大到 0.01 的时候,提取出的水印才受到比较严重的干扰,但仍然可以分辨,但此时椒盐噪声的攻击已经很明显了。

(2) 高斯白噪声攻击, 实验结果如图 4-10, 4-11 所示。



(a) 方差为 0.00001 高斯白噪声处理 (b) 恢复水印, NC=0.98

图 4-10 高斯白噪声攻击测试图

下图 4-11 显示了算法抵抗高斯白噪声的结果图形:



a. 方差=0.000001 NC=0.98 b. 方差=0.000003 NC=0.98 c. 方差=0.000009 NC=0.98



(d) 方差=0.00002 NC=0.96 (e) 方差=0.00003 NC=0.96 (f) 方差=0.00004 NC=0.93

图 4-11 抵抗高斯白噪声的水印检测结果图象

由图 4-11 可见, 算法可以抵抗方差 ≤ 0.00004 的高斯白噪声。

(3) 压缩攻击, 图 4-12 给出了抵抗 JPEG 压缩攻击实验结果。



(a) 质量因子 99%



(c) 质量因子 97%



(b) 恢复水印, NC=0.98



(d) 恢复水印, NC=0.98



(e) 质量因子 93%



(g) 质量因子 90%



(f) 恢复水印, NC=0.90



(h) 恢复水印, NC=0.88

图 4-12 压缩攻击测试图：上为压缩攻击图，下为提取的水印图

(4) 剪切攻击，实验结果如图 4-13 所示。



图 4-13 剪切攻击测试图

在充分考虑图象特征的基础上，结合人眼对纹理、边缘、以及频率的不同敏感性，针对水印强度和水印位置提出了一种自适应性的盲水印算法，实验结果表明，该算法取得了比上一章算法更好的结果，不仅保证了原始图象的视觉质量，水印的提取也更精确。

实验发现，相对于上一章的算法新的算法对于椒盐噪声和剪切攻击有很好的鲁棒性；对高斯白噪声的鲁棒性相比要差一些；对 JPEG 压缩也有一定的抵御能力，但对非线性攻击缺乏鲁棒性。

5 总结和展望

5.1 本文的主要工作总结

随着网络的发展,网上传输的数字产品的版权问题日益受到人们的关注,数字水印作为版权保护的有效手段和方法,得到了深入的研究和广泛的应用。水印技术的基本思想是利用水印的一些特别的性质如不可见性和不可移除性在图象中隐藏特定的标识,本文提出了一种基于 EZW 和整数小波变换的盲水印算法。针对水印强度、小波系数所在子带的选择以及要更改的小波系数的个数都是根据各个子块的图象特征,并结合 HVS 特性自适应性的选择,实验结果表明该算法具有良好的鲁棒性,能够抵挡各种常见的处理操作(噪声和剪切攻击)和图象压缩处理技术的攻击,嵌入水印后对原始图象的影响较小,人眼几乎无法感觉出图象质量的变化。并利用置乱技术增加了水印的隐蔽性。

5.2 本文研究存在的问题

由于时间仓促,本文还存在着一定的不足,主要集中于以下几个方面:

(1) 由于小波变换不具有旋转、缩放不变性,该水印算法抗几何攻击的能力不是很好,有待进一步的研究。

(2) 算法的某些参数,对不同的图象要作相应的一些手工调整。

(3) 算法在突出嵌入过程自适应性的同时,增加了检测过程的难度,所以即使在正确嵌入的情况下,水印并不能完全可靠的提取。算法可以在进一步研究人类视觉系统特性的基础上,找出更合适的对图象块的划分标准和调整策略。

5.3 进一步的研究方向

数字水印技术涉及到众多的学科领域，但是到目前为止，还没有形成一个完整而系统的理论体系。其系统性能的提高不仅是嵌入算法的改进，还包括检测过程可靠性的提高。数字水印技术今后可能的研究方向为^{[40][41]}：

(1) 攻击性等特性的研究：结合数字信号处理技术，寻找出它们之间的关系，从而发现更好的数字水印技术。

(2) 基于特征的数字水印技术：因基于统计特征的数字水印技术容易受到非线性等变换方法的攻击，而基于图像高层特征的数字水印技术如基于边界信息等则具有较好稳健性，因此可能成为今后的研究重点。

