

摘要

数字水印技术是一种有效的数字产品版权保护和数据安全维护技术,是信息隐藏技术研究领域的一个重要分支,已经受到国际学术界和企业界的高度关注。在现实生活中,数字水印技术已经广泛应用在数字作品的知识产权保护、商务交易中的篡改防伪、声像数据的隐藏标识和篡改提示等方面。数字水印技术主要分空域数字水印技术和变换域数字水印技术,目前变换域数字水印技术以其物理意义清晰、可充分利用人类的感知特性、不可见性和鲁棒性好、与压缩标准兼容等优点成为研究的热点领域。本文的研究主要集中于变换域环境下数字水印的嵌入问题,期望通过提出改进算法以提高水印算法的鲁棒性。

首先对数字水印技术进行了比较详细的介绍,包括数字水印技术的研究背景、历史、现状,以及数字水印技术中比较关键的几部分如:水印生成、水印嵌入。同时对空域数字水印技术进行了简单的介绍,实现了一种算法——LSB 算法,并通过实验结果指出了该算法的优缺点。

本文的工作重点在对变换域数字水印嵌入技术的研究方面。在变换域数字水印技术上,分别对基于离散余弦变换(DCT)的数字水印算法及基于离散小波变换(DWT)的数字水印算法进行了详细分析。

在基于 DCT 的数字水印算法上,首先实现了一种 DCT 域典型算法,并通过实验结果指出了该算法的缺点。根据这些缺点,本文提出了一种基于图像内容的自适应水印嵌入算法,将自组织特征映射网络和 DCT 相结合,根据图像内容自适应地决定嵌入强度。通过比较两种算法得到的含水印图像的质量、提取出的水印图像的质量,以及两种算法在鲁棒性方面的表现得出:本文所提出的算法在提高提取水印图像的质量方面、在抗攻击的鲁棒性方面都较典型算法有很大提高。

在基于 DWT 的数字水印算法上,首先实现了一种 DWT 域典型算法,并通过实验结果指出了该算法的缺点。根据该算法的缺点本文提出了一种基于小波包变换和 DCT 相结合的数字水印嵌入算法,该算法充分利用小波变换和 DCT 变换的优点,弥补各自变换的不足。通过比较两种算法提取出的水印图像的质量,以及两种算法抗攻击的能力,最终得出结论:本文所提出的算法在提高提取水印图

像的质量和抗攻击这两方面都较典型算法有很大的提高。

关键字

水印嵌入；小波包变换；人工神经网络；自组织特征映射网络；水印攻击

Abstract

Digital watermarking is an effective method to protect the copyright of the digital products and to maintain the securities of the data. It's an important offset of the information hiding. Digital watermarking has been regarded by the corporations and the researchers. In our lives, it has been used widely in the copyright protection, juggles prevention in the business, hiding the symbol of the audio and video data or the registering of juggles. In this thesis, we will pay more attention to the embedding methods of the digital watermarking information in the DCT-domain and the DWT-domain. We introduce two methods of embedding watermarks and hope the new methods will be more robust.

In this thesis, we give the details of the digital watermarking technology, such as the research history, the research actuality and the main parts of the arithmetic—creation of the watermarks and embedding of the watermarks. Then we introduce the knowledge of the spatial digital image domain. By achieving the famous method—LSB (Least Signification Bit) and the results of the robust detection, we indicate the advantages and the shortcomings of this method.

The main parts of this thesis is the embedding methods in the frequency digital image domain. In this parts, we give the particular knowledge of digital watermarking in the DCT-domain and the DWT-domain.

In the DCT-domain, we achieve a typical method and detect the robust. The shortcoming of this method is concluded through the results. We, then, introduce a new method which combine the DCT and the SOM to prompt the shortcoming and can embed the watermarks based on the detail of the image. Comparing the quality of the image and the robust on the withstanding of attacks which we get by the two methods, we conclude that the arithmetic in this thesis is more affective.

In the DWT-domain, we achieve a typical method and detect the robust. By researching the shortcoming of this method, we introduce a new method which combine the wavelet packet transform and the DCT. Comparing the quality of the

image and the robust on the withstanding of attacks which we get by the two methods, we conclude that the arithmetic in this thesis is more affective.

Keyword:

watermarking embedding, wavelet packet transform, neural network, SOM, watermarking attacking

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京工业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名： 朱文星 日期： 2006.6

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签名： 朱文星 导师签名： 孙光民 日期： 2006.6

第一章 绪论

1.1 课题背景

数字信息革命给人类的社会和生活带来了深刻的变化,同时也带来了新的挑战和创新机遇。今天,数码相机、数码摄像机、扫描仪等设备和功能强大的软件,已被全球范围的用户用于创作、处理和享用数字多媒体数据,如音频、图像、视频等,互联网也为对媒体信息的传播提供了更加广阔便捷的渠道。多媒体产品的可完美复制和方便快捷的传播,使数字版权保护成为研究的热点问题。

计算机技术的发展也对如何保证信息安全提出了挑战:计算机软件强大的信息处理能力使人们可以方便的编辑、修改、存储和传播数字信息,但一些个人和团体为了某种目的,在未经作品所有者许可的条件下擅自篡改数字图像内容的做法,使得数字图像的真实性、完整性受到严重的威胁。因此,多媒体产品的真实性、完整性的研究就具有重要的研究意义和使用价值。

对数字信息进行保护的传统方法是密码技术,虽然密码技术可用来解决其中的部分问题,但是密码技术存在着如下三大缺点^[1, 2]: ①它明确地提示攻击者哪些是重要信息,容易引起攻击者的好奇和注意,并有被破坏的可能性。②一旦加密文件被破解,其内容就完全透明了。③攻击者可以在破译失败的情况下将信息破坏,使得即使是合法的接收者也无法阅读信息内容。这些缺点是密码技术对多媒体数字信息的保护显得力不从心。信息隐藏技术以其特有的优势解决了密码技术的一些缺陷,开始引起人们的普遍关注。密码技术仅仅隐藏了信息的内容,而信息隐藏技术不但隐藏了信息的内容,而且隐藏了信息的存在。

数字水印技术是一种有效的数字产品版权保护和数据安全维护技术,是信息隐藏技术研究领域的一个重要分支,已经受到国际学术界和企业界的高度关注。它将具有特定意义的标记(水印),利用数字嵌入的方法隐藏在数字图像、声音、文档、图书、视频等数字产品中,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和数字多媒体防伪的有效手段。

1.2 数字水印技术的实际意义

在现实生活中，以下几个引起普遍关注的问题充分说明了数字水印研究的实际意义^[3-6]。

1、数字作品的知识产权保护

数字作品（如电脑美术、扫描图像、数字音乐、视频、三维动画）的版权保护是当前的热点问题，而对数字作品的版权保护可能是水印最主要的应用。由于数字作品的拷贝、修改非常容易，而且可以做到与原作完全相同，所以原创者不得不采用一些严重损害作品质量的办法来加上版权标志，而这种明显可见的标志很容易被篡改。

数字水印利用数据隐藏原理使版权编制不可见或不可听，既不损害原作品质量，又达到了版权保护的目，这项应用要求非常高的稳健性。目前，用于版权保护的数字水印技术已经进入了初步实用化阶段，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。

2、商务交易中的篡改防伪

随着高质量输入/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防伪变得更加容易。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、声像数据的隐藏标识和篡改提示

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。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。

1.3 数字水印技术的研究历史

数字水印技术从正式提出到现在虽然只有短短的几年,但由于它是应用于开放性网络上的多媒体信息隐藏技术,为解决版权保护和内容完整性认证、来源认证、篡改认证、网上发行、用户跟踪等一系列问题提供了一个崭新的技术研究方向,因此在数字产品的知识产权保护、隐蔽标识、篡改提示、隐蔽通信和防伪等方面都具有十分看好的应用前景。

Van Schyndel 在 ICIP'94 会议上发表了题为“A digital watermarking”的文章,它是第一篇在主要会议上发表的关于数字水印的文章,其中阐明了一些关于水印的重要概念。这篇文章被认为是一篇具有历史意义的文献。数字水印相关的国际学术会议——信息隐藏学术研讨会分别于 1996 年、1998 年、1999 年、2001 年、2002 年和 2004 年连续举行了 6 届,发表了一系列高质量的文章。另外,IEEE 和 SPIE 等一系列重要国际会议也出版了关于数字水印的专题。欧洲已有几项较大的工程项目都有关于数字水印方面的专项研究,如 VIVA 和 ACTS 项目。1998 年以来《IEEE 图像处理》、《IEEE 会报》、《IEEE 通信选题》、《IEEE 消费电子学》等许多国际重要期刊也都组织了数字水印的技术专刊或专题新闻报道。

在产业界,欧洲和日本的有关厂商正在积极开发采用该技术的产品。1996 年 2 月美国 Adobe System 公司首先在图像处理软件《Adobe Photoshop 4.0》中,采用美国 Digimarc 公司的技术,加入了数字水印模块,起到了版权保护的功能。2001 年 1 月 Digimarc 公司又宣布与图形艺术的业界团体 Printing Industries of America (PIA) 就电子水印技术联手合作,在打印机中使用 Digimarc 的“Media Bridge”电子水印技术。2001 年 7 月,富士通公司开发出了“阶层型电子水印”技术,为其在因特网上实现电子博物馆和电子美术馆系统“Musethque Light”提供了安全保障。

我国学术界也紧跟世界水印技术发展的脚步。1999 年 12 月,第一届全国信息隐藏学术研讨会(CIHW)在北京电子技术应用研究所召开。国家“863”计划、“973”计划项目等都对数字水印的研究提供了资金的支持。

数字水印技术是一门交叉学科,要用到的知识很广,包括密码学、图像处理、生物学、光学、心理学、各种数学、计算机学、信号处理学、无线通信学、神经网络学、信息论等等。能够应用各种其他领域的方法来实现信息安全保护的功能,

