

摘 要

随着数字网络通讯的飞速发展以及数字多媒体的广泛应用，数字水印技术已经成为数字版权保护领域研究的一个热点问题。数字水印技术就是将特定的信息嵌入到数字媒体中，从而保护数字媒体或者特定信息的安全。

本文主要研究针对图像水印系统的算法研究，主要在以下几个方面开展了工作：

- 1) 采用二值图像作为水印信号，利用变换域系数作为水印的载体，在保证不降低图像质量的前提下达到嵌入水印的目的，在恢复水印的过程中无需原始图像的参与，相比较那些需要利用原始图像恢复数据的系统，文中所提出的方案更具有实用性。所有的过程，包括嵌入、攻击、提取、验证均在 MATLAB 环境中进行模拟。实验证明经过信号处理与压缩后，水印仍然可以被检测出来。
- 2) 对频率域数字水印算法进行分析，提出了将水印信息嵌入到中频系数中。为了得到中频系数采用了依据心理视觉阈值制作的量化表对频率域系数进行量化。在基于 DWT 域数字水印算法中提出用提升格式实现小波变换，并采用 Daubechies9/7 函数作为小波变换基。在 DWT 水印系统中，利用小波变换的多分辨率特性提取影响图像纹理的参数作为水印的载体，利用纹理的隐蔽特性，使得系统在保证健壮性的同时获得很好的不可觉察性。相比较 DCT 系统，DWT 水印系统可以实现水印的自适应嵌入。DWT 的多分辨率特性可以将人眼视觉特性与图像的统计特性结合起来，为设计最优的水印系统提供了一种可能，具有更大的发展空间。
- 3) 利用建立的水印模型对影响水印系统的各种因素，包括水印嵌入的位置、嵌入的强度，水印的结构、水印的容量、人类视觉系统对系统性能的影响

响进行全面的综合分析，为优化系统性能提出一定的可参考的建议。

关键词：数字水印，离散余弦变换，离散小波变换，提升格式，多分辨率分析

Abstract

With the rapid growth of Internet technologies and extensive use of multimedia data, digital watermark has become a popular topic in the field of digital copyright protection. Digital watermark serves as protecting the securities of digital multimedia by embedding special information into it.

This paper is focused on images watermarking algorithm, It developed mainly in the follow aspects:

1. This paper is focused on images watermarking algorithms. Watermark casting operates in frequency domain, embeds pseudo-random sequence of real number in selected coefficients without image degradation. A blind watermark retrieval technique that can detect the embedded watermark without resorting the original image is proposed, so that the proposed techniques represents a major improvements to those relying on the comparison between the watermarked and original image, which is not practical for a huge image database. All process, include watermark embedding, extracting and verification are simulated in MATLAB environments. Experimental results show that the embedded watermark is robust against various signal processing and compression attacks.
2. This paper analyzed the frequency domain watermark algorithm. Embedded the watermark information into intermediate frequency in the DCT based watermark algorithm. This paper chose lifting scheme and Daubechies9/7 function to finish wavelet transform. In DWT base system, a couple of significant wavelet coefficients in detailed sub-bands are selected to embed watermarks by first level decomposing. A better image quality (imperceptibility) can be gained by exploiting human visual system. Compared with DCT based system, DWT base watermark system is an adaptive system. As the multi-resolution property of DWT enable DWT based

watermark system combine the statistic characteristic of image with human visual system, make it possible to find an optimal system.

3. Using proposed system test the parameters which work on the system performance, such as embed position, embed strength, watermark structure, image capacity and HVS etc.

Keywords: digital watermark, discrete cosine transform, discrete wavelet transform, lifting scheme, multi-resolution analysis

哈尔滨工程大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：本论文的所有工作，是在导师的指导下，由作者本人独立完成的。有关观点、方法、数据和文献的引用已在文中指出，并与参考文献相对应。除文中已注明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经公开发表的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标名。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者（签字）：郭永春

日期：2005年2月24日

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

随着数字技术和因特网的发展,各种形式的多媒体数字作品纷纷以网络形式发表,然而数字作品的便利性和不安全性是并存的,它可以低成本、高速度地被复制和传播,这样就为创造者和使用者都提供了很大的便利,但这些特性也容易被盗版者所利用,因而,采取多种手段对数字作品进行保护、对侵权者进行惩罚已经成为十分迫切的工作。除了与传统作品版权保护相类似的法律和管理手段外,还应该针对数字作品本身的特点为其提供技术上的保护。数字水印技术的研究就是在这种应用要求下迅速发展起来的。

数字水印是一种有效的数字产品版权保护和数据安全维护技术,是信息隐藏领域的一个重要的分支。它将具有特定意义的标记,利用数字嵌入的方法隐藏在数字图像、声音、文档、图书、视频等数字作品中,用以证明创作者对其作品的所有权,并作为鉴定、起诉非法侵权的证据,同时通过对水印的检测和分析来保证数字信息的完整可靠性,从而成为知识产权保护 and 数字多媒体防伪的有效手段。在本文中,我们将待嵌入水印的数字产品称为掩体对象或载体,将嵌入水印后的数字产品称为隐藏对象或含水印载体。

数字水印技术除应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,如果隐藏的信息被破坏掉,系统可以视为安全的,因为秘密信息并未泄漏;但是,在数字水印系统中,隐藏信息的丢失即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稳健性、安全性和透明性。

1.2 数字水印概述

从狭义上来讲数字水印技术,是将一些特定信息,按照某种方式植入宿主信息中。当宿主信息在网络传播或其它状态下被非法复制从而产生版权纠纷或信息被非法篡改时,通过相应的算法提取出该数字水印,从而验证版权

的归属或宿主信息的完整性，确保著作权人的合法利益或者确保信息的完整性。宿主信息可以是任何一种数字媒体，如图像、声音、视频或一般性的电子文档等。数字水印是嵌在数字产品中的数字信号，水印的存在要以不破坏原数据的欣赏价值、使用价值为原则。目前数字水印技术已经不仅仅用于版权保护和完整性验证。它可以按照不同的分类方法分为各种水印模式，不同的水印模式或几种混合模式下的水印技术可以应用于不同方面。数字水印技术可以从不同的角度进行划分：

按水印的嵌入方法可以分为可见水印和不可见水印。可见水印是指被嵌入水印数据在嵌入水印信息以后，水印信息仍能被人眼观察到，它可以理解为通常意义上的图像融合。不可见水印则相反，指的是在嵌入水印后，水印信息不能够依靠视觉直接观察得到。由于可见水印对图像质量的影响，以及其技术已经相当成熟，因此在本文中只探讨对于不可见水印的研究。

按水印的特性可以将数字水印技术分为健壮数字水印和脆弱数字水印两类。健壮数字水印主要用于在数字作品中标识著作权信息，如作者、作品序号等，它要求嵌入的水印能够经受各种常用的编辑处理；脆弱数字水印主要用于完整性保护，与健壮水印的要求相反，脆弱水印必须对信号的改动很敏感，人们根据脆弱水印的状态就可以判断数据是否被篡改过。

按水印信息附载的媒体可以将数字水印划分为图像水印、音频水印、视频水印、文本水印以及用于三维数据模型的三维水印等。随着数字技术的发展，会有更多种类的数字媒体出现，同时也会产生相应的水印技术。

按水印的检测过程可以将数字水印划分为明文水印和盲水印。明文水印在提取水印过程中需要原始数据，而盲水印的提取过程只需要嵌入水印后的数据，不需要原始数据。一般来说，明文水印的健壮性比较强，其中在中所提到的算法都属于明文水印，但其应用受到存储成本的限制，而在本文中提到了明文水印和盲水印算法。目前学术界研究的数字水印大多数是盲水印。

按数字水印的内容可以将水印划分为有意义水印和无意义水印。有意义水印是指水印本身也是某个数字图像或数字音频片段的编码；无意义水印则只对应于一个序列号。有意义水印的优势在于，如果由于受到攻击或其他原因致使解码后的水印破损，人们仍然可以通过视觉观察确认是否有水印。但对于无意义水印来说，如果解码后的水印序列有若干码元错误，则只能通过

统计决策来确定信号中是否含有水印。

按数字水印的隐藏位置，可以将其划分为空域数字水印、频域数字水印、生理模型算法等。其中频域数字水印算法又分为 FFT 域、DCT 域、DWT 域等算法。

数字水印技术在 90 年代被提出以后便得到很多研究者的重视，而其本身的应用领域也十分广泛：

1) 数字作品的版权保护

数字作品如电脑美术、扫描图像、数字音乐、视频、三维动画等的版权保护是当前的热点问题。由于数字作品的拷贝、修改非常容易，而且可以做到与原作品完全相同，这些复制作品的任意传播与不正当利用严重侵犯了原创者的合法权益。而目前原创者用来保护其版权利益的方法无非是加入可见标志，这也是通常意义上的可见水印，但是这种水印不仅不能避免拷贝者轻易破坏水印信息，而且加入可见水印信息对图像质量也有很大影响。近年来兴起的不可见水印可以有效的解决这个问题。

2) 商务交易中的票据防伪

随着高质量图像输入输出设备的发展，特别是精度超过 1200dpi 的彩色喷墨、激光打印机和高精度彩色复印机的出现，使得货币、支票以及其他票据的伪造变得更加容易。据美国官方报道，仅在 1997 年截获的价值 4000 万美元的假钞中，用高精度彩色打印机制造的小面额假钞就占 19%，这个数字是 1995 年的 9.05 倍。目前，美国、日本以及荷兰都已开始研究用于票据防伪的数字水印技术。另一方面，在从传统商务向电子商务转化的过程中，会出现大量过渡性的电子文件，如各种纸质票据的扫描图像等。即使在网络安全技术成熟以后，各种电子票据也还需要一些非密码的认证方式。数字水印技术可以为各种票据提供不可见的认证标志，从而大大增加了伪造的难度。

3) 数据完整性保护

数据的完整性提示是一个很重要的工作。现有的信号拼接和镶嵌技术可以做到“移花接木”而不为人知，因此，如何防范对图像、录音、录像数据的篡改攻击是重要的研究课题。基于数字水印的篡改提示是解决这一问题的理想技术途径，通过隐藏水印的状态可以判断声像信号是否被篡改。脆弱水印可以用来检测数据的完整性，它可以确定出数据是否被改变而且可以确定

数据改变的位置。

4) 隐藏数据标识

数据的标识信息往往比数据本身更具有保密价值，如遥感图像的拍摄日期、经/纬度等；在医学图像中隐藏水印和患者姓名是非常有效的安全保护方法。在视频信息目录中嵌入一些有关制作人和内容方面的注释，则搜索引擎可以通过这些来对电影或者新闻等视频内容进行检索。没有标识信息的数据有时甚至无法使用，但直接将这些重要信息标记在原始文件上又很危险。数字水印技术提供了一种隐藏标识的方法，标识信息在原始文件上是看不到的，只有通过特殊的阅读程序才可以读取。这种方法已经被国外一些公开的遥感图像数据库所采用。

5) 数据隐藏

数字水印所依赖的信息隐藏技术不仅提供了非密码的安全途径，更引发了信息战尤其是网络情报战的革命，产生了一系列新颖的作战方式，引起了许多国家的重视。网络情报战是信息战的重要组成部分，其核心内容是利用公用网络进行保密数据传送。迄今为止，学术界在这方面的研究思路一直未能突破“文件加密”的思维模式，然而，经过加密的文件往往是混乱无序的，容易引起攻击者的注意。网络多媒体技术的广泛应用使得利用公用网络进行保密通信有了新的思路，利用数字化声像信号相对于人的视觉、听觉冗余，可以进行各种空域和变换域的信息隐藏，从而实现隐蔽通信。水印技术还可以用在发送秘密的私人信息，因为政府对密码服务有一定的限制，则人们可以在其他的数据中隐藏他们的真实信息。

6) 内容保护

虽然可见水印在版权保护，完整性保护方面的应用不是很广泛，但是在某些应用中，却需要用可见水印达到保护的目。例如，多媒体作品的提供者希望向潜在的购买者提供一个作品的预览，为了使预览作品失去商业价值，常将一个可见的难以去除的水印叠加在作品之上。

7) 法庭认证

水印信息的提取可以提供证据来证明过失的承担者。例如，在跟踪非法拷贝中，对不同的用户，在数据中隐藏不同的水印信息。这个信息可以是和用户身份相关的一个序列号或者用户的图像标志。当数据被非法传播或盗用，

则可以通过水印信息使产权所有者确定是谁违反合同给第三方非法的提供数据。

8) 使用控制

可以对系统所涉及到的图像或视频实施拷贝次数控制,每进行一次拷贝,硬件对水印修改一次,当允许拷贝数降为 0 时,硬件将不再产生新的拷贝,一个典型的例子是 DVD(Digital Video Disc)系统。另一个典型例子是,由索尼和飞利浦公司提出的 SCMS (Serial copy management system)就是在磁带上加上一个布尔型标签,来控制使用者复制的次数,使用者只能复制一次,不能多次复制,从而用这种方法来实现防止批量拷贝。在商业广告中加入水印,系统可以自动监听来确定是否正常播放了广告。

1.3 数字水印特征

数字水印技术不同于传统的加密技术,因为其目的不在于限制正常的资料存取,而在于保证数据在被非法拷贝后能够证明其所有者。因此,数字水印技术必须考虑正常的信息操作所造成的威胁,即要数据信息对正常的操作技术具有免疫能力,这种免疫力的关键是要使隐藏信息部分不易被正常的数据操作所破坏。

在本文所研究的数字水印技术中,主要研究不可见数字水印和健壮数字水印,此类数字水印的基本特征有:

健壮性(robustness),指不因数据文件的某种改动而导致水印信息丢失的能力。这些改变包括常见图像处理如数据压缩、低通滤波、图像增强、二次抽样、二次量化、A/D 和 D/A 转换等;几何变换和几何失真如裁剪、尺度拉伸、平移、旋转、扭曲等;噪声干扰、多重水印(multiple watermarking)的重叠等。而且要能够承受一定程度的人为攻击,而使隐藏信息不会被破坏。

不可检测性(undetectability),指数字水印嵌入算法是秘密有效的,不能使得破坏者轻易检测到水印的存在,甚至提取出水印信息,从而达到破坏水印信息的目的。

透明性(invisibility),利用人类视觉系统或人类听觉系统属性,经过一系列隐藏处理,使目标数据没有明显的降质现象,而隐藏的数据却无法人为地看见或听见。

自恢复性(self-restoration), 所谓的自恢复性是指由于经过一些操作或变换后, 可能会使原始图像产生较大的破坏, 而只从留下的片段数据, 仍能恢复出水印信号, 而且这种恢复过程不需要原始图像, 则称这样的数字水印算法具有好的自恢复性。

除此之外, 数字水印技术还必须拥有以下特征才能达到其保护版权的目的: 首先, 嵌入水印操作后的图像要保持其质量没有下降, 也就是说嵌入不可见水印不会影响到图像质量。其次, 在水印提取过程中要避免使用原始图像, 大量原始图像的存储是不经济的。

1.4 数字水印技术研究动态

在 20 世纪 80 年代, 索尼和飞利浦公司首次提出了数字媒体版权保护的方案 SCMS (Serial copy management system)。数字水印技术也是在继数字隐藏技术后提出的一种数字媒体版权保护方案, 发展到现在它的应用领域已经不局限于版权保护, 而且各国研究者也在这方面做出了杰出的贡献, 提出并实现了一系列有代表性的算法。下面是近几年出现的关于媒体数字水印的一些典型算法, 这些算法可以分为三种类型:

1) 空域算法:

空域算法指的是实现数字水印嵌入和提取的过程全部在空间域中完成, 不需要进行频率域的变换, 最早提出的空域算法就是著名的 LSB(Least Significant Bits)方法, 它是将水印信息安排在象素的最低位, 也是最不容易引起图像有较大视觉变换的位置。作为几个比较实用的软件包之一的 Stego 就采用了改变图像最低位信号实现图像水印的目的。这样的算法不够健壮, 目前对于这种方法提出了很多改进算法, Lippman 曾经提出将水印信号隐藏在原始图像的色度通道中。Bender 曾经提出了两种方法, 一种是基于统计学的“patchwork”方法, 另一种是纹理块编码方法。在空域水印算法中, 值得一提的是文本水印算法, 这种算法主要是轻微改变字符间距, 行间距或是增加、删除字符特征, 如底纹线等方法来嵌入水印。同样, 这些方法也很脆弱, 攻击者可以通过调整行、列间距来破坏水印。另外的途径是在符号级或语义级加入水印。例如, 可以用 big 来替换文本中的 large, 不过这种方法仍然不是很有效。

2) 频域算法:

频域算法与空域算法不同,指的是嵌入或者提取水印的过程中,需要进行频率域的变换操作,这样做的目的是增强水印算法的健壮性,使得图像在有损压缩和滤波后仍能很好的提取出水印信息。有人提出一种适用 JPEG 有损压缩的算法。它采用 DCT 来实现空间域到频率域的变换。NEC 实验室的 COX 等人提出的基于扩展频谱的水印算法在数字水印算法中占有重要地位,这一算法提出了强壮水印算法的几个重要原则:首先,水印信号应该嵌入数据中对人的感觉最重要的部分。在频率域中这个重要部分就是低频分量。一般的图像处理技术并不去改变这部分数据,水印的健壮性大大提高。其次水印信号应该由具有高斯分布的独立同分布随机实数序列构成。这使得水印经受多拷贝联合攻击的能力大大增强。NEC 的实现思想是:对整幅图像做 DCT 变换,选取除 DC 分量外的 1000 个最大的 DCT 系数插入由 $N(0,1)$ 所产生的一个实数序列水印信号。

3) 生理模型算法:

近年来利用人类生理模型的特性,包括 HVS(Human visual system)和 HAS (Human auditor svstem)来提高多媒体数据压缩系统质量和效率的研究得到了许多关注。这些方面的研究结果同样可以供数字水印系统利用。

目前,用于版权保护的数字水印技术正处于研究阶段,其中有许多公司都在致力于这方面的研究,包括 Digimarc, Signum Technologies, Central Research Laboratories, 和 Alpha-Tee 等。IBM 公司在其“数字图书馆”软件中就提供了数字水印功能,Adobe 公司也在其著名的 Photoshop 软件中集成了 Digimarc 公司的数字水印插件。麻省理工学院媒体实验室受美国财政部委托,已经开始研究在彩色打印机、复印机输出的每幅图像中加入唯一的、不可见的数字水印,在需要时可以实时地从扫描票据中判断水印的有无,快速辨识真伪。然而实事求是的说,目前市场上的数字水印产品在技术上还不成熟,很容易被破坏或破解,而且由这几个公司开发的应用型数字水印系统都是比较简单的,像 Photoshop 中所用到的数字水印技术只是实现了对于二维图像中加入时间戳信息和作者文本信息的功能,不能实现加入作者标志或者图像信息等功能。而且它们所开发的是面向二维图像的数字水印,在三维模型数字水印方面还是刚刚起步。因此在数字水印技术方面还需要继续加强研究,

尤其是针对专门领域的特有的数字水印技术的研究。

1.5 本课题概述和研究总论

随着数字化产品的普及，特别是随着因特网用户的成倍增长和网络带宽的增加，加之电子商务技术的成熟，在网络上直接销售数字化产品是一个趋势，数字产品在网络上的自由流通对版权保护提出迫切的要求，也提出了一个新的商业契机。同时在军事和国防领域方面也有水印技术的发展空间，例如利用数字水印技术保护秘密传递的军事信息的完整性，确保信息的真实可靠，或者用水印技术来验证军事口令等等。