(3) 公钥数字水印系统：使用一个专有的密钥来叠加水印信号，任何人都可通过一个公开的密钥来检测出水印信号，但是用公开的密钥来推导专有密钥和用公开的密钥来去除水印信号这两个过程都非常困难。目前，该领域还未取得突破性进展。

(4) 数字水印代理(Agent)：其核心思想是将数字水印技术与 TSA (trusted spotting agent)相结合。这种数字水印代理在网络上的服务器之间漫游，扮演着基于数字水印检测、验证和追踪非法拷贝的侦探角色。

(5) 目前其它的数字水印技术，如对基于图形、矢量图和动画等媒体的数字水印技术研究的比较少。

(6) 由于 MPEG-4 及 JPEG2000 压缩标准的公布，小波已成为其核心技术，基于小波域的水印算法也越来越多，但单纯基于包括小波变换在内的各种时频分析的水印算法，如果不辅以其它改进措施，很难抵抗剪切、旋转、放缩等几何攻击。当然抵抗几何攻击是所有水印算法面临的共同的难题。如何利用图象小波变换系数统计分布特性，开发大容量鲁棒性好的实用性盲数字水印是一个好的研究方向。

致谢

本文能够顺利完成，是在导师张二虎教授的悉心指导下取得的。张老师在论文写作的每一个阶段都给了我不少的启发和教诲，使我受益匪浅。是张老师带领我进入了这片神奇的乐土，使我在其中痴迷、陶醉。不仅仅在学术上，张老师传授给我知识，在生活和工作当中，张老师更是教育我如何为人处事。在此，谨向我的导师致以最衷心的感谢，感谢导师将我引入了图象处理这个色彩缤纷的领域，给我提供了良好的学术环境和条件以及多年来的关心和指导。

硕士研究生学习期间，得到了学友黄淑英、陈世雷、谢庆丰、邱明、胡娟丽、胡军洲、段刚龙、师弟鲁继文、师妹强微以及理工大教 3 楼 615 研究室全体成员的关心与帮助，在此表示感谢。

感谢我的爱人曲国福和女儿曲方莹在我读硕士期间给予的关心和支持。

最后，我要将真诚的谢意敬献给每一个给予我极大理解、支持与关怀的老师，亲人和朋友。

由于作者水平有限，文中的差错和疏漏在所难免，敬请各位专家和同行批评指正，本人不胜感激。

参考文献

- 【1】Bruce Schneier. Applied cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C. John Wiley&Sons, Inc., 1996.
- 【2】Man Young Rhee. Cryptography and Secure Communication, McGraw-Hill Book Co., 1994.
- 【3】Neal Koblitz, A Course in Number and Theory and Cryptography. Springer-Verlag, 世界图书出版公司, 1990.
- 【4】Fabien A.P. Petitcolas, Ross J. Anderson and Markus G. Kuhn. Information Hiding-A Survey, Proc. of IEEE, 87(7) 1999:1062-1078.
- 【5】Lei Tang, Methods for Encrypting and Decrypting MPEG Video Data Efficiently In Proceedings of the ACM Multimedia 96, Boston, Nov., 1996:219-229.
- 【6】C. Shi and B. Bhargava. Light-weight MPEG Video Encryption Algorithm. In Proc. of the Int'l Conf. on Multimedia'98, New Delhi, India, Jan., 1998:55-61.
- 【7】Lintian Qiao, Klara Nahrsted, Comparison of MPEG Encryption Algorithms. Computer& Graphics, Vol:22, Iss:4, 1998:437-448.
- 【8】Q Ruanaidh J, Dowling W J, Boland F M. Watermarking digital images for copyright protection. In: IEEE proceeding on Vision, Signal and Image Processing, 143(4), Aug., 1996:250-256.
- 【9】Voyatzis q, Nikolaidis N, Pitas I. Digital watermarking: an overview. In: 9th European Signal Processing Conference, Island of Rhodes, Greece, 1998: 9-12.
- 【10】Jiri Fridrich. Applications of data hiding in digital images. In: the ISPAC'98 Conference in Melbourne, Australia, Nov., 1998.
- 【11】Mahalingam Ramkumar. Data hiding in multimedia-theory and applications. [Ph.D. Degree], New Jersey, Department of Electrical and Computer Engineering, New Jersey Institute of Technology, 1999.
- 【12】Cox I J, Matt L Miller. A review of watermarking and the importance of perceptual modeling. In: SPIE Proceeding on Human Vision and Electronic Imaging, 1997:3016-9299.
- 【13】刘振华,尹萍编著,信息隐藏技术及其应用.科学出版社, Feb. 2002.