也为该技术的发展开辟了广泛的发展空间,为今后技术的不断发展提供先决条件。

1.4 数字水印技术的研究现状

数字水印技术不论是应用于图像、视频^[7, 8],还是音频^[9, 10]等领域,其算法的原理是相通的。另外,也有对文本的电子文档(例如 ps 和 pdf 格式的文档)进行水印嵌入的研究^[11, 12]。本文主要对该技术在静态图像处理方面的发展和研究进行讨论。

在各种类型的嵌入算法中,人们主要把作用域集中在图像的空间域和各种变换域,比如离散傅立叶变换域、离散余弦变换域、小波变换域等,通过对作用域的系数的修改或参数的改变,把水印信息加入到被保护的图像中。在提取过程中,一般直接用与嵌入过程相反的变换方法,直接提取出可读信息。对于可检测信息,一般采取数理统计中假设检验的方法,构造出相应的检验统计量,计算出嵌入信息存在与否的概率,从而做出判断。

1.4.1 空域水印技术

早期人们对数字水印的研究基本上是基于时空域的,算法相对简单,实时性较强,但在鲁棒性上不如变换域算法和压缩域算法。实际上,在时空域算法中,重要的一大类算法是脆弱水印或半脆弱水印算法,因为这类算法具有对攻击的时间或空间位置的定位能力。因此,后期人们研究的时空域算法多用于内容认证或篡改提示。算法一般基于位平面、统计特性、替换、量化等方法。

空域数字水印方法的普遍缺点是:①嵌入的信息量不能太多;②鲁棒性差,尤其对滤波、量化和压缩攻击比较敏感。

1.4.2 变换域水印技术

由于空域数字水印技术的普遍缺点,近年来水印研究大都集中在变换域或频域中,主要通过修改载体的变换域系数来实现水印嵌入过程。变换域水印算法中,数字载体首先进行一种特定的正交变换,嵌入的空间是载体的某个频带或某些频

带。这些频带对应的变换系数遵循一定的规则被修改、替换或交换。载体的低频信息反映了载体的主要轮廓，不应有较大的失真，水印的嵌入将影响不可见性；而载体的高频信息是人类感知系统不敏感的信息，通常被压缩技术所剔除，故在该频带嵌入水印，水印的鲁棒性较差。因此，为了同时满足鲁棒性和不可见性，人们主张将水印嵌入到载体的中频系数中。变换域水印算法的主要优点是：物理意义清晰；可充分利用人类的感知特性；不可见性和鲁棒性好；与压缩标准兼容。

变换域数字水印技术主要包括：离散余弦变换（DCT）域、离散小波变换（DWT）域。其中，离散余弦变换是数字信号处理技术中最常用的线性变换之一，存在快速算法，具有很好的能量压缩能力和去相关能力，因而它在数字音频信号压缩和图像压缩等领域得到广泛应用。特别地，数字图像的 JPEG 压缩标准就是建立在离散余弦变换的基础上的。基于 JPEG 压缩标准的水印嵌入算法可以增强水印抵抗 JPEG 压缩的能力。

由于离散余弦变换是从图像空间到频率空间的全局变换，在变换空间中任何一个数据的误差都会影响到图像中的每一个像素，即使采用了分块处理的方法，但这种分块处理必然会引起“块效应”。而离散小波变换是从图像空间到频率空间的局部变换，同时其具有多分辨率分析的能力，因此其效果要好于离散余弦变换。利用小波变换把原始图像分解成多频段的图像，能适应人眼的视觉特性且使得水印的嵌入和检测可分多个层次进行，小波变换域数字水印方法兼顾空域方法和 DCT 变换域方法的优点。

除了 DCT 变换域和 DWT 变换域数字水印算法外，还有基于其他变换的水印算法，例如：DFT 变换域数字水印算法^[13, 14]、矢量变换域水印算法^[15]、Zernike 变换域水印算法^[16]以及压缩域水印算法^[17, 18]等。

1.5 论文的结构

本文主要研究了基于离散余弦变换和离散小波变换的数字图像水印嵌入技术。包括分别实现了基于两类变换的典型算法，并根据算法的缺点分别提出了改进算法。通过比较典型算法与改进算法输出图像的质量，以及提取水印图像的质量，并对典型算法及改进算法的鲁棒性进行比较，证明本文所提出的改进算法不但支持较大嵌入强度，并且改进算法的鲁棒性更好。全文分为六章，其中第四、

五章为本文工作的重点。

第一章为绪论，主要介绍了课题背景，数字水印技术研究的实际意义，数字水印技术的研究历史。并将数字水印技术分为空域数字水印技术和变换域数字水印技术，分别对这两种技术的研究现状进行了介绍。

第二章首先给出了数字图像水印系统的基本框架。根据基本框架，给出了数字图像水印系统的基本要求，并对框架中的重要部分如水印的生成、嵌入和提取进行了详细介绍。之后简单介绍了数字图像水印的分类以及性能评估。

第三章对空域数字图像水印算法进行了简单的介绍。实现了一种典型的空域图像水印算法——LSB 算法，通过实验结果指出了空域水印算法的优缺点。

第四章介绍基于离散余弦变换的数字图像水印算法。该章首先介绍了经典的基于离散余弦变换的数字图像水印算法——Cox 算法。之后提出了一种改进型的基于离散余弦变换的数字图像水印算法，该算法利用神经网络的自组织、自学习的能力对载体图像进行分类，并根据不同的分类嵌入不同强度的水印信息，以达到自适应的嵌入水印的目的。最后对两种算法鲁棒性进行比较，证明本文提出的算法的鲁棒性更好。

第五章介绍了基于离散小波变换的数字图像水印算法。该章首先实现了一种基于离散小波变换的典型算法，之后提出了一种改进算法，该算法将离散小波包变换和 DCT 变换相结合以嵌入水印信息。不但算法的安全性得到提高，同时通过对两种算法鲁棒性的比较，证明了本文提出的算法的鲁棒性更好。

第六章对本文进行了总结，并对下一步工作及数字图像水印的未来研究方向进行了探讨。

第二章 数字图像水印技术

2.1 数字图像水印系统的基本框架

根据 Voyatzis 和 Pitas^[19]提出的思想,数字水印处理系统的基本框架可以表示为图 2-1 的形式。一个数字水印算法主要由水印生成、水印信息的嵌入、水印信息的提取和检测三部分组成。

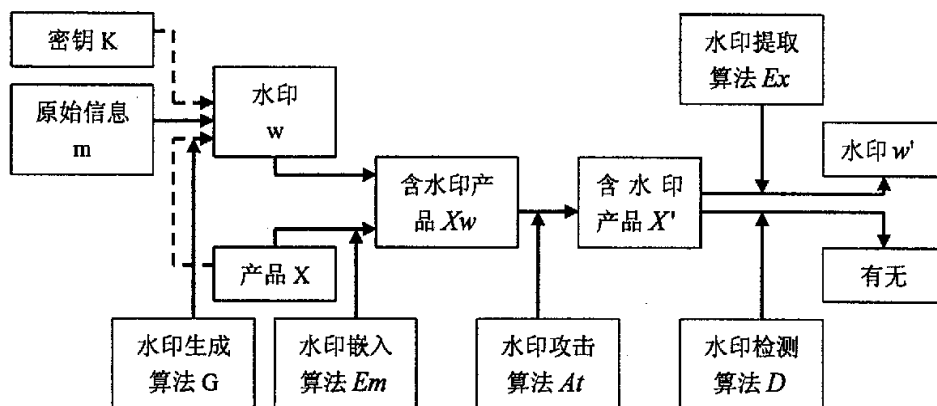


图 2-1 数字水印处理系统的基本框架

Figure 2-1 The frame of digital watermarking processing system

2.1.1 水印信息的生成

数字水印生成是数字水印处理过程的第一步关键步骤。构成水印的序列通常应该具有不可预测的随机性 (Unpredictable Randomness)。由于人类视觉系统对纹理具有极高的敏感性,故水印不应含有纹理,水印应该具有与噪声相同的特性。

嵌入到载体图像中的水印信号可以是无意义的水印信号,例如:使用伪随机二值序列作为水印信号^[20],使用混沌序列产生水印信号^[21]。将无意义的水印信号嵌入到载体图像中,在水印提取时,需要再利用原始的水印信号进行相关性计算。通常可以将一些有意义的水印信号嵌入到载体图像中,例如:数字产品的序列号、产品的版权所有人签名等。有意义水印在提取后,不需要再利用原始的水印信号进行相关性计算,可以直接使用它对载体中是否含有水印进行判断。嵌入

有意义的水印信号简单的方法是直接将水印信号嵌入到载体图像中,但这种方法保密性差,如果攻击者从载体数据中获得了水印数据,就可以很容易的对水印进行破坏。因此在水印嵌入前,要对水印信号进行预处理,例如可以采取加密或图像置乱算法。本算法采用 Arnold 变换对水印信号进行置乱处理。

Arnold 变换是 V. I. Arnold 在研究环面上的自同态时所提出的,也称为猫脸变换 (cat mapping)。Arnold 变换指的是二维 Arnold 变换。设 M 是光滑流形环面 $\{(x, y) \pmod{1}\}$, M 上的一个自同态 φ 定义如下:

$$\varphi(x, y) = (x + y, x + 2y) \pmod{1} \quad (2-1)$$

显然映射 φ 导出覆盖平面 (x, y) 上的一个线性映射:

$$\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

于是我们得出:设有单位正方形上的点 (x, y) , 将点 (x, y) 变换到另一个点 (x', y') 的变换为

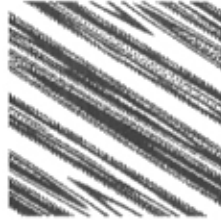
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod{1} \quad (2-3)$$