国内目前还没有成熟的产品问世，但在近两、三年来也有一些大学机构从事水印算法的研究。针对信息时代对版权保护的迫切要求，我们也应该加紧研制自己的水印产品。该课题的选题也是基于此而设定的。

课题的研究对象是二维静态图像水印系统，主要内容如下：

- 1) 建立了完整的数字图像水印系统处理模型，包括水印的嵌入、提取、与验证过程(在 MATLAB 环境中仿真实现)。
- 2) 针对目前在 JPEG 和 JPEG2000 压缩标准中所采用的离散余弦变换(DCT)和离散小波变换(DWT)，主要研究基于 DCT 和 DWT 的两种不同的水印方案，并对两种系统的性能进行比较。在 DCT 水印方案中，对图像的 DCT 频谱进行 Z 字排序后，提取中频系数作为水印的载体；在 DWT 水印系统中，对图像进行提升格式的二级子带分解，改变细节子带中水平子带系数的位置，即影响图像纹理的参数作为水印的载体。
- 3) 利用建立的水印模型对影响水印系统的各种因素，包括嵌入位置、嵌入力度、水印容量、人类视觉系统(HVS)对系统的影响进行比较综合分析。

实验证明两种水印系统对于通常的信号处理和图像处理具有较好的鲁棒性，但由于小波变换良好的时-频局部特性，使得 DWT 系统具有更优的性能，DWT 的多分辨特性能够实现水印的自适应嵌入，为处理大批量图像提供了方便，具有更较好的推广应用价值。

此外，在目前已有的水印方案中，由于更侧重于系统健壮性的要求，一般均选择视觉最重要部分作为水印的载体(低频参数)，而本文的方案基于不可见性和健壮性的考虑，均保留了低频参数不被修改，选择视觉次重要部分

作为水印的载体，实验证明，通过调整水印的嵌入力度以及增加水印在图像中的冗余分布，可以获得更好的健壮性。

第 2 章 数字图像水印的基础理论与框架

2.1 水印系统基础框架

图像水印系统的基本思想是在一幅宿主图像(原始图像)中嵌入一个秘密信息(即水印),而且要保证水印是不可觉察而且安全的,在知道水印嵌入过程中所用密钥的情况下,应该可以恢复嵌入的秘密信息,如图 2.1 所示。所有的水印系统都应包括两个基本模块:水印嵌入模块和水印提取模块。

原始图像经过一定的调整后生成水印图像,然后已经嵌入水印的图像可以再通过各种媒介展示给潜在的顾客群,其中图像可能遭遇各种攻击,包括无意攻击以及盗版者的恶意攻击,最后对于有版权争议的图像可以进行验证,以确定版权的归属。

水印可以是任何形式的数据,高斯噪声、随机序列、二维图像等等。

密钥可以用来加强系统的安全性,以避免非授权方恢复和修改水印。Kerckhof 准则的一个直接应用为:水印算法应该是公开的,并且为了防止水印被偶然地移除,不可以直截了当地得到完整的水印。这可以通过水印信息在原始图像中的位置来实现。在许多方案中,由一个密钥控制的伪随机数生成器决定水印嵌入的位置以及水印本身的结构,因此只有密钥所有者是唯一一个可以获取水印的人。

在嵌入过程中可以利用 HVS(人的视觉系统)特性,调整水印嵌入的力度或者位置,以期在保证水印嵌入不可觉察的前提下,加入尽可能强的水印信号到原始图像中,以便提高水印的健壮性。

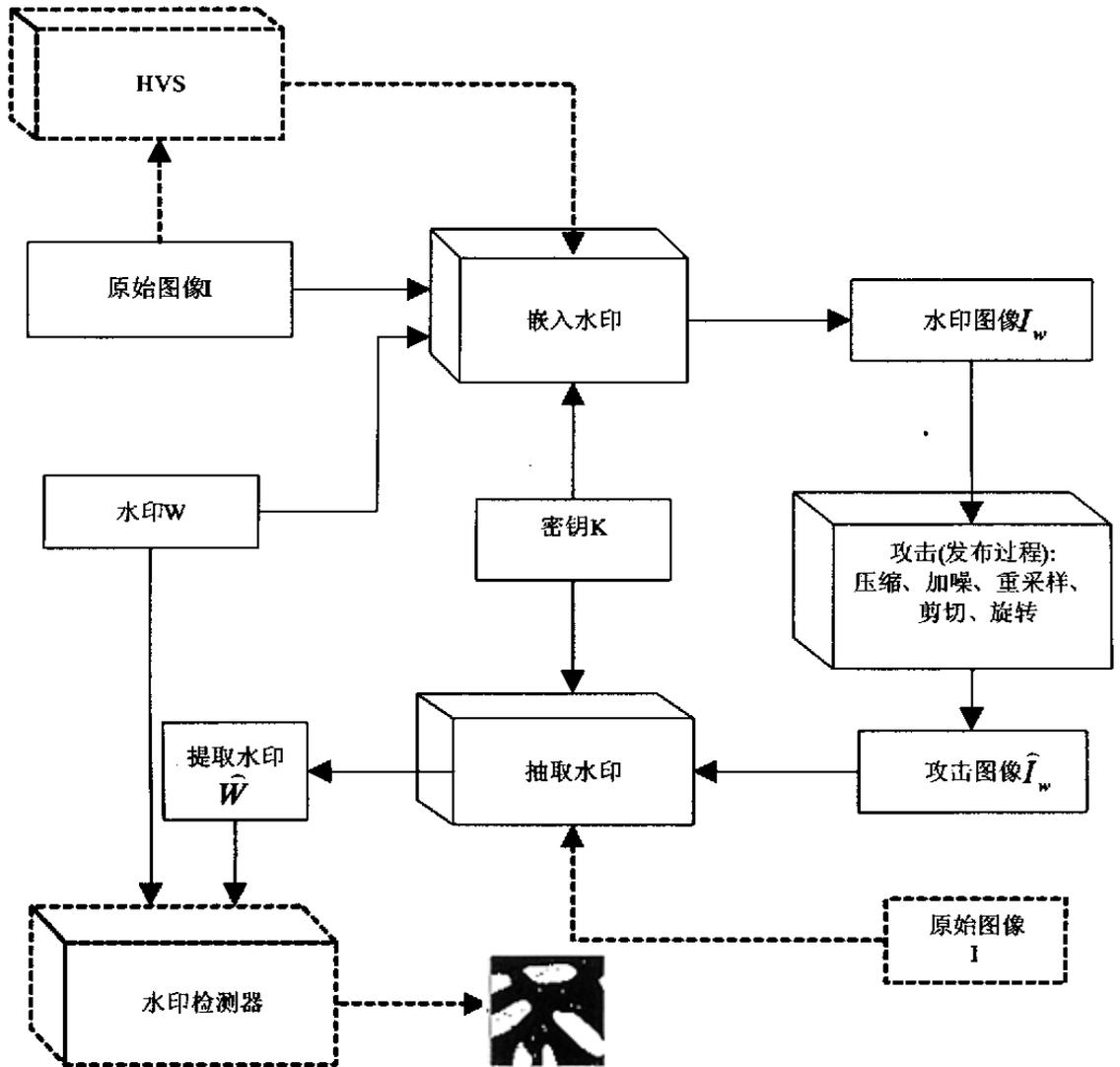


图 2.1 水印的基本流程

2.2 水印系统的要求和算法设计问题

1) 不可感知性

对水印系统的一个重要的要求就是水印可感知的透明度，要保证在水印嵌入的过程中不引入人为修改的痕迹，因为人为痕迹会减少或破坏数据的商业价值。也就是说因嵌入水印而引起的变动应该低于可见阈度值—可见阈度值指人眼刚好能发现的干扰值，低于该阈值的干扰是觉察不出来的。由于水印系统所必需的不可觉察性，用来嵌入水印的每个样本值只能做微小的修改。因此，设计这样的水印方法是重要的，它利用人眼的视觉特性，在不超过可感知门限的约束下，使水印的能量取得最大值。

2) 健壮性

加入水印的图像在传输和发布过程应该对可能发生的技术性修改具有健壮性。加入水印的目的就是为了为图像提供版权保护，如果对图像稍稍的修改就会移除水印，那水印也就失去了本身的意义。健壮性要求对图像进行一些常见的信号处理或者图像操作后仍然能够检测出水印，比如对图像进行滤波、噪声干扰、边缘增强、抖动、剪切、扫描、有损压缩、A/D, D/A 转换等操作。另外，水印技术还应能抵御各种有意的破坏，它们包括移去水印和使水印无法提取。根据水印应用目的，它所要求的健壮性会影响设计的过程。例如如果我们要求能容忍很高的 JPEG 压缩的水印嵌入方法，那么使用变换域的方法可能比使用时域的方法更有效。

3) 冗余性

尽管在允许的范围内所做的改动很小，为了保证健壮性，通常将水印信息冗余的分布在很多的样本中，从而得到整体的健壮性，这意味着利用一小部分已嵌入水印的数据就可以恢复出水印。

4) 检测水印是否需要原始图像

通常在提取水印过程中使用原始数据的方法会提高水印系统的健壮尤其是针对数据中的几何失真而言，因为它允许几何失真中的检测和定位。不过在很多应用中，有可能得不到原始数据或者存贮原始数据‘需要占用很大的空间，另外，检测时需要原始数据也会给数据的安全性带来更多的危险。所以设计一个不需要原始数据的水印技术是一个明显的趋势。本文设计的水印系统在提取水印的时候均不需要原始图像的参与。

5) 对给定水印的提取或验证

如果水印信息是特定的信息或者图案，那么通过水印提取模块解调恢复出嵌入的水印就是系统的最终目的。而如果水印信息是预定义的可容许水印集合中的一种，譬如由密钥空间中的一个密钥控制的伪随机生成器生成的高斯噪声，则需要将提取的水印与可容许水印集合相比较进行验证，这也就是检测器的功能，系统的输出是‘发现水印’或‘没有水印’的结论。

在不可感知性和健壮性之间要寻求一个合理的平衡点，是设计一个优秀的水印系统的关键，也是系统最基本的要求。因为高健壮性的系统需要更强的嵌入以及更大的冗余度，这反过来都会增加水印的可感知性。

2.3 针对水印系统的攻击

水印图像在分布过程可能会遇到有意或者无意的攻击，一个成功的水印系统应该在遭受一些处理后仍然能检测出水印的存在，或者当水印被破坏的时候，图像已经产生严重的失真而失去本身的价值。以下列出一些水印图像比较常遇到的攻击：

- 信号增强(锐化、改变图像的对比度、gamma 校正等)；
- 加性和乘性噪声(高斯、均衡、斑点)；
- 有损压缩(JPEG 压缩)；
- 局部或全局仿射变换(平移、旋转、剪切、缩放)：小角度的旋转，通常
- 合剪切技术，并不会使图像质量有所下降，但却很轻易的使水印检测失败；
- 结合 JPEG 压缩的仿射变换；
- 滤波（低通、高通、中值、高斯、均值滤波等)；
- D/A 和 A/D 变换(打印—扫描)；
- StirMark 攻击：StirMark 是一种水印测试工具，可以产生细微的随机几何变形，StirMark 引入的失真几乎不被觉察，它也不能从本质上删除水印，不过它能使检测器失去同步，阻止检测器找到水印；
- 多重水印；
- 统计平均；
- 马赛克攻击；

2.4 嵌入策略

为了提高水印系统的健壮性，选择合理的水印结构和嵌入策略是非常重要的。通常认为应将水印嵌入到视觉重要分量上，因为视觉重要分量是图像信号的主要成分，携带较多的能量，具有更大的视觉容量。另外，一般针对于多媒体的信号处理技术大都保留了这些重要分量。同时需要注意的是，对这些视觉重要分量的修改要低于可见阀度值。

2.5 水印的选择与生成

作为水印信息，不管采取形式，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，高斯噪声、随机分布的 $\{0,1\}$ 、 $\{-1,1\}$ 序列均可作为水印。

为了让水印携带更多的版权信息，有些系统是以图像(譬如 8 位灰度图像甚至彩色图像)等有意义的信号为水印信息，也称为二维水印，因为这些图像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 位灰度图像，共有 1024 字节，将其不留痕迹的嵌入到 256×256 图像中是很不容易作到的。一般在采用图像作为水印的时候，一般在嵌入过程之前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。

因为本文着重于对水印嵌入对策的研究，因而采用二值图像作为水印嵌入到原始图像当中去。

2.6 工作域选择

由于水印在时域变换方法中对于攻击往往很脆弱，不够健壮，所以我们常常采用频域变换法，频域变换法具有以下优势：

- 1) 从提高鲁棒性来看，应该将嵌入到图像的视觉上最重要的部分。视觉重要分量是图像信号的重要组成部分，携带了较多的能量，因此通常的图像压缩、信号处理都保留了这些视觉重要分量以保证图像质量没有明显失真。而图像的低频、中频系数基本代表了图像的视觉重要部分，所以采用变换域的方法，可以很容易的将图像的视觉重要分量标记出来。
- 2) 变换域的方法可以与国际数据压缩标准相兼容，由于压缩算法大都在频域进行，比如 JPEG 的 DCT，小波系数编码方法 EZW(嵌入式小波零数编码)等，可以考虑压缩域内的水印编码来提高系统抵抗压缩操作攻击的能力。

- 3) 在变换域嵌入水印信息可以分布到变换域的所有频率上, 有利于保证水印的不可视性。
- 4) 在变换域, 视觉系统 HVS 的某些特性可以更方便地结合到水印编码过程中。
- 5) 有些变换对某些变化有着固有的鲁棒性, 比如 DFT 具有仿射不变性, 对图像的空间坐标平移不敏感, 因而可以利用它来恢复经过了仿射变化的图像当中的水印, 又如对数极坐标(LPM)变换, 可以对旋转和缩放不敏感, 因此利用它可以使得对水印图像的任何旋转或缩放操作都不敏感, 而利用小波分析得多分辨特性, 使得其对图像的剪切操作不敏感。

2.7 嵌入和提取模块

数字水印的基本原理是将某些标识数据作为水印信息嵌入到宿主数据中, 并且保证水印信息在宿主数据中不可感知和足够安全。数字水印技术包含嵌入水印和提取水印两个过程。下面给出通用意义下的数字水印嵌入和提取算法, 其中水印信息可由多种模型构成, 如随机数字序列、数字标识、文本以及图像等。

首先来看水印的嵌入过程, 所谓水印嵌入过程就是将水印信息隐藏到宿主数据中, 从图像处理的角度看, 嵌入水印可以视为在强背景(原始图像)下迭加一个弱信号(水印信号), 由于人的视觉系统分辨率受到一定的限制, 只要迭加信号的幅度低于对比度门限, 就无法感觉到信号的存在, 对比度门限受视觉系统的空间、时间和频率特性的影响。因此, 通过对原始图像做一定的调整, 有可能在不改变视觉效果的情况下嵌入一些信息。另一方面, 从数字通信的角度来看, 水印嵌入过程可理解为在一个宽带信道(原始图像)上用扩频通信技术传输一个宽带信号(水印信号), 尽管水印信号具有一定能量, 但分布到信道中任一频率上的能量是难以检测的, 水印提取过程则是一个有噪信道中弱信号的检测问题。设 I 为待嵌入水印的数字图像, W 为水印信号, I' 为加入水印信号后的图像, 那么处理后的水印由函数 f 定义如下:

$$I' = f(I, W) \quad (2-1)$$

其中的 f 函数包含了原始图像以及水印信号的预处理、嵌入水印处理和

图像恢复处理。如图 2.2 所示为图像水印嵌入的一般过程：

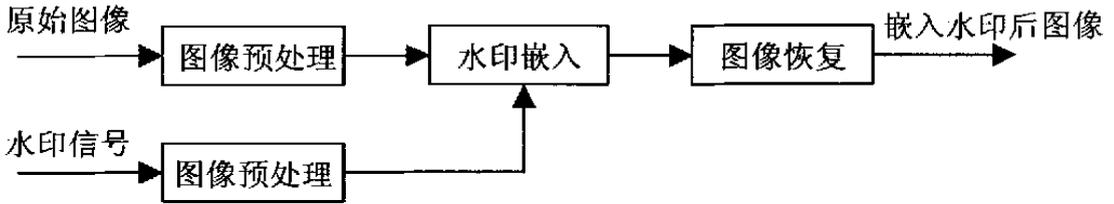


图 2.2 水印嵌入的一般过程

其中图像的预处理包含图像保证水印嵌入算法的高效以及实用而采取的一系列变换，如图像为了适应人类视觉系统而进行的颜色模型的调整、时频域转换等。图像恢复则是指在将水印信号嵌入原始图像以后对原始图像进行恢复显示的过程，使得它转换到通常所看到的空域信号，或者转换到计算机所能进行一般处理的颜色模型中来。

在图 2.2 中最关键的部分是水印嵌入，也就是水印嵌入函数 f 的作用。通常在水印嵌入的时候都是将水印信号转换成二进制码流嵌入到原始图像中，如果二进制码为 0，则对原始图像相应象素位进行一定处理，如果二进制码为 1，则对原始图像进行另外的处理，这样做的目的是方便将来的提取过程。可以用式 2-2 来表示嵌入函数作用：

$$B(W) = \begin{cases} 0, P1(I) \\ 1, P2(I) \end{cases} \quad (2-2)$$

其中 I 和 W 为经过预处理以后的数据，函数 B 是取水印图像的一位， $P1$ 和 $P2$ 是分别对原始图像的相应象素位进行函数处理。

经过这样的处理，最终得到的是不完全等同于原始图像也不同于水印信息但又同时包含原始图像信息和水印信息的一幅新图像，其在视觉上与原始图像相比几乎没有变换，而在能量上不仅具有原始图像的能量还具有水印信息的能量。

单纯水印嵌入的过程不是一个完整的数字水印处理过程，只有在嵌入水印信息后的图像中提取出预期的水印信息才能最终达到保护版权、保护完整性的目的。下面来看一下水印的提取过程。与嵌入过程雷同，水印提取过程

可以用式 2-3 来表示:

$$I = f'(I', W) \quad (2-3)$$

其中 f 为提取水印函数, 其它定义跟(2-1)式相同。

在对水印图像提取水印信息以前需要先对水印图像进行必要的预处理, 在提取算法上, 分为两种, 一种是盲提取, 也就是提取水印信息的算法在应用中不需要原始图像的参与, 另外一种就是明文水印, 也就是在水印信息提取算法中需要原始图像才能正确的提取出水印信息。目前的水印算法研究的重点越来越趋向于盲水印, 在本文中所采用的算法有明文水印和盲水印两种方式。

如图 2.3 所示为图像水印提取的一般过程:

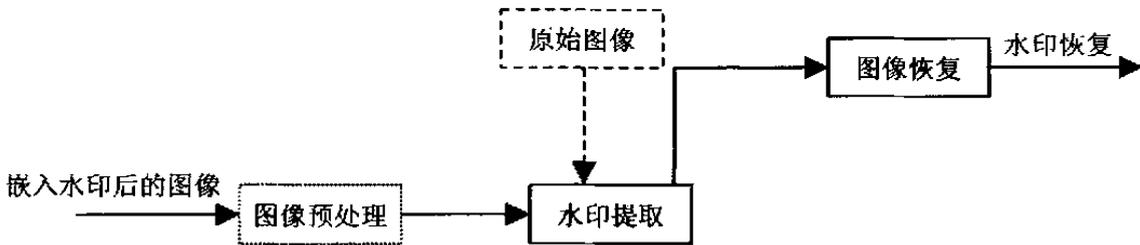


图 2.3 水印提取的一般过程

其中的虚线部分体现了明文水印和盲水印的区别。在这个框图中最为主要的部分是水印提取函数的选取, 用式 2-4 来表示水印提取函数:

$$B(W) = \begin{cases} 0, & \text{if } (P1(I) == True) \\ 1, & \text{if } (P2(I) == True) \end{cases} \quad (2-4)$$

在检测水印图像的过程中, 如果象素值符合 $P1(I) == True$ 条件时, 则相应的水印信号二进制位为 0, 如果象素值符合 $P2(I) == True$ 条件时, 相应的水印信号二进制位为 1。经过对二进制流重新组合后就能恢复出水印信息, 以确证图像的版权或者是否完整。

2.8 人类视觉系统(HVS)及图像的统计特性对水印嵌入的影响

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

图像信息的最终的接收者，也是图像质量的最终评审者，所以对图像信息的处理，应该考虑人眼的视觉特性以及图像的统计特性，以期在保证图像质量的前提下，尽可能的嵌入更多水印信息。视觉遮罩(visual masking)对水印嵌入非常重要，视觉遮罩指利用图像本身的一些特性来掩盖图像被修改的痕迹。例如给一幅图像加入噪声，会发现平坦区域的噪声比复杂区域(纹理区)的噪声更明显。

根据上一节的嵌入法则，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，仅当迭加的信号超过一定的强度时，它才可以被检测到。迭加信号的可见阙度值受到背景亮度、背景纹理复杂性等影响。以下是一些和水印嵌入有关的视觉特性：

- 1) 背景度越亮，可见阙度值越高(照度隐蔽)；
- 2) 背景纹理越复杂，可见阙度值越高(纹理隐蔽)；平坦区域的变化更容易觉察。
- 3) 图像的低频信号对于与图像的轮廓信息，高频信号对应与细节信息。
- 4) 对于彩色图像，人眼对兰色成分的敏感度较红、绿色低，因而可将水印嵌入在彩色图像的兰色分量中，或者将 RGB 分量转换到 YUV 空间，将水印嵌入到 Y 分量上。

2.9 水印验证

鉴于本文中采用的水印信息是二值图像，在数字水印验证过程中，通过检测器获得提取的水印信号与嵌入的水印信号之间的相似性比较，得到水印是否存在的结论，从而判定系统的有效性和健壮性。

相关是信号分析和信号处理中的重要概念，可以用来研究两个信号或自身之间的相互关系，判断两信号之间的相似程度。

计算提取的水印与嵌入的水印之间的相关系数，预先设定一阈值，若大于此阈值，则表明待测图像中存在水印，否则不存在(图 2.4)。

水印验证可以看作一个假设检验，在这个检验过程中，检测者在肯定假设(存在水印)和否定假设(没有水印)之间作出判断。在此二元假设中，可能会出现两种错误：

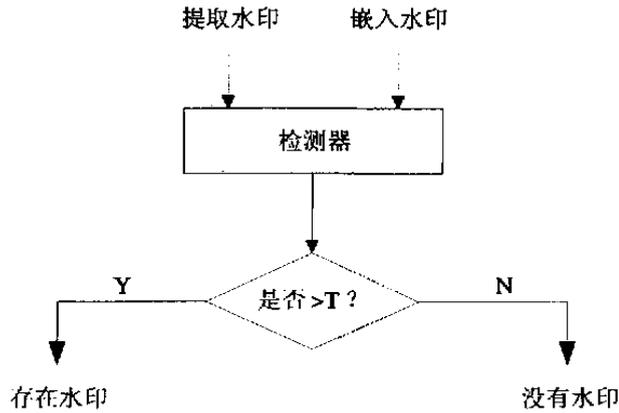


图 2.4 水印验证过程

误肯定(I 型错误): 在否定假设正确时, 认为了肯定假设;

误否定(II 型错误): 在肯定假设正确时, 认为了否定假设;

阈值 T 的确定是一个古典假设估计问题, 要求 T 的选择尽可能降低以上两种错误。针对此, 本文中判决门限的设定和提取水印的性质有关, 而不是采用一个固定的门限, 大大降低了两种错误发生的概率。

2.10 水印系统的评测

评估一个水印系统的优劣, 主要从它的健壮性和不可觉察性两个基本要求来测定, 健壮性要求使得水印图像在经历攻击后, 依然可以恢复出水印或者检测出水印的存在。

2.11 不可感知性的评测

对水印可感知性进行评估可以通过主观测试或者质量度量来衡量。当使用主观测试是, 挑选的测试人员基于一个统一的协议(譬如 ‘ITU-R Rec.500 质量等级级别’)将待测数据按照从最好到最坏的次序排列。主观测试对最终的质量评价和测试是有使用价值的, 但在研究和开发情况下并不实用。

在这种情况下, 量化失真的度量也就更加有效, 并且也使不同方法间的比较趋于合理, 因为其结果不依赖于主观评定。一般采用的度量标准是信噪比(SNR)和峰值信噪比(PSNR):

$$SNR = \frac{\sum_{m,n} I_{m,n}^2}{\sum_{m,n} (I_{m,n} - I'_{m,n})^2} \quad (2-5)$$

$$PSNR = \frac{MN \max_{m,n} I_{m,n}^2}{\sum_{m,n} (I_{m,n} - I'_{m,n})^2} \quad (2-6)$$

2.12 本章小结

本章分别从水印系统基础框架、水印系统的要求和算法设计问题、针对水印系统的攻击、嵌入策略、水印的选择与生成、工作域选择、嵌入和提取模块、人类视觉系统(HVS)及图像的统计特性对水印嵌入的影响、水印验证、水印系统的评测和不可感知性(图像失真度量)的评测各个方面介绍了数字图像水印系统,为下面的数字水印算法的提出奠定了基础。

第 3 章 二维彩色图像数字水印技术研究

3.1 图像彩色模型

现有数字水印算法大多面向于处理灰度图像，真正面向真彩色图像的水印算法很少。而本系统所处理的图像数据都是为了更生动，更详细的反映文物的信息，因此采用的都是真彩色图像。通常计算机里面用来表示真彩色图像都是通过 RGB 颜色模型来实现，而为了有效传播和利于人类可视系统对亮度变化比对色度变化更敏感的特点，在整个算法的实现中采用了 YUV 颜色模型。

1) RGB 颜色模型

在 RGB 模型中，每种颜色的主要光谱中都有红、绿、蓝的成份。这种模型基于笛卡儿(Cartesian)坐标系。颜色子空间如图 3.1 所示，在图中 RGB 值在 3 个顶角上，蓝绿色、紫红色和黄色在另三个角上，黑色在 origin，白色在离 origin 最远的角上。由三原色可以组成想要得到的各种颜色，也就是散布在立体上的各个点。

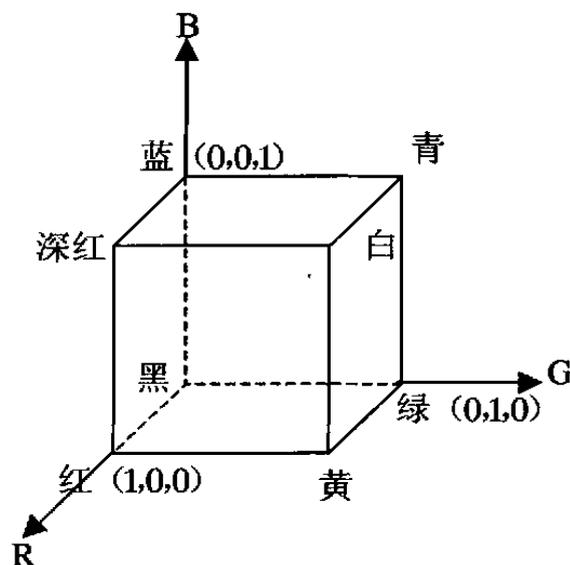


图 3.1 RGB 色彩空间模型

在计算机中 24 位真彩色是分别用一个字节来表示 RGB 的值，这样每一个分量由 8 位组成，范围在 0—255 之间。

在 RGB 彩色模型中，所表示的图像由 3 个图像分量组成，每一个分量图像都是其原色图像。当送入 RGB 监视器时，这三幅图像在荧光屏上混合产生一幅合成的彩色图像。在 RGB 空间，用以表示每一像素的波特数叫做像素深度。考虑 RGB 图像，其中每一幅红、绿、蓝图像都是一幅 8 比特图像，在这种条件下，每一个 RGB 彩色图像称为有 24 比特深度。全彩色图像常用来定义 24 比特的彩色图像。在 24 比特 RGB 图像中颜色总数是 $(2^8)^3 = 16777216$ 。

2) YUV 颜色模型

YUV 颜色模型也将色彩表示为三个分量，即亮度 Y，蓝色色度 U，和红色色度 V。由于亮度比色度更容易引起人眼的注意，为了保证图像的质量，本文采用将水印信息嵌入色度值中。在通常所流行的 JPEG 压缩格式就是先将图像由 RGB 彩色空间转换到 YUV 彩色空间，然后进行编码压缩的。

RGB 颜色模型和 YUV 颜色模型可以通过式 3-1 和 3-2 实现转换。

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.5887 & 0.144 \\ -0.148 & -0.289 & 0.437 \\ 0.615 & -0.515 & 0.100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.140 \\ 1 & -0.395 & -0.581 \\ 1 & -0.2032 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

其中亮度 Y 的取值范围为 0-255 之间，蓝色分量 U 和红色分量 V 的取值范围在 -128--128 之间。

3.2 空域水印算法

空域水印算法以其简洁、高效的特性而在水印研究领域占有一席之地，在过去的十几年中，水印的空域算法也层出不穷。其经典的 LSB 算法就是将

水印信息放置在原始图像中对于人类视觉最不敏感的地方，在空域中，通常选择改变原始图像中象素的最低位来实现水印的嵌入和提取。

空域水印算法之所以仍能发展下去有其自身的优点：首先就是它的简单，容易操作的特性，在算法实现中无需考虑到复杂的时频域变换过程，所有操作可以在容易理解的空间域完成；其次就是它的算法实现效率高，由于减少了变换过程，使得算法实现的时间复杂度和空间复杂度都得到了很大程度的优化，算法在实现过程中对硬件要求降低，对批量处理的数据会有较好的效果；最后值得注意的就是空域数字水印算法其可嵌入信息量大。

但是一般的空域水印算法也有其不足的地方，即它的抗攻击性不强，也就是它的健壮性比较差。图示如下。

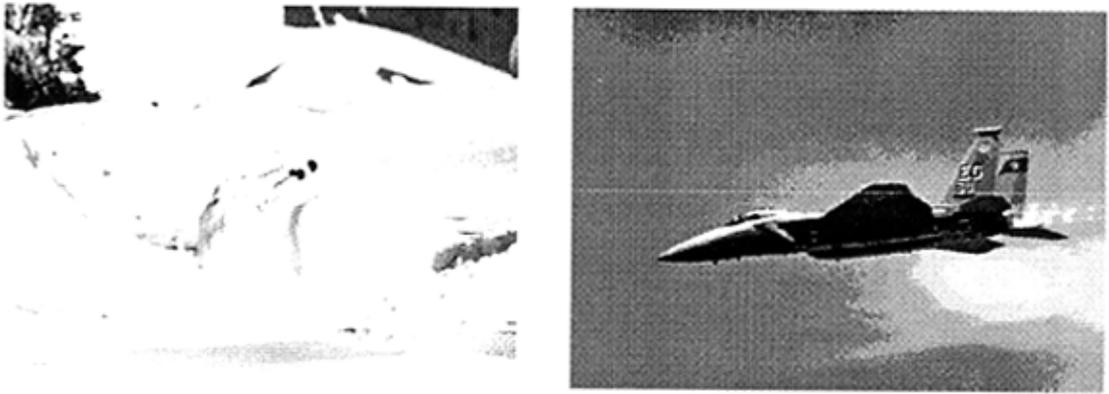


图 3.2 基于空域方法提取水印图

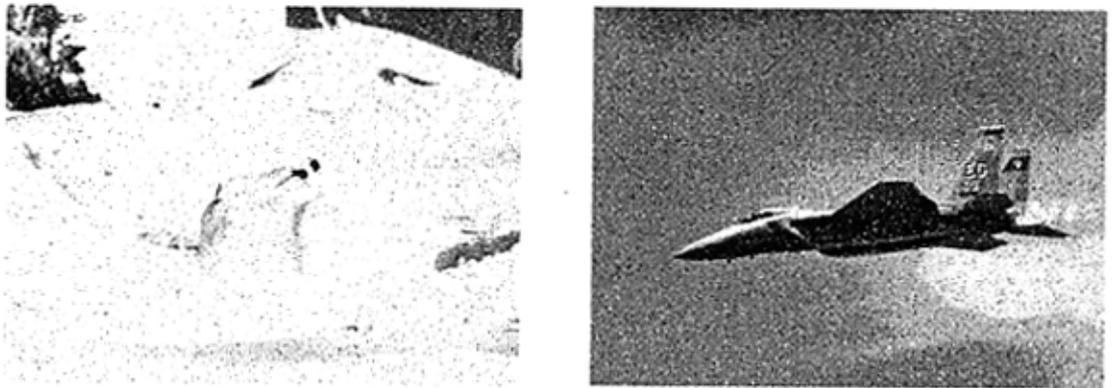


图 3.3 加入椒盐噪声后提取水印图

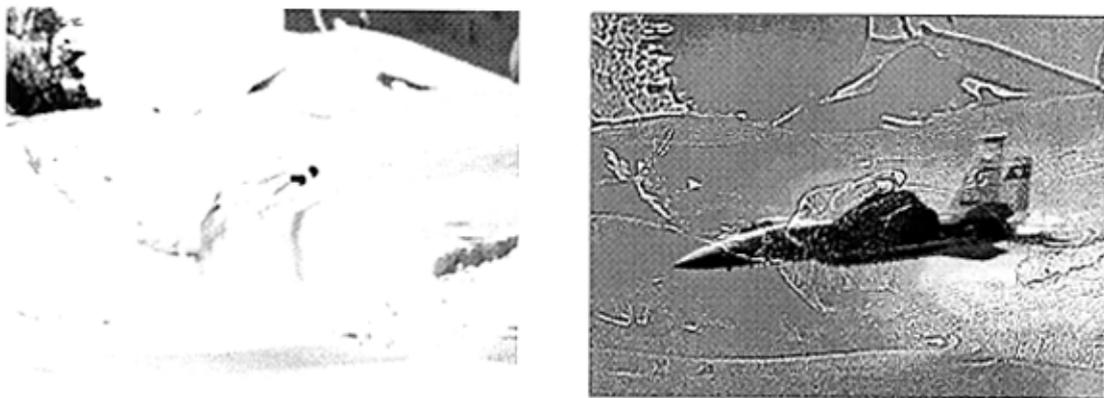


图 3.4 经过滤波器后提取水印图

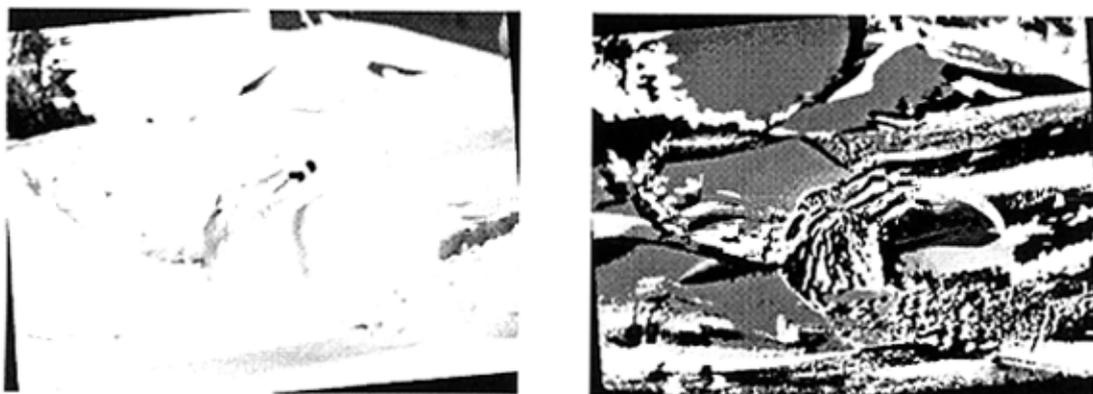


图 3.5 旋转 5 度提取水印图

基于时域的水印系统易受攻击，对载体稍微更改的抵抗力是很脆弱的，健壮性差，目前已经被逐步淘汰。

3.3 基于 DCT 域数字水印技术

由于空间域算法鲁棒性差，变换域算法已成为水印技术的主流。而在静态图像和视频图像传输中，JPEG、MPEG 等压缩方式已被广泛采用，数字水印的提取过程中不可避免的受图像压缩的影响，而 JPEG 的核心正是 DCT 变换，因此，为了减小有损压缩带来的损失，人们有必要研究基于 DCT 变换的数字水印技术。

静止图像通用压缩标准 JPEG 的核心部分是 DCT 变换，它根据人眼的视觉特性把图像信号从时域空间转换到频率域空间，由于低频信号是图像的实质而高频信号是图像的细节信息，人眼对于细节信息的改变并不是很敏感，

JPEG 压缩通过丢弃高频部分来最大程度的满足压缩和人眼视觉的需要。

下面先来分析 JPEG 标准中的压缩流程：首先将原始图像数据分为 8×8 的小块，如果原始图像的长和宽不是 8 的倍数，则采用延拓的方式补齐；然后对每一块独立进行 DCT 变换，经过此变换以后，图像中点和点之间的关系就呈现出来，将会有利于压缩。对 DCT 变换后的系数按 Zig-Zag 方式重排后，对其进行量化操作，量化表是按照心理视觉阈值进行制作的。最后对得到的 8×8 的量化后系数进行编码，编码一般是先采用 RLE 压缩，然后用 Huffman 方式编码。如图 3.6 为 JPEG 编码过程。

