

摘 要

数字水印作为信息隐藏技术的重要手段,在保护图像版权和信息安全方面得到了越来越多的应用,关于数字水印的研究也成为当今的一个研究热点。本文对目前比较典型的数字水印算法进行了分析,并对基于离散小波变换(DWT)和人眼视觉系统(HVS)的图像水印算法进行了研究。

在已有的研究中,基于人眼视觉系统特性的水印嵌入算法在计算 JND 门限值时,对频率、亮度和纹理掩蔽因子权值的计算仍不够理想,会因为单个掩蔽因子的取值误差而影响到整个嵌入系数的准确度,从而影响水印的嵌入效果。而基于 Arnold 置乱变换和 QR 分解的水印预处理方法,往往只有单个密钥,导致水印的安全性不能得到很好的保障。

针对上述问题,本文对人眼视觉系统 JND 门限值的计算方式进行了改进,能够更加准确地计算出水印的嵌入系数。同时在对水印的预处理方法上,先对水印进行 QR 分解,得到正交矩阵和上三角矩阵,再采用 Arnold 变换将这两个矩阵分别进行置乱,产生了双密钥,由此解决了单个密钥时,安全性不高的问题。

最后将原始图像进行离散小波变换,并把置乱后的水印信息分别嵌入到小波变换域的低频和对角方向上。在仿真实验中,对含水印图像进行了旋转、滤波、加噪、压缩、剪切等攻击实验。结果显示,本文研究的算法与其他方法相比具有更好的鲁棒性。

关键词:离散小波变换;预处理;数字水印;人眼视觉系统

ABSTRACT

As an important means of information hiding technology, digital watermarking has been more and more used in image copyright protection and information security, meanwhile research on digital watermarking is a hot topic today. In this paper, the current typical digital watermarking algorithm is analyzed, and the image watermarking algorithm which is based on Discrete Wavelet Transform (DWT) and the Human Visual System (HVS) is studied.

In the existing studies, while calculating the JND threshold, the watermark embedding algorithm which is based on the characteristics of HVS can't choose the best weights of masking factor on the frequency, intensity and texture. Meanwhile, the error of a single masking factor will affect the accuracy of the embedded coefficients degree, and affect the embedding effect. The watermark preprocessing method based on Arnold scrambling transformation and QR decomposition often only has a single key, leading to the security of the watermark can not be well protected.

For these problems, in this paper the calculating method of JND threshold of Human Visual System is improved to calculate the embedding coefficients more accurately. Meanwhile, to the pretreatment of the watermark, the watermark is QR decomposed into the orthogonal matrix and the upper triangular matrix firstly in this paper. And then the two matrixes are scrambled by the Arnold transform with double keys, which solved the problem that the security is not high of single key.

Finally, the watermark information matrix scrambled is embedded into the low frequency and diagonal direction of wavelet transform domain vector of the image which is discrete wavelet transformed. In the simulation experiment, there are several simulations of attacks taken to the watermarked image, such as rotating, filtering, adding noise, compression, shear and so on. The result shows that compared with other methods, the algorithm studied in this paper has better robustness.

Key Words: DWT; Preprocessing; Digital Watermark; Human Visual System

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 课题研究背景和意义	1
1.1.1 课题背景	1
1.1.2 课题研究的意义	1
1.2 数字水印技术的发展现状	2
1.3 本文的主要研究内容和结构安排	3
第 2 章 数字水印技术概述	5
2.1 数字水印的概念与特点	5
2.2 数字水印系统的基本模型	6
2.3 数字水印的分类	8
2.4 数字水印的典型算法	9
2.4.1 空间域水印算法	9
2.4.2 变换域水印算法	10
2.4.3 压缩域水印算法	14
2.4.4 生理模型算法	14
2.5 数字水印的应用	14
2.6 典型的数字水印攻击方法	15
2.7 评价数字水印算法的参考标准	17
2.8 本章小结	18
第 3 章 小波变换理论分析	19
3.1 小波变换的发展背景	19
3.2 小波变换的主要理论	19
3.2.1 小波变换的基本概念	20
3.2.2 小波变换的性质	21
3.2.3 多分辨率分析	22

3.2.4 常见的小波基	23
3.3 本章小结	25
第 4 章 基于人眼视觉特性的水印算法	26
4.1 人眼视觉的特性	27
4.2 传统的临界可见误差 JND 门限算法	28
4.3 改进后的 JND 门限算法	29
4.4 本章小结	29
第 5 章 数字水印的预处理	30
5.1 水印的置乱变换	30
5.2 水印的 QR 分解	31
5.3 传统的水印预处理方法	31
5.4 改进后的水印预处理方法	32
5.5 本章小结	34
第 6 章 基于 DWT 和 HVS 的图像水印算法及仿真	35
6.1 水印的嵌入过程	35
6.2 水印的提取过程	36
6.3 仿真实验与分析	37
6.3.1 实验平台	37
6.3.2 水印的嵌入提取实验	37
6.3.3 攻击实验	38
6.4 本章小结	45
第 7 章 总结与展望	46
7.1 论文总结	46
7.2 待解决的问题	46
致 谢	48
参考文献	49
攻读学位期间的研究成果	52

第1章 引言

1.1 课题研究背景和意义

1.1.1 课题背景

在如今计算机技术和互联网快速发展的时代中，应运而生的是大量的数字产品。数字产品在改善人们生活质量和水平的同时，也因其易于散播、复制和处理的特点，产生了严重的侵权问题，比如盗版、恶意破坏、信息更改等^[1]。其中，数字图像作为目前网络上主流的多媒体产品，更成为了盗版等行为的主要侵犯对象，不仅对版权所有者的利益造成了损害，也对使用者的权益造成了危害，因此必须加强对数字图像所有权的保护^[2]。

在以往的保护方法中，密码认证技术是比较常见的，它主要是对数字信息的具体内容进行保密，这样虽然在一定程度上可以解决数字产品的使用控制和传播安全问题，但是一旦密码被破解，被保护的内容就会泄露，所以该技术未能有效解决数字产品的版权以及完全性的保护等问题^[3]。

数字水印技术是一种将版权等标识数据加入到数字图像中，以达到保护图像版权和数据安全的方法。将标识数据隐藏在数字图像产品中，人们凭借肉眼识别不出它的存在，只能通过特殊的技术手段才能进行识别。当需要进行所有权分析的时候，就可通过对数字水印的提取，以及信息完整可靠性的检测，来判断该作品的归属权，以达到版权保护的目^[4]。

在研究和改进水印算法的过程中，要判断水印算法优劣的一个标准便是看它能否很好地解决水印不可见性和鲁棒性之间的平衡。由于图像、视频等多媒体都包含着大量视听上的冗余信息，结合人眼视觉系统的特性进行水印嵌入算法的研究，可以大大降低水印嵌入后对人类视觉的影响^[5]。所以，为了确定嵌入的位置和强度，在嵌入水印时可以充分结合人眼的视觉特性，这对增加数字水印的鲁棒性有着重要意义。

1.1.2 课题研究的意义

近年来,数字水印技术得到了快速发展,并且在实际生产中得到了越来越多的应用,带来了巨大的社会经济效益。

首先,在商业领域,数字水印技术已经得到了大量使用,其产生的经济价值是推动数字水印技术不断向前发展的一个很大动因。目前的数字水印系统有鉴别所有者系统、防盗版系统等;其次,在学术方面,数字水印技术涉及到多个领域,因此,对数字水印的研究不仅可以加强数字多媒体产品的版权和完全性的保护,还能给其它学科带来更新的研究内容,推动了这些学科的发展^[6-8]。

但是,数字水印技术依然有许多不足之处,还有许多值得研究的问题,鲁棒性、不可见性需要进一步加强,数字水印的软件化程度仍有待提高,同时需要向大容量、低复杂度的方向发展。这也是本课题研究的意义所在。

本研究在预处理中将 QR 分解后的水印矩阵进行置乱,然后在嵌入数字水印的过程当中用离散小波对原始图像进行变换,可以防止因 JPEG 等有损压缩造成的水印完全性的缺失。同时结合人眼视觉特性来量定水印嵌入的位置和强度,降低图像变化后给人类视觉上造成的差异感,从而提高了水印的鲁棒性,并兼顾了水印的不可见性。

1.2 数字水印技术的发展现状

现代数字水印技术早期研究的重点是数据隐藏,在设计上没有考虑被隐藏信息的鲁棒性,当受到各种攻击时,很容易遭到破坏。为了进一步发展数字水印技术,国际上陆续举行了一些会议,Cox 等人首次提出了变换域水印算法,该类算法是基于扩频数据交换的,具有良好的效果。在国外,许多国家对数字水印研究的时间相对较长,到了 20 世纪末期,国外一些公司开始销售水印产品,比如在 Photoshop 中加入了数字水印的检测功能,这使得水印技术得到了更便捷、更广阔地使用。随着所涉及的各个学科的发展,数字水印在版权追踪方面的优势慢慢突显出来,并发展成为一个热门的研究领域。

尽管数字水印技术在实际应用上取得了一定的进展,水印公司的成立也标志着数字水印技术所具有的实用性和商业性,但当今应用于商场上的一些水印产品仍不完善,安全性还不够,需要对数字水印技术和理论的进一步研究和探索,从而推动水印产业的发展。我国对数字水印技术的研究仍处于起步阶段,但是

越来越受到重视，许多科研机构都投入了越来越多的人力和费用。

近年来，数字水印技术开始在水印的嵌入过程中结合人眼视觉系统的特性。为了保证图像的视觉质量，可以通过人眼视觉系统的掩蔽因子计算出JND的门限值，以确定水印在原始载体图像中的最大嵌入强度，这样可以在确保不可见性的同时，实现水印最大容量的嵌入^[9]。

在对原始载体图像进行分解时，离散余弦变换和离散小波变换都得到了比较广泛的应用。两者相比，基于离散小波变换的数字水印算法的优势在于具有多尺度分析的特性，可以对图像进行多分辨率分解，以确定水印最佳的嵌入位置。离散小波变换的多分辨率特性能够充分结合人类视觉系统的特性，使得水印的鲁棒性和不可见性达到平衡。

在水印预处理技术方面，QR分解这一方法逐渐得到使用^[10]。基于QR分解的水印预处理方法的思想是将水印分解成两个矩阵，分别包含了水印的主要信息和细节信息，再将这两个矩阵分别嵌入到载体图像的不同位置内。这样不仅简化了水印嵌入的复杂度，同时由于将水印的主要信息单独进行处理，因此提高了水印的鲁棒性。

1.3 本文的主要研究内容和结构安排

本研究主要从两个方面着手：先对水印矩阵进行QR分解，得到两个矩阵分量，并在综合考虑了各种算法的置乱效果以及复杂度的大小之后，采用Arnold变换对QR分解后得到的两个矩阵分别进行置乱，并和已有的研究结果进行对比，判断改进方法能否进一步提高水印的安全性。同时从人眼视觉的角度进行分析，利用改进后的人眼视觉系统的JND模型的计算方法计算出小波系数，以确定水印嵌入的位置和强度。接着，在对原始图像进行离散小波变换之后，把QR分解后的水印信息分量分别嵌入其小波变换域的低频和对角方向上。最后，对嵌入水印后的图像进行了旋转、滤波、加噪、压缩、剪切等攻击实验，并将仿真结果与其他方法进行比较，以判断本文算法的优劣性。

本文的结构安排如下：

第一章：绪论，在阅读了大量关于数字水印发展背景和实际意义的文献之后，在本章介绍了本论文的研究背景和意义，以及数字水印技术的发展过程和现状，最后阐述了本论文的研究内容和结构安排。

第二章：阐述了数字水印技术的基本概念与特点，以及研究的理论基础，分析了典型的数字水印算法和分类，并列举了数字水印的应用领域和典型的攻击方法。

第三章：介绍了小波变换的基本理论，阐述了小波分析的发展过程，小波变换的基本概念，小波变换的性质和多分辨率分析等特点，以及小波变换在数字水印中的应用。

第四章：介绍了人眼视觉系统的特性和临界可见误差 JND 门限等基本理论，并根据已有方法提出了改进后的小波系数的计算方法，以更好地确定数字水印的嵌入位置和强度。

第五章：对原有水印预处理方法进行了改进，提出了新的预处理方法，进一步提高了水印的安全性，并通过仿真实验进行了验证。

第六章：对本文研究的水印嵌入算法进行了仿真实验，并对含水印的图像进行了多种攻击实验。通过峰值信噪比以及归一化互相关系数等参数来检测算法的有效程度。最后将仿真实验得出的数据与其它水印嵌入方法的实验结果进行对比，以判断本文算法的优劣性。