- 【14】 R. G. van Schyndel, A. Z. Tirkel and C. F. Osborne. A Digital Watermark. in Int. Conf. Image Processing, VOL:2, 1994: 86-90.
- 【15】 W. Bender, D. Gruhl and N. Morimoto. Techniques for data hiding. in Proc. SPIE. Vol:2420, Feb. 1995:40.
- 【16】 黄继武, SHI YunQ, 等. 基于块分类的自适应图象水印算法. 中国图象图形学报, 4(8), 1999:640-643.
- 【17】 Ingemar J. Cox, Thomson Leighton and Talal Shamoan, Secure Spread Spectrum Watermark for Multimedia. IEEE Transaction on Image Processing, VOL:6, Dec. 1997:1673-1687.
- 【18】 Hsu C-T, Wu J-L. Hidder signature in images. Proc of ICIP, Mar., 1996:223-226.
- 【19】 牛夏牧, 陆哲明, 等. 彩色数字水印嵌入技术. 电子学报, Vol:28, No. 9, 2000:10-12.
- 【20】 J. J. K. O. Ruanaidh. Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking. Signal Processing, Vol: 66, no. 3, May, 1998:303-318.
- 【21】 J. oe Ruanaidh, WJ. Dowling and F. M. Boland. Phase watermarking of digital images. In Proceedings of ICIP' 96, vol. 3: 239-242.
- 【22】 Kundur D, Hatzinakos D. Digital watermarking based on multiresolution wavelet data fusion. Proc, ICIP[C], 1997(1):544-547.
- 【23】 Wang. H. -J., C. C. J. Kuo. Image Protection via Watermarking on perceptually Significant Wavelet Coefficients. in Proceedings of the IEEE Multimedia Signal Processing Workshop, vol. 1, Santa Barbara, California, Dec. 1998: 278-284.
- 【24】 R. L. Pickholtz, D. L. Schilling and L. B. Milstein. Theory of Spread-Spectrum Communications--A Tutorial. In IEEE Trans. Comm., vol. COM-30, no. 5, May 1982: 855-884.
- 【25】 Cox I J, Killian J, Leighton T, Shamoan T. Secure spread spectrum watermarking for images , audio and video. In: Pro. IEEE ICIP (Int. Confon Image Processing), Lausane, Switzerland, Mar. 1996: 243-246.
- 【26】 Sweldens W. a custom-design construction of biorthogonal wavelets. Appl Comp Harm Anal, 1996(3):186-200.
- 【27】 Daubechies I. Ten Lectures on Wavelet//CBMS-NSF Regional Conf Series in Appl Math. Philadelphia, SLAM, 1992.
- 【28】 Sataporn Schwindt , Tjumrongrat Amornraksa. Raw speech based

- digital watermarking using zerotree of DWT.
<http://www.kmutt.acth/itc2002/cd/pdf>.
- 【29】 S.Panyapolsakul, T.Amornraksa. Improved Performance of Zerotrees based digital watermarking. www.kmutt.acth/itc2002/cd/pdf/18_07_45/ta2-0a/5.pdf.
- 【30】 黄继武, SHI YunQ, 姚若河. 基于分块的自适应图像水印算法. 中国图像图形学报, 1999, 4(8):640-643.
- 【31】 J.F. Delaigle, C.Devleeschouwer, B.Macq, L. Langendijk. Human visual system features enabling watermarking. Multimedia and Expo, 2002. ICME '02, Proceedings. 2002 IEEE International Conference on, Vol.2, Aug. 2002:489-492.
- 【32】 Choong-Hoon Lee, Hwang-Seok Oh, Yunju Baek, Heung-Kyu Lee. Adaptive digital image watermarking using variable size of blocks in frequency domain. TENCON 99. Proceedings of the IEEE Region 10 Conference, Vol. 1, Sep.1999:702-705.
- 【33】 Wen jun Zeng, Shawmin Lei. Digital watermarking in a perceptually normalized domain. Signals, Systems, and Computers, 1999, Conference Record of the Thirty-Third Asilomar Conference on, vol.2, Oct. 1999: 1518-1522.
- 【34】 O-Hyung Kwon, Young-Sik Kim, Rae-Hong Park. Watermarking for still images using the human visual system in the DCT domain. Circuits and Systems, 1999 ISCAS '99. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on, Vol.4, Jun. 1999: 76 - 79.
- 【35】 张华熊, 仇佩亮. 置乱技术在数字水印中的应用. 电路与系统学报, Vol. 6, No. 3, 2001, 9.
- 【36】 Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: The