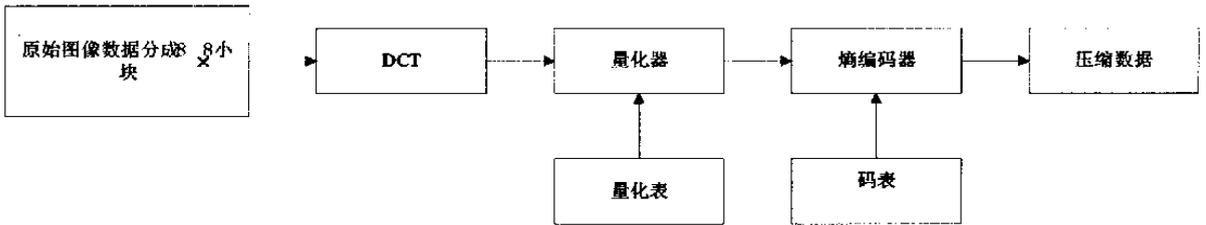


图 3.6 JPEG 压缩原理

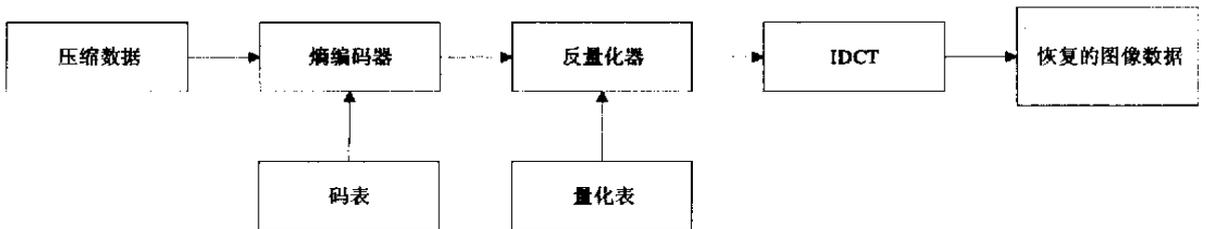


图 3.7 JPEG 解码过程

JPEG 的解码过程与它的编码过程几乎是相反的，首先将压缩的 JPEG 文件分成 8×8 的小块并用码表对每一分块进行解码；其次用量化表进行反量化操作，最后对所得到的系数进行 IDCT，即离散余弦反变换，将每块重新组合就得到没有压缩的图像数据。如图 3.7 为 JPEG 解码过程。

3.3.1 离散余弦变换

DCT 是将信号从空间域转换到频率域的一种方法。下面从工程的角度分

析二维图像的 DCT 过程。首先如图 3.8 为一个空域到频域转换的简单示例，图 a 为空间域图像，图 b 为经过 DCT 变换后的结果。可以看出图像经过 DCT 变换后能量聚集在左上角的位置。

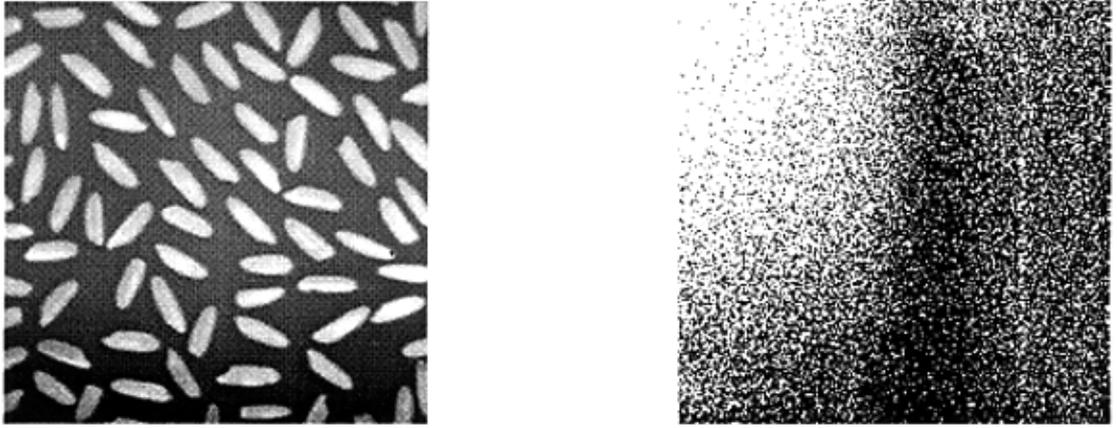


图 3.8 离散余弦变换示意图

具体的二维 DCT 变换的定义如式(3-3), M, N 为图像的长和宽:

$$I(u,v) = \left(\frac{2}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{N}\right)^{\frac{1}{2}} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} A(u)A(v) \cos\left[\frac{\pi \cdot u}{2 \cdot M}(2i+1)\right] \cos\left[\frac{\pi \cdot v}{2 \cdot N}(2j+1)\right] \cdot I(i,j) \quad (3-3)$$

其中:

$$A(\xi) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & \text{if } \xi = 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-4)$$

图像经过离散余弦变换后,从其频率系数中,很容易得出它的直流分量、低频分量、高频分量的分布。其中 $1(0,0)$ 位置的值最大,它是此图像信号在频率域中的直流分量,包含了原始图像块中的大部分能量。从 3-5 式可以看出它实际是一个图像样本的平均值:

$$I(0,0) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I(i,j) \quad (3-5)$$

离散余弦变换和傅立叶变换同是将信号从空间域转换到频率域,但是它们的性能却有很大的区别,下面用一个一维信号的例子来说明离散余弦变换在性能上远远优于傅立叶变换:

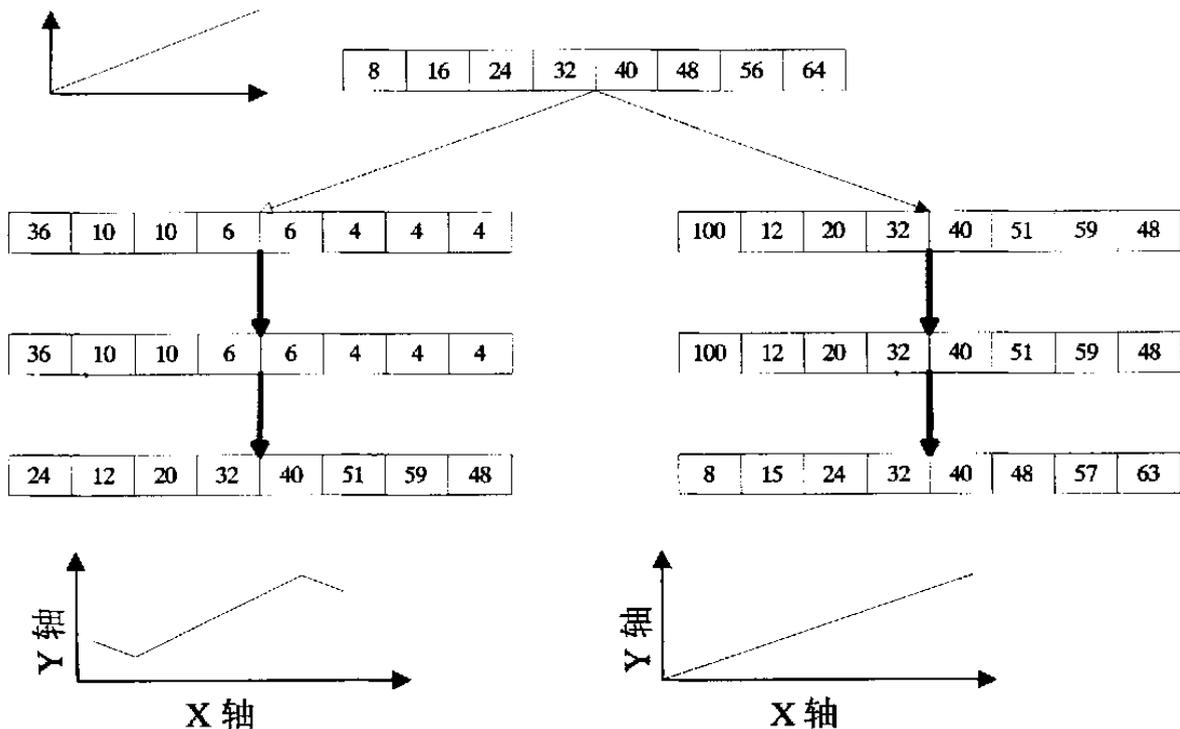


图 3.9 FFT 和 DCT 变换效果比较

从图 3.9 中可以看出，经过离散余弦变换后的频率域系数其直流分量、低频和高频系数分界比较明显，高频部分出现的 0 居多，在舍弃后，对图像质量影响不会很大。而在傅立叶变换中，其频率域系数高低频系数分界不明显，高频中仍存在很大能量，致使图像在进行丢弃后，质量大大下降。

与傅立叶变换一样，离散余弦变换自然可以由定义式出发进行计算。但这样的计算量太大，在实际应用中很不方便。所以要寻求一种快速算法。DCT 变换实际是对图像进行滤波的过程，而滤波器系数的计算也可以脱离图像本身，如果将滤波器系数计算出来并进行存储，然后进行计算，这样会使得变换速度大大提高。设 A 为原空域中的图像， B 为 A 在频率域中的结果， T 为变换矩阵则有： $B=T*A*T'$ ， T 为标准正交矩阵。从此式中也可以很容易得到其反变换的等式： $A=T*B*T'$ 。其中 T 中元素可以按 3-6 式进行计算：

$$T_{pq} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{M}} & p = 0; 0 \leq q \leq M - 1 \\ \sqrt{\frac{2}{M}} \cos \frac{\pi(2q+1)p}{2M} & 1 \leq p \leq M - 1; 0 \leq q \leq M - 1 \end{cases} \quad (3-6)$$

其中 M 为滤波矩阵的大小。

在图像处理的广泛领域中，离散余弦变换起着非常重要作用，包括图像的效果增强、图像分析、图像复原和图像压缩等。在图像数据的数字处理中常用的是二维离散余弦变换，它能把空间域的图像转变到空间频域上进行研究，从而能很容易地了解到图像的各空间频域成分，进行相应处理。

3.3.2 DCT 系数的选取

为使数字水印在 JPEG 有损压缩过程中具有较好的鲁棒性，人们一般先把原始图像分成大小为 8×8 的块，并对各小块进行 DCT 变换，然后根据数字水印信息对 DCT 系数作适当修改，以完成数字水印的嵌入。若对 8×8 的 DCT 系数按 Zig-Zag 顺序从左上角到右下角进行排列，则 8×8 的 DCT 系数块的排列 Zig-Zag 如图 3.10 所示。

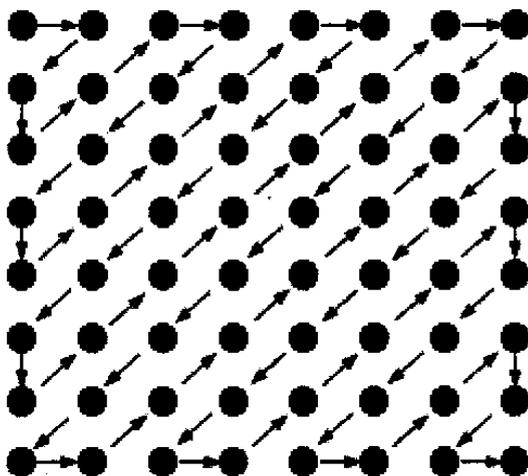


图 3.10 DCT 系数的 Zig-Zag 排列

用变换域方法嵌入时，需要分析水印应嵌入在这 64 个系数中的那几个

上,因为不同的 DCT 系数作为水印载体对水印的鲁棒性和不可感知性有不同的影响。为使水印具有较好的鲁棒性和不可感知性,用来嵌入水印的 DCT 系数应满足如下条件:

- 1) 在经过常见信号处理和噪声干扰后仍能很好的保留,即这些 DCT 系数不应过多地为信号处理和噪声干扰所改变。
- 2) 具有较大的感觉容量,以便嵌入水印后不会引起原始图像视觉质量的明显改变。

感觉上重要的分量是图像信号的主要成分,且携带较多的信号能量,在图像有一定失真的情况下,仍能保留其主要成分。因此,要提高水印的鲁棒性,应将水印放在感觉上最重要的分量上(对应于 DCT 域的低中频系数)。

3.3.3 基于 DCT 域的明文水印算法

通过上面的介绍可知,按水印的检测过程可以将数字水印划分为明文水印和盲水印,接下来我们首先介绍的明文水印算法。

首先介绍水印的嵌入过程,水印图像的嵌入基本过程如图 3.11 所示。

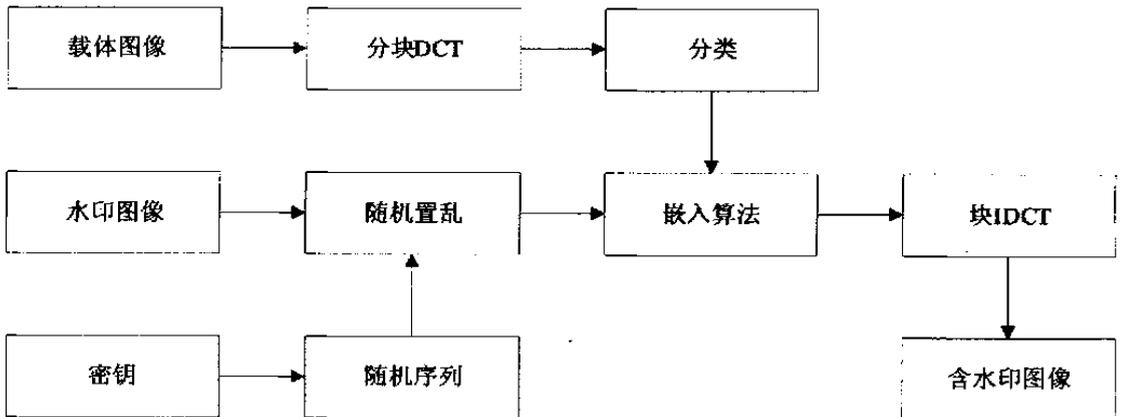


图 3.11 水印的嵌入过程

在水印嵌入过程中,要完成包括分类,置乱和嵌入这几步,具体介绍如下:

1) 分类

水印嵌入过程可看为在强背景(原始图像)上叠加一个弱信号(水印)。只要信号低于 HVS 的对比度门限,HVS 就无法感觉到信号的存在。根据 HVS

的对比度特性，该门限值受背景亮度、背景纹理复杂度和信号频率的影响。背景越亮，纹理越复杂，门限越高，这种现象称为亮度掩蔽和纹理掩蔽。视觉掩蔽特性暗示，具有不同局部性质的区域，在保证透明性的前提下，可允许叠加的信号不同。为此，我们把图像分为 3 类，以便叠加不同强度的水印分量。第 1 类亮度较低，且纹理简单，HVS 对其中像数值的改变较为敏感，叠加的水印分量的强度应最小；第 3 类亮度较高，且纹理复杂，HVS 对其中像数值的改变敏感性最弱，叠加的水印分量的强度应最大；其余的为第 2 类，叠加的水印分量的强度居中。

通过估计空间频率分布可间接估计纹理复杂度。首先采用 JPEG 算法的量化表（表 2.1）对图像块 DCT 系数进行量化，以考虑 HVS 对不同空间频率成分有不同的敏感程度。然后计算量化后的非零系数的个数，该数值越大，表明图像块高频成分越丰富，纹理越复杂。

背景的亮度信息则隐含在 DCT 直流系数中。

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

表 3.1 量化表

块分类的具体方法如下：

如果 $F_k(0,0) < T_1$ 且 $number\{\text{int}(F_k(u,v)/Q(u,v)) \neq 0\} < T_2$ ($1 \leq u,v \leq 8$) 则 B_k 属于第 1 类；如果 $F_k(0,0) > T_3$ 且 $number\{\text{int}(F_k(u,v)/Q(u,v)) \neq 0\} > T_4$ ($1 \leq u,v \leq 8$) 则 B_k 属于第 3 类；如果上述两种情况均不满足，则 B_k 属于第 2 类。其中， $\text{int}(\)$ 为取整函数， $number\{\ }$ 表示计数， B_k 表示第 k 图像块（大小为 8×8 ）， $F_k(u,v)$ 为第 k 块的 DCT 系数， $Q(u,v)$ 为 JPEG 的量化系数， $T_1 - T_4$ 为门限。

2) 随机置乱

为了抵抗剪切攻击以及增强保密性,在嵌入前,往往要进行伪随机排序。以确保载体图像受到攻击后,仍能最大限度地检取出水印图像。本算法通过密钥 K 控制产生两个 $1 \sim M$ (水印的大小为 $M \times M$) 的随机序列 R_1 和 R_2 , 并按下式对水印 $W(i, j)$ 进行置换:

$$W_z(i, j) = W(R_1(i), R_2(j)) \quad (i, j=1, 2, \dots, M) \quad (3-7)$$

3) 嵌入算法

选用大小为 96×96 的黑白图像作为水印, 随机置乱后分为 $32 \times 32 \times 3$ 个小块, 则每块包含 3 位。因此, 在载体图像的每个 8×8 的小块中需嵌入 3 比特水印信息, 通常选取各图像块的 16 个 DCT 中频系数中的由密钥选择的 3 个系数作为嵌入对象。将各水印块的位 $W_k(i)$, 其中 $1=i=3; 1=k=32 \times 32 \times 3$; 嵌入到 DCT 系数 $X_k(i)$ 上, 即

$$X_k'(i) = X_k(i) + \alpha \times W_k(i) \quad 1=i=3; 1=k=32 \times 32 \times 3 \quad (3-8)$$

其中, $X_k(i)$ 为 DCT 域低频系数, $W_k(i)$ 为水印值, α 为拉伸因子, 根据块的类别而改变, α 可由试验来确定。

用 $X_k'(i)$ 替换原 DCT 系数作分块 IDCT, 就可得到嵌入水印信息后的新载体图像。

为了提取水印更方便些, 我们在嵌入水印前, 先对水印进行一些处理。原水印可看作二维 $(0, 1)$ 序列, 处理后变为 $(-1, 1)$ 双极性序列。

接下来我们介绍水印的提取过程, 水印的提取过程基本上是嵌入过程的逆过程, 基本流程如下图 3.12 所示:

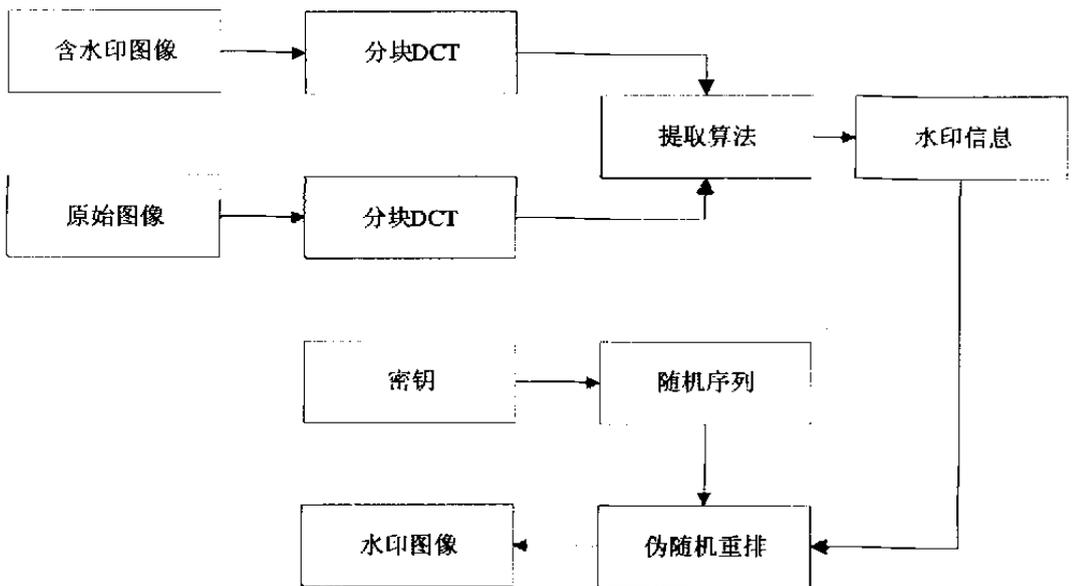


图 3.12 水印的提取过程

因为本算法是明文水印算法，所以在水印提取时，需要使用原始图像。首先，将含水印图像和原图像分别分成大小为 8×8 的像素块，经过 DCT 变换后，找到每小块的 3 个中频系数 $X_k'(i)$ 和 $X_k(i)$ 。然后对两者进行比较，因为嵌入的水印是双极性序列，所以提取的时候只要判别相应 DCT 系数的差值的正负即可。即：

$$\Delta = X_k'(i) - X_k(i) \quad 1=i=3; 1=k=32 \times 32 \times 3 \quad (3-9)$$

当 $\Delta=0$ 时，对应的水印值为 1；

当 $\Delta < 0$ 时，对应的水印值为 0。

然后根据密钥 K 控制产生两个 $1 \sim 96$ 的随机序列 $R1$ 和 $R2$ ，并按下式对水印 $W'(i, j)$ 进行置换：

$$TW(R1(i), R2(j)) = W'(i, j) \quad (i, j=1, 2, \dots, 96) \quad (3-10)$$

TW 即为最终提取出来的水印。

3.3.4 实验结果分析

在上一章的介绍中可知，在图像处理中，一个重要而又应首先考虑的问题是重建后的图像质量问题，通常采用峰值信噪比 PSNR 来定量评价含水印图

像的质量。

我们采用 256×256 的 Lena 作为原始图像， 96×96 的黑白 Rice 图像作水印，对应第 1 类、第 2 类、第 3 类，拉伸因子 α 分别为：9, 12, 15。门限 T1—T4 经过反复试验分别确定为：300, 1, 1000, 14。