第七章：对本文工作进行了总结，同时也提出了目前本算法仍存在的问题，并展望了未来要做的改进。

第2章 数字水印技术概述

2.1 数字水印的概念与特点

数字水印一般是按照某种特定的算法,在不影响原多媒体产品使用的前提下,将水印信息加入到多媒体产品中。人类无法凭肉眼感知水印的存在,只能通过专门的检测工具才能将其提取或者检测出,从而达到对多媒体产品的版权认证和完全性保护的目的。

数字水印的主要特点如下:

1、安全性:为了保证完全性,从而更好地达到保护版权的目的,数字水印的嵌入算法应该具有一定的抗攻击能力,在某种程度上受到人为攻击时不会被破坏^[11]。当原始多媒体产品所含的数据被更改时,水印数据也要相应产生改变,只有通过这种方式才能依靠特殊方法检测出原始数据的改变^[12]。

2、隐蔽性:也称为不可见性。即数字水印与原始载体所含信息应该具有一致性,这样才能使水印数据不能被非法使用者提取出来^[11]。在选择版权保护标志时,应该根据原始载体的类型和特性进行选择,并利用所有者所给的密钥把水印数据隐藏到一串序列中。而以数字方式存储的可见标志主要用于声明通过模拟或者物理形式保存、公布的数据的归属权,如果使用可见标志进行保护,则极易被更改和去除^[13,14]。

3、鲁棒性:数字水印应该能抵抗一般的信号处理操作,如去除等攻击,并且能在经过各种操作之后,在某种程度上产生失真,但仍然能够保证信息的完全性和准确性^[11]。当遭遇到任何想要彻底破坏水印的行为时,载体图像会被严重破坏,使得载体信息无法使用,以达到判别更改破坏的目的。任何恶意更改和去除水印的操作都将严重破坏原始载体所含信息的完全性,除非已经对数字水印进行了深入分析和理解,在之前就获得了有关数字水印的大量信息。其中用于归属权鉴别和维护的数字水印一般称为鲁棒水印,因为用于归属权鉴别和维护的数字水印要有比较强的安全性和抗攻击能力,不仅要可以抵制一般的破坏,还要能抵制恶意的几何攻击。因为在实际应用中,水印很容易成为攻击者首选的攻击对象,要使水印的功能得到充分体现,就应该在嵌入之前增加水印

的抗攻击能力。鲁棒水印技术是将版权数据和所有权数据嵌入到原始载体所含的数据信息中,这样当无法判断所有权的归属时,多媒体作品中所含的鉴别信息就能发挥作用^[15,16]。

4、确定性:水印检测算法应该具有一定的可信度,也就是在检测水印的时候,要保证出现差错的几率足够小,如果过大的话,该水印算法就没有太大的使用性了。同时在实际使用过程中,由于很难保证完全无错,这又要允许某种程度上的差错,因此在使用之前就需要充分考虑到某些可能发生错误的情况,并加以改善,将差错降到最低。

5、低复杂性:衡量一个算法的优劣性,其中一个很重要的指标就是算法的复杂程度,如果复杂度过大,那么在运行过程中,带来的时间以及存储空间等的开销就会很大,这并不是理想的结果。水印算法也不例外,它的复杂度较低,因此被广泛使用。当使用 Matlab 进行图像处理时,由于该软件的处理能力十分强大,并且集合了大量的与图像处理有关的函数,从而简化了编码量,使得水印嵌入和提取时所写的代码量非常少^[17]。

在数字水印的几大特性中,最重要却又相互矛盾的两个特性分别是鲁棒性和隐蔽性。离散小波变换能够进行多分辨率分析,可以很好地结合人眼视觉系统(HVS)的掩蔽性,因此水印嵌入的位置和强度可以通过人眼视觉系统的 JND 模型来确定。这样既增强了水印的鲁棒性,又考虑到了隐蔽性,从而较好地解决了两个特性之间的矛盾。

2.2 数字水印系统的基本模型

数字水印技术的基本模型一般由以下三部分构成:水印的嵌入、水印的提取和水印的检测。

1、水印的嵌入过程

水印的嵌入是整个水印实际使用过程中最重要的阶段,该算法的优劣性,直接影响到之后的水印提取以及抗攻击的效果。在此阶段,输入的数据包括原始图像、水印以及嵌入密钥,这些数据在受到嵌入算法处理后,得到含水印的图像。文本、具体数值、多媒体图像等各种方式的数据都可以作为水印,但在嵌入过程中,需要使用不同算法进行实现,本文采用的是图像水印数据。

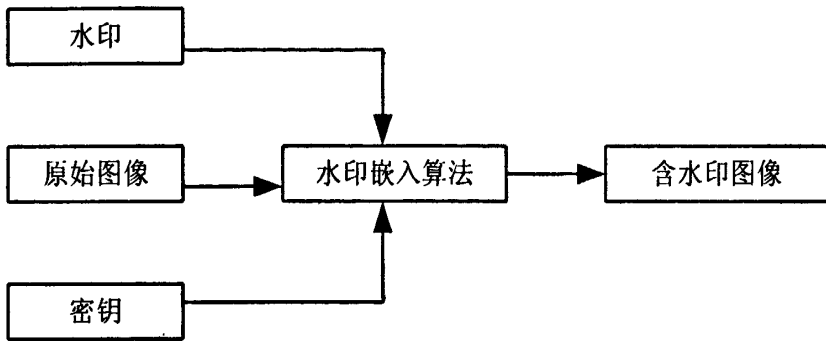


图2.1 水印的嵌入过程

2、水印的提取过程

水印的提取同样是重要的阶段，该过程可以恢复水印信息，是嵌入过程的逆过程，输入的数据包括待检测数据、公钥或密钥，还有原始数据。经过水印提取算法之后，水印信号将从嵌入水印的图像中分离出来，这时就要判断提取出的水印的完全性，从而进行所有权归属等问题的判断。

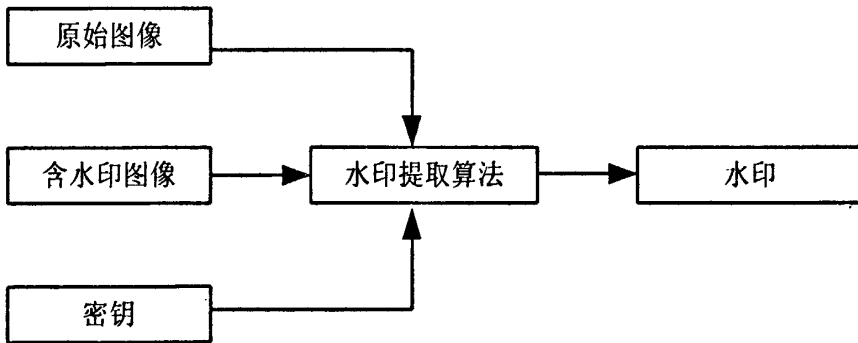


图2.2 水印的提取过程

3、水印的检测过程

该过程可以检测载体数据中是否含有水印，输入的数据包括待检测数据、公钥或密钥、原始数据以及原始水印，经过水印检测算法的检测，可以判断该多媒体数据中是否有水印信息存在。

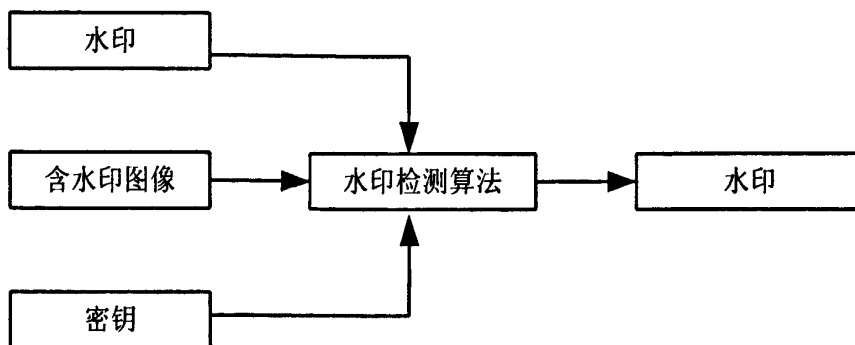


图2.3 水印的检测过程

2.3 数字水印的分类

目前数字水印有以下几种分类方式^[18]:

1、按水印的特性划分

在实际使用中往往要考虑到水印的特性,那么根据这些特性,数字水印可以分为脆弱水印和鲁棒水印。其中,鲁棒水印用得比较多,经常应用于标识多媒体产品的版权信息,要达到很好的识别效果,嵌入的水印信息要能抵抗更改等攻击处理。而脆弱水印则用来保护多媒体产品的完全性,与前者不同,脆弱水印很容易受到信号变动的影响,因此要知道数据信息是否被更改或破坏,可以通过脆弱水印来判断。脆弱水印也同样被广泛应用于日常生产以及商业等各个领域。

2、按水印的检测过程划分

检测过程是数字水印处理中非常重要的环节,所以根据检测过程,水印有明文水印和盲水印之分。其中要用到原始数据的是明文水印的检测,它的鲁棒性较强,能够较好地抵御各种恶意攻击;而盲水印的检测过程只需用到密钥,由于盲水印的信息量不大,所占用的存储成本相对较低,因此目前比较流行,也是大量水印算法研究的对象。

3、按水印嵌入的载体划分

在水印的使用过程中需要把水印嵌入到载体当中,那么根据嵌入载体的不同,水印可以被划分为文本水印、图像水印等。各种载体都有其自身的特性,

因此对于不同的载体应该选用适合的水印算法。其中图像水印在实际生产中使用的最多，也是目前得到最多研究和不断改进的一个分类。

4、按水印的嵌入位置划分

隐藏位置的选择在很大程度上决定了水印嵌入和抗攻击的效果，因此根据嵌入位置的不同，水印有时域、空域数字水印以及变换域数字水印之分。时域、空域水印都是将水印信息直接叠加在信号空间上；而变换域水印则是将水印信息隐藏在变换域上，那么在嵌入之前，就要对原始多媒体数据进行变换域的变换。

5、按水印所含信息划分

根据内容的不同，水印可以分为有意义水印和无意义水印。在有意义水印中，水印也是数字图像或者音频信息，而无意义水印则只是一串数字队列。前者的水印所含有的信息量比较多并且具有完整的意义，如果受到攻击等原因导致在解码时被损坏，仍能通过视觉判断其是否存在。而后者由于所含信息量较少而且排列形式单一，在受到攻击时很容易破坏原有的信息排列方式，导致水印无法识别。因此在实际生产中，以图像等形式表示的有意义水印使用得比无意义水印要广得多。

6、按水印实际使用划分

数字水印有着非常广的用途，那么根据用途的不同，有保护所有权水印、票据防伪水印和更改提示水印之分。其中票据防伪水印一般用于票据的打印和不同证件的防伪标识，而且当数字水印算法用于票据防伪时，必须能够达到快速检测，因此算法的复杂度要比较低。如今研究最热门的数字水印是保护所有权水印，很多数字产品在受到侵权时，可以借助数字水印来维护权益。更改提示水印是脆弱水印的一种，它能够在原始载体被破坏的时候，为了起到提示作用，使得水印信息也被破坏，从而达到检测原始载体是否完整的目的。

2.4 数字水印的典型算法

2.4.1 空间域水印算法

1、最低有效位算法(LSB)

为了保证水印的隐蔽性,该算法把数据嵌入数字图像空域中重要性最低的有效位上,由于在信息隐藏的过程中,对原始载体图像所作的改变很小,但是嵌入的水印信息的容量却比较大,因此能够简单地应用于音频和图像产品的信息隐藏处理。该算法将一幅大小为 $M \times N$ 的图像的最低有效位分成 $(M \times N)/(m \times n)$ 个大小为 $m \times n$ 的小块(算法的复杂度跟 m 和 n 的取值有关,多数情况下取 $m = n$),通过计算在 $(M \times N)/(m \times n)$ 个小块中有着不同值的相邻像素对的个数得到复杂度。当最低有效位的分块的值都为 0 或 1 时,则复杂度为 0,而当最低有效位的分块的值 0 和 1 交替分布时,复杂度取值为 $2(m^2 - m)$ 。例如取 $m = 4, n = 4$,则每个分块的大小为 4×4 ,可以计算出复杂度 δ 的大小为 $\delta \in [0, 24], \delta \in N$ 。图 2.4 是分解后的大小为 4×4 ,取值为 0 和 1 交替分布的最低有效位小块,因此复杂度的大小为 $24^{[19,20]}$ 。