式 (2-3) 称作二维 Arnold 变换, 简称 Arnold 变化。将 Arnold 变化应用在数字图像上, 可以通过像素坐标的改变而改变图像灰度值的布局, 把数字图像看作一个矩阵, 则经 Arnold 变化后的图像会变得“混乱不堪”, 但继续使用 Arnold 变换, 一定会出现一幅与原图相同的图像。图 2-2 为原始水印信号及经过 Arnold 变换后的置乱信号。



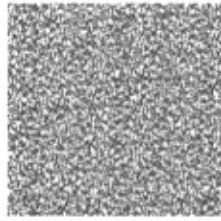
a) 原始水印信号

a) The original watermark



b) 经过 2 次迭代后的置乱信号

b) The encrypted watermark after double Arnold transforms



c) 经过 5 次迭代后的置乱信号

c) The encrypted watermark after five Arnold transforms

图 2-2 原始水印信号及经过 Arnold 变换后的置乱信号

Figure 2-2 The original watermark and the encrypted watermark by the Arnold transform

可以看到，当迭代在五次以上时，水印信号变得“混乱不堪”，达到了置乱的目的。

2.1.2 水印信息的嵌入

水印嵌入技术是数字水印系统的第二大关键技术。水印嵌入方法的设计即为如何把水印信号嵌入到原始载体中去，这往往是决定算法性能的关键，嵌入方法决定着对原始载体影响的大小，并且在很大程度上决定了算法的性能。

根据所基于的域不同，数字水印嵌入技术主要分为空域算法、变换域算法和压缩域算法三大类。空域算法将水印信息直接嵌入到音频空域采样、图像空间像素和视频数据等原始载体数据中，即在媒体信号的时间域或空间域上实现水印的嵌入。变换域算法将水印信息嵌入到音频、图像、视频、三维目标等原始载体的变换域系数中。压缩域算法广义上是指充分考虑 JPEG、MPEG、和 VQ 技术的结构和特性，将水印嵌入到压缩过程的各种变量值域中，以提高对相应压缩技术或压缩标准攻击的鲁棒性为目标的嵌入算法。

在水印信息嵌入问题上,所采用的变换方法、水印嵌入的位置、嵌入的信息量以及嵌入的强度都对算法的性能有很大的影响,并成为研究的重点。本文主要的研究工作集中于基于变换域的数字水印嵌入算法:一、提出了将神经网络引入水印嵌入过程,利用神经网络自组织、自学习的能力对载体图像进行分类,实现水印的自适应嵌入。二、提出了将 DCT 与 DWT 相结合,实现水印嵌入的算法,以提高算法的鲁棒性。

2.1.3 水印信息的提取和检测

水印检测,是指根据检测密钥通过一定的算法判断该作品中是否含水印。水印提取,是指根据提取密钥通过一定的算法(往往是嵌入算法的逆过程)提取出该作品中的每个印记,其长度等于原始水印序列的长度。如果水印检测或提取过程中需要用到原始载体,则称此过程为明检测或明提取;如果水印检测或提取过程中不需要用到原始载体,则称此过程为盲检测或盲提取。

水印信息的检测主要是针对嵌入算法设计,在密钥 K 的控制下对嵌入信息进行估计,并利用一定的指标对估计的结果进行评价。有的情况下对特定的嵌入信息是否存在进行检测,以得出待检测产品中是否含有特定的嵌入信息。

2.2 数字图像水印系统的基本要求

一般情况下,数字图像水印系统常见的基本要求如下:

(1) 鲁棒性 (robustness)。指图像水印算法抵抗常见图像处理操作的能力,也就是说含水印图像经历无意修改而保留水印信息的能力。一般来说,水印应当具有对噪声、平滑、增强、有损压缩、平移、旋转、缩放和裁剪具有鲁棒性。但是,对于内容认证应用场合,必须要求水印具有脆弱性 (fragility)。

(2) 透明性 (invisibility)。透明性也称不可见性,即水印的存在不应明显干扰被保护的图像数据。通常需要利用人类视觉系统特性来进行水印处理,从而使含水印图像没有明显的主观降质现象,而嵌入的水印却无法人为地看见。

(3) 安全性 (security)。指水印算法抵抗恶意攻击的能力,即它必须能够承受一定程度的人为攻击,而是水印信息不会被删除、破坏或窃取。应该保证非授权用户无法检测或破坏水印,即使在水印算法或相关知识公开的情况下。安全性

中还包含不可检测性 (undetectability), 指隐蔽载体与原始载体具有一致的特性 (如具有一致的统计噪声分布等), 以便使非法拦截者无法判断是否有隐蔽信息。

(4) 数据容量 (data capacity)。水印应该能够包含相当的数据容量, 以满足多样化的需要。

(5) 盲检测和自恢复性。盲检测是指水印的检测和提取不需要原始图像的参与。而自恢复性含义如下: 含水印图像经过一些操作或变换后, 可能会产生较大的失真或破坏。如果只从留下的片段数据仍能恢复水印信号, 而且恢复过程不需要原始图像参与, 这就是所谓的自恢复性。

(6) 确定性 (unambiguous)。水印所携带的信息能够被唯一确定地鉴别。

一般而言, 上述这些特性要求之间通常是相互竞争和矛盾的, 实际应用中不可能使它们同时达到最佳, 只能根据需要在不同特点之间取得折衷或者设定可调范围。

2.3 数字图像水印的分类

数字水印技术的分类方法有很多种, 分类的出发点不同导致了分类的不同, 它们之间是既有联系又有区别的。最常见的分类方法包括以下几类:

1、按水印特性划分, 可将水印划分为可见水印和不可见水印。

2、按水印所附载的载体数据划分, 可分为图像水印、音频水印、视频水印、文本水印以及用于三维网格模型的网格水印等。

3、按水印检测过程划分, 可将水印划分为非盲水印 (Nonblind watermark)、半盲水印 (Seminonblind watermark) 和盲水印 (Blind watermark)。非盲水印在检测过程中需要原始数据和原始水印参与; 半盲水印则不需要原始数据, 但需要原始水印来进行检测; 盲水印的检测只需要密钥, 既不需要原始数据, 也不需要原始水印。

4、按水印内容划分, 可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断的编码; 无意义水印则只对应于一个序列号或一段随机数。

5、按用途划分, 可将水印划分为票据防伪水印、版权保护水印、篡改提示水印和隐蔽标识水印。

6、按水印隐藏的位置划分,可将水印划分为空域数字水印、变换域数字水印。

本文研究的重点是变换域数字图像水印技术,所提出的算法通过嵌入有意义的水印信息来实现数字产品的版权保护。该算法为不可见水印,水印的提取过程为非盲水印提取。

2.4 数字图像水印的性能评估

对水印的性能评估建立合理的评估方法和基准是数字水印研究的一个重要内容。对水印的评估主要包括以下两个方面:水印鲁棒性的评估;嵌入水印对图像引起的失真的主观和客观定量评估。

2.4.1 影响水印鲁棒性的因素

影响水印鲁棒性的因素有很多种,这其中包括:嵌入的信息量,水印嵌入的强度,图像的尺寸和特性以及密钥等。考虑这些参数,对于公平的测试基准和性能评估,待评估水印方法必须在各种不同的测试图像集中进行测试。若要对几种水印方法进行比较,则必须确保对所有的待评估方法,嵌入的信息量是相同的。

2.4.2 视觉质量的定量描述

通常的水印方法都是在水印可见性可鲁棒性之间存在着折衷。对水印可见性的评估可以用定量度量方法或主观测试方法。定量度量方法主要有基于像素的失真量度量方法以及基于人的视觉系统(HVS)的度量方法。主观测试方法主要是基于观测者打分的质量等级评判方法。

2.4.3 性能评估中所使用的攻击方法

对水印系统进行性能评估的过程中,需要对水印系统进行一些攻击,以测试其性能。这些攻击是一个水印系统在实际使用过程中可能会遭受到的,此处的“攻击”的含义包括有意的攻击和无意的攻击。有意的攻击是指为了去除水印而采取的各种处理方法,无意的攻击是指含水印的图像在使用过程中不可避免受到的诸

如有损压缩、噪声影响等处理。

对水印系统的攻击主要有：

- (1) JPEG 压缩攻击：JPEG 是广泛用于图像压缩的压缩算法，任何水印系统处理的图像必须能够经受某种程度的有损压缩，并且能够提取出经过压缩后的图像中的水印。
- (2) 几何变形攻击：对含水印的图像进行各种几何操作。包括：水平翻转、旋转、剪切等。
- (3) 图像增强处理攻击：包括低通滤波、锐化等处理。

2.5 本章小结

本章主要对数字图像水印技术进行了介绍。首先给出了数字图像水印系统的基本框架，并对框架中几个重要的部分进行了详细的介绍，包括：水印的生成，水印的嵌入以及水印的提取与检测。

在水印系统的基本要求中介绍了水印系统中常见的一些要求。并对各个要求进行了详细的介绍。

最后给出了数字图像水印的分类以及水印算法的性能评估方法，在评估方法中主要介绍了性能评估中所使用的攻击方法。

第三章 空域数字图像水印技术

3.1 空域数字图像水印技术的研究现状

空域图像水印技术最简单和有代表性的方案就是用水印信息代替图像的最低有效位 (LSB) 或者多个位平面的所有比特的算法。图像的最低有效位也称为最不显著位, 它是指数字图像的像素值用二进制表示时的最低位。1993 年 Tirkel 等人^[22]提出了数字图像水印的一种方法, 该方法将 m 序列的伪随机信号以编码形式嵌入到灰度图像数据的 LSB 中。由于 LSB 位平面携带着水印, 因此在嵌入水印图像没有产生失真的情况下, 水印的恢复很简单, 只需要提取含水印图像的 LSB 位平面即可, 而且这种方法是盲水印算法。但 LSB 算法最大的缺陷是对信号处理和恶意攻击的鲁棒性很差, 对含水印图像进行简单的滤波、加噪等处理后, 就无法进行水印的正确提取。考虑到最低平面替换的鲁棒性差, 而最高位平面替换的可见性差, 文献^[23, 24]提出一种折衷方案, 将水印与多个位平面替换, 对于 8 位图像来说通过采用第 4 位以下的各位平面。为了增加安全性, 位平面不再固定, 而是用一个随机序列来随机选取要替换的位平面。