- wavelet representation. *IEEE Trans PAMI*, 1989, 11(7):674-693.
- 【37】陈哲, 冯天瑾。基于小波分形特征提取的图象分割方法. *中国图象图形学报*, Vol. 4(A), No. 12, 1999, 12.
- 【38】杜干, 孙肖子。医学图像分割的神经网络方法. *西安电子科技大学学报*, Vol. 25, No. 5, Oct. 1998.
- 【39】杨 N, 杨德群。基于区域一致性测度多尺度边缘检测方法. *自动化学报*, Vol. 25, No. 6, 1999, 11.
- 【40】M. Maes, et al. Digital watermarking for DVD video copy protection. *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 17, Sept. 2000: 47-57.
- 【41】M. Bami, F. Piva, Digital watermarking of visual data: state of art and new trends. *EUSIPCO 2000*, CD-ROM ThupmPmSS2, Tampere, Finland, Sept. 2000.
- 【42】Chuan-Fu Wu, Wen Shyong Hsieh. Digital watermarking using zerotree of DCT. *IEEE Trans on consumer electronics*. Vol. 46, No. 1, Feb. 2000.
- 【43】Houng-Jyh Mike Wang, Po-chy su, C. -C. Jay Kuo. Wavelet based digital watermarking. *Journal of Optics Express*. Vol. 3, No. 12, Dec. 1998:491-496.
- 【44】Craver S, Memon N, Yeo B et al. Can invisible watermarks resolve rightful ownerships?. In: *SPIE Electronic Imaging: Storage and Retrieval of Image and Video Databases*. 1997, 30(22):310-321.
- 【45】Craver S, Memon N, Yeo B et al. Resolving rightful ownerships with invisible watermarking techniques: Limitations, attacks, and implication. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*. 1998, 16(4):573-586.

- 【46】 Zeng W J, Liu B. A statistical watermark detection technique without using original images for resolving rightful ownership of digital images. IEEE Trans Image Processing, 1999, 8(11):1534-1548.
- 【47】 Barni M, Bartolini F, Cappellini V et al. A DCT domain system for robust image watermarking. Signal Processing, 1998, 66(3):357-372.
- 【48】 Podilchuk C I, Zeng W. Image-adaptive watermarking using visual models[J]. IEEE Journal on Special Areas in Communications, 1998, 16(4):525-539.
- 【49】 Kwo H, Feng J. New hexagonal watermark embedding in wavelet domain[A]. Proceedings of 2001 International Symposium on Intelligent Multimedia, Video and Speech Processing [C]. Hong Kong: [s.n], 2001:75-78.
- 【50】 Tsekeridou S, Pitas I. Embedding self-similar watermarks in the wavelet domain[A]. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'00) [C]. [s.l]:IEEE, 2000:1967-1970.
- 【51】 Barni M, Bartolini F, Arni M, Pina A. Improved wavelet-based watermarking through pixel-wise masking[J]. IEEE Transactions on Image Processing. 2001, 10(5): 783 - 791.

攻读硕士学位期间公开发表的论文

- 【1】 赵凡. 一种基于边缘检测的视网膜图像的分割方法. 陕西工学院学报, 2003. 2.
- 【2】 赵凡. 彩色图象的一种小波去噪方法. 陕西工学院学报, 2004. 1.
- 【3】 赵凡. VISUAL FOXPRO 环境下一种串行通信软件的开发. 计量与测试技术, 2004. 4.
- 【4】 赵凡, 张二虎. 高精度智能仪器大范围测量中的数据解算方法. 航空计测技术, 2004. 6.
- 【5】 赵凡. 压阻式传感器的应变与温度交叉灵敏度分析. 仪表技术, 已录用.