图 3.13 显示了原始图像、原始水印图像、含水印图像及提取出的水印图像，PSNR=32.6873。

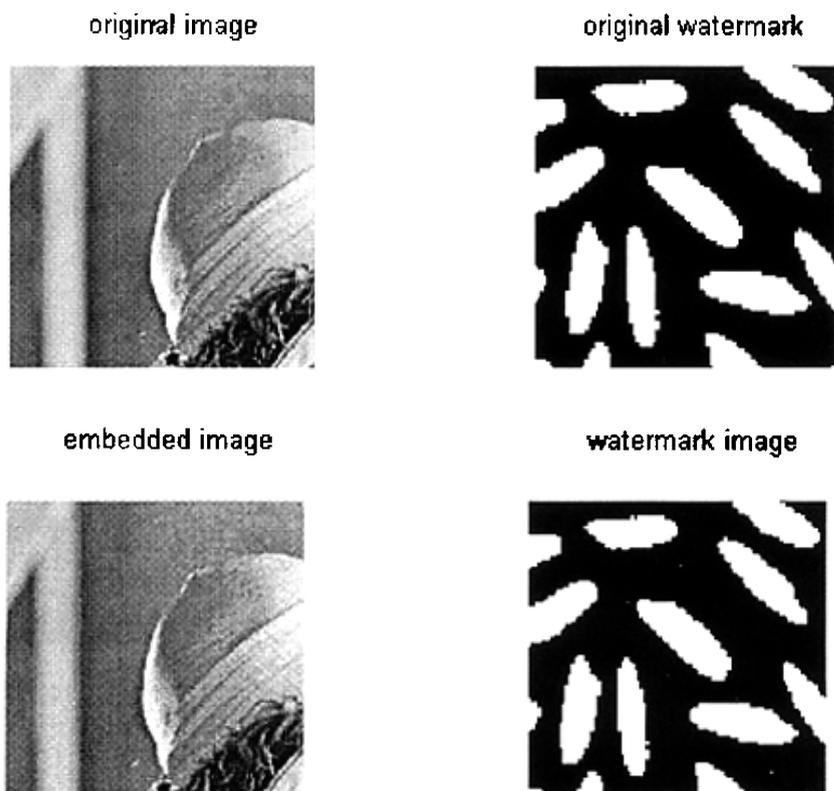


图 3.13 基于 DCT 域的明文水印提取图

下面分别对此数字水印算法在噪声添加、剪切攻击、旋转攻击、滤波以及 JPEG 压缩方面的健壮性进行测试。

首先来看其在几何变换下所提取出的水印结果。如图 3.14 为对嵌入水印后图像进行裁剪后的结果以及其提取出来的水印图像。而如图 3.15 为图像逆时针旋转 1 度后的结果和提取出来的水印图像。

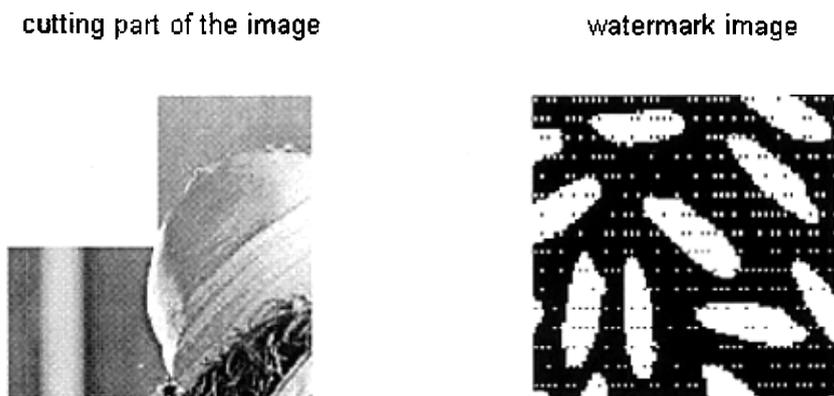


图 3.14 含水印图像剪切后的提取水印图



图 3.15 含水印图像旋转后的提取水印图

接下来我们实验含水印图像在加入椒盐噪声和 JPEG 压缩后的提取出的水印过程。图 3.16 是含水印图像加入椒盐噪声后的提取水印图，图 3.17 和图 3.18 分别是含水印图像经过质量等于 30 和 60 的水印提取图。

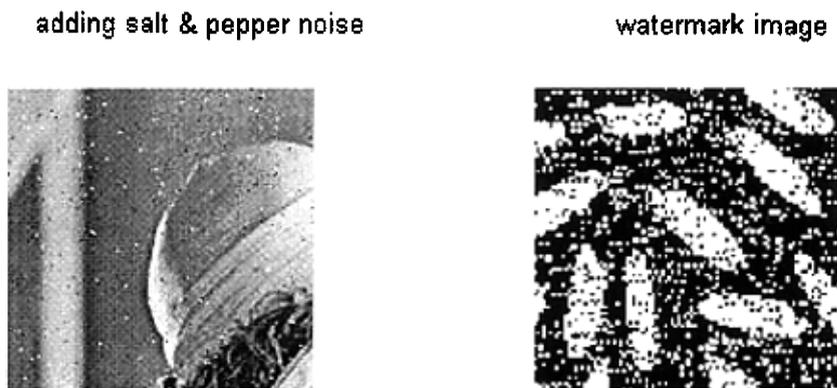


图 3.16 含水印图像加入椒盐噪声后的提取水印图

30 quality compression



watermark image



图 3.17 含水印经过质量是 30 的 JPEG 压缩后的提取水印图

60 quality compression



watermark image



图 3.18 含水印经过质量是 60 的 JPEG 压缩后的提取水印图

最后，我们含水印图像经过滤波器来提取水印图像，如下图 3.19 所示为含水印图像经过滤波器后的水印提取图。

through filter [10 10]



watermark image



图 3.19 含水印图像经过滤波器后的提取水印图

3.3.5 小结

通过上面的分析，主要是从 DCT 域来分析数字水印算法，提出了基于 DCT 的明文水印算法。

明文水印的健壮性较强，但是提取水印的时候需要原始水印图像，考虑到大规模水印处理过程，实现起来比较困难，所以下面从盲水印算法来研究 DCT 域中的水印特性。

3.3.6 基于 DCT 域的盲水印算法

通过上面对于离散余弦变换过程的分析，为了能够实现快速变换，提高算法执行效率，首先须对图像进行 8×8 分块，然后进行变换。而由于在有损压缩中会丢弃其高频分量，因此对于水印信息图像在变换后只需保留其低频和中频系数，最终通过 IDCT 恢复出其原始水印信息图像。

Cox 等曾经提出了强壮水印算法的重要原则：为了使水印强壮，水印信号应该嵌入原始数据中对人的感觉最重要的部分，其在频率域空间中，这种重要部分就是低频分量。因为攻击者在破坏水印的过程中，将会不可避免地引起图像质量的严重下降，所以，一般的图像处理技术也并不去改变这部分数据，这样会使水印的健壮性大大提高。但是此类健壮性算法在实现水印信息嵌入低频系数的过程中却破坏了图像本身的质量。而 Turner 也在其文章中提到将水印信息添加至图像最不重要位，显然这样的水印算法健壮性不足，但是却能够保证图像质量最低限度的损失。综合考虑这两类算法的优缺点，为了同时保证水印算法的健壮性和在嵌入水印信息后保证图像的质量不会受到大的损坏的情况下，本文在所提出的基于 DCT 域水印算法中始终坚持将水印信息添加至图像的中频系数中。

为了选取低频、中频系数方便，保证低频分量先出现，中频分量次出现，高频分量后出现，以增加行程中连续“0”的个数，本文采用了对 DCT 系数进行“之”字型(Zig-Zag)的排列方法，如图 3.10 所示。

在选取中频系数的过程中，有人曾提出提取 Zig-Zag 中第 9 位到第 32 位的系数，不过这种方法不具有自适应性，本文通过分析 JPEG 有损过程提出

新的自适应的方法：首先在 JPEG 压缩过程中，为了去掉高频分量，进行了量化操作，它是产生信息损失的根源。这里的量化操作，就是将某一个值除以量化表中对应的值。由于量化表左上角的值较小，右下角的值较大，这样就起到了保持低频分量，抑制高频分量的目的。从 3.3.3 中的可知，表 3.1 为一张依据心理视觉阈值制作的量化表，通过此量化表量化后的 DCT 系数其低频、中频、高频的分界就比较明显。

如果在量化后的 Zig-Zag 中出现连续的三个 0，就可以断定高频系数出现。

下面来看本文提出的新的基于 DCT 的水印算法，首先来看嵌入过程：

- 1) 将原始图像和水印信息图像进行颜色模型转换，从 RGB 到 YUV；然后将经过颜色模型转换后的图像的 YUV 模型中的 Y 分量分成 8×8 的块。
- 2) 对每一个 8×8 图像块进行 DCT 变换。
- 3) 提取原始图像的中频系数，即将原始图像的频率域系数经过量化后自适应选取中频系数作为嵌入水印信息的载体位。同时将水印信息图像转换为二值图像，再变成二进制流，作为嵌入的对象。
- 4) 将水印信息嵌入到原始图像信息中，具体的嵌入过程，如下面所述。
- 5) 最后对嵌入水印信息的原始图像进行反离散余弦变换((IDCT)，再将其从 YUV 颜色模型空间转换到 RGB 颜色空间，最终得到了嵌入水印后的图像。如图 3.20 为此嵌入算法的过程图。

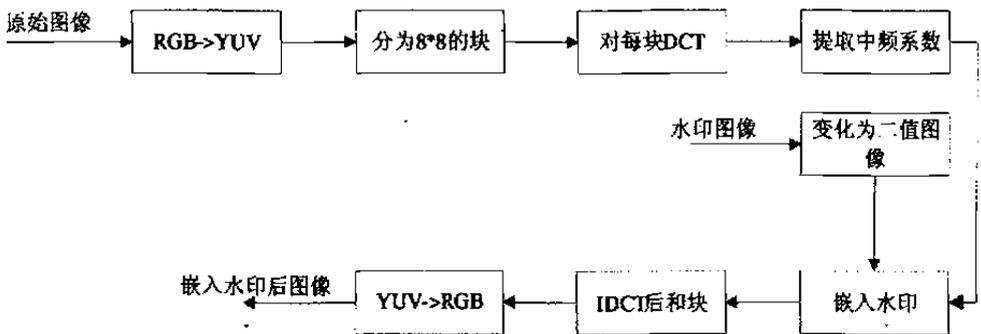


图 3.20 嵌入水印过程

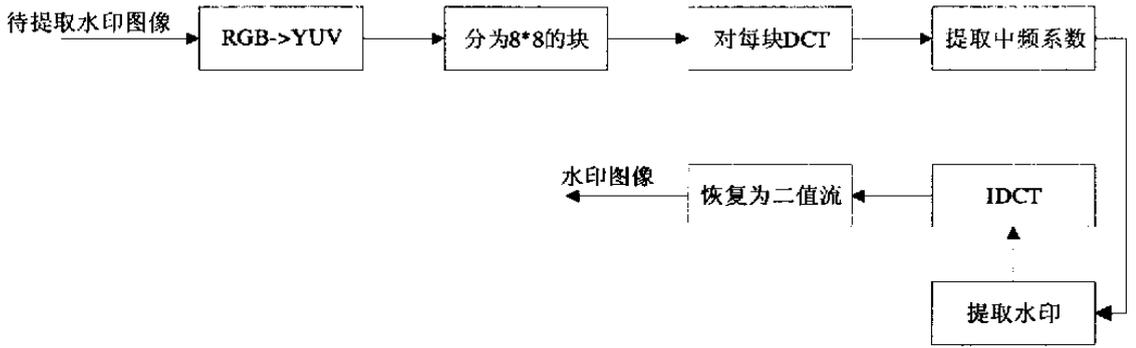


图 3.21 提取水印过程

再来看一下水印的提取过程：

- 1) 先将嵌入水印信息后的图像从 RGB 颜色模型空间转换到 YUV 颜色模型空间，然后将 YUV 颜色模型空间中的 Y 分量提取出来。
- 2) 将 Y 分量分成 8×8 的小块，将每一个 8×8 的小块进行 DCT 变换。
- 3) 提取出经过 DCT 变换后的中频系数。
- 4) 从中频系数中提取出水印信息，将二进制码流恢复为二值图像信息。

具体的水印提取过程如图 3.21，图 3.21 为本提取算法的过程图。由于图像在进行离散余弦变换后其系数常用浮点数来描述，因此在将水印的低频和中频信号嵌入到原始图像的中频系数过程中，本文利用了改变相邻中频系数之间的关系来达到嵌入信息的目的。

$$B(W_i) = \begin{cases} 0, & I(u_1, v_1) < I(u_2, v_2) \\ 1, & otherwise \end{cases} \quad (3-11)$$

具体嵌入过程如式 3-11 所示，先判断水印信息二进制码，如果其值为 1，而且待嵌入水印系数比其下一个系数的值小，则交换这两个系数的值；如果其值为 0，而待嵌入水印系数比其下一个系数的值大，则交换这两个系数。换句话说就是要保证嵌入 1 时，此系数大于下一个系数值，嵌入 0 时相反。

如图 3.22 为此过程的流程图。其中 w 为水印信息， $wlen$ 为水印信息长

度, I 为待嵌入水印图像信息, $swap$ 函数的功能是交换两个数值, i 控制嵌入的水印信息长度。

具体提取水印信息的过程是这样的; 判断待提取水印信息的系数, 如果其值大于下一个系数值则证明此系数中嵌入的水印信息位为 1, 否则为 0。如图 3.23 为此过程的流程图。

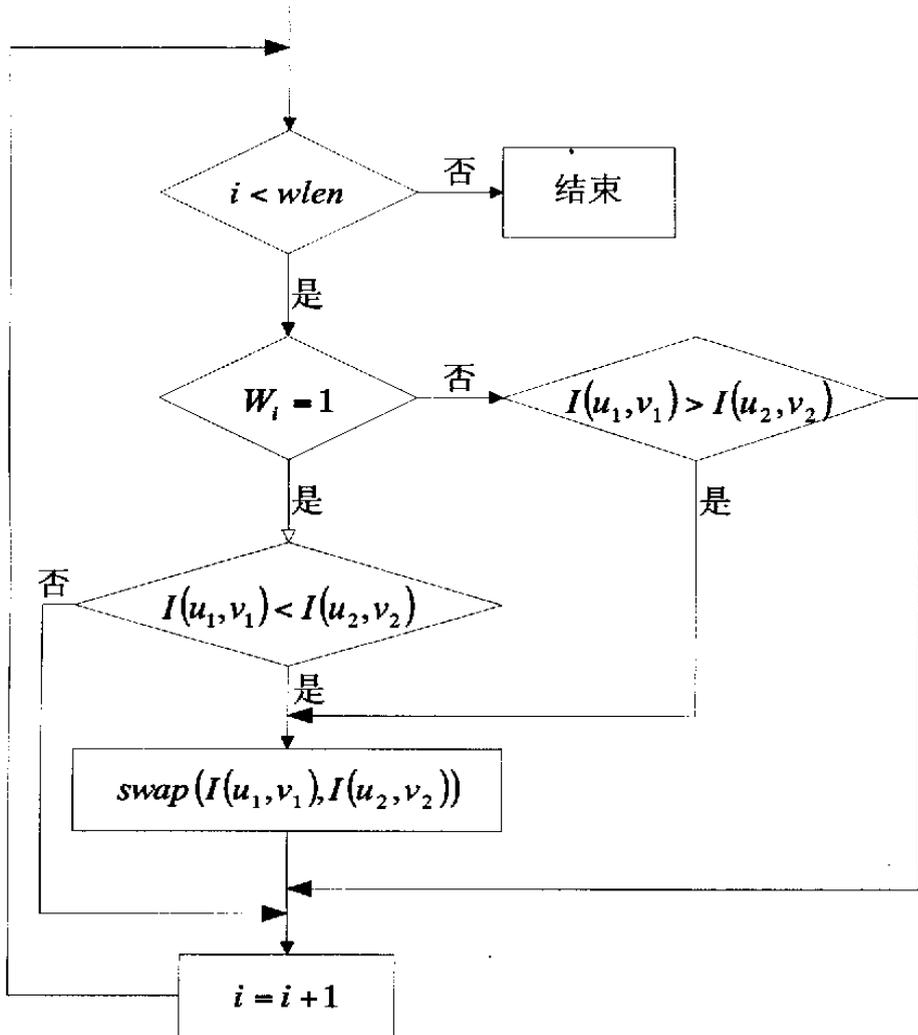


图 3.22 水印嵌入过程流程

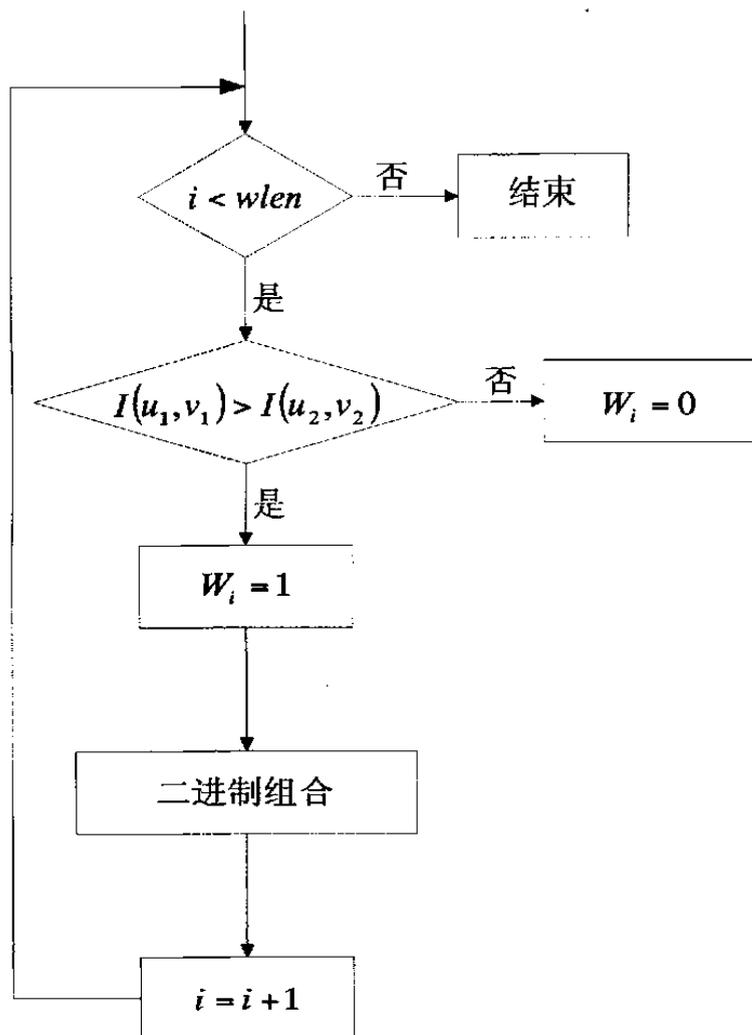


图 3.23 水印提取流程图

3.3.7 实验结果分析

DCT 作为时频域变换的一种工具,运用其快速变换已经能够很容易而且高效的将图像的空域信号转换到频率域中来,而在频率域中嵌入数字水印已经成为水印技术发展的方向,因此选用 DCT 技术来进行水印嵌入有一定的意义,实验结果表明其效果也很好。