0	1	0	1
1	0	1	0
0	1	0	1
1	0	1	0

图2.4 最低有效位分块

由于 LSB 算法是对图像等媒体的空域的最低有效位的像素进行交替,嵌入的水印数据极易被攻击而损坏,鲁棒性较差,因此使用得越来越少。

2.4.2 变换域水印算法

变换域水印算法的基本原理是在原始图像的变换域当中嵌入水印数据。在变换域中能够建立许多视觉模型,大部分信号处理也都能获得良好的解释,因此把水印数据嵌入到变换域中,可以提高数字水印的抗攻击性能。使用变换域算法,水印信息的能量可以分布在空域的全部像素上,这样可以增强水印的隐蔽性,在编写水印嵌入代码时可以较好地结合人眼视觉系统(HVS)的频率掩

蔽等特性，以产生更好的视觉质量。由于变换域算法与多媒体数据压缩国际标准相兼容，因此可以在压缩域内进行编码。

1、离散余弦变换DCT

离散余弦变换是一种正交变换，它具有较强的能量集中性，大部分信号的主要能量集中在离散余弦变换后的低频部分，同时由于它结合了 JPEG 压缩标准，所以基于 DCT 的算法具有较强的抗 JPEG 压缩的特性^[21-23]。有以下几种常见的基于 DCT 的水印算法：

文献[24]、[25]中的水印嵌入算法认为要保证水印的鲁棒性，就应该将其加在图像的视觉敏感位置 DC 分量上，也就是把水印数据加入到 DCT 的低频系数当中。

文献[26]、[27]中提出要保证较好的鲁棒性，应该把水印数据加在 DCT 域的中频系数中。这种方法的优点在于既可以降低嵌入的水印数据对原始图像在主观视觉上的影响，又能有效地抵抗有损压缩给水印信息造成的破坏。

而文献[28]中的思想是把水印数据嵌入到 DCT 域的中低频系数上，这样当图像受到攻击而失真时，仍能保留主要的水印信息，具有更好的鲁棒性。

2、离散小波变换DWT

在图像处理中使用小波变换的目的是通过多分辨率分析来分解图像，得到不同空域和频域上的分支图像^[29,30]。基于 DWT 的水印算法具有以下三大特性：一是时频局部化特性；二是多尺度分析；三是低复杂度。

与傅里叶序列展开类似，例如 $f(x)$ 的抽样值，最后产生的系数就可以叫做 $f(x)$ 的离散小波变换(DWT)，离散小波变换的变换对如下：

$$W_{\psi}(j_0, k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_x f(x) \varphi_{j_0, k}(x) \quad (2.1)$$

$$W_{\psi}(j, k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_x f(x) \psi_{j, k}(x) \quad (2.2)$$

对于 $j \geq j_0$ 还有

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_k W_\psi(j_0, k) \varphi_{j_0, k}(x) + \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_k W_\psi(j, k) \psi_{j, k}(x) \quad (2.3)$$

其中, $f(x)$, $\varphi_{j_0, k}(x)$ 和 $\psi_{j, k}(x)$ 是离散变量 $x=0, 1, 2, \dots, M-1$ 的函数。通常, 令 $j_0=0$, 并选择 M 为 2 的幂, 对 $x=0, 1, 2, \dots, M-1, j=0, 1, 2, \dots, J-1$ 和 $k=0, 1, 2, \dots, 2^j-1$ 求和。哈尔小波变换中的小波函数以及尺度函数与 $M \times M$ 哈尔小波变换矩阵的行相对应, 变换本身由 M 个系数组成, 最小尺度是 0, 最大尺度是 $J-1$ 。

基于 DWT 的数字水印算法是目前研究的热点, 由其还衍生出了许多数字水印算法, 比如以下两种:

1、快速小波变换

快速小波变换(FWT)考虑到了相邻尺度离散小波变换系数之间的特殊关系, 因此分辨率分析的改进公式如下^[31]:

$$\varphi(x) = \sum_n h_\varphi(n) \sqrt{2} \varphi(2x-n) \quad (2.4)$$

以 2^j 将 x 进行尺度化, 并以 k 为数量进行平移, 令 $m=2k+n$, 得到式 2.5:

$$\begin{aligned} \varphi(2^j x - k) &= \sum_n h_\varphi(n) \sqrt{2} \varphi(2(2^j x - k) - n) \\ &= \sum_m h_\varphi(m - 2k) \sqrt{2} \varphi(2^{j+1} x - m) \end{aligned} \quad (2.5)$$

其中, 可以将尺度向量 h_φ 理解成是将 $\varphi(2^j x - k)$ 展开成尺度为 $j+1$ 的尺度函数之权。

$$\psi(2^j x - k) = \sum_m h_\psi(m - 2k) \sqrt{2} \varphi(2^{j+1} x - m) \quad (2.6)$$

用式 2.6 中的小波向量 $h_\psi(n)$ 代替式 2.5 中的尺度向量 $h_\varphi(n)$, 并将小波定义的式子代入式 2.2, 可以得到式 2.7:

$$W\psi(j, k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_x f(x) 2^{j/2} \psi(2^j x - k) \quad (2.7)$$

将 $\psi(2^j x - k)$ 用式 2.6 的右边部分代替, 则得到:

$$W\psi(j, k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_x f(x) 2^{j/2} \left[\sum_m h_\psi(m - 2k) \sqrt{2} \varphi(2^{j+1} x - m) \right] \quad (2.8)$$

经过交换调整, 可以得到式 2.9:

$$\begin{aligned} W\psi(j, k) &= \sum_m h_\psi(m - 2k) \left[\frac{1}{\sqrt{M}} \sum_x f(x) 2^{(j+1)/2} \varphi(2^{j+1} x - m) \right] \quad (2.9) \\ &= \sum_m h_\psi(m - 2k) W_\varphi(j+1, m) \end{aligned}$$

其中, 在尺度 $j+1$ 的大约相似系数是 DWT 在尺度 j 的细节参数, 则有

$$W_\psi(j, k) = \sum_m h_\psi(m - 2k) W_\varphi(j+1, m) \quad (2.10)$$

式 2.9 和式 2.10 说明了 DWT 相邻的尺度系数间的特殊关系, 对比以上结果, 能够得出尺度 j 的近似值和细节系数 $W_\varphi(j, k)$ 与 $W_\psi(j, k)$ 可以通过计算尺度 $j+1$ 的近似系数 $W_\varphi(j+1, k)$, 以及时域逆转的尺度和小波向量卷积, 再对结果进行亚取样得到。

2、二维小波变换

二维小波变换要用到一个二维尺度函数 $\varphi(x, y)$ 和 3 个二维小波 $\psi^H(x, y)$, $\psi^V(x, y)$ 和 $\psi^D(x, y)$, 它们是一维尺度函数 φ 与 ψ 的小波函数相乘得到的。去掉会有多个结果的式子 $\varphi(x)\psi(x)$, 通过剩下的四个结果可以得到下述尺度函数:

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

以及可分离的“方向敏感”的小波

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

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

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

在上式中，度量小波的函数会发生改变，即图像的强度和灰度会沿着不同方向产生改变，具体如下： ψ^H 衡量在列方向上进行的改变， ψ^V 响应在行方向上进行的改变， ψ^D 则是在对角线方向上的改变。一维的 DWT 能很容易地转变至二维 DWT，因此数字滤波器和抽样不仅能够实现一维 DWT，还能实现二维 DWT，可以先取行方向上的一维 FWT，再取另一方向上的一维快速小波变换。

2.4.3 压缩域水印算法

现今网络等领域要用到大量的多媒体产品，尤其在传输和存储这些数据的时候，为了提高传输速率和减少存储空间，就需要对这些产品的部分信息进行压缩。压缩域数字水印算法是建立在 JPEG 等压缩标准基础之上的，不仅简化了实际应用过程中的操作，它的使用价值在图像传输领域也得到了突显，压缩域水印算法还可以应用到水印的检测与提取的过程当中。

2.4.4 生理模型算法

数学、计算机等领域的许多研究都涉及到人类的生理模型，数字水印算法中用到的模型主要有听觉系统 HAS 和视觉系统 HVS 两大类。听觉系统模型是从人类的听觉角度出发，进行音频信号的处理和研究；而视觉系统模型是从人类的视觉感官出发，为了不降低原作品在视觉感官上的效果，可以结合人眼视觉系统的特点，充分使用 JND 模型，以得到原始载体的各个嵌入位置所能容纳的水印数据的极限值。在图像处理时，人眼将图像过滤为不同频率范围的子带信号，这跟小波变换的多分辨率特性相匹配，所以结合人类视觉系统的特性能够很好地解决数字水印的鲁棒性与不可见性之间的矛盾。在水印嵌入的时候，为了使算法的抗攻击性能得到提高，就需要使嵌入的位置和强度满足实际应用。

2.5 数字水印的应用

1、所有权保护

所有权保护是目前数字水印最主要的应用，它通过将多媒体产品的所有者或者版权信息嵌入到多媒体产品中，以防止非法使用者对作品拥有版权。当发生所有权等纠纷的时候，就可以通过对数字作品中所包含的水印数据进行检测，

来判断该数字作品的归属。

通过数字水印可以隐藏数字作品中的所有权信息，这样不仅保持了原作品的完全性，同时还使所有权的归属得到了保障。但是现今研发水印工具的理论和方法并不是很完善，致使水印数据在受到各种攻击之后，往往不能很好地保存下来，使得检测出的水印无法进行识别，从而影响了实际应用中的效果，因此水印的抗破坏性能还有待于进一步的提高。

2、图像修改识别

图像修改识别就是检测对图像信息所做的修改，由于脆弱性水印对剪切等处理具有较低的抵御能力，因此为了达到识别图像修改的目的，可以采用嵌入脆弱性水印的方法来实现。这样当嵌入水印后的图像在遭受攻击或破坏时，即使只出现了细微变化，其中所含的水印就将彻底被破坏，以起到提示的作用，从而保证了图像的完全性^[32,33]。

3、复制监控

复制监控是预防性措施，它是在多媒体产品公开之前便嵌入标记允许复制或标记播放次数的水印数据。当多媒体产品被复制或播放时，水印信息将首先被检测，并判断是否允许复制或播放，以及复制或者播放的次数等信息^[8-9]。

4、更改提示

更改提示也是数字水印非常重要的应用，比如法院以及商务等领域都需要使用到多媒体产品，而在这些领域的应用都是非常严谨的，因为其常常要作为法律或者经济上的有力证据，这时就需要判定其所含信息是否经过篡改等恶意操作。

5、单据防伪

在电子商务不停发展的时代，伴随着图像输入输出设备不断向高质量的方向发展，使得伪造单据等非法行为更加简单易行。因此，为了有效提高商务交易过程票据使用的安全性，迫切需要使用数字水印技术来为各种票据提供隐蔽的认证标识。

2.6 典型的数字水印攻击方法

目前比较常见的攻击方法如下^[34,35]。

1、去除攻击

去除攻击的做法一般是把水印数据从嵌入水印后的多媒体产品中去除，比较常见的有以下几种攻击方式：首先是降低噪声，它是通过滤波的方式来起到降噪的目的，这种方式的使用已经是很频繁的了。其实当水印信息加入到载体图像中时，已经在不同程度上改变了原始的载体图像，这时水印数据常常被看作是一种噪声，这就导致了利用降低或去除噪声的方式削弱或者去除数字水印信息的攻击。其次是同谋攻击，它的具体做法是在已经嵌入水印的载体中加入各种其它水印数据。

2、鲁棒性攻击

鲁棒性攻击是指削弱或去除多媒体产品中的水印信息，并不识别或者提取水印，比如图像的压缩、增强、裁剪、噪声的叠加等。在遭受该攻击之后，水印信息一般情况下仍然会有所残留，但严重的后果是通过所剩的数据往往无法进行检测。

3、密码攻击

密码攻击与密码分析相似，是通过分析多媒体产品中的水印信息，以达到去除水印信息而干扰检测过程，使其无法识别到水印的目的。穷举搜索攻击以及 Oracle 攻击都属于该类别，后者通过对嵌入水印后的图像各个点的值的变化计算出要进行的改变的数值，并遍历到所有的点或者元素，以达到整体的改变效果。最后可以将之前算出的值，根据不同位置扩大不同的倍数之后，从嵌入水印后的图像中去除。