1996 年, Bender 等人^[25]提出了 Patchwork 算法, 该算法在密钥控制下将图像像素点等概率的划分为两个集合, 这两个集合像素值的均值应该几乎相等。将其中一个集合的像素值均增加一个 d , 同时将另一个集合的像素值均减少一个 d , 这样这两个集合像素的均值的差就为 $2d$ 。通过检验一幅图像的这种统计关系来确定是否含有特定的水印信息。在水印检测时最终只是对“是否嵌入了水印”给出答案, 而无法对嵌入的所有水印比特进行准确提取, 因而也认为嵌入的实际信息只有一比特。之后 Langelaar 等又提出了一种改进的算法^[26], 其目的是增加嵌入的信息量, 并且提高算法的鲁棒性。

Kutter 等^[27]提出一种对 RGB 彩色空间中蓝色成分进行修改以嵌入水印的方法。由于人眼对蓝色是最不敏感的, 因而可以通过修改蓝色成分像素点的值嵌入信息。根据嵌入位的位置和亮度比例, 其修改可以是加性的也可以是减性的, 解码过程中也不需要原始图像文件。

本章实现了 LSB 算法, 对算法的鲁棒性进行了检测, 并指出了算法的优缺点。

3.2 算法实现

3.2.1 水印信号预处理

本文所采用的载体图像为 256 色灰度图像 Lena (512×512)，如图 3-1 所示：



图 3-1 载体图像 Lena

Figure 3-1 The original image

本文采用两个静态二值图像作为水印信息进行水印嵌入算法的研究。如图 3-2 所示：



a) 水印一 (128×128 的二值图像)

a) The first watermark (128×128 Black & White image)



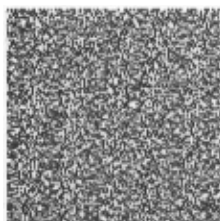
b) 水印二 (64×64 的二值图像)

b) the second watermark (64×64 Black & White image)

图 3-2 本文所采用的两个水印信息

Figure 3-2 The two watermarks

采用 Arnold 变换分别对两个水印图像进行置乱处理（选择 5 次迭代的结果），其结果如图 3-3 所示：



a) 经过置乱处理后的水印一

a) The encrypted watermark (the first)



b) 经过置乱处理后的水印二

b) The encrypted watermark (the second)

图 3-3 经过置乱处理后的水印图像

Figure 3-3 The two encrypted watermarks

可见经过置乱处理后，水印信息已经变得“模糊不清”，很好的保护了水印信息。

3.2.2 水印嵌入和提取

LSB 算法首先对水印图像进行周期扩展，使得扩展后水印信号的大小与原始载体图像的大小一致，然后用水印信号代替载体图像相应象素的最低位，得到含有水印的图像。图 3-4 为用水印信号代替载体图像相应象素的不同位后得到的含水印图像，各图像的信噪比如表 3-1 所示。

由表 3-1 可以看到，用水印图像代替载体图像的不同位得到的含水印图像的质量随着嵌入位的上升而迅速下降，因此水印只能嵌入到低位上。

水印的提取过程是嵌入过程的逆过程，即提取含水印的图像的 LSB 位，再进行一次同样迭带次数的 Arnold 变换，则恢复出水印图像。



图 3-4 用水印信号代替载体图像不同位后得到的输出图像

(a) -- (h) 代替最低位—代替最高位

表 3-1 不同位嵌入水印信息后得到的输出图像的信噪比

水印嵌	1	2	3	4	5	6	7	8
信噪比	44.0983	37.9228	31.9599	25.9754	19.9946	13.4057	7.7236	0.6848

3.3 空域水印算法鲁棒性检测

水印的鲁棒性是指加入的水印不仅能抵抗非恶意的攻击，而且能抵抗一定失真内的恶意攻击。非恶意的攻击是指含水印的图像在使用过程中不可避免受到的诸如损要锁、噪声影响等处理；恶意攻击是指为了去除水印而采取的各种处理方法，此种攻击往往是恶意的。

图 3-5 为对含有水印信息的图像进行各种攻击后提取出的水印图像。



a) 加入脉冲噪声后的图像及提取的水印图像

a) The watermarking image with the salt pepper noise and the watermark extracted



b) 加入高斯噪声后的图像及提取的水印图像

b) The watermarking image with the gauss noise and the watermark extracted

图 3-5 对含有水印信息的图像进行加噪攻击后提取出的水印图像

Figure 3-5 The watermarking image with noises and the watermarks extracted

结论:

通过上面的实验,我们可以得出如下结论:空域水印算法其算法复杂度低,实时性较高,但算法的鲁棒性差,对一些简单的攻击很敏感。因此本文的工作重点集中在变换域数字图像水印嵌入技术的研究中。

3.4 本章小结

本章主要介绍了空域图像水印技术。首先对空域图像水印技术的研究现状进行了介绍,主要介绍了几种常见的空域图像水印算法。之后实现了一种典型的空域图像水印算法——LSB 算法,并对算法的性能进行了测试。通过实验结果得出结论:空域水印算法其算法复杂度低,实时性较高,但算法的鲁棒性差,对一些简单的攻击很敏感。因此,本文的工作重点在变换域数字图像水印算法的研究上。

第四章 DCT 变换域数字图像水印技术

上一节介绍的空域数字水印嵌入方法的普遍缺点是算法的鲁棒性差,尤其对于滤波、量化和压缩攻击。为此,近年来的水印文献大都集中在变换域,主要通过修改载体的变换域系数来实现水印的嵌入。在变换域水印算法中,数字载体首先进行一种特定的正交变换,该变换可以针对整个载体(如整幅图像)或者载体的各部分(比如对图像进行分块)。嵌入空间是载体的某个频带或某些频带,这些频带对应的变换系数遵循一定的规则被修改、替换、或交换。载体的低频信息反映了载体的主要轮廓,不应有较大的失真,水印的嵌入将影响不可见性;而载体的高频信息是人类感知系统不敏感的信息,通常被压缩技术所剔除,故在该频带嵌入水印,水印的鲁棒性较差。基于此,为了同时满足鲁棒性和不可见性,人们主张将水印嵌入到载体的中频系数中。

变换域水印嵌入算法的主要优点是:物理意义清晰;可充分利用人类的感知特性;不可见性和鲁棒性好;与压缩标准兼容。本章主要介绍 DCT 域数字水印嵌入算法。

4.1 离散余弦变换

离散余弦变换(Discrete Cosine Transform)简称 DCT。任何连续的实对称函数的傅立叶变换中只含有余弦项,因此余弦变换与傅立叶变换一样有明确的物理意义,DCT 变换避免了傅立叶变换中的复数运算,它是基于实数的正交变换。DCT 变换矩阵的基向量很近似于 Toeplitz 矩阵(系数矩阵对称且沿着与主对角线平行的任一对角线上的元素都相等)的特征向量,而 Toeplitz 矩阵又体现了人类语言及图像信号的相关特性,故 DCT 常常被认为是对语音和图像信号的准最佳变换,同时 DCT 算法较易于在数字信号处理器汇总快速实现,因此它目前在图像编码中占有重要的地位,成为一系列有关图像编码的国际标准(JPEG、MPEG、H.261 等)的主要环节。基于 JPEG 压缩标准的水印嵌入算法可以增强水印抵抗 JPEG 压缩攻击的能力,因此 DCT 变换在数字水印处理技术中受到了普遍的重视。

4.1.1 一维离散余弦变换的定义

一维有限长离散序列 $x = (x_0, x_1, \dots, x_{N-1})^T$ 的离散余弦变换 (1D-DCT) 定义为:

$$X_\mu = \alpha_\mu \sum_{i=0}^{N-1} x_i \cos \left[\frac{(2i+1)\mu\pi}{2N} \right] \quad (4-1)$$

相应的逆变换 (IDCT) 定义为:

$$x_i = \sum_{\mu=0}^{N-1} \alpha_\mu X_\mu \cos \left[\frac{(2i+1)\mu\pi}{2N} \right] \quad (4-2)$$

$$\text{其中系数 } \alpha_\mu = \begin{cases} \sqrt{1/N} & \mu = 0 \\ \sqrt{2/N} & \mu = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases}$$

4.1.2 二维离散余弦变换的定义

二维有限长离散序列 $x = \{x_{ik}, 0 \leq i \leq N_1 - 1, 0 \leq k \leq N_2 - 1\}$ 的离散余弦变换 (2D-DCT) 定义为:

$$X_{\mu\nu} = \alpha_\mu \alpha_\nu \sum_{i=0}^{N_1-1} \sum_{k=0}^{N_2-1} x_{ik} \cos \left[\frac{(2i+1)\mu\pi}{2N} \right] \cos \left[\frac{(2k+1)\nu\pi}{2N} \right] \quad (4-3)$$

相应的逆变换 (2D-DCT) 定义为:

$$x_{ik} = \sum \sum \alpha_\mu \alpha_\nu X_{\mu\nu} \cos \left[\frac{(2i+1)\mu\pi}{2N} \right] \cos \left[\frac{(2k+1)\nu\pi}{2N} \right] \quad (4-4)$$