在频率域中嵌入水印信息的最大优点是可以分离出原始图像的低频、中频、高频信号,然后根据人类视觉模型来选择嵌入水印的位置,在 3.3.6 中提到的算法中,将水印信号嵌入在图像的中频信号中是在实现数字水印的健壮

性和不可见性之间选择了一条中间道路。下面具体分析本算法的效果。

首先如图 3.24 为使用该算法进行的水印提取过程后的图像：其中图 a 为嵌入水印后的图像，图 b 为按照本算法提取出来的水印图像。

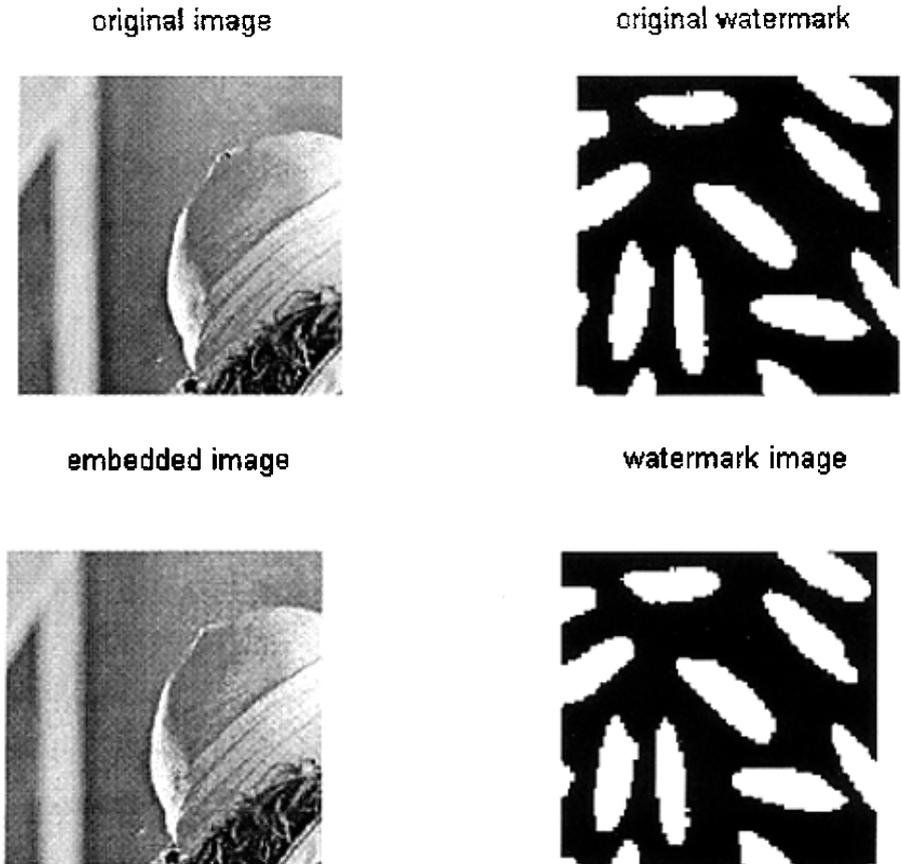


图 3.24 基于 DCT 方法提取水印图

下面分别对此数字水印算法在几何变换、颜色调整以及 JPEG 压缩方面的健壮性进行测试。首先来看其在几何变换下所提取出的水印结果。如图 3.25 为对嵌入水印后图像进行裁剪后的结果以及其提取出来的水印图像。而如图 3.26 为图像逆时针旋转 1 度后的结果和提取出来的水印图像。

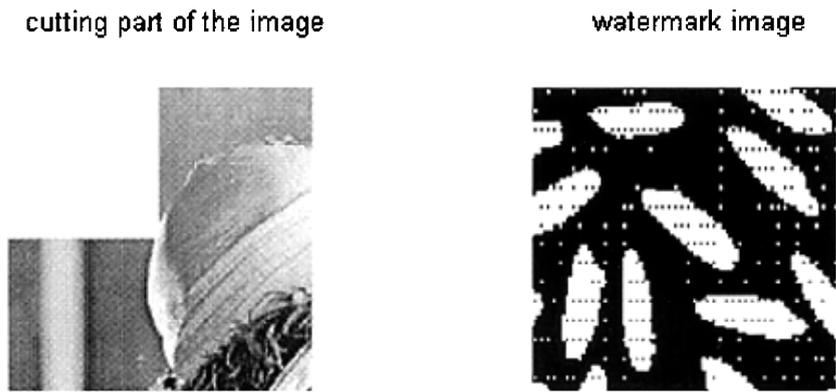


图 3.25 含水印图像裁剪后提取水印图

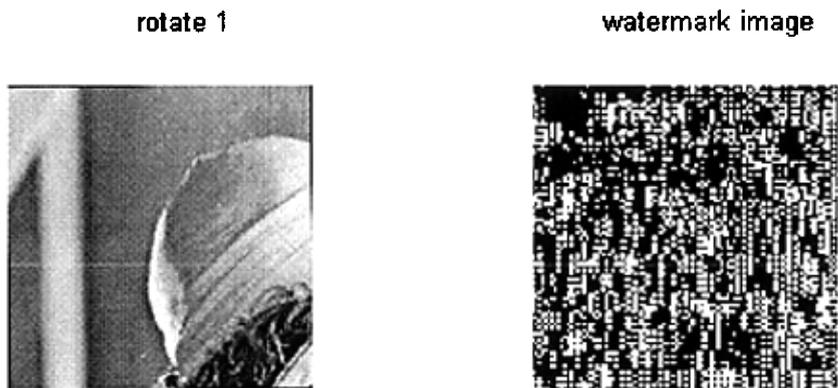


图 3.26 含水印图像旋转后提取水印图

由于离散余弦变换本身是 JPEG 压缩所采用的变换算法，因此基于此变换的数字水印技术在抵抗 JPEG 压缩方面有一定的效果，图 3.27 和图 3.28 分别为经过压缩率为 30% 和 60% 的 JPEG 压缩后的图像和从中提取出的水印图像。

30 quality compression



watermark image



图 3.27 含水印图像经过质量为 30 的压缩后的提取水印图

60 quality compression



watermark image



图 3.28 含水印图像经过质量为 60 的压缩后的提取水印图

本算法在频率域中完成嵌入水印操作，其主要是依据调整相邻频域系数来完成，下图为含水印图像经过滤波器后的图像及其从中提取出来的水印图像。

through filter [10 10]



watermark image



图 3.29 经过滤波器后提取水印图

下图是含水印图像添加椒盐噪声后的提取水印图。

adding salt & pepper noise



watermark image



图 3.30 含水印图像加入椒盐噪声后的提取水印图

尽管基于离散余弦变换的水印算法在水印技术发展中具有划时代的意义，而且在 3.3.6 中提到的算法也达到了较好的效果，但近年来出现的小波变换则将数字水印技术推向了另一个高度，基于小波变换的数字水印算法因为小波的多分辨率特性以及其变换后能量更加集中的特性，使其成为以后数字水印技术发展的主流方向。

3.3.8 小结

上面主要从 DCT 域来分析数字水印算法，提出了基于 DCT 的盲水印算法。

在基于 DCT 的水印算法中，本文主要利用了离散余弦变换的快速算法，并将变换系数进行 Zig-Zag 排列，选取其中的中频系数进行嵌入水印，在嵌入水印过程中选择改变相邻频域系数之间的关系来进行添加水印信息操作。在 3.3.7 中给出了本文提出的算法的实验效果。

3.4 本章小结

本章对 DCT 变换作了分析和研究，在 DCT 域中分别提出了明文水印和盲水印两种算法，并对上述算法作了攻击方面的实验，除了旋转攻击以外，证明都有很好的鲁棒性。

第 4 章 基于 DWT 域数字水印技术

离散余弦变换是经典的谱分析工具，它考察的是整个时域过程的频域特征或整个频域过程的时域特征，而小波变换是现代谱分析工具，它既能考察局部时域过程的频域特征，又能考察局部频域过程的时域特征。小波分析方法是一种窗口大小固定但其形状可改变，时间窗和频率窗都可改变的时频局部化分析方法。即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率，在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率，所以被誉为数学显微镜。正是这种特性，使小波变换具有对信号的自适应性。本论文用基于小波变换的多分辨率分解方法实现了二维图像的数字水印技术。

4.1 离散小波变换

小波变换是由法国科学家 Morlet 于 1980 年进行地震分析工作时提出的，但小波研究的热潮始于 1986 年，当时 Meyer 构造出具有一定衰减性质的光滑函数，并用它的二进制伸缩和平移系构成小波变换的规范正交基。离散小波变换定义如下：

$$\langle f, \psi_{m,n} \rangle = a_0^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi(a_0^{-m}t - nb_0) dt \quad m, n \in Z \quad (4-1)$$

其中 m 为尺度因子，控制变换窗口大小； n 为平移因子，控制窗口偏移量。取 $a_0 = 2$ ， $b_0 = 1$ 得到二进小波伸缩和平移系：

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-\frac{m}{2}} \psi(2^{-m}t - n) \quad m, n \in Z \quad (4-2)$$

小波变换之所以优于傅立叶变换的主要原因在于它的多分辨率特性，它可以针对不同信号变换而进行窗口的伸缩变化。加窗傅立叶变换可以形象地看成是固定尺寸的矩形时频窗口在时频域中滑动，并透过这个窗口来“观察”信号。这种固定矩形窗口的观察方法与人们期望的观察不太一致。例如，对一个高频成份丰富的信号，即变化很快的信号，最感兴趣的问题是它的发生时间，而对其频率则不要求知道的很准确；但是对一个变化很慢的信号，关心的则是频率，而对时间范围则不要求很精细。小波分析就是适应这种要求，

通过调节它的 m, n 参数来达到缩放、平移窗口的目的, 它可以对高频成份使用大的频域窗口, 小的时域窗口, 而对于低频成份采用小的频域窗口, 大的时域窗口, 从图 4.1 可以清楚的看出其多分辨率的特性。

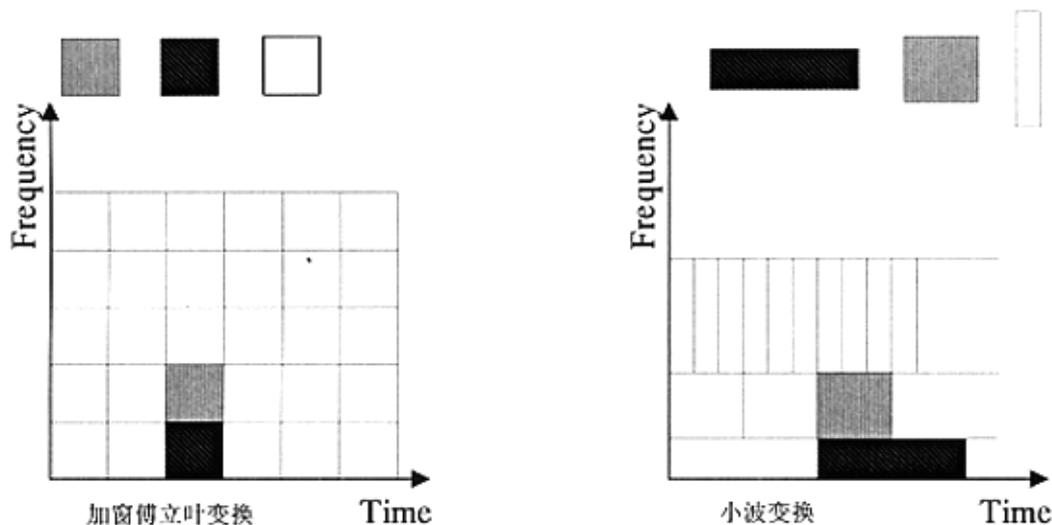


图 4.1 加窗傅立叶变换和小波变换的比较

有尺度函数构造小波函数是小波变换的必经之路。某一尺度上的尺度函数可以由下一尺度的线性组合得到。

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_{n \in \mathbb{Z}} h_n \varphi(2t - n) \quad (4-3)$$

$\varphi(t)$ 是尺度函数, 是一个多分辨率分析的生成函数, h_n 是尺度系数。由尺度函数得到小波函数表达式如下:

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{n \in \mathbb{Z}} g_n \varphi(2t - n) \quad (4-4)$$

其中 g_n 是由尺度系数 h_n 导出的小波系数。如果将小波变换看成是一个滤波的过程, 则 h_n 和 g_n 就是滤波系数。

上面介绍的是一维离散小波变换, 为了将小波变换应用于数字水印技术中, 需要有二维的小波函数和尺度函数。采用分离变量方法可以由一维小波函数和尺度函数构造所需要的二维函数, 它们是:

$$\begin{cases} \Phi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y) \\ \Psi^1(x, y) = \varphi(x)\psi(y) \\ \Psi^2(x, y) = \psi(x)\varphi(y) \\ \Psi^3(x, y) = \psi(x)\psi(y) \end{cases} \quad (4-5)$$

1988 年 Mallat 受到塔式算法的启发在多分辨率分析的指导下建立了 Mallat 算法，它对于小波变换的实际应用具有划时代的意义。Mallat 算法本质上不需要知道尺度函数 $\varphi(t)$ 和小波函数 $\psi(t)$ 的具体结构，只由系数 h_n 和 g_n 就可以实现信号的分解与重构，因此也称为快速小波变换。二维分解与重构的过程可以通过两步完成，即首先将信号 $f(x, y)$ 的每一行看成是一个一维信号进行分解，然后将这一中间结果的每一列看成一维函数再进行分解，这样最后的分解就是二维小波分解。类似的重构过程也可以分离为行处理和列处理两个步骤。如图 4.2 为这一过程，其中 H 、 \tilde{H} 和 G 、 \tilde{G} 分别是尺度系数和小波系数， A 为低频分量， D 为高频分量， j 表示层数。

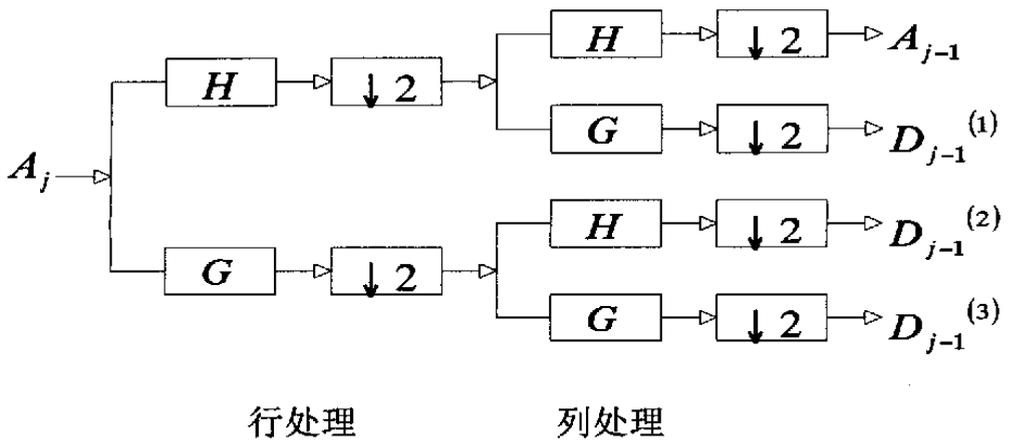


图 a 小波二维分解

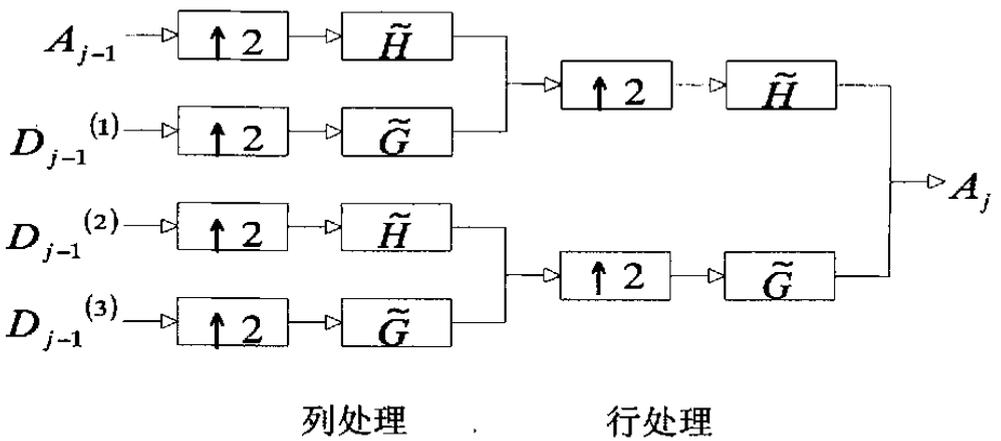


图 b 小波二维重构

图 4.2 Mallat 算法分解重构图

小波变换将输入信号分解为低分辨率参考信号(reference signal)以及一系列细节信号(detailed signal), 在一个尺度下, 参考信号和细节信号包含了完全恢复上一尺度下信号的全部信息。如图 4.3 为二维离散信号进行二层小波分解后的塔式结构, 其中 A^2 为第二层分解后的低频成份, 也是图像的主要能量集聚地, $D^{2,h}, D^{2,v}, D^{2,d}$ 分别为第二层分解后的三个高频成份, 它们位于不同的方向上, 而 $D^{1,h}, D^{1,v}, D^{1,d}$ 则为第一层分解后的三个高频分量。由于在二层分解中, 第二层的高频分量的能量介于其低频分量和第一层高频分量之间, 可以认为其为中频分量。在后面基于小波变换的算法中, 本系统选择将水印信息添加在第二层分解后的高频分量中, 并把它作为二层分解的中频信号来利用。图 4.3 为本系统对二维彩色图像进行二层小波分解的结果, 其中选用 Daubechies9/7 小波作为小波函数。