4、协议攻击

协议攻击属于非授权攻击，此方法并不破坏数字水印本身，而是通过伪造水印等信息源，以模糊所有权的归属。比如将一个与所含水印有着相同强度的水印信息嵌入在多媒体作品中，使得产品所有权无法确定，导致版权纠纷的产生。协议攻击有以下分类：其中的奇异攻击是指在未含任何水印信息的多媒体产品中，加入水印标记，来伪造对该产品的所有权，以起到迷惑的目的。这种攻击方法很容易导致产品所有权的误导性，致使纠纷的发生，因此要研究出有

效的算法来防止该奇异攻击的破坏^[36]。而同样属于协议攻击的复制攻击，是把通过非法复制等手段得到的水印数据加入到其他不具有所有权的多媒体产品中，以起到伪造所有权的目的。该攻击首先要做的是估算未嵌入水印前的多媒体产品，以及嵌入水印后的多媒体产品，再将两者做差便可以估算出所含的水印量值。最后，把通过这一手段得到的水印数据加入到其它有特殊用途的多媒体产品当中，以达到仿冒对该产品所有权的目的。

2.7 评价数字水印算法的参考标准

对于不同的实际应用，会采用或者设计出与之相适应的水印嵌入算法，这就出现了一个问题，该怎样分析和判断所使用的水印算法是否适合某一特定需求，以及水印算法的优劣性。只有在判断了水印算法的好坏之后，才能将其投入到生产等领域当中，也为将来的进一步改进奠定了良好的基础。但是目前还没有很完善和全面的评判方法和标准，要对水印算法进行评测只能依靠现有的一些方法进行。由于性能评测方法的重要性，对水印算法评价标准的研究也是现在热门的研究方向。本文主要采用了以下评价指标来分析水印的嵌入、攻击以及提取的实验结果。

1、不可见性：水印嵌入算法的首要标准就是在嵌入水印之后，不能明显降低原始图像的视觉质量，因此该特性是判断水印嵌入效果的最直观的标准。它是从人类的视觉感官角度上进行判断的，要求在通过嵌入算法使得水印嵌入之后，肉眼无法识别其与原始多媒体产品的区别。如果通过人眼就能看出水印嵌入前后的差别，则说明该水印算法不适合于此应用，不能达到很好的嵌入效果，应该改进或者更换算法^[37]。

2、峰值信噪比：峰值信噪比是衡量图像受噪声影响的重要指标，它从某种程度上体现了多媒体产品信息在水印嵌入前后的改变。因此在数字水印的嵌入实验中，可以将水印数据看作噪声，再通过峰值信噪比来判断水印嵌入对图像等多媒体产品质量的影响程度，要得到这一比值需要用到原始多媒体产品和嵌入水印后的多媒体产品^[38]。其计算公式如下：

$$PSNR = 10 \log_{10} (MAX_I^2 / MSE) \quad (2.15)$$

其中 MSE 是图像在水印加入前后的均方误差。

3、归一化互相关系数：前两种方法是用来判断水印的嵌入效果的，而在提取出水印之后，对水印质量和失真度的分析和判断则需要用到归一化互相关系数。归一化互相关系数的值越高，则说明提取出的水印与原始水印的相似程度越高，也就是水印算法的抗干扰性能越强。其计算公式如下：

$$NC = \frac{\sum_{m,n} I_{m,n} \tilde{I}_{m,n}}{\sum_{m,n} I_{m,n}^2} \quad (2.16)$$

2.8 本章小结

本章对数字水印技术做了比较完整的介绍，首先阐述了数字水印的基本概念，及主要特点。接着描述了水印系统的基本模型，并列举了数字水印的类别、典型算法、应用领域以及典型的攻击方法。最后给出了评价数字水印算法性能的各项指标，本文也将采用这些指标进行实验结果的分析。

第3章 小波变换理论分析

3.1 小波变换的发展背景

对于信号来说,在处理过程中频率域上的信息是非常重要的。在某些实际应用中,这种仅局限于频率域展开的分析方法是非常有用的,但是在信号和图像处理中,有许多应用需要在时域上进行分析。因此为了达到这些要求,拓展傅里叶分析之后,得到了许多能同时在频率域和时域上分析信号的方法。其中短时傅立叶变换(Short Time Fourier Transform)是最早在傅里叶分析的基础上引入时域信息的,它要获得局部的频域信息,是通过时间窗的划分,并把信号表示在每一个时间窗里的频域上。它弥补了傅里叶变换无法进行时频局部分析的缺点,在非平稳信号的分析中发挥了很大的作用^[39]。

短时傅里叶变换通过窗口函数 $g(t-\tau)$ 对信号 $f(t)$ 进行乘积运算,在 τ 附近实现平稳开窗之后,再进行傅里叶变换。变换公式如式3.1所示:

$$Gf(w, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t-\tau)e^{-j2\pi wt} dt \quad (3.1)$$

由上式可以看出短时傅里叶变换的时域区分度依赖于大小恒定的时间窗,因此精确度不够。而小波分析则具有多分辨率分析,弥补了短时傅里叶变换的不足,其频率窗和时间窗可以根据信号进行动态的调整,因此无论在频域还是时域都能很好地反映信号的局部信息。在小波分析中,低频子带基本上是平稳信息,对其进行分析时需要比较高的频率分辨率来分析信号,而不需要太高的时间分辨率;但是高频子带则相反,比如在图像处理中,小波变换将图像的边缘特征、纹理信息等定位于空间域,从而能够进行更为高效的编码。由于能够分析信号的瞬时状态,将信号中的平稳信息与非平稳信息分离,并可以展示信号的局部频率信息,所以小波分析被称为数字显微镜,近几年来也成为了一个迅速发展的研究领域,具有深厚的理论基础,也出现在了越来越多的应用领域当中。

3.2 小波变换的主要理论

3.2.1 小波变换的基本概念

给定一个基本函数 $\psi(t)$ ，令

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.2)$$

先将基本函数 $\psi(t)$ 进行位移，然后再进行伸缩变换，便得到了 $\psi_{a,b}(t)$ ，称之为小波基函数。其中 a, b 都是常数，且 $a > 0$ 。如果给 a, b 赋予不一样的值，就可以产生一组函数 $\psi_{a,b}(t)$ 。信号 $x(t)$ 平方可积，也就是 $x(t) \in L^2(\mathbb{R})$ ，那么有如下定义：

$$\begin{aligned} \psi_{a,b}(t) &= \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \\ &= \int x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \\ &= \langle x(t), \psi_{a,b}(t) \rangle \end{aligned} \quad (3.3)$$

由于 a, b, t 三者都是连续的，所以式 3.3 又叫做连续小波变换。其中 a 是尺度因子， b 是时移变量， $WT_x(a, b)$ 是 a 和 b 的函数。而 $\psi(t)$ 是母小波，它可以是实函数或者复函数，这取决于 $x(t)$ 是实信号还是复信号。

在式 3.2 中，时移变量 b 用来确定对信号 $x(t)$ 分析的时间位置，而尺度因子 a 是用来对母小波 $\psi(t)$ 作伸缩变换的。 $\psi(t)$ 经变换后得到 $\psi(t/a)$ ，当 $a > 1$ 时，随着 a 的增大， $\psi(t/a)$ 在时间域的跨度也增大；当 $a < 1$ 时，随着 a 减小， $\psi(t/a)$ 的时间域宽度将越窄。因此， a 和 b 能够确定对信号分析的时间宽度以及中心位置。而式中的 $\frac{1}{\sqrt{a}}$ 保证了当尺度 a 不同时， $\psi_{a,b}(t)$ 和 $\psi(t)$ 的能力仍然相同，如式 3.4 所示：

$$\int |\psi_{a,b}(t)|^2 dt = \frac{1}{a} \int |\psi(\frac{t-b}{a})|^2 dt \quad (3.4)$$

令 $\frac{t-b}{a} = r$, 则 $dt = adr$, 则式 3.4 的右边可表示为 $\int |\psi(r)|^2 dr$ 。

3.2.2 小波变换的性质

小波变换具有如下性质:

1、叠加性

假设 $x(t)$ 的小波变换是 $WT_x(a,b)$, $y(t)$ 的小波变换是 $WT_y(a,b)$, 则 $z(t) = k_1x(t) + k_2y(t)$ 的小波变换是 $k_1WT_x(a,b) + k_2WT_y(a,b)$ 。

2、尺度变换

假设 $x(t)$ 的小波变换是 $WT_x(a,b)$, 则 $x(\frac{t}{\lambda})$ 的小波变换是 $\sqrt{\lambda}WT_x(\frac{a}{\lambda}, \frac{b}{\lambda}), \lambda > 0$ 。

3、时移性

如果 $x(t)$ 的小波变换是 $WT_x(a,b)$, 则 $x(t-t_0)$ 的小波变换是 $WT_x(a,b-t_0)$,

即 $x(t)$ 的时移对于小波变换的 b 移位了 t_0 。

4、交叉性质

小波变换没有交叉项, 因为它是线性的, 并且具有叠加性。尽管如此, 通过小波变换得到的能量分布函数 $|WT_x(a,b)|^2$ 却有交叉项, 如下所示:

设 $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$, 则有

$|WT_x(a,b)|^2 = |WT_{x_1}(a,b)|^2 + |WT_{x_2}(a,b)|^2 + 2|WT_{x_1}(a,b)||WT_{x_2}(a,b)|\cos(\theta_{x_1} - \theta_{x_2})$ 式中, θ_{x_1} 和 θ_{x_2} 分别是 $WT_{x_1}(a,b)$ 和 $WT_{x_2}(a,b)$ 的辐角。

小波变换中的 a 同时对窗口的大小和在频率轴上的位置有作用, 但是 θ 只对窗口在相平面时间轴上的位置有作用。因此, 当频率较低的时候, 小波变换具

有很低的时间分辨率；而当频率较高的时候，小波变换则具有很高的时间分辨率。这是小波变换的优势所在，有如下特性：

1、多分辨率分析这一特性，使得小波变换能够对信号进行更高分辨率的分析，可以用高频小波和低频小波分别对信号进行高频分析和低频分析，因此小波变换有类似显微镜的作用。

2、通过小波变换的定义公式可以看出，随着 a 取值的减小，在频率域对 $X(\Omega)$ 的观察幅度变宽，而在时域对 $x(t)$ 的观察幅度则变窄了，同时中心频率移向了高频处；相反的，随着 a 取值的增大，在频率域对 $X(\Omega)$ 的观察幅度变窄，而在时域对 $x(t)$ 的观察幅度则变宽了，同时中心频率移向了低频处。

3、数字图像中的细节信息，边缘部分等都是高频信号，它们在时域上的时间间隔很短，在分析这些信号的时候，需要良好的时间域分辨率，而对频率域上的分辨率的要求则相对来说并不高。而数字图像大部分信息都集中在低频信号上，这些信号对时间域的要求不高，因此在分析这些信号时，只要求具有良好的频率分辨率。小波变换能够同时达到这些要求，它可以在满足人眼视觉特性的基础上很好地对数字图像等多媒体数据进行分析。

3.2.3 多分辨率分析

多分辨率分析有如下定义：假设 $\{V_j\}, j \in Z$ 是 $L^2(R)$ 空间中的一串闭合子空间，要使 $\{V_j\}, j \in Z$ 成为一个多分辨率的近似，必须满足以下六个性质：

$$1、\forall (j,k) \in Z, \text{若 } x(t) \in V_j, \text{ 则 } x(t-2^j k) \in V_j$$

$$2、\forall j \in Z, V_j \supset V_{j+1}, \text{ 即 } \dots V_0 \supset V_1 \supset V_2 \supset \dots \supset V_j \supset V_{j+1} \dots$$

$$3、\forall j \in Z, \text{ 若 } x(t) \in V_j, \text{ 则 } x\left(\frac{t}{2}\right) \in V_{j+1}$$

$$4、\lim_{j \rightarrow -\infty} V_j = \bigcap_{j=-\infty}^{\infty} V_j = \{0\}$$

$$5、\lim_{j \rightarrow -\infty} V_j = \text{Closure}\left(\bigcup_{j=-\infty}^{\infty} V_j\right) = L^2(R)$$