式 (4-3) 中系数 α_μ, α_ν 的定义与式 (4-2) 相同。

二维离散余弦变换不但能够将自然图像的主要信息集中到最少的低频系数上,而且引起的图像块效应最小,能够实现信息集中能力和计算复杂性的良好折衷,因此它在压缩编码中得到广泛的应用。本章所讨论的 DCT 域水印技术即讨论二维离散余弦变换域下数字水印嵌入技术。与空域图像水印相比,离散余弦变换 (DCT) 域图像水印对压缩、滤波和其他一些数字处理算子具有更强的鲁棒性,同时又与常用的图像压缩标准 JPEG 兼容,因而得到了广泛的重视,基于 DCT

的数字水印技术是目前水印技术中研究最多、最深入，而且也是最成熟的。

4.2 几种常见的 DCT 变换域数字图像水印算法

典型的 DCT 域算法是由 Cox 等^[28]提出的一种基于 DCT 变换的扩频水印技术。它将满足正态分布的伪随机序列加入到图像的 DCT 变换后视觉最重要系数中，它利用了序列扩频技术 (SS) 和人类视觉特性 (HVS)。算法原理为先选定视觉重要系数，再进行修改，最常用的嵌入规则为：

$$x'_i = x_i + \alpha w_i \quad (\text{加法准则}) \quad (4-5)$$

$$x'_i = x_i(1 + \alpha w_i) \quad (\text{乘法准则}) \quad (4-6)$$

算法由于受到不可见性的制约，强度不可能太大。这种算法的性能较好，但水印的检测需要原图像。

Podilchuk^[29]提出了可感知水印的方法。算法使用从视觉模型导出的 JND(Just Noticeable Difference) 来确定在图像的各个部分所能容忍的水印信号的最大强度，从而能避免水印信号对视觉质量的破坏。对于 DCT 系数，文献使用 Waton 定义的感知模型。该模型利用频率的亮度敏感度和局部对比掩蔽，对每个 8×8 的 DCT 块提供了与图像相关的掩蔽阈值。根据原始图像与待测图像间的偏差和水印序列的相关性，就可进行水印检测。

Tao 等^[30]在给定噪声敏感指数的局部感知分类器基础上提出了一种自适应 DCT 水印技术。他将载体图像进行分块，并利用 HVS 的亮度掩蔽、边缘掩蔽和纹理掩蔽效应将每个块归到 6 个感知类中，水印嵌入到交流 DCT 系数中，嵌入强度根据所属类的不同而自适应地改变。Barni 等^[31]提出另一种利用 HVS 掩蔽特性基于 DCT 的水印算法，他将整幅图像进行 DCT 变换，并对 DCT 系数按 Zig-Zag 扫描重新排列为二维向量，对向量中第 L 个系数后面的系数进行修改以嵌入水印。水印检测可以通过比较水印和可能变化的 DCT 系数间的相关性和一个阈值而进行。

同时一些研究人员也将新的理论和方法引入到 DCT 域数字图像水印中来，如基于分形图像编码的数字水印技术^[32]、基于神经网络的图像水印技术^[33, 34]等，都取得了很好的效果。

4.3 典型算法实现

本文实现了一种 DCT 域数字水印嵌入算法，该算法是在 Cox 算法的基础上进行了改进后实现的。本算法将含有特定信息的数字图像作为水印信息嵌入到载体图像中，在嵌入过程中利用人类视觉特性（HVS）选定需要修改的系数，之后修改这类系数，以达到嵌入水印的目的。本算法采用的嵌入准则是加法准则。在水印生成过程中，采用 Arnold 变换对待嵌入的水印图像进行置乱。

4.3.1 水印嵌入算法

该算法的实现框图如图 4-1 所示：

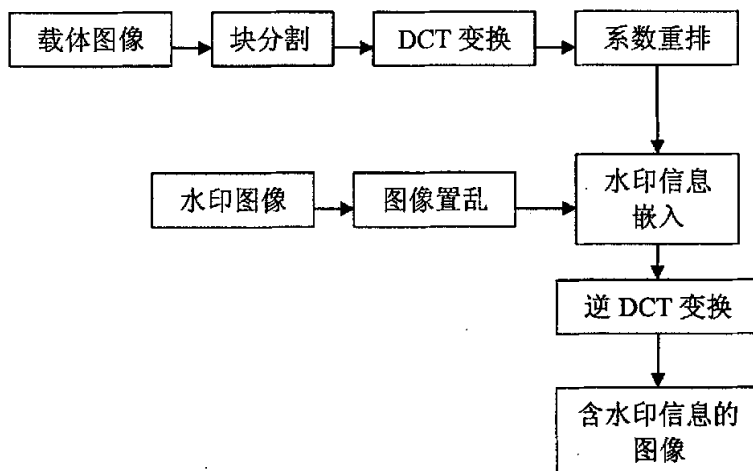


图 4-1 典型 DCT 域数字水印算法框图

Figure 4-1 The frame of the classic algorithm in the DCT-domain

1、图像分块 DCT:

为使得该算法对一般的压缩类攻击有一定的抵抗能力，首先将载体图像进行分块，原始图像被分割为互不覆盖的 K 个图像块。 $f_k(x', y')$, $0 \leq x', y' < 8$, 其中 $k = 0, 1, \dots, K-1$, 然后对 $f_k(x', y')$ 进行 DCT 变换，得到 $F_k(u', v')$ 。

2、系数重排

系数重排的目的在于寻找中频系数。为了保证嵌入到图像 DCT 变换后的鲁棒性

和不可见性，应将水印信息加入到图像 DCT 变换后的中低频系数中。这是因为低频系数集中了载体的大部分能量，对载体图像较为重要，改变图像的低频系数很容易引起图像失真。但是加入到高频部分的水印信息只要经过高频率波就可以在不损坏图像质量的情况下将其滤去。

对 8X8 的 DCT 系数按之字型从左上角往右下角排列，则其排列顺序如图 4-2 所示。考虑到经过 DCT 变换后的系数，左上角的系数为图像的低频系数，改变该值容易引起图像质量的下降，而右下角的系数为图像的高频系数，该系数的值较小，不易嵌入过强的水印，同时，在压缩处理中，图像的高频系数容易被舍去。因此在嵌入位置的选择上，选择改变 DCT 系数的中低频系数值，以实现水印的嵌入。图像的中低频系数选择从 DCT 系数的之字型排列的第 6 位开始，其长度根据载体图像的大小以及嵌入水印信息的长度而定。

1	2	6	7	15	16	28	29
3	5	8	14	17	27	30	43
4	9	13	18	26	31	42	44
10	12	19	25	32	41	45	54
11	20	24	33	40	46	53	55
21	23	34	39	47	52	56	61
22	35	38	48	51	57	60	62
36	37	49	50	58	59	63	64

图 4-2 DCT 系数的之字型排列图

Figure 4-2 The figure of the DCT coefficient arranged by the zigzag

3、水印信息嵌入

水印 W 为水印图像经过置乱处理，并经过排序后生成的一个长度为 L 的序列，即 $W = \{x_i, 0 \leq i \leq L-1\}$ ， $L = lK$ ，其中 l 为每块图像嵌入的水印子序列的长度。

水印分量采用如下办法嵌入到图像块的 DCT 系数中：

$$F_k'(u', v') = \begin{cases} F_k(u', v') + \alpha x_i, & l \cdot k \leq i < l \cdot (k+1), (u', v') \in S_k \\ F_k(u', v'), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-7)$$

其中 S_k 具有 l 个元素，选自 $F_k(u', v')$ 的中频分量。 α 为嵌入强度，其值根据输出图像的质量而定。

4、逆 DCT 变换

最后，对 DCT 域中调整后的图像块进行 DCT 反变换，得到包含水印的图像为：

$$\tilde{f}(x,y) = \bigcup_{k=0}^{K-1} IDCT\{F'_k(u',v')\} \quad (4-8)$$

4.3.2 水印信息的提取

本算法的提取过程为非盲水印提取，即在提取过程中需要原始载体图像和原始水印信息的参与。其具体过程同嵌入过程相类似，提取出的水印通过下式得出：

$$x'_i = \left(\tilde{F}_k(u',v') - F_k(u',v') \right) / \alpha, \quad 1 \cdot k \leq i < 1 \cdot (k+1), \quad (u',v') \in S_k \quad (4-9)$$

之后将提取出的序列 W' ($W' = \{x'_i, 0 \leq i \leq L-1\}$) 进行逆向排序，再经过一次置乱处理后，得到提取出的水印信息。

4.3.3 实验结果

该算法所采用的载体图像为图 3-1 所示的 Lena 图像，所采用的水印图像为图 3-2 所示的两个二值图像。

经过上述算法计算后，得到的含水印信息的图像如图 4-3 所示



a) 含水印一的输出图像 (SNR=30.021)

a) The image with the first watermark (SNR=30.021)



b) 含水印信息二的图像 (SNR=33.651)

b) The image with the second watermark (SNR=30.021)

图 4-3 含水印信息的图像 (嵌入强度 $\alpha = 20$)

Figure 4-3 The image with watermarks

图 4-4 为在不同嵌入强度下载体图像嵌入水印一后的输出图像信噪比, 以及相应嵌入强度下提取出的水印图像的信噪比, (其中嵌入强度 α : 5—40)

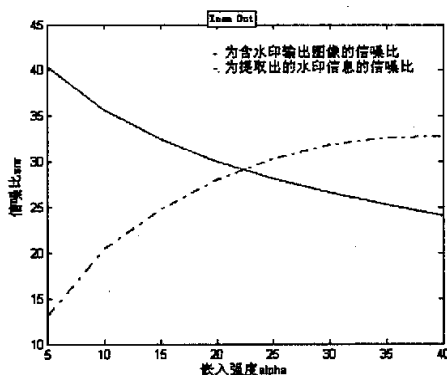


图 4-4 输出图像信噪比及提取的水印图像信噪比 (水印一)