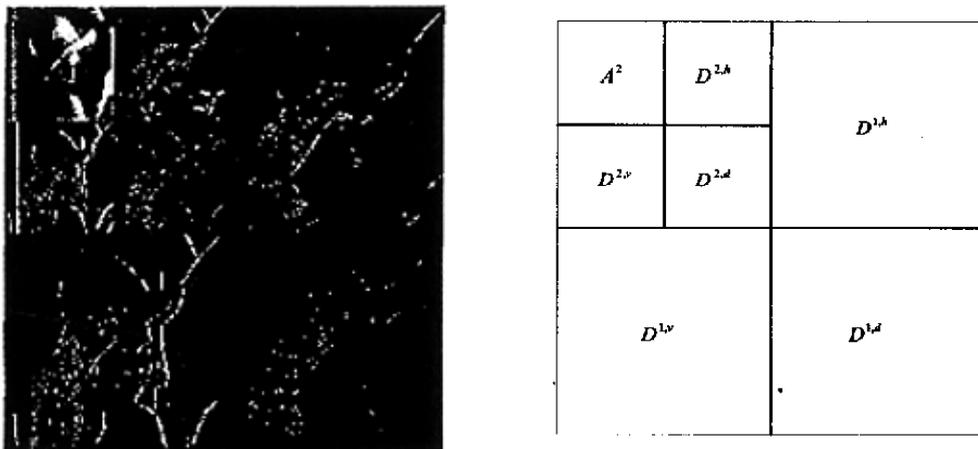


图 4.3 二层小波分解图以及其塔式结构

4.2 基于提升格式的第二代小波

提升格式(liftings scheme)被誉为构造第二代小波的关键技术。对于第二代小波而言,提升格式是一种基于 Mallat 算法思想而比 Mallat 算法更为有效的算法。Daubechies 证明,凡是用 Mallat 算法实现的小波变换都可以转用提升格式来实现。与传统的 Mallat 算法相比,提升格式完全是基于空域的构造方法,它不依赖于平移和伸缩的概念,也不需要频谱分析工具,因此适用于有限区域、曲面上以及非均匀采样等领域中小波的构造。它的基本思想是建立在双正交小波和完全可恢复滤波器组的理论基础上,在保持小波双正交特性的条件下,通过所谓原始提升和对偶提升过程,来改善小波及其对偶的性能,以满足各种应用的需要。

提升格式的分解过程分为三步:首先进行分裂过程,是指将原始信号分为奇数和偶数两部分;然后进行预测过程,也即是对偶提升过程,是指用偶数部分来预测奇数部分,奇数部分减去上一级分解的偶数部分得到细节信息;最后进行更新过程,即原始提升,是指为了使模糊信号保持原有信号的某些特征,例如均值,而用细节信号对其进行补充。

下面对提升格式的三个步骤从数学理论方面进行简要说明:首先如图 4.4 为分裂过程:

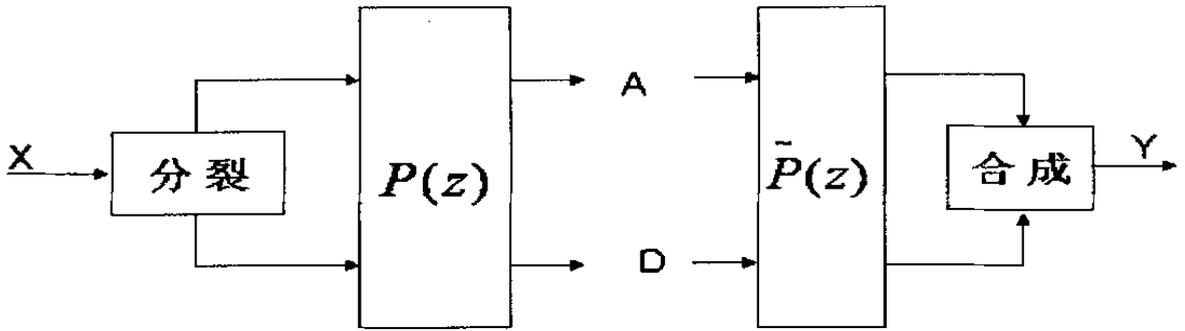


图 4.4 小波分解重构图

其中：

$$P(z) = \begin{bmatrix} h_e(z) & g_e(z) \\ h_o(z) & g_o(z) \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

$$\tilde{P}(z) = \begin{bmatrix} \tilde{h}_e(z) & \tilde{g}_e(z) \\ \tilde{h}_o(z) & \tilde{g}_o(z) \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

$h_e(z)$ 和 $h_o(z)$ 分别是 $h(z)$ 的偶数部分和奇数部分， $g_e(z)$ 和 $g_o(z)$ 是 $g(z)$ 的偶数部分和奇数部分。

显然它们的重构条件是：

$$\tilde{P}(z)P(z) = I \quad (4-8)$$

因此可以得到：

$$\tilde{P}(z) = P(z)^{-1} = \frac{1}{h_e(z)g_o(z) - h_o(z)g_e(z)} \begin{bmatrix} g_o(z) & -g_e(z) \\ -h_o(z) & h_e(z) \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

其次进行对偶提升和原始提升，如图 4.5 所示， $t(z)$ 为对偶提升过程， $s(z)$ 为原始提升过程。

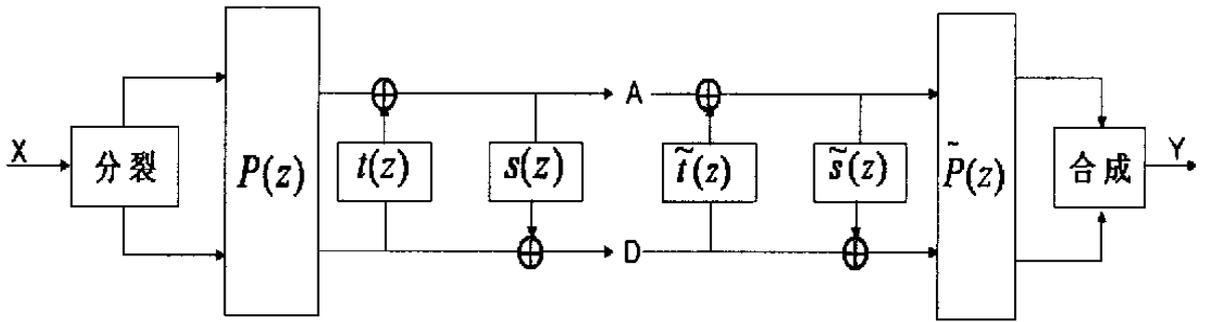


图 4.5 利用提升格式实现的小波分解重构图

其中 $t(z) = -\tilde{t}(z)$, $s(z) = -\tilde{s}(z)$ 。

基于提升格式的小波变换有其自身的优点：首先在于它的本位操作性，即所有运算都可做本位操作，这样可以节省内存，提高运算效率；其次在于它的速度比 Mallat 算法快，其在运算中利用复合赋值减少了浮点运算量；而且一个上升步骤中的所有操作是并行的，而多个上升步骤之间是串行的，也提高了运算效率；最后可以看到它的逆变换与正变换几乎是相反的过程，由提升格式的分解系数很容易得到其重构系数，因此只需简单的改变代码执行的先后循序便可实现，具有与正向变换相同的计算复杂性。

4.3 基于 DWT 的水印算法

在本文中选用分解和重构效果比较好的 Daubechies9/7 双正交小波，并用提升格式来实现小波变换过程。下面来看本文提出的基于 DWT 的水印算法，首先来看嵌入过程：

- 1) 首先对原始图像进行颜色模型转换，从 RGB 转换到 YUV，然后将水印信息图像变换为二值图像。
- 2) 利用 Daubechies9/7 双正交小波基对原始图像 YUV 颜色模型中的 Y 分量进行具有提升格式的小波变换。
- 3) 对于原始图像 Y 分量经过 DWT 后提取出的中频系数，即在二层小波分解中的第二层的高频系数，作为将来嵌入水印信息的载体位。

- 4) 将水印信息按照图 3.22 的方式嵌入到原始图像 Y 分量经过 DWT 后提取出的中频系数信息中。
- 5) 最后对嵌入水印信息后的图像进行反向离散小波变换 (IDWT) 即小波图像的重构, 再将其从 YUV 颜色模型空间转换到 RGB 颜色空间, 最终得到了嵌入水印后的图像。图 4.6 为本算法嵌入过程。

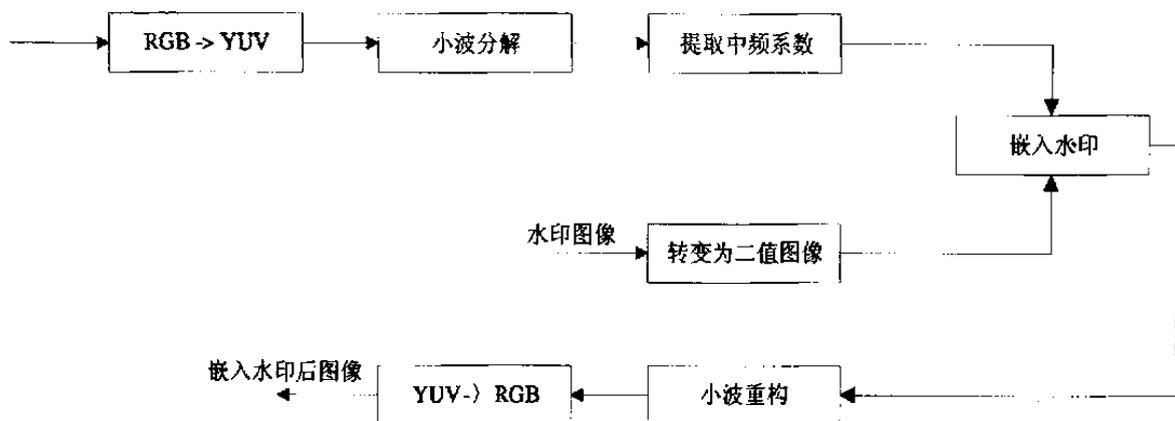


图 4.6 嵌入水印过程

再来看一下水印的提取过程:

- 1) 先将嵌入水印信息后的图像从 RGB 颜色模型空间转换到 YUV 颜色模型空间。
- 2) 利用 Daubechies9/7 双正交小波基对 Y 分量进行离散小波变换(DWT) 即进行小波分解。
- 3) 提取出经过 DWT 变换后的中频系数。
- 4) 按照图 3.23 的方式从中频系数中提取出水印信息, 并将二进制码流恢复为二值图像。图 4.7 为提取水印过程。

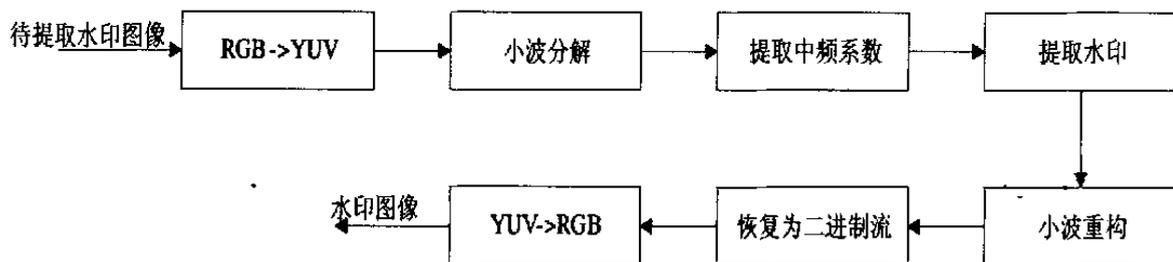


图 4.7 提取水印过程

4.4 实验结果分析

小波变换因其在频率域分析方面的特点以及作为 JPEG2000 标准的指定变换，优点在于：

- 1) 小波变换是一个满足能量守恒方程的线性变换，能将一个信号分解成其对空间和时间的独立贡献，同时又不丢失原信号所包含的信息。
- 2) 小波变换相当于一个具有放大、缩小和平移的数学显微镜，可通过检查不同放大倍数下信号的变化来研究其动态特性。
- 3) 小波函数族的时间、频率窗的面积较小，且在时间轴和频率轴上都很集中，也就是说，小波变换后系数的能量较为集中。
- 4) 小波变换的时间和频率分辨率的分布是不均匀的，具有变焦特性。

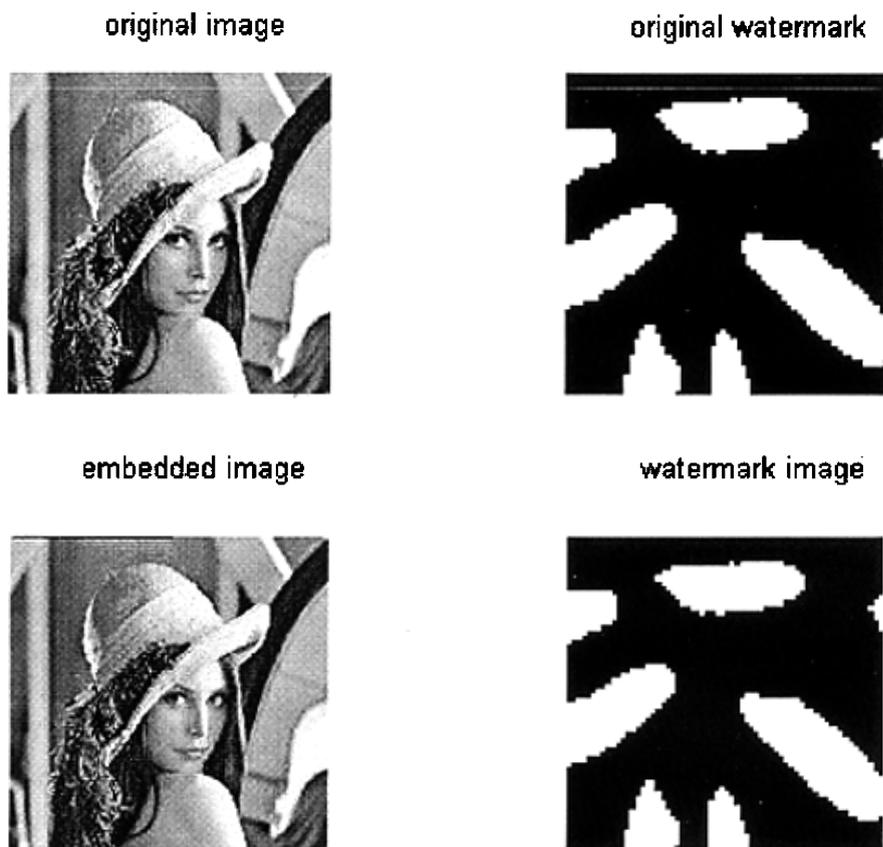


图 4.8 基于 DWT 的水印提取图

图 4.8 为使用基于小波变换的数字水印算法进行的水印提取过程后的图像。

下面分别对此数字水印算法在噪声添加、剪切攻击、旋转攻击、滤波以及 JPEG 压缩方面的健壮性进行测试。

首先来看其在几何变换下所提取出的水印结果。如图 4.9 为对嵌入水印后图像进行裁剪后的结果以及其提取出来的水印图像。而如图 4.10 为图像逆时针旋转 1.度后的结果和提取出来的水印图像。

cutting part of the image



watermark image



图 4.9 含水印图像裁剪后提取水印图图

rotate 1



watermark image



图 4.10 含水印图像旋转后提取水印图

本算法选取小波二层变换的中频信号嵌入水印在抗击 JPEG 压缩方面有一定的效果，下图为经过 JPEG60%压缩率的图像和从中提取出的水印图像。

60 Quality JPEG Image



watermark image



图 4.11 JPEG 压缩后提取水印图

through filter [10 10]



watermark image



图 4.12 经过滤波器后提取水印图

adding salt & pepper noise



watermark image



图 4.13 添加椒盐噪声后提取水印图

本算法在频率域中完成嵌入水印操作，其主要也是依据调整相邻频域系数来实现嵌入，上如图 4.12 和图 4.13 分别为经过滤波器后的图像及其从中提取出来的水印图像，和添加椒盐噪声后的图像及其从中提取出来的水印图像。

本算法在利用小波变换的基础上提出了运用提升格式来实现，并用 Daubechies9/7 函数作为小波基，在细节实现中更运用了改变相邻频率域系数完成，整个算法对彩色图像嵌入水印，提取水印方面达到较好的效果，能抵抗一定的攻击操作。

4.5 本章小结

本章主要从小波域来分析数字水印算法，提出了基于 DWT 的水印算法。

在基于 DWT 的水印算法中，主要是利用了 Daubechies9/7 函数作为小波基和小波提升格式来实现算法中的变换部分，并进而实现水印的嵌入操作，其算法的实验结果在 4.4 中给出。

第 5 章 水印系统的健壮性评估

5.1 二维数字水印攻击及健壮性评估

数字水印技术在实际应用中必然会遭到各种各样的攻击。通常这种攻击分为有意攻击和无意攻击两种，所谓有意攻击是指由于对新技术的好奇或者由于盗版带来的巨额利润使得有些人出于恶意的目的有意的对水印图像进行攻击；而无意攻击则是指数字制品在存储、分发、打印、扫描等过程中，会引入各种失真，这种失真是出于无意的，不可避免的，如果水印算法不够健壮，则会引起水印信息的丢失。所谓图像水印的健壮性攻击，就是对现有的图像水印系统进行攻击，以检验其健壮性，通过分析其弱点所在及易受攻击的原因，改进图像水印系统的算法设计。攻击的目的在于使相应的图像水印系统的检测工具无法正确地恢复出水印信号或不能提取出正确的水印信息。常用的二维图像数字水印算法攻击方法有：

- 1) 简单攻击也称为波形攻击或噪声攻击即只是通过对水印图像进行某种操作，削弱或删除嵌入的水印，而不是试图识别或分离水印。这些攻击方法包括线性或非线性滤波、基于波形的图像压缩(JPEG, MPEG)、添加噪声、图像裁减、图像量化、模拟数字转换等。
- 2) 同步攻击也称检测失效攻击即试图使水印的相关提取失效或使恢复嵌入的水印成为不可能。这种攻击一般是通过图像的集合操作完成的，如图像放大、空间位移、旋转、图像裁减、重采样以及一些几何变形等。这类攻击的特点是水印实际上还存在于图像上，但水印检测函数已不能提取水印或不能检测水印的存在。
- 3) 删除攻击即针对某些水印方法通过分析水印数据，估计图像中的水印，然后将水印从图像中分离出来并使水印提取失效。

从攻击者的角度来讲，他并不关心著作权拥有者所植入的水印是什么，他所关心的是能否从一幅图像中消除水印，这与一般意义的图像信息隐藏是不同的，对于一般的图像信息隐藏，攻击者的目的是恢复出图像中隐藏的信息，这对攻击者花费的代价要求比较高，而对于数字水印，攻击者可以通过

加噪声或者滤波的办法干扰图像信息，在一定程度上破坏图像，从而给提取水印带来困难，因此确保数字水印算法的健壮性成为一个难点。

算法设计不同使得图像水印质量也各不相同，因此有必要建立一套能客观、正确、统一地测评水印质量的标准。StirMark 是目前最流行的测评水印的攻击软件。它对水印的攻击方法包括裁剪、镜像、旋转、旋转+缩放、锐化、高斯滤波、随机扭曲、线性变换、纵横比调整、拉伸、缩放、线性裁剪、眼色调整、JPEG 压缩等。