6、有基本函数 $\theta(t)$ ，使得 $\{\theta(t-k)\}, k \in Z$ 是 V_0 中的Riesz基。

小波变换不同于其它变换，它能够多尺度、多角度的观察和分析图像等多媒体中所含的数据，因此具有多分辨率分析的特点。在小波变换时，每一层的

输出采样都随着每层低频分量的继续分解而减半，从而起到了不断深入细化分析的效果，使得对信号的研究更为具体和准确，这就是对信号的多分辨率分析。

3.2.4 常见的小波基

以下是目前比较常用的小波基：

1、Morlet小波

Morlet 小波的定义如下：

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} e^{j\omega t} \quad (3.5)$$

$$\Psi(\Omega) = \sqrt{2\pi} e^{-\frac{(\Omega-\omega)^2}{2}} \quad (3.6)$$

它是具有高斯包络的单频率复正弦函数，严格来说，由于 $\Psi(\Omega=0) \neq 0$ ，该小波不是紧支撑的，而且也不具备容许条件，但是从上述表达式以及傅里叶变换中可以看到，在时频域上 Morlet 小波的局部性能仍然不错。再则由于在 $\Omega=0$ 处， $\Psi(\Omega)$ 的斜率很小，因此该小波在 $\Omega=0$ 处的一阶和二阶导数也近似为 0。

2、Harr小波

Harr 小波有如下定义：

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ -1 & \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (3.7)$$

式 3.7 是一组正交函数集，它的支撑域范围为 $t \in [0,1]$ 。Harr 小波在时域上不连续，由于 $\int \psi(t) dt = 0$ ，而 $\int t\psi(t) dt \neq 0$ ，所以， $\Psi(\Omega)$ 在 $\Omega=0$ 处只有一阶零点，因此 Harr 小波不是理想的基小波。但它仍具有以下几个优点：第一点，Harr 小波在 $t \in [0,1]$ 范围内是紧支撑的；第二点，当 $a=2^j$ 时， $\psi(t)$ 不仅与整数位移正交，即 $\int \psi(t)\psi(t-k) dt = 0$ ，还与 $\psi(2^j t) (j \in Z)$ 相正交，即

$$\int \psi(t)\psi(2^j t)dt = 0。$$

3、Marr小波

Marr 小波有如下定义:

$$\psi(t) = (1-t^2)e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (3.8)$$

$$\Psi(\Omega) = \sqrt{2\pi}\Omega^2 e^{-\frac{\Omega^2}{2}} \quad (3.9)$$

Marr 小波是高斯函数的二阶导数, 不具备紧支撑和正交等特性, 但是它却比较接近人眼的空间视觉特性。

4、DOG(Different of Gaussian)小波

DOG 小波的定义如下:

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} - \frac{1}{2}e^{-\frac{t^2}{8}} \quad (3.10)$$

$$\Psi(\Omega) = \sqrt{2\pi}[e^{-\frac{\Omega^2}{2}} - e^{-2\Omega^2}] \quad (3.11)$$

该小波是由尺度相差为 1 倍的两个高斯函数相减得到的, 它使得 $\Psi(\Omega=0)=0$ 和 $\partial\Psi(\Omega)/\partial\Omega(\Omega=0)=0$, 也就是在 $\Omega=0$ 处有二阶零点。

5、样条小波

样条函数是低通函数, 它使得拟合曲线本身以及导数都是平滑的, 因此不能用作小波, 但却能由它得出一组具有带通性质的小波函数。式 3.12 是三次样条小波的表达式:

$$\Psi(\Omega) = \frac{e^{-j\frac{\Omega}{2}} \sqrt{\sum_8(\frac{\Omega}{2} + \pi)}}{\Omega^4 \sqrt{\sum_8(\Omega) \sum_8(\frac{\Omega}{2})}} \quad (3.12)$$

$$\text{其中, } \sum_8(\Omega) = \sqrt{\frac{N_1(\Omega) + N_2(\Omega)}{105 \sin^8 \frac{\Omega}{2}}}, \quad N_1(\Omega) = 5 + 30 \cos^2 \frac{\Omega}{2} + 30 \sin^2 \frac{\Omega}{2} \cos^2 \frac{\Omega}{2},$$

$N_2(\Omega) = 2 \sin^4 \frac{\Omega}{2} \cos^2 \frac{\Omega}{2} + 70 \cos^4 \frac{\Omega}{2} + \frac{2}{3} \sin^6 \frac{\Omega}{2}$, $\sum_8(\Omega)$ 是 $\sum_2(\Omega) = \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\Omega}{2}$ 的 6 阶导数。

3.3 本章小结

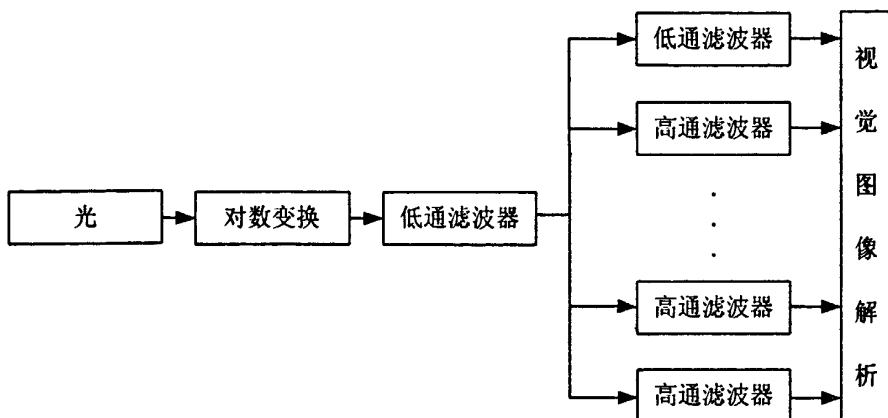
本章介绍了小波变换的概念以及相关理论。首先阐述了小波变换的概念和性质, 然后介绍了多分辨率分析以及小波变换中常见的小波基。

第4章 基于人眼视觉特性的水印算法

眼球、神经系统及视觉中枢构成了人类的视觉系统，在很多领域，都需要根据人类的视觉成像原理来进行具体问题的具体分析^[40]。当分析大脑对图像的成像感知过程时，可以知道人眼视觉对不同画面的灵敏性的不同，决定了图像质量的变化对视觉影响的程度，而决定视觉灵敏性的原因则有图像空间频率、背景亮度等^[41]。由于在实际应用中，既要保证水印有足够的信息量来抵御各种使用过程中受到的损耗和干扰，又要包含尽可能少的数据量，以减少在存储空间上的浪费，这就引入了阈值的概念。而人眼视觉特性，则是充分考虑到了这一点，根据人眼视觉系统的特性，当水印嵌入系数低于其掩蔽因子的门限值时，就可以使得在达到隐蔽性的同时，实现水印嵌入容量的最大化^[42]。

在图像处理时，人眼将图像过滤为不同频率范围的子带信号，HVS对同一频带的不同方向的细节信号有着不同的敏感度，与小波变换的多分辨率特性相匹配。所以结合人类视觉系统的特性能够很好地解决数字水印的鲁棒性与不可见性之间的矛盾。在水印嵌入的时候，为了使算法的抗攻击性能得到提高，就需要嵌入的位置以及强度满足实际应用。可以根据每一个像素的JND(Just Noticeable Difference)阈值将水印嵌入到DWT域的低频系数上，这充分利用了人类视觉特性优化了水印的嵌入强度，能够使不可见性和嵌入强度达到理想的平衡点。目前，虽然对HVS的特性有了大量的研究，但仍然没有可计算、精确的HVS模型^[43]。

人眼视觉系统等同于一个低通而且是线性的滤波系统，瞳孔在成像的时候，往往会有—定的光学成像误差，而且构成视觉系统的细胞的大小都是一定的，这就决定了人眼视觉系统的某些性能必然会受到局限，比如人眼的分辨能力就是有限的，它对高频信号不敏感，也就是当图像中的细节纹理部分发生变化或者受到干扰时，一般不容易引起人眼的感官反应。图4.1是人类视觉系统的模型：



4.1 人类视觉系统模型

4.1 人眼视觉的特性

1、频率敏感性

人眼对不同的刺激有着不同的反应，比如对不同频率的正弦波的刺激就有着不同的敏感程度，这个可以用对比度敏感函数 CSF 来表示。通常情况下，人眼对低频系数上的变化要比高频系数上的敏感性更强，因为低频带上的数据所蕴含的信息量更多，而高频带上由于都是细节或者突变纹理，它们的变化不容易引起人眼的感应。根据人眼视觉的频率敏感性，有利于分析出为了加强水印的鲁棒性和不可见性，应该将其嵌入到图像的哪个频带上^[44]。

那么图像分解后 l 尺度 θ 方向上，视觉受任意分解子图的作用情况如式 4.1 所示：

$$a(l, \theta) = PQ \tag{4.1}$$

$$\text{其中： } P = \begin{cases} \sqrt{2}(\theta = 1), \\ 1(\theta \neq 1), \end{cases} \quad Q = \begin{cases} 1.00(l = 0) \\ 0.32(l = 1) \\ 0.16(l = 2) \\ 0.10(l = 3) \end{cases}$$

2、亮度敏感性

亮度敏感性同样是影响人眼视觉成像质量的重要因素之一，人眼对不同亮

度的敏感度不同,人眼的感官刺激随着背景亮度的增加而降低,因此背景的亮度越低,图像的噪声越容易被发觉。根据此特性,将水印嵌入图像时,适当调整图像的亮度,只要亮度改变的值低于门限值时,水印嵌入前后图像的差别就不会为人所感知。人眼视觉受图像分解后 l 尺度任意角度上的某个像素 (i, j) 的亮度的作用情况如式 4.2 所示:

$$b(l, i, j) = 1 + (1/256)S_3^3(1 + [i/2^{3-l}], 1 + [j/2^{3-l}]) \quad (4.2)$$

3、纹理方向敏感性

纹理敏感性是指图像中各个位置的纹理对人眼感官有着不一样的影响,比如对角线方向上的纹理对人眼感官上的影响要小于水平和垂直方向上的影响,这主要是因为一般图像的细节和边缘部分都分布在对角线方向上,而水平和垂直区域往往是大量信息的所在区^[45]。视觉受图像分解后 l 尺度任意方向上的子带中像素 (i, j) 的纹理强度的作用如式 4.3 所示:

$$T(l, i, j) = \sum_{k=0}^{3-l} \frac{1}{16^k} \sum_{\theta=0}^2 \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 [S_{k+l}^{\theta}(y + \frac{i}{2^k}, x + \frac{j}{2^k})]^2 \times Var[S_3^3(l + y + \frac{i}{2^{3-l}}, l + x + \frac{j}{2^{3-l}})]_{k=0,1,y=0,1} \quad (4.3)$$

4、掩蔽特性

人眼的掩蔽特性是指处于图像细节区的噪声比平滑区的对人眼感官上的影响更大,其中边缘部分对人眼感官上的影响更加严重。同时,人眼的掩蔽特性具有局部性,一般中等灰度对人眼感官上的影响要高于低等和高等灰度对人眼的影响^[46]。

4.2 传统的临界可见误差 JND 门限算法

临界可见误差 JND (Just Noticeable Difference) 表示人眼所无法识别的图像的最大失真。根据图像各分量能容忍的水印信号的门限强度, JND 能够表示出将水印信息嵌入原始图像的不被人眼察觉的最大强度,所以使用人眼视觉特性的图像水印算法是目前倍受关注的研究方向^[47]。

JND 计算公式可以用 4.1 节的三个公式的乘积来表示:

$$JND(l, \theta, i, j) = \beta * a(l, \theta) * b(l, i, j) * T(l, i, j)^{0.5} \quad (4.4)$$

公式 4.4 中, $JND(l, \theta, i, j)$ 为 l 层 θ 方向上子带 (i, j) 处小波系数的 JND 门限值, $a(l, \theta)$ 、 $b(l, i, j)$ 和 $T(l, i, j)$ 分别为 4.1 节中提到的频率、亮度和纹理掩蔽因子。

4.3 改进后的 JND 门限算法

公式 4.4 中的 $JND(l, \theta, i, j)$ 越大就代表人眼对噪声越不敏感, 但是 $JND(l, \theta, i, j)$ 是三个因子的乘积, 每个因子的大小都会影响到该乘积, 从而影响掩蔽效果, 要避免这种由于某个因子的值过小而导致 $JND(l, \theta, i, j)$ 很小的情况出现, 应该单独考虑每个视觉掩蔽因子的值。文献[43]只将乘积与其中的两个因子做比较, 取最大值作为结果, 该方法并未考虑到所有因子的重要性, 因此在一些特殊情况下仍然无法得出最为理想的结果。针对该问题, 本文做了进一步改进, 具体做法是在乘积 $JND(l, \theta, i, j)$ 和三个因子中取最大值作为噪声敏感模型嵌入强度的系数, 这样就可以避免上述问题, 能够适应各种可能出现的情况。以下是对公式 4.4 的噪声敏感模型的改进:

$$Z_l^{\theta}(i, j) = \max\{a(l, \theta) * b(l, i, j) * T(l, i, j)^{0.5}, a(l, \theta), b(l, i, j), T(l, i, j)^{0.5}\} \quad (4.5)$$