Figure 4-4 The SNR of the image with the first watermark and the watermark extracted

图 4-5 为在不同嵌入强度下载体图像嵌入水印二后的输出图像信噪比, 以及相应嵌入强度下提取出的水印图像的信噪比, (其中嵌入强度 α : 5—40)

结论:

该算法基于离散余弦变换, 并且在嵌入过程中考虑到人眼的视觉特性, 含水印的输出图像质量较高。但该算法的缺点是不能根据图像的纹理特征自适应地改变水印嵌入的强度, 整幅图像的嵌入强度一致。同时, 在嵌入强度较大的情况下, 虽然提取出的水印图像的质量比较高, 但含水印的输出图像的质量比较差, 因此

该算法不宜嵌入较大强度的水印信息。

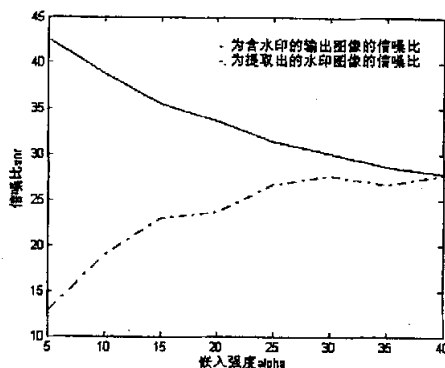


图 4-5 输出图像信噪比及提取的水印图像信噪比（水印二）

Figure 4-5 The SNR of the image with the second watermark and the watermark extracted

4.4 改进 DCT 域数字图像水印算法

本文提出了一种 DCT 域改进算法，该算法利用神经网络的自组织、自学习的能力，对载体图像进行分类。根据不同的类，嵌入不同强度的水印信息，达到自适应的嵌入。

4.4.1 神经网络的基本原理

人工神经网络，简称 ANN (Artificial Neural Network)，或简称神经网络，是采用大量简单的处理单元广泛连接起来构成的一种复杂的信息处理网络。其中的处理单元及其相互连接模式是借鉴人脑神经元的结构以及连接机制设计的。这种网络具有与人脑相类似的学习记忆能力、知识概括能力和对输入信息的特征提取能力，是人脑的一种抽象、简化模型。

传统计算机中，计算和存储是完全独立的两个部分，即计算机在计算之前要从存储器中取出待处理数据，处理后再将结果存入存储器。这样，存储器与计算机之间的通道就构成了计算机高速运算的瓶颈。相比之下，在神经网络中，信息的存储与处理是合二为一的，即信息的存储体现在神经元连接的权值分布之中，并以大规模并行方式进行信息处理。这就体现出了神经网络较之传统计算方法的优越性。

最早的神网络模型应该是由 McCulloch and Pitts (1943 年) 在分析神经元的特点基础上提出的神经元的数学模型——“MP 模型”，神经元的活动满足“全或无 (all-or-none)”的方式，神经元之间的联系只有兴奋性和抑制性突触联系两种；神经元的物理组织不会随时间的改变而改变。自 MP 模型发展至今，人工神经网络已经出现了数十种模型，如感知器、自适应元件、Hopfield 网络、自组织特征映射 (Self-Organizing Map)、BP 网络 (Back-Propagation Network)，以及概率神经网络 (Probabilistic neural networks, PNN) 等等。

4.4.2 神经元之间的联接模式

神经元是构成神经网络的基本计算单元，是一种有多个输入和一个输出的非线性单元，可以有反馈输入和阈值参数。图 4-6 给出了第 j 个神经元的一种基本结构示意图。神经元输出 y 和 N 个输入信号 x_1, x_2, \dots, x_N 的关系可以表示为：

$$y_j' = \sum_i w_i x_i + s_j \quad (4-10)$$

$$y = f(y_j') \quad (4-11)$$

其中 w_i 为连接权值， s_j 为反馈信号。 $f(\cdot)$ 为传递函数，其可以根据输入输出信号的特性进行选择。

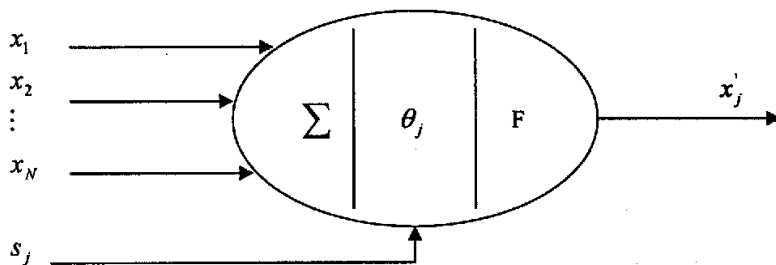
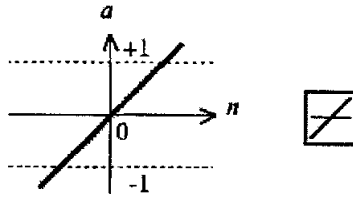


图 4-6 神经元结构图

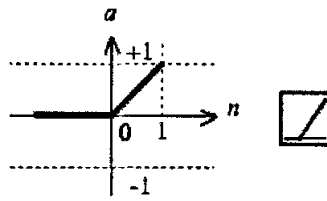
Figure 4-6 The structure of the neural unit

常用的传递函数有线性传递函数、正线性传递函数、硬限幅传递函数、对称的硬限幅传递函数、Log-Sigmoid 传递函数、Tan-Sigmoid 传递函数、径向基函数传递函数等等，图 4-7 a) -j) 分别给出了各个函数的波形图和示意图。



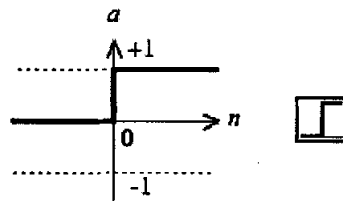
a) 线性传递函数

a) Linear Transfer Function



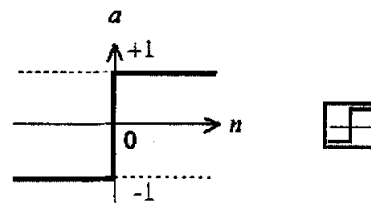
b) 正线性传递函数

b) Positive Linear Transfer Function



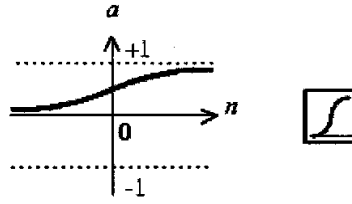
c) 硬限幅传递函数

d) Hard-Limit Transfer Function



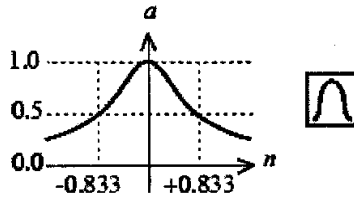
d) 对称硬限幅传递函数

d) Symmetric Hard-Limit Transfer Function



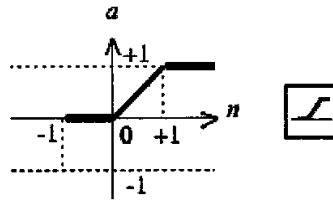
e) Sigmoid 传递函数

e) Log-Sigmoid Transfer Function



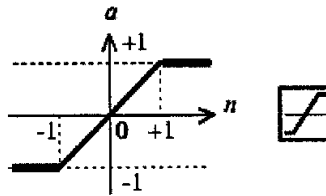
f) 辐射基函数

f) Radial Basis Function



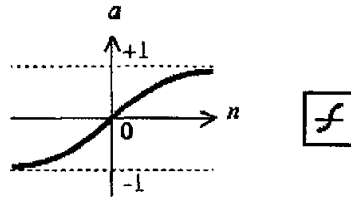
g) Satlin 传递函数

g) Satlin Transfer Function



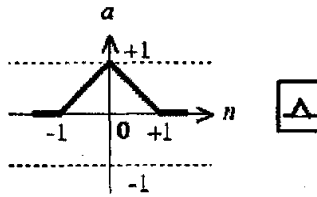
h) Satlins 传递函数

h) Satlins Transfer Function



i) Tan-Sigmoid 传递函数

i) Tan-Sigmoid Transfer Function



j) 三角基函数

j) Triangular Basis Transfer Function

图 4-7 各个传递函数的波形图和示意图

Figure 4-7 Transfer Function Graphs

连接模式是指神经元之间的联接关系，主要有单层、多层和循环连接模式。前两种连接模式构成的都是前馈型网络。第三种是包含反馈的联接模式。前馈型网络的输出只由当前输入、网络参数和结构，而循环网络的输出由当前输入和前期输出两者以及网络参数和结构决定，因此有短期记忆的性质。

4.4.3 神经网络的训练

应用神经网络对输入矢量进行模式识别前要对其进行训练，又叫做学习。训练过程就是应用一系列输入矢量，通过某种算法逐步调整权值和阈值的过程。通过训练或是学习，神经网络能够对一组输入矢量产生希望的输出。训练后的网络即可以用来识别未知样本。

训练算法可以分为有监督训练和无监督训练两种。有监督训练算法要求训练矢量集中的每一个矢量对应一个目标矢量，即期望输出矢量，它是利用先验知识进行训练的。无监督训练不要求知道训练矢量对应期望输出矢量，而是一种自动聚类的过程。

神经网络训练算法有很多种，其中大部分是从 Hebb 训练规则演变而来的。Hebb 提出用一个无监督的学习算法逐步调整权值，其基本规则是：当引入一个训练矢量到一对连接神经元的输入端使之处于兴奋状态时，其连接弧的权值应该加强，用公式表示就是：