5.2 测评实验

本文提到了很多的攻击方法，而本测评实验只是挑选有代表性的攻击方法作为实验方法：

- 1) 几何变换几何变换包括图像尺寸大小变化、剪切、删除或增加图像线条等。很多已有水印算法对这些几何操作都非常脆弱，容易被去掉。因此研究水印在图像几何变换方面的健壮性也是人们非常关注的。
- 2) 图像的压缩图像有损压缩算法是去掉图像信息中的冗余量而进行。水印的不可见性要求水印信息驻留于图像不重要的视觉信息中，通常为图像的高频分量。而一般图像的主要能量均集中于低频分量上。经过图像压缩后，高频分量被当作冗余信息清掉，对于抵抗 JPEG 压缩攻击也是本文研究水印健壮性的一个重要方面。
- 3) 滤波检验图像中的水印是否具有低通特性，即图像经过低通滤波，如均值滤波和中值滤波后，依然能够正确提取出水印信息。
- 4) 图像量化和图像增强一些常规的图像操作，如图像在不同灰度级上的量化、亮度与对比度的变化、直方图修正与均衡，均不应对水印的提取和检测有严重影响。

本系统中选取的水印信息为二值图像，因此对于算法经过攻击后所提取出来的水印图像质量需要有一定的评价标准，通常对于彩色图像的客观评价标准是用恢复图像偏离原始图像的误差来衡量图像恢复的质量，本实验中选择 PSNR 值来测评，如式 2-6。

下面为按照以上攻击方式和评测标准进行的实验结果及其分析：

图 5.1 给出了图像在进行不同程度的裁剪情况下，各个算法提取出的水印图像 PSNR 值结果，此处裁剪指的是选取任意区域裁剪：

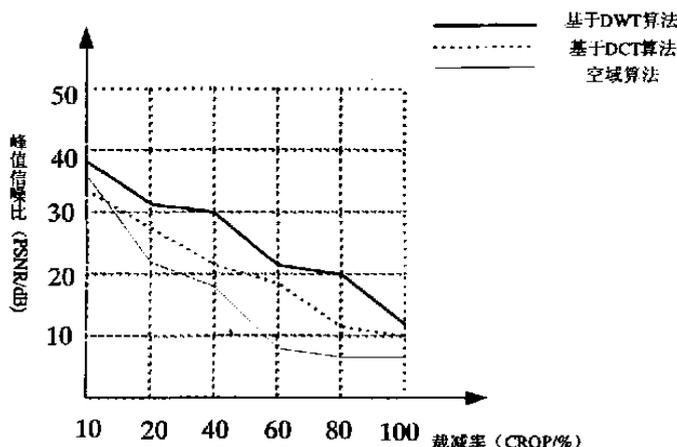


图 5.1 不同程度裁剪情况下各算法提取水印图像的 PSNR 值

由图 5.1 结果可以看出，图像经过低裁减率裁剪后三种算法的提取出图像质量差别不是很大，但是图像经过大部分裁剪后，三种算法的效果就有明显差别，基于 DWT 算法的优势也就体现出来。

图 5.2 给出了图像在不同程度的 JPEG 压缩率下，各个算法提取出的水印图像 PSNR 值结果：

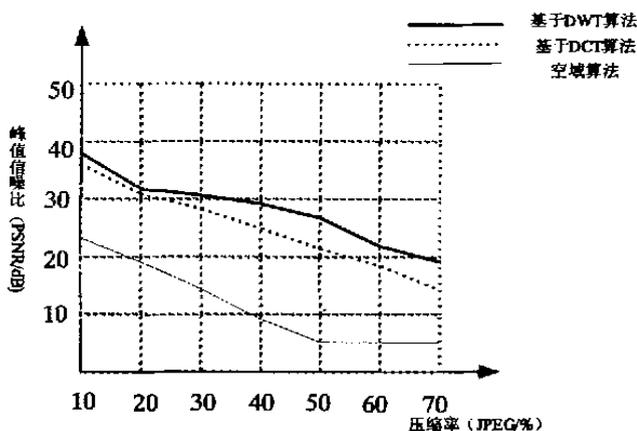


图 5.2 不同程度压缩情况下各算法提取水印图像的 PSNR 值

由于 JPEG 压缩的根本原理是借助于舍弃高频系数来完成的，因此这种攻击对于本文所采用的基于 DCT 的算法和基于 DWT 的算法不会产生很大的影响，它们是选择将水印信息嵌入在中频系数中的。从图 5.2 中可以看出，两种频域算法效果明显比空域算法好。

图 5.3 给出了图像在进行不同程度的中值滤波情况下，各个算法提取出

的水印图像 PSNR 值结果:

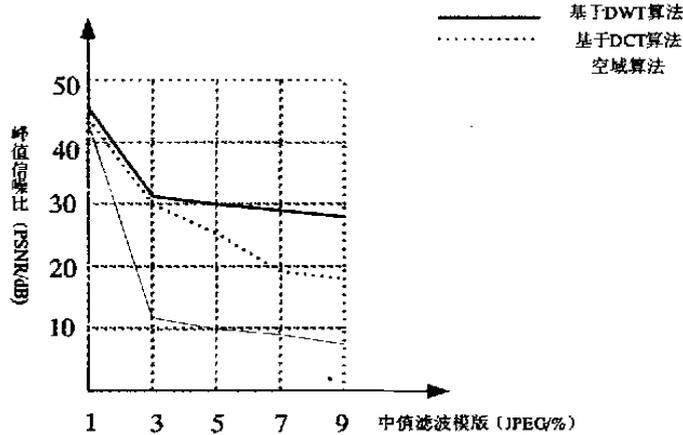


图 5.3 不同程度滤波情况下各算法提取水印图像的 PSNR 值

从图 5.3 中可以看出,当中值滤波的模板稍微增大的时候,空域算法的效果就明显下降,可见其在这方面的健壮性很不好,而其它两种算法提取出水印图像质量虽有所下降,但总的效果还是比较好的。

图 5.4 给出了图像在进行不同程度的亮度对比度变换情况下,各个算法提取出的水印图像 PSNR 值结果:

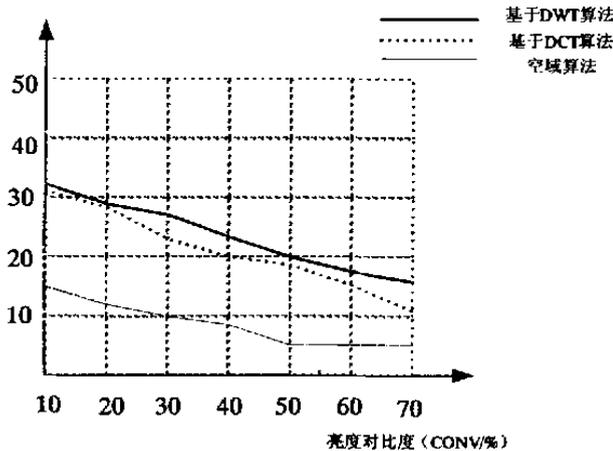


图 5.4 不同程度亮度、对比度调整后各算法提取水印图像的 PSNR 值

从以上的分析图中可以看出,基于 DWT 的数字水印算法在各种攻击下表现的效果最好。

5.3 本章小结

通过上面的分析可知,基于 DWT 的水印算法无论面对哪种攻击,它的健壮性都要好于其它两种算法,不过上述三种算法在遭到旋转攻击的时候,健

壮性都很差，这是上述算法的不足之处。

结论

本文对数字水印的基础理论框架进行了全面的综合和概括，建立了完整的数字图像水印系统处理模型，包括水印的嵌入、提取、与验证过程。所提出的方案均在 MATLAB 中进行了验证。

对于图像水印系统，健壮性和不可觉察性是最基本也是必须的要求。该课题主要针对水印嵌入对策研究，以期获得最佳性能。其中包括水印嵌入空间、嵌入的位置、嵌入的强度，水印的结构、水印的容量对系统性能的影响进行综合分析，为优化系统提出一定的可参考的建议。以便在水印系统设计的时候能够根据系统的实际需求，合理安排各种参数。

本文提出了两种分别基于 DCT 和 DWT 的水印方案。在 DCT 水印系统选择 DCT 系数的中频系数作为嵌入的载体(出于不可觉察性和健壮性的考虑)。在 DWT 水印系统中，利用小波变换的多分辨率特性提取影响图像纹理的参数作为水印的载体，利用纹理的隐蔽特性，使得系统在保证健壮性的同时获得很好的不可觉察性。

用 MATLAB 模拟图像可能遭受的各种攻击，测试水印系统的健壮性，并对水印图像的失真进行主观和客观的评估。证明在文中所建立的水印系统都具有很好的抵抗常见信号处理(JPEG 压缩、滤波、噪声干扰等)以及图像处理(旋转、图像剪切等)的性能，尤其是能够很好的抵抗 JPEG 压缩。

对 DCT 系统和 DWT 水印系统进行性能比较，DWT 水印系统的综合性能均高于 DCT 系统，由于 DCT 变换的性质，以下两点是 DCT 系统所无法达到的：

- 1) 自动选择嵌入位置；DWT 的多分辨率特性可以充分利用人眼视觉特性，建立自适应于图像的视觉遮罩，将水印嵌入到人眼敏感度低的地方。
- 2) 自动调整嵌入容量；通过多分辨率特性统计图像特性，自动分析图像的视觉容量，在可见阈值值(JND)的控制下充分利用图像的视觉容量嵌入更多的信息，获取更高的健壮性。

水印系统设计的关键就是寻找不可觉察性和健壮性的平衡，而 DWT 系统的诸多自适应特性为寻求最佳的平衡点提供了可能的依据。也是水印技术

未来发展的主流方向。

因为该课题研究过程主要是针对图像的运算，计算耗时较大，由于时间和设备的限制，研究中还有很多不足的地方需要进一步完善，例如选择不同的原始图像、不同的水印以及其它影响系统性能的细节因素进行测试。

除了本文在应用中涉及的不足之外，数字水印技术目前在国际中的研究现状也存在很多不足之处，需要在以后的研究中不断深入、改进。

- 1) 进一步深入进行算法分析。即通过对现有的数字水印算法的健壮性、安全性、抗攻击性等特性的研究，并结合数字信号处理技术，寻找出它们之间的关系，从而提出更加好的数字水印算法。
- 2) 数字水印代理技术的开发，其核心思想是将数字水印技术与 TSA(trusted spotting agent)相结合。这样这种数字水印代理即可以在网络上的服务器之间进行漫游，并可扮演基于数字水印检测、验证和追踪非法拷贝的侦探角色。
- 3) 大多数算法尚未很好地利用视觉系统的特性，对视觉特性应用的定性、定量描述尚未见到。事实上对视觉系统的研究也仍是一项长期的工作。由于 DCT 和 DWT 在图像处理和数据压缩领域中的特殊地位，基于 DCT 和 DWT 的方法将继续成为主流。
- 4) 压缩域水印算法以及水印与压缩编码方法相结合的研究，水印与密码学的结合解决信息安全的某些问题。

数字水印软件作为数据安全领域中的新生事物，具有很高的技术含量和很强的生命力，同时也孕育着巨大的商机。我们有理由相信，会有越来越多的有识之士投入到数字水印技术的研究和产业化进程中来。

参考文献

- [1] F. Mintzer, G. W. Braudway, M. M. Yeung. Effective and ineffective digital watermarks. Proceedings of ICIP' 97, Intern. Conf. on Image processing, vol. III, pp.9-12, S. Barbara, CA, USA, October 26-29, 1997
- [2] Min Wu, Bede Liu. Watermarking for Image Authentication. Proc. of ICIP' 98, vol. 2, pp.437-441, 1998
- [3] Hyuncheol Park, Kwangjo Kim. Visible Watermarking using Verifiable Digital Seal Image. SCIS 2001 The 2001 Symposium on Cryptography and Information Security Oiso, Japan, January 23-26, 2001 The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers
- [4] M. Barni, F. Bartolini, V. Cappellini, A. Piva. A DCT-domain system for robust image watermarking. to appear on Signal Processing, Elsevier
- [5] I. Cox, J. Kilian, F. T. Leighton, T. Shamoon. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. IEEE Transactions on Image Processing, vol. 6, no. 12, pp.1673 — 1687, December 1997
- [6] J. J. O. Ruanaidh, F. M. Boland, W. J. Dowling. Phase watermarking of digital images. Proceedings of ICIP' 96, Intern. Conf. on Image Processing, vol. III pp.239-242, Lausanne, 16-19 September 1996
- [7] G. Braudaway. Protecting publicly-available images with an invisible image watermark. Proc. of ICIP' 97, Intern. Conf. on Image Processing, vol. 1, pp. 524-527, Santa Barbara. CA, October 1997
- [8] S. Craver, N. Memon, B. L. Yeo, M. M. Yeung. Resolving rightful ownership with invisible watermarking techniques: limitations, attacks and implications, to appear on IEEE Journal of Selected

Areas in Communications

- [9] N. Nikolaidis, I. Pitas. Copyright protection of images using robust digital signatures. Proc. of ICASSP'96, Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 4, 2168—217
- [10] I. Pitas. A method for signature casting on digital images. Proc. of ICIP'96, Intern. Conf. on Image Processing, vol. III, pp. 215-218, Lausanne, Switzerland, September 1996
- [11] J. J. O. Ruanaidh, T. Pun, Rotation, scale and translation invariant digital image watermarking, vol. I, pp. 536-539, S. Barbara, CA, USA, October 26-29, 1997
- [12] J. Zhao, E. Koch. Embedding robust labels into images for copyright protection. Proc. of Intern. Congress on Intellectual Property Rights for Specialised Information, Knowledge and New Technologies, pp. 242-251, Vienna, Austria, August 1995
- [13] W. Zeng, B. Liu .On resolving rightful ownerships of digital images by invisible watermarks. Proceedings of ICIP'97, Intern. Conf on Image Processing, vol. I, pp. 552-555, S. Barbara, CA, USA, October 26-29, 1997
- [14] G. L. Friedman. The trustworthy digital camera: restoring credibility to the photographic image. IEEE Trans. on Consumer Electronics, vol. 39, pp. 905-910, November 1993
- [15] Fabien A. P. Petitcolas, Ross J. Anderson, Markus G. Kuhn. Attacks on Copyright Marking Systems .David Aucsmith, Ed., Second workshop on information hiding, in vol. 1525 of Lecture Notes in Computer Science, Portland, Oregon, USA, 14-17 April, 1998, pp. 218-238
- [16] Van Schyndel. R, Tirke I. A, Osborne. C, A digital watermark Proceedings of ICIP, IEEE Press, 1994, pp. 86-90
- [17] How Stego Online Works. <http://www.stego.com/howto.html>
- [18] A. Lippman. Receiver-Compatible Enhanced EDTV System, U. S. Patent

- No. 5, 010, 405 (1991)
- [19] W. Bender, D. Gruhl, N. Morimoto. Techniques for Data Hiding IBM System Journal. Vol. 35, No. 3&4, 1996
- [20] Zhao. J, Koch. E. Embedding robust labels into images for copyright protection. In Proceedings of the KnowRight'95 Conference on Intellectual Property Rights and New
- [21] L. F. Turner. Digital data security system. Patent IPN WO 89/08915, 1989
- [22] Christine. I. Podilchuk, Wenjun Zeng. Digital Image Watermarking using Visual Models. Human Vision and Electronic Imaging II, SPIE3016, San Jose, CA, USA, February 1999
- [23] Watermarking Technology for Copyright Protection: General Requirements and Interoperability.
<http://www.imprimatur.net/IMP FTP/watermark1.pdf>, 18 May, 1998
- [24] 阮秋琦. 数字图像处理. 电子工业出版社. [M]. 2001 年 1 月第一版. P216-217
- [25] 冈萨雷斯 (Gonzalez, R. C.) 等著, 阮秋琦等译. 数字图像处理. 电子工业出版社. 2003 年 3 月第二版. P229-230
- [26] 王炳锡, 陈琦, 邓峰森. 数字水印技术. 西安: 西安电子科技大学出版社. P8-9
- [27] 魏为民. 基于彩色静止数字图像的信息隐藏技术研究. <http://www-900.ibm.com/developerWorks/cn/security/se-eshow/index.shtml>
- [28] Xu JianHua. Image Process and Analysis. [M]. BEIJING .Science Publishing Company. 1994, 102-105 (徐建华图像处理与分析[M]北京: 科学出版社, 1994, 102-105)
- [29] C. W. Brown, B. J. Shepherd. Graphics File Formats. Manning, pp. 220-229, 1995
- [30] The Discrete Cosine Transform(DCT).
<http://www.cs.cf.ac.uk/Dave/Multimedia/node231.html>

- [31] 丁玮, 闰伟齐, 齐东旭. 基于离散余弦变换的数字水印图像. 北方工业大学学报, 第 11 卷第 3 期, 1999 年 9 月
- [32] 王大凯, 彭进业. 小波分析及其在图像处理中的应用. 西北大学电子科学系. [M]. 2002 年 6 月
- [33] 曾剑芬, 马争鸣. 提升格式与 JPEG2000. 中山大学学报(自然科学版)第 41 卷. 第一期 2002 年 1 月
- [34] 李洪刚, 吴乐南. 基于任意小波的提升格式的设计. 东南大学学报(自然科学版). 第 31 卷第 4 期. 2001 年 7 月
- [35] C. Valens. The Fast Lifting Wavelet Transform.
<http://perso.wanadoo.fr/polyvalens/clemens/lifting/lifting.html>, 1999
- [36] 汪孔桥. 数字图像的质量评价. 测控技术. 2000 年 19 卷第 5 期
- [37] 李琴王强. 印刷图像质量评价方法的研究. 印刷世界. 2001 年 3 月
- [38] 孙农亮, 曹茂永. 运动模糊图像清晰度评价函数的研究. 仪器仪表学报. 第 22 卷. 第 3 期增刊. 2001 年 6 月
- [39] 易开祥, 石教英. 自适应二维数字水印系统. 中国图象图形学报. 第 6 卷 (A 版). 第 5 期. 2001 年 5 月
- [40] 郝文化, 田蕾, 董文芳. MATLAB 图形图像处理应用教程. 北京: 中国水利水电出版社, 2004 年 1 月第一版

攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果

- [1] 祁新春, 李礼勋, 韩鹏. 一种基于提升格式的小波域盲水印算法. 应用科技. 2005(9).

致谢

本论文的完成首先要感谢我的导师李礼勋教授，李老师有广博的学识、丰富的科研经验和灵活、敏锐的思维方式。在论文的进行当中，李老师对我的论文进展情况，论文完成中的重点、难点等方面都给予了悉心的关心和指导。在论文完成中，对我的论文给予了认真详尽的审阅和指导。正是在李老师的严格要求下，我才能顺利完成硕士论文工作，在此向李老师致以衷心的感谢。

另外，我还要感谢 801 教研室的全体老师，在我论文完成中，他们在各个方面都给予了我很大帮助，教研室和谐的氛围和优良的工作环境，为我的论文完成创造了广阔的空间，在此也向他们表示感谢。

我还要感谢冯明、李佶、姜文杰、王咏胜等同学，在学习和生活上的关心和帮助，以及技术上的支持。

最后，向评阅本论文的专家致以诚挚的谢意！