水印嵌入公式:

$$U_l^{\theta}(i, j) = U_l^{\theta}(i, j) + \alpha_l Z_l^{\theta}(i, j) w'(m, n) \quad (4.6)$$

其中 $U_l^{\theta}(i, j)$ 表示小波变换原始图像之后 l 尺度 θ 方向上 (i, j) 处的小波系数, $U_l^{\theta}(i, j)$ 表示嵌入水印后的 l 尺度 θ 方向上 (i, j) 处的小波系数, $w'(m, n)$ 表示经预处理后的水印信号, $Z_l^{\theta}(i, j)$ 表示 l 尺度 θ 方向上 (i, j) 处的噪声敏感系数, α_l 表示嵌入强度调节因子。

4.4 本章小结

本章主要介绍了人眼视觉特性的概念, 以及在水印嵌入算法中所发挥的作用, 并将前人计算水印嵌入系数的方法又做了改进, 取乘积与三个掩蔽因子的最大值作为最后的结果, 这样能得到更好的掩蔽效果。

第5章 数字水印的预处理

5.1 水印的置乱变换

置乱预处理是指根据特定的运算规则，重新排列原始图像中每个像素点的方位或者色彩，以使原始图像无法被识别。经过置乱处理后，水印图像各个点之间不再关联，避免了错误点的集中排列，使得水印抗攻击的能力得到改善，增强了水印数据的安全性。如果不经置乱预处理，而把水印直接嵌入到原始图像中，对水印的攻击就会变得非常容易，因此在把水印嵌入到原始图像之前要进行置乱预处理，置乱处理的关键在于置乱时间、置乱效果和恢复时间^[48-50]。目前，常用的置乱技术有 Arnold 变换、Gray 码变换、混沌序列等方法。在这些技术中，Arnold 变换的复杂度最低，却能达到优良的置乱效果，因此在实际生产中被越来越多的使用。

Arnold 变换的定义如下：假设一个 $N \times N$ 的图像矩阵，像素坐标为 (x, y) ，且 $x, y = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。通过公式 5.1 将点 (x, y) 映射到点 (x', y') ：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \bmod N \quad (5.1)$$

Arnold 变换具有周期性，当变换到某个数值时就会恢复到变换前的原图。给定一个正整数 N ，当 $N > 2$ 时，满足： $T < N^2/2$ ，由此可以得出当水印图像具有较大的阶数时，Arnold 变换的周期会不相同，当周期越短时，变换时的开销也就越小^[51,52]。下面是不同阶数的水印图像的 Arnold 变换的周期列表：

表 5.1 不同阶数对应的 Arnold 变换的周期

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10
周期	3	4	3	10	12	8	6	12	30
N	12	16	24	32	48	64	128	256	512
周期	12	12	12	24	12	48	96	192	384

在进行置乱预处理时，水印或者原始图像均能够被置乱，但是一般情况下

原始图像所含的信息量比较大, 如果进行置乱变换的话, 需要很大的时间开销, 所以一般只对水印数据进行置乱变换。

5.2 水印的 QR 分解

将水印进行 QR 分解, 得到正交矩阵(Q 矩阵)和上三角矩阵(R 矩阵), 其中 Q 矩阵的抗剪切、压缩等操作的能力较强, 而 R 矩阵则具有优良的能量分布, 水印的大部分信息量都集中在 R 矩阵当中。

原始载体图像的大部分能量都分布在低频子带中, 不容易受到各种攻击的影响和破坏, 所以将水印嵌入到低频子带可以提高水印的抗攻击能力; 而原始载体图像的边缘纹理等细节信息则集中在高频子带, 虽然其抗攻击的能力不及低频子带, 但是人眼对此部位的信息的敏感度比较低, 稍有变动不会引起人眼在视觉上察觉。因此, 将部分水印数据加入高频子带可以很好地掩蔽水印信息, 以降低人眼的觉察性。

本文根据原始载体图像高低频子带的不同特点, 把经过 QR 分解后的正交矩阵嵌入到小波变换域的低频子带 LL3 上, 可以有效抵御低频子带上受到的攻击; 而上三角矩阵则嵌入到原始载体图像的对角方向 HH3 上, 这样可以把水印的大部分信息都掩饰在原始载体图像的细节纹理中。这样使得水印的鲁棒性和隐蔽性都得到了加强^[10]。

5.3 传统的水印预处理方法

传统的水印预处理方法是先将水印图像进行置乱变换, 再把置乱变换之后的水印图像进行 QR 分解, 得到两个分量矩阵。具体过程如图 5.1 所示:

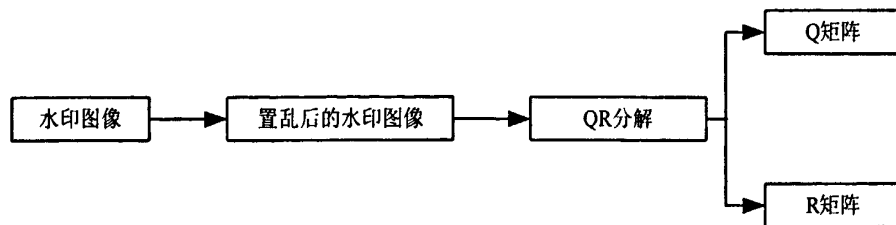


图 5.1 传统的水印预处理过程

该方法能够较好地使水印均匀分布在所嵌入的载体图像里, 具有良好的不

可见性。但是在水印的置乱过程中只有一个密钥，水印的安全性能比较低，容易遭到非法攻击者的破解和破坏。因此针对这种情况，本文对该方法进行了改进，提出了一种新的水印预处理方法，能够提高水印的安全性。

5.4 改进后的水印预处理方法

改进后的方法是先将水印图像进行 QR 分解，然后再将得到的两个矩阵分别以不同的置乱次数进行置乱，得到两个不同的密钥 k_1 和 k_2 ，在提取过程中需要同时使用这两个密钥才能对水印进行提取。具体过程如图 5.2 所示：

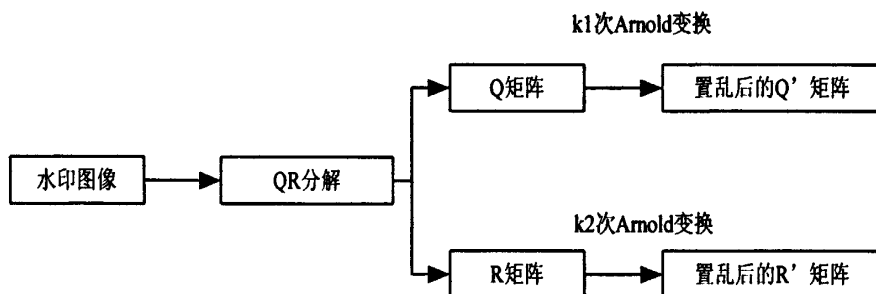


图 5.2 改进后的水印预处理过程

为了对比改进后的水印预处理方法与传统方法的优劣性，本文分别对两种方法进行了仿真实验，并对比分析了实验结果。

1、水印的嵌入

使用传统预处理方法的水印嵌入步骤如下：

- (1)、将水印进行 k_1 次 Arnold 变换(k_1 取值为 28)。
- (2)、将置乱后的水印图像进行 QR 分解，得到 Q 和 R 矩阵。
- (3)、对原始图像进行二级小波分解，选取低频子带和高频子带，并分别将 Q 和 R 矩阵分别嵌入低频和高频子带。

使用改进预处理方法的水印嵌入步骤如下：

- (1)、将水印进行 QR 分解，得到 Q 和 R 矩阵。
- (2)、将 Q 和 R 矩阵分别进行 k_1 和 k_2 次 Arnold 变换(k_1 和 k_2 的值分别为 28 和 26)，得到 Q' 和 R' 矩阵。
- (3)、对原始图像进行二级小波分解，选取低频和高频子带，并分别将 Q' 和 R' 矩阵嵌入低频和高频子带。



(a) 原始图像

支持
正版

(b) 原始水印图像



(c) 传统方法嵌入水印后的图像



(d) 改进方法嵌入水印后的图像

图 5.3 水印的嵌入

2、攻击实验

本文选取了剪切和压缩两种攻击分别对两幅含水印图像进行攻击实验，并对攻击后的图像进行水印提取。

(1)、剪切攻击

选用中心剪切对嵌入水印后的图像进行处理，再用水印提取方法将水印分离出来。

支持
正版

(a) 传统方法提取出的水印

支持
正版

(b) 改进方法提取出的水印

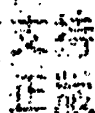
图 5.4 中心剪切攻击后提取出的水印

表 5.2 中心剪切攻击实验数据对比表

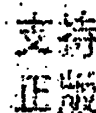
	传统预处理方法	改进后的预处理方法
PSNR	30.3136	31.9385
NC	0.9104	0.9473

(2)、压缩攻击

对嵌入水印后的图像进行 10:1 的 JPEG 压缩, 再用水印提取方法将水印从压缩攻击后的图像中提取。



(a)传统方法提取出的水印



(b)改进方法提取出的水印

图 5.5 压缩攻击后提取出的水印

表 5.3 压缩攻击实验数据对比表

	传统预处理方法	改进后的预处理方法
PSNR	30.1472	31.5309
NC	0.9156	0.9447

通过表 5.2 和表 5.3 中 PSNR 和 NC 值的对比可以看出, 在水印的嵌入过程中, 使用改进后的水印预处理方法, 含水印图像在受到几何攻击之后, 提取出的水印更为完整, 因此本文将使用改进后的方法对水印进行预处理。

5.5 本章小结

本章分析了已有的水印预处理方法, 提出了改进后的水印预处理方法, 并通过仿真实验对比了改进前后预处理方法的优劣性, 结果显示改进后的预处理方法具有更好的鲁棒性。

第 6 章 基于 DWT 和 HVS 的图像水印算法及仿真

6.1 水印的嵌入过程

如图 6.1 所示, 水印嵌入的过程主要包括对水印图像的 QR 分解, 对分解后得到的 Q 和 R 矩阵的置乱变换, 对原始载体图像的离散小波变换, 将置乱后的水印信息嵌入到载体图像小波变换域的低频和对角方向上, 以及水印嵌入后的三级小波逆变换。

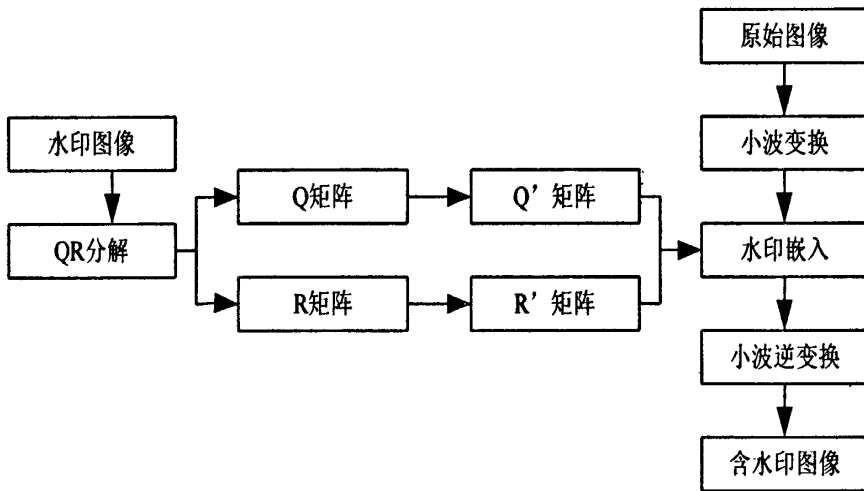


图 6.1 水印的嵌入过程

具体过程如下:

- 1、对经过置乱处理的水印进行 QR 分解, 产生正交矩阵 Q, 以及上三角矩阵 R。

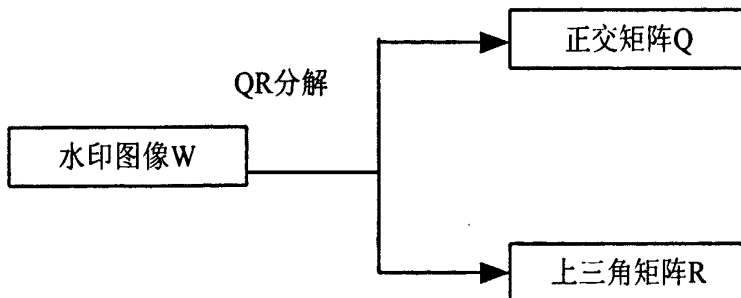


图6.2 水印的QR分解过程

2、对水印的 Q 、 R 矩阵分别进行 Arnold 置乱变换得到 Q' 和 R' 矩阵，密钥 k_1 和 k_2 分别是两个矩阵的置乱次数。

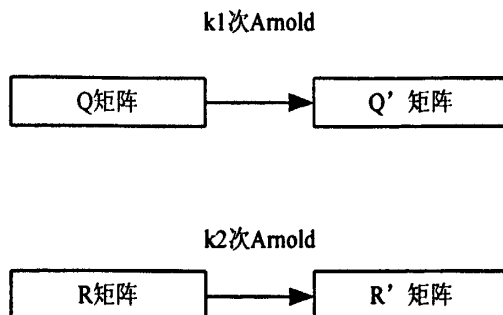


图6.3 QR分解后的水印置乱

3、将原始图像进行归一化处理，再做三级小波分解，得到的子带分量有： $LL3$ 、 $HL3$ 、 $LH3$ 、 $HH3$ 、 $HL2$ 、 $LH2$ 、 $HH2$ 、 $HL1$ 、 $LH1$ 、 $HH1$ 。

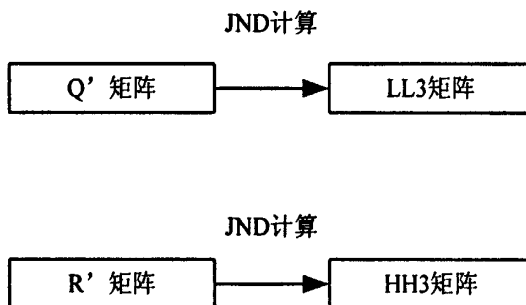


图6.4 原始图像的处理

4、选取 $LL3$ 和 $HH3$ 两个子带作为水印嵌入的位置，根据公式 4.5 计算出两个子带的感应系数。再分别将置乱后水印图像的 Q' 和 R' 矩阵，根据公式 4.6 嵌入到 $LL3$ 和 $HH3$ 子带中。

5、水印嵌入后，对图像进行三级小波逆变换，得到含水印的图像。

6.2 水印的提取过程

1、将嵌入水印的图像与原始图像都做小波三级分解，得到 $LL3$ 和 $HH3$ 两个子带的感应系数。

2、将嵌入公式 4.6 进行变换，得到提取公式 6.1，根据该公式分别求出两个子带方向的水印矩阵。

$$w'(m,n) = \frac{U_i^{\theta}(i,j) - U_i^{\theta}(i,j)}{\alpha_i Z_i^{\theta}(i,j)} \quad (6.1)$$

3、对步骤 2 中得到的两个水印矩阵分别根据密钥 k_1 和 k_2 进行逆置乱，再将逆置乱后的两个矩阵进行 QR 分解的逆过程，得到水印图像。

6.3 仿真实验与分析

6.3.1 实验平台

操作系统：Windows XP

仿真工具：MATLAB 7.0

6.3.2 水印的嵌入提取实验

本实验中，原始图像 R 选用的是大小为 512×512 的 lena 图，水印图像 W 的大小为 64×64 ，此时 Arnold 变换的周期为 48。经过实验验证，当变换周期为 48 时，水印图像的置乱次数取值在 25~28 之间时，能得到比较好的置乱效果，因此本文 Q、R 矩阵的置乱次数分别选为 26 和 28。在水印的嵌入以及提取实验完成之后，以峰值信噪比(PSNR)为标准对含有水印的图像进行客观评价，并且通过归一化互相关系数(NC)对提取出的水印的完全性进行评价。水印的置乱、嵌入和提取情况见图 6.5：

支持
正版

(a) 原始水印图像



图6.5 水印的嵌入与提取

将本文方法与文献[10]和[43]的方法得到的实验数据进行对比, 见表 6.1(对比数据包括含水印图像与原始图像的峰值信噪比, 以及提取的水印图像与原水印图像的归一化互相关系数):

表 6.1 对比实验数据分析表

	本文	文献[43]	文献[10]
PSNR	39.1623	33.2621	38.0645
NC	0.9983	0.9966	0.9979

6.3.3 攻击实验

1、剪切攻击

用以下几种剪切对嵌入水印后的图像进行攻击: 随机剪切、1/4 剪切、中间剪切, 然后用本文的水印提取方法将水印提取出来。



(a) 随机剪切

支持
正版

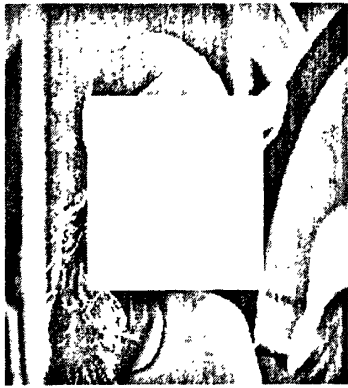
(b) 随机剪切提取出的水印



(c) 1/4 剪切

支持
正版

(d) 1/4 剪切提取出的水印



(e) 中心剪切

支持
正版

(f) 中心剪切提取出的水印

图 6.6 剪切攻击仿真

表 6.2 剪切实验结果数据分析表

剪切攻击	剪切攻击后的结果	剪切攻击后的 PSNR	提取出的水印 NC 值
随机	图 6.6(a)(b)	35.2365	0.9645
1/4	图 6.6(c)(d)	33.0947	0.9523
中心	图 6.6(e)(f)	32.5071	0.9778

表 6.3 中心剪切攻击实验数据对比表

	本文	文献[43]	文献[10]
PSNR	32.5071	30.6786	31.0764
NC	0.9478	0.9167	0.9436

分析上述数据能够得出,利用本文的嵌入方法使嵌入水印后的图像在经过 1/4 和中心剪切攻击之后,仍然能够提取出较为清晰的水印图像。表 6.3 选取中心攻击实验数据进行了对比,可以看出本文提取水印的 NC 值比文献[10]、[43]高。因此,本文算法较文献[10]、[43]有较为明显的改进效果,能更好地抵抗剪切攻击。

2、JPEG 压缩攻击

对嵌入水印后的图像进行不同比例的压缩,再用水印提取方法将水印从压缩攻击后的图像中提取出来。

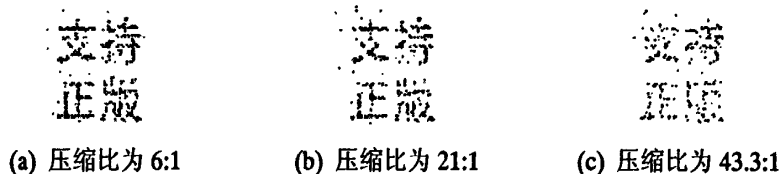


图 6.7 JPEG 压缩后提取出的水印

表 6.4 JPEG 压缩攻击实验数据分析

压缩比例	压缩攻击后的 PSNR	提取出的水印 NC 值
6:1	32.3653	0.9542
21:1	27.5214	0.9336
43.3:1	26.8816	0.9126

表 6.5 JPEG 压缩(6:1)攻击实验数据对比表

	本文	文献[43]	文献[10]
PSNR	32.3653	31.1364	31.2464
NC	0.9552	0.9467	0.9485

分析表 6.5 的数据可以得出, 在受到 JPEG 压缩攻击时, 本文的方法比文献[10]、[43]的方法表现出更强的鲁棒性。

3、滤波攻击

滤波攻击可以较好地检验水印的抗干扰能力, 因此本文对嵌入水印后的图像进行了以下滤波攻击: 中值滤波攻击和高斯低通滤波攻击。



(a) 中值滤波

支持
正版

(b) 中值滤波后提取的水印



(c) 高斯低通滤波

支持
正版

(d) 高斯低通滤波后提取的水印

图 6.8 滤波后含水印图像

表 6.6 滤波攻击实验结果数据分析表

滤波类型	滤波攻击后的结果	滤波攻击后的 PSNR	提取出的水印 NC 值
中值滤波	图 6.8(a)(b)	31.6436	0.9821
高斯低通滤波	图 6.8(c)(d)	34.3866	0.9902

表 6.7 中值滤波攻击实验数据对比表

	本文	文献[43]	文献[10]
PSNR	32.3661	31.1853	31.2364
NC	0.9844	0.9653	0.9556

由表 6.6 和表 6.7 可以看出，本文算法能够较好地抵抗滤波攻击，与文献[10]、[43]相比，抵抗滤波攻击的性能得到了进一步提高。

4、噪声攻击

本文采用高斯噪声和椒盐噪声分别攻击嵌入水印后的图像，再把水印从含噪图像中提取出来。本实验采用了均值和方差是(0, 0.01)和(0, 0.05)的高斯噪声，以及概率分别为 0.025 和 0.01 的椒盐噪声进行攻击。



(a) 高斯噪声(0,0.01)



(b) 高斯噪声(0,0.05)

图 6.9 高斯噪声加入后的图像

支持
正版

(a) 高斯噪声(0,0.01)

支持
正版

(b) 高斯噪声(0,0.05)

图 6.10 加入高斯噪声后提取出的水印

表 6.8 高斯噪声攻击实验数据分析

噪音	加噪后的图像	加噪攻击后的 PSNR 值	提取的水印	提取出的水印 NC 值
(0,0.1)	图 6.9(a)	24.6389	图 6.10(a)	0.9825
(0,0.05)	图 6.9(b)	16.4603	图 6.10(b)	0.9471



(a) 椒盐噪声(0.025)



(b) 椒盐噪声(0.01)

图 6.11 椒盐噪声加入后的图像

支持
正版

(a) 椒盐噪声(0.025)

支持
正版

(b) 椒盐噪声(0.01)

图 6.12 加入椒盐噪声后提取出的水印

表 6.9 椒盐噪声攻击实验数据分析

概率	加噪后的图像	加噪攻击后的 PSNR 值	提取的水印	提取出的水印 NC 值
0.025	图 6.11(a)	22.4609	图 6.12(a)	0.9042
0.01	图 6.11(b)	26.0325	图 6.12(b)	0.9528

表 6.10 椒盐噪声(0.025)攻击实验数据对比表

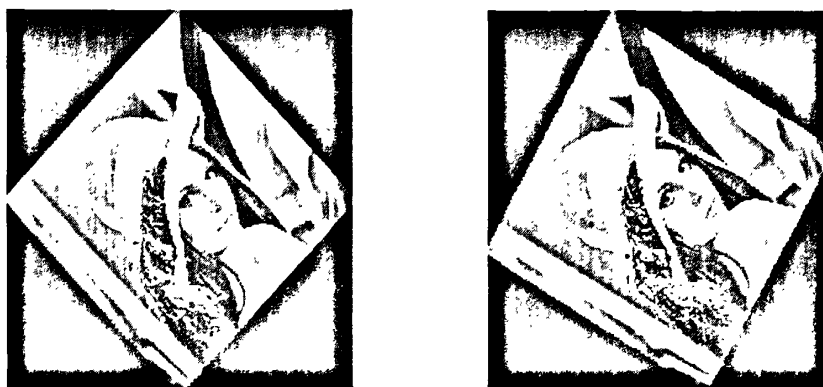
	本文	文献[43]	文献[10]
PSNR	22.4609	20.8735	21.3948
NC	0.9042	0.8696	0.8783

由表 6.9 和表 6.10 可以看出,将相同程度的椒盐噪声加入含水印图像

的时候, 本文方法提取出的水印图像的 PSNR 和 NC 值都高于文献[10]、[43], 因此相对来说, 本文方法的抗噪声攻击的能力更强。

5、旋转攻击

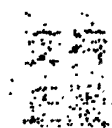
对嵌入水印后的图像进行旋转攻击, 再将水印从经过旋转攻击后的图像中提取出来。本文分别进行了 45° 和 60° 的旋转攻击。