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \eta x_i x_j \quad (4-12)$$

其中 $w_{ij}(n)$ 为调整前从神经元 x_i 到 x_j 的联接弧的权值； $w_{ij}(n+1)$ 是调整后连接弧的权值； η 是学习速率常数； x_i 为第 i 个神经元的输出值，同时又是第 j 个神经元的输入值之一； x_j 为第 j 个神经元的输出值。采用 Hebb 规则及其变形可以构成许多训练算法，如常用的感知器，BP 算法等等。

4.4.4 自组织特征映射神经网络

依据大脑对信号处理的特点，T.Kohonen 于 1981 年提出了一种神经网络模型——自组织特征映射模型 (Self Organizing Feature Map, SOM)。自组织特征映射模型是典型的自组织系统，因而也称为自组织模型 (Self Organizing Map, SOM)。

Kohonen 认为人的大脑有如下特点：第一，大脑的神经元虽然在结构上相同，但是它们的排序不同。第二，根据生物学和神经生理学，大脑皮层分成多种不同的局部区域，各个区域分别管理某种专门的功能，比如听觉、视觉、思维等。第三，大脑中神经元的排序受遗传决定，但会在外界信息的刺激下，不断接受传感信号，不断执行聚类过程，形成经验信息，对大脑皮层的功能自组织作用，形成新功能。模拟人脑的这个过程，神经网络是通过权值调整来完成的。

相邻近的神经元之间的局部交互方式是侧向交互，遵从的规则为：以发出信号的神经元为圆心，对近邻的神经元的交互作用表现为兴奋性侧反馈，对远邻的神经元的交互作用表现为抑制性侧反馈。由于这种交互作用的曲线类似于墨西哥草帽，所以也称这种交互方式为“墨西哥草帽”。神经网络中，邻近的各个神经元之间通过相互的侧向交互作用，从而产生相互竞争的过程，自适应地形成了针对特殊信息的组织结构

SOM 模型可以用二维阵列来表示，如图 4-8 所示

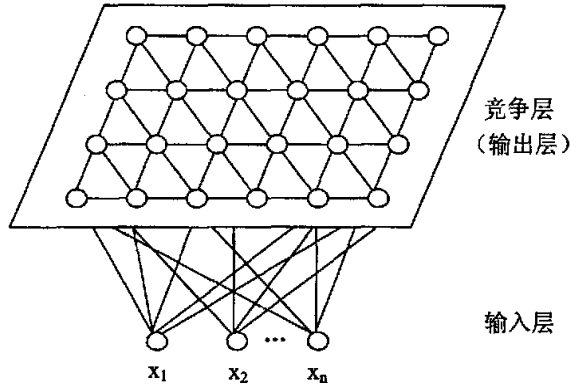


图 4-8 SOM 的二维阵列模型

Figure 4-8 SOM two-dimensional model

二维阵列神经网络由输入层和竞争层组成。输入层是一维的神经元。竞争层是二维的神经元。输入层的神经元和竞争层的神经元每个都相互连接。二维阵列竞争层也称输出层。在二维阵列竞争层中，可以清楚地看出，每个输出神经元都和最近相邻的八个神经元相连，最边沿的神经元和三至五个神经元相连。对于神经元 j ，它的外部输入信号可以用 I_j 表示

$$I_j = \sum_i W_{ij} X_i \quad (4-13)$$

其中 X_i 是外部输入信号， W_{ij} 是输入神经元 i 到输出神经元 j 之间的权系数。对神经元 j 来说，它的输出 Y_j 的活动可以用如下微分方程表示：

$$\frac{dY_j}{dt} = I_j + \sum_{k \in S_j} r_k Y_k - g(Y_j) \quad (4-14)$$

其中 S_j 是和神经元 j 相联系的神经元子集； r_k 是系数，与权系数和横向连接结构有关； $g(Y_j)$ 是非线性损失，如神经元饱和、分流和泄露效应等等。

神经元的输出 Y_j 的初始分布可能是随机的，但随着时间的变化，由于输出层神经元有侧向交互的作用， Y_j 的分布就会自组织变化。反映在神经网络中，随外部环境的输入，神经元的权系数将自适应变化，这一过程就是神经网络自学习的过程。神经元自适应过程和外部输入、输出以及权系数都有关系，一般用如下方程表示：

$$\frac{dW_j}{dt} = \alpha Y_j X - \beta Y_j W_j \quad (4-15)$$

其中 W_j 是权系数向量, $W_j = (W_{1j}, W_{2j}, \dots, W_{nj})^T$; X 是输入向量, $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$; α , β 是正的标量常数。

SOM 模型中, 每一个权系数的有序序列 W_j 都可以看作是神经网络的一种内部表示, 它是有序的输入序列 X 的相对应映像。SOM 模型通过调整权系数 W_{ij} 使神经网络收敛于一种表示形态, 在这一表示形态中的一个神经元只对某种输入模式特别匹配或特别敏感。换言之, SOM 的目的就是使神经元的权系数的形态表示可以间接模仿输入的信号模式。

SOM 的学习算法由两部分组成: 最优匹配神经元的选择和网络中权系数的自组织。最优匹配神经元的选择实质上是选择输入模式所对应的中心神经元 C 。权系数的自组织过程则是以墨西哥草帽的形态来使输入模式得以存放。每执行一次学习, 则 SOM 网络就会对外部输入模式执行一次自组织适应过程, 其结果是强化当前模式的映射形态, 弱化以往模式的映射形态。下面分别给出这两部分的实现算法。

1、最优匹配神经元的选择

设有输入模式为 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$, 对于 SOM 网络的输出层神经元 j , 则有权系数向量 $W_j = (W_{1j}, W_{2j}, \dots, W_{nj})^T$, $j = 1, 2, \dots, n$ 。输入模式 X 和权系数 W_j 的匹配程度用两者的内积表示, 即 $X^T W_j$ 表示。内积 $X^T W_j$ 最大时, 则必有二者之间的向量差的范数 $\|X - W_j\|$ 最小, 最小距离可以确定最优匹配神经元 C , 从而有匹配规则:

$$\|X - W_C\| = \sum_{j=1}^p \|X - W_j\| \quad (4-16)$$

其中 W_C 为神经元 C 的权系数向量, 范数可以选用欧几里德距离。 W_C 的表示形态就是输入模式 X 的最优匹配。在求出 W_C 之后, 就可以考虑 N_C 邻域内的神经元的权系数自组织过程。

2、网络权值系数的自组织

设输出是线性的，则输出可以用下式表示：

$$Y_j = \sum_{i=1}^n W_{ij} X_i \quad (4-17)$$

在权系数进行自组织学习时，全系数的调整方程如下：

$$\frac{dW_{ij}}{dt} = \eta(t) \{ Y_j(t) X_i(t) - r [Y_j(t)] W_{ij}(t) \} \quad (4-18)$$

其中 $W_{ij}(t)$ 是输入神经元 i 和输出神经元 j 在时间 t 的权系数， $\eta(t)$ 是随时间 t 变化的递减增益函数， $Y_j(t)$ 是输出神经元 j 的输出， $X_i(t)$ 是输入神经元 i 的输入， r 是常系数。

设 N_C 是以神经元 C 为中心的某一半径范围内全部神经元的集合。在 N_C 区域内，所有神经元的输出为 1，在区域之外，所有神经元的输出为 0。即有：

$$Y_j(t) = \begin{cases} 1 & j \in N_C \\ 0 & j \notin N_C \end{cases} \quad (4-19)$$

如果令常系数 r 为 1，则权系数的调整方程变为：

$$\begin{cases} \frac{dW_{ij}}{dt} = \eta(t) [X_i(t) - W_{ij}(t)] & j \in N_C \\ \frac{dW_{ij}}{dt} = 0 & j \notin N_C \end{cases} \quad (4-20)$$

区域 N_C 的范围宽度是时变的，在开始时可以选择范围宽一些，通常不妨设为边长或边长的一边以上；随着时间的推移， N_C 则向以神经元 C 为中心的小范围单调变小，最后甚至可以终结在 C 处，即 $N_C = \{C\}$ 。

在学习过程中，增益函数 $\eta(t)$ 也称为学习速率。学习速率随时间的增加而递减，最后逐渐趋向于零，因此，保证了学习过程的收敛性。

4.4.5 基于自组织特征映射神经网络的 DCT 域水印嵌入算法

该算法实现框图如图 4-9 所示：

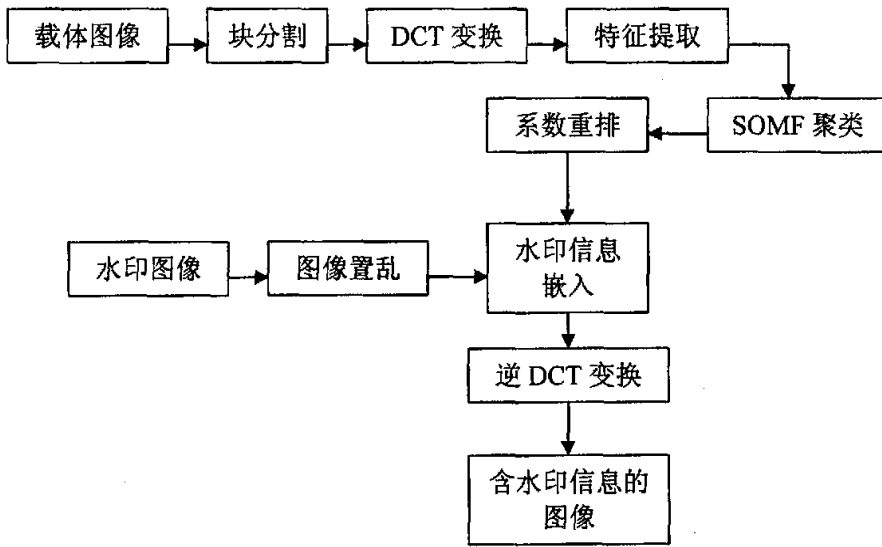


图 4-9 基于自组织特征映射神经网络的 DCT 域数字水印算法框图

Figure 4-9 The frame of the DCT-domain digital watermarking algorithm based on the SOM

通过对比该算法实现框图与典型 DCT 域水印算法实现框图，我们可以看到该算法中在对分块的载体图像进行 DCT 变换后进行了特征提取，提取出每一块的特征信息，并将其作为 SOM 的输入向量。利用 SOM 的自组织、自学习的特性对载体图像块进行聚类。在水印嵌入过程中，根据聚类的结果对不同的类嵌入不同强度的水印信息。这一方面可以依据图像的纹理特征嵌入不同强度的水印，达到自适应嵌入的目的，提高了算法的鲁棒性；另一方面聚类的结果也可以作为密钥来保存，提高了水印算法的保密性。

4.4.5.1 特征提取

在特征提取阶段，本算法根据人类视觉系统（Human Visual System, HVS）模型引入下列四个特征信息，对分块的载体图像进行 DCT 变换，之后分别提取这四个特征信息，并作为该块的特征矢量输入到神经网络中。

1、亮度敏感度（Luminance Sensitivity）：在固定背景下信号的感知能力。嵌入信号的强度可以随着背景亮度的增大而增大。亮度敏感度的计算公式如下：

$$L_k = \frac{X_{DC,k}}{X_{DC}} \quad (4-21)$$

其中 $X_{DC,k}$ 为第 k 块载体图像经过 DCT 变换后的直流系数, \bar{X}_{DC} 为所有块经过 DCT 变换后的直流系数的平均值。

2、频率敏感度 (Frequency Sensitivity): 人眼对于不同频率的正弦波的感知能力。一般来说, 人眼对于频率越低的信号其感知能力越高。我们利用 JPEG 量化表作为图像的频率敏感度, JPEG 量化表如图 4-10 所示:

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	10	10	77
24	35	55	64	81	10	11	92
49	64	78	87	10	12	12	101
72	92	95	98	11	10	10	99

图 4-10 JPEG 量化表

Figure 4-10 The JPEG quantification table

3、纹理敏感度 (Texture Sensitivity): 嵌入信号的强度可以随着图像纹理复杂程度的提高而增大。在计算纹理敏感度时, 利用 JPEG 量化表对分块图像的 DCT 系数进行量化, 量化的结果取距离该值最近的整数。然后计算块中非零系数, 并将其作为该块的纹理敏感度。计算公式如下所示:

$$T_k = Acc \left\{ Round \left[\frac{X_k(x,y)}{Q(x,y)} \right] \right\} \quad (4-22)$$

其中 Acc 为一累加器, 用来计算块中非零系数的个数。 $Round[R]$ 为取距离 R 最近的整数。 Q 为 JPEG 量化表。 $X_k(x,y)$ 为第 k 块图像的 DCT 系数。

4、信息熵敏感度 (Entropy Sensitivity): 熵的定义为平均信息量, 图像的熵是衡量图像信息丰富的一个重要指标。在 HVS 模型中, 熵的计算公式如下所示:

$$E_k = \sum p_k(x,y) \cdot \log \frac{1}{p_k(x,y)} \quad (4-23)$$

$$\text{其中 } p_k(x, y) = \frac{X_k(x, y)}{\sum X_k(x, y)}。$$

这四个特征组成特征矢量 $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ ，其中 x_1, x_2, x_3, x_4 分别代表亮度敏感度、频率敏感度、纹理敏感度、熵敏感度的值。特征矢量的值越大，表明该块图像所能嵌入水印的强度就越大。将该矢量作为神经网络的输入矢量输入到 SOM 中，通过 SOM 的自组织、自适应的学习对图像块进行分类，并对每一类嵌入不同强度的水印信息。本算法对图像块分为三类进行实验。

4.4.5.2 实验结果

首先将载体图像 Lena (512×512) 进行分块，分成 (8×8) 的块。之后对每一块图像进行离散余弦变换，并求出每一块图像的特征向量（包括亮度敏感度、纹理敏感度、熵敏感度）。将此特征向量作为 SOM 神经网络的输入向量输入到网络中进行训练，根据训练完后的神经网络权值的分布情况确定类中心点的位置，并确定每一块图像所属的类别。

图 4-11 所示为在分为三类情况下，经过神经网络训练后，SOM 权值矩阵的二维视图。

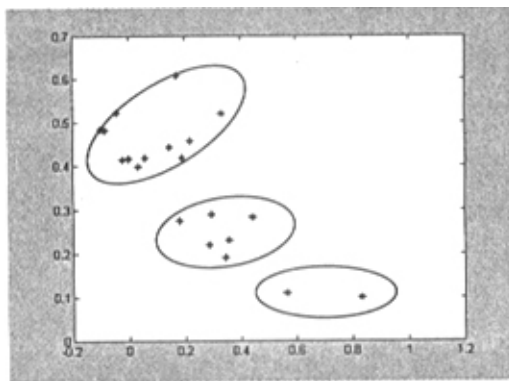


图 4-11 经过训练后神经元的二维分布图

Figure 4-11 two-dimensional distribution of the neural unit after trained

其中，“*”表示经过神经网络训练后神经元的二维分布图。

1、对于水印一

分别对不同类嵌入不同强度的水印（选择对第一类的 $\alpha_1 = 10$ ，第二类的

$\alpha_2 = 30$ ，第三类的 $\alpha_2 = 20$)，得到的结果如图 4-12 所示：



a) 含水印的输出图像 (SNR=28.5148) b) 提取出的水印图像 (SNR=25.6752)
a) The image with watermark (SNR=28.5148) b) The extracted watermark (SNR=25.6752)

图 4-12 嵌入水印一后得到的图像以及提取出的水印图像

Figure 4-12 The image with the first watermark and the extracted watermark

若按固定嵌入强度提取水印，则提取出的水印图像的信噪比为如表 4-1 所示：

表 4-1 按固定嵌入强度提取水印图像的信噪比

Table 4-1 The SNR of the watermarks extracted at the fixed strength

嵌入强度	5	10	15	20	25	30	35	40
输出信噪比	-9.136	-0.5845	4.836	6.811	6.41	5.522	4.734	4.108

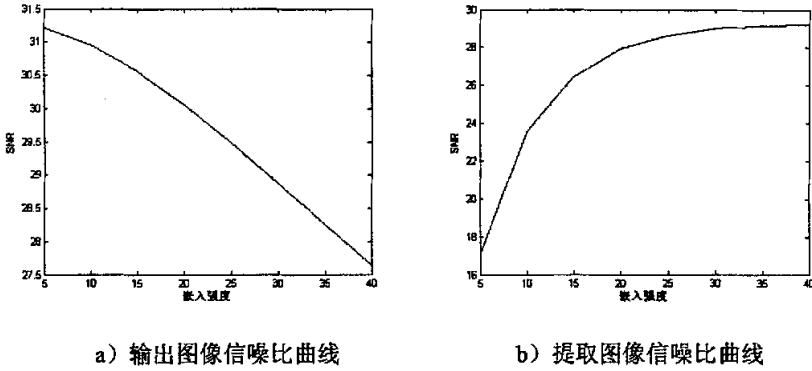
可以看出，如果按固定嵌入强度提取水印，则提取效果并不理想。因此，图像分类的情况就可以作为密钥，这样可以提高算法的安全性。

固定其中两类嵌入强度（嵌入强度取 $\alpha = 20$ ），观察第三类嵌入强度与输出图像质量及提取图像质量的关系。结果如图 4-13、4-14、4-15 所示：

结论：

综合三类嵌入强度与输出图像质量及提取图像质量关系曲线，我们可以看出随着嵌入强度的增大，输出图像的质量下降很快，而提取图像的质量则提高的并不明显，这就意味着不能一味地增大嵌入强度。单独观察每一类嵌入强度，同时在输出图像质量及提取图像质量间取折衷，我们得出如下结论：第一类嵌入强度应当适当增加，我们取 $\alpha_1 = 30$ ，此时输出图像质量 $SNR_1 = 28.8785$ ，提取图像质量 $SNR_2 = 28.9829$ 。第二类嵌入强度应当适当减小，我们取 $\alpha_2 = 10$ ，此时输出图像质量 $SNR_1 = 31.0873$ ，提取图像质量 $SNR_2 = 24.7984$ 。第三类嵌入强度取

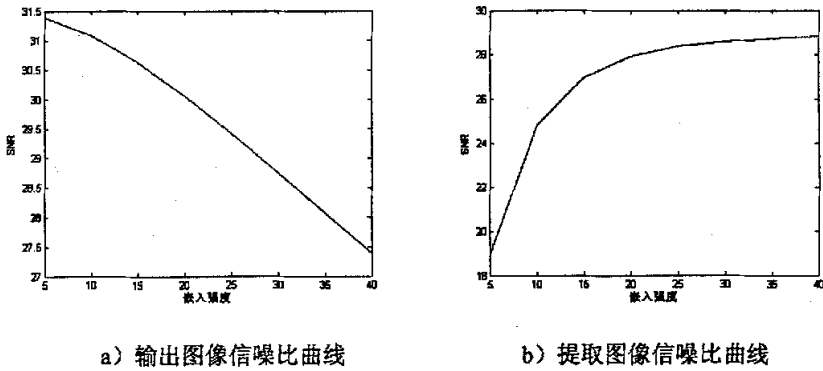
$\alpha_3 = 20$ ，此时输出图像质量 $SNR_1 = 30.0551$ ，提取图像质量 $SNR_2 = 27.9213$ 。



a) The SNR of the output image b) The SNR of the extracted watermark

图 4-13 第一类嵌入强度与输出图像质量及提取图像质量关系曲线