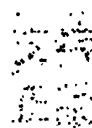
(a) 45° 旋转

(b) 60° 旋转

图 6.13 经过旋转攻击的图像



(a) 45° 旋转



(b) 60° 旋转

图 6.14 旋转攻击后提取的水印

表 6.11 旋转攻击实验数据分析

旋转角度	旋转后的图像	提取的水印	提取出的水印 NC 值
45°	图 6.13(a)	图 6.14(a)	0.8945
60°	图 6.13(b)	图 6.14(b)	0.8766

表 6.12 旋转 45° 攻击实验数据对比表

	本文	文献[43]	文献[10]
NC	0.8945	0.7965	0.8305

由表 6.11 和表 6.12 可以看出,本文的方法比文献[10]、[43]具有更好的抗旋转攻击的能力。但是从上述数据也可以看出,本文算法对旋转攻击的抵抗能力要弱于对于其他攻击的抵抗能力,因此这也是本文算法今后需要改进的方向和重点。

6.4 本章小结

本章对本文研究的数字水印算法进行了仿真实验,包括水印的嵌入和提取,以及攻击实验。并将本文研究的算法与文献[10]、[43]的实验数据进行了对比,结果显示本文研究的算法具有更好的鲁棒性和不可见性。

第7章 总结与展望

7.1 论文总结

在阅读了大量的关于数字水印的文献和资料之后,本文对相关技术进行了分析,并对一些算法做了进一步的研究和改进,以期得到更好的结果。

本研究主要展开了以下工作:

1、对数字水印预处理方法进行了改进

已有的数字水印预处理方式是先将水印进行 Arnold 变换,再进行 QR 分解,这样只有单密钥,容易遭到破解,安全性能有待提高。本研究对此加以改进,提出了新的水印预处理方法:先将水印图像进行 QR 分解,得到 Q、R 两个矩阵,再分别对 Q、R 矩阵进行 Arnold 变换,得到双密钥,使得水印在嵌入之后不容易被破解,安全性能进一步得到了提高。本研究通过仿真实验对此进行了验证。

2、对人眼视觉系统的 JND 门限值的计算方法进行了改进

在根据人眼视觉特性确定水印的嵌入强度时,原有的一些方法未能全面考虑到某个视觉掩蔽因子的值过小而导致乘积 $JND(l, \theta, i, j)$ 过小的情况出现。虽然文献[43]对此问题进行了改进,但只是将乘积与其中的两个因子进行比较,取最大值作为结果,这样仍未考虑到所有因子的重要性,在一些情况下仍然无法得出最理想的结果。本文针对该问题做了进一步改进,将乘积 $JND(l, \theta, i, j)$ 分别和三个掩蔽因子进行比较,取其中的最大值作为噪声敏感模型嵌入强度的系数,这样能够在保证水印不可见性的前提下,达到最大强度地嵌入。

3、综合运用了改进后的预处理方法和 JND 门限值的计算方法

本文通过研究分析已有的数字水印相关算法和技术,在对算法进行了改进之后,综合应用了这些算法实现水印的嵌入,并且取得了较好的实验效果。

7.2 待解决的问题

本文研究的水印嵌入算法具有良好的鲁棒性,经过本算法嵌入的数字水印图像在受到各种攻击之后,仍能提取出比较完整的水印,达到了预期的目标。

但是本文提出的算法仍存在着以下不足之处：由于目前数字水印理论和技术限制，水印无法对所有的几何攻击都表现出较强的鲁棒性，这在本文的实验结果中也得到了体现，比如本文的水印算法在受到旋转攻击后，提取出的水印图像的失真度比较大，尽管仍然可以被识别出，但是检测效果并不理想。所以提高水印算法抗攻击能力的全面性，尤其是对旋转等特殊攻击的鲁棒性，是今后研究的重点。

致 谢

本论文从最初的准备和研究阶段，到最后的撰写过程，都是在导师齐影虹副教授的耐心指导和关怀下进行，并最终完成的。齐老师广博和深入的学术见解，严谨负责的态度以及谆谆的教导，不仅在课题研究上给了我莫大的帮助，也端正了我研究算法和撰写论文的态度。齐老师更是我心灵上的导师，每当迷茫困惑之时，在与她交流之后，总能得以释怀，并找到继续前进和奋斗的动力。她无微不至的关心总能给我以亲人般的温暖，伴随着如此感觉，我度过了两年半的研究生生涯。在此，向齐老师表示衷心的感谢！

同时还要借此机会，感谢计算中心的领导和全体老师在这两年半的时间里所给予的关心和教诲，师生间的和睦相处，为中心的优良氛围再增添了几分和谐；还要感谢历届学长的鼎力相助和同届同学们在日常生活中的朝夕相伴，他们不仅给予了各种帮助，也为我的研究生生涯平添了太多乐趣；最后还要感谢父母，是他们哺育我成长，给了我无私的爱，也是他们教会了我怎样做人，如何处世。

最后，在论文完成之际，我希望自己能够顺利毕业，成功踏入社会，走上工作岗位，迎来人生新的篇章！

潘文锋

2010年11月10日

参考文献

- [1] 李超. 数字水印技术探究[J]. 电子科学, 2009, (2):14~15.
- [2] 戴子春. 基于 DWT 的数字水印算法研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(5):571~574.
- [3] 段贵多. 针对版权保护和内容认证的图像数字水印研究[D]. 电子科技大学, 2009.
- [4] 赵翔, 郝林. 数字水印综述[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(11):1946~1950.
- [5] 陈洪涛, 朱从旭. 一种基于 HVS 的图像小波域鲁棒性数字水印[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(10):78~81.
- [6] Lie WN, Lin GS, Wang TC. Digital Watermarking for Object-based Compressed Video[A]. The 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'2001) [C]. Sydney : ISCAS , 2001 :49~52.
- [7] 刘志军. 基于小波域的自适应盲检彩色水印算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(7):1792~1794.
- [8] 丁文霞, 王浩, 刘立勇. 一种基于混沌系统的多功能彩色图像数字水印算法[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(12):44~48.
- [9] 郭玉辉, 高世伟. 结合人类视觉系统的数字图像水印技术[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(1): 9~11.
- [10] 王树梅, 赵卫东, 王志成. 一种基于 QR 分解的 DWT 域水印算法[J], 2008, 25(5): 51~54.
- [11] 陈青, 王延平. 数字水印—知识产权保护的新技术[J]. 中国图象图形学报: A 辑, 1999, 4(9):800~804.
- [12] 袁征. 可证安全的数字水印方案[J]. 通信学报, 2008, 29(9):91~96.
- [13] 刘瑞祯, 谭铁牛. 数字图像水印研究综述[J]. 通信学报, 2000, 21(8):39~48.
- [14] 孙圣和, 陆哲明. 数字水印处理技术[J]. 电子学报, 2000, 28(8):85~90.
- [15] 易开祥, 石教英, 孙鑫. 数字水印技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(2): 111~117.
- [16] 郭磊. 数字图像的稳健水印技术研究[D]. 西安电子科技大学, 2004.
- [17] 张汗灵. Matlab 在图像处理中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008, 344~350.
- [18] 尹浩, 林闯, 邱峰等. 数字水印技术综述[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(7): 1093~1099.
- [19] 熊玲. 图像 LSB 隐写分析算法研究[D]. 西南交通大学, 2010.
- [20] 马刚, 蒋志新, 卫红春. 一种基于 LSB 的易碎性数字盲水印算法[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(8):205~208.
- [21] 瞿新南, 孙秋艳. 基于 DCT 的图像置乱程度评价方法[J]. 计算机工程, 2009, 35(10): 164~167.
- [22] 鲁业频, 李凤亭, 陈兆龙等. 离散余弦变换编码的现状与发展研究[J]. 通信学报, 2004, 25(2):106~118.

- [23] 杨涛, 徐建锋, 杨国光等. 基于数字全息和离散余弦变换的数字水印技术[J]. 光电工程, 2009, 36(12):91~96.
- [24] 程兴国, 王襄, 曾嵘. DCT 域中 DC 分量上嵌入水印的算法[J]. 现代电子技术, 2007, 30(3):57~59.
- [25] 孙见青, 汪荣贵, 李守毅. 基于 DC 分量和 AC 分量相结合的数字水印技术[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2007, 30(7):825~828.
- [26] 崔东峰, 王相海. 基于 DCT 的自适应图像盲水印算法[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(6):1355~1357.
- [27] 鲍昀霞, 何东健. 基于 DCT 的彩色图像水印算法[J]. 微电子学与计算机. 2007.
- [28] 丁缪, 程显毅, 徐波. DCT 域加密自适应数字水印算法[J]. 计算机应用研究, 2009, (12):4768~4770.
- [29] 杨志疆, 徐丹. DWT 域基于位平面的图像公开水印算法[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(1):71~73.
- [30] 刘晶, 刘刚, 何文娟. 基于 NSCT 和 DWT 的鲁棒数字水印算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(13):163~165.
- [31] 王志伟, 朱长青, 殷硕文等. 一种基于 DFT 的 DEM 自适应数字水印算法[J]. 计算机图象图形学报, 2010, 15(5):796~801.
- [32] L.J. Cox, M.L. Miller. "The First 50 Years of Electronic Watermarking," EURASIP Journal of Applied signal processing, 2002, 2002(2):126~132.
- [33] C.I. Podilchuk and E.J. Delp. "Digital watermarking: algorithms and applications," IEEE Sinal Processing Magazine, 2001, 18(4):33~46.
- [34] 同鸣, 冯玮, 姬红兵等. 一种强稳健性的抗几何攻击图像水印算法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(24):6613~6616.
- [35] 王颖, 郑雪峰, 刘海燕. 基于图像的数字水印攻击技术的研究[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(8):2274~2277.
- [36] 孟晓锋, 孙悦庭, 尹忠科. 小波域基于块能量分析的数字水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(15):71~72.
- [37] 杨红梅, 梁永全, 刘连山. 基于 DWT 的彩色图像水印不可感知性评价[J]. 计算机科学, 2008, 35(10):208~211.
- [38] 黄小乔, 石俊生, 杨健等. 基于色差的均方误差与峰值信噪比评价彩色图像质量研究[J]. 光子学报, 2007, 36(B06):295~298.
- [39] Rafael C.Gonzalez, Richard E.Woods 著. 数字图像处理 (MATLAB 版) [M]. 阮秋琦等译. 北京: 电子工业出版社, 2005, 310~405.
- [40] 杨恒伏, 孙光, 田祖伟. 基于 HVS 特性的图像自适应中值滤波算法[J]. 计算机工程. 2009, 35(11):231~233.
- [41] 白永强, 朱仲杰, 段智勇等. 结合 HVS 特性的视频图像质量评价[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(27):181~187.
- [42] 吴晓, 龙奕, 尹忠科等. 依据 HVS 的改进 Bandelet 变换域图像数字水印[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(8):163~166.

- [43] 吕宝成. 基于 DWT 与人眼视觉的自适应数字水印算法[D]. 西北师范大学, 2009.
- [44] 陈洪涛, 朱从旭. 一种基于 HVS 的图像小波域鲁棒性数字水印[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(10):78~81.
- [45] 刘利田, 常建平. 一种基于 HVS 的彩色图像水印算法[J]. 计算机工程, 2007, 33(24):144~145.
- [46] 宋琼琼, 贾振红. 基于人眼视觉特性的混合滤波算法[J]. 激光杂志, 2008, 29(2):22~24.
- [47] 苏庆堂, 孙中红, 张英俐. 基于 IWT 和 HVS 的彩色图像盲水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(31):178~179.
- [48] Huang Daren, Liu Jiufen, Huang Jiwu. An embedding strategy and algorithm for image watermarking in DWT domain [J]. Journal of Software, 2002, 13 (7) : 1291~1297.
- [49] Hong I, Kim I, Han S S. A Blind Watermarking Technique Using Wavelet Transform [C]. Proc. of ISIE'01, Pusan, Korea, 2001:1946~1950.
- [50] 鲍德旺, 杨红颖, 祁薇等. 基于音频特征的抗去同步攻击数字水印算法[J]. 计算机图象图形学报, 2009, 14(12):2619~2622.
- [51] 何冰, 王晖, 赵杰. 基于 DWT 的抗 RST 攻击鲁棒性数字水印[J]. 计算机工程, 2009, 35(22):134~136.
- [52] 龚劬, 郭吉强. 一种基于 DWT 的双密钥自适应水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(27):127~129.

攻读学位期间的研究成果

已发表论文:

潘文锋, 刘海英. 基于 Web Service 的通信网络协议转换器的研究与应用 电脑知识与技术
2010.6

参与项目:

中国电信集团公司江西分公司, “江西省宽带预处理系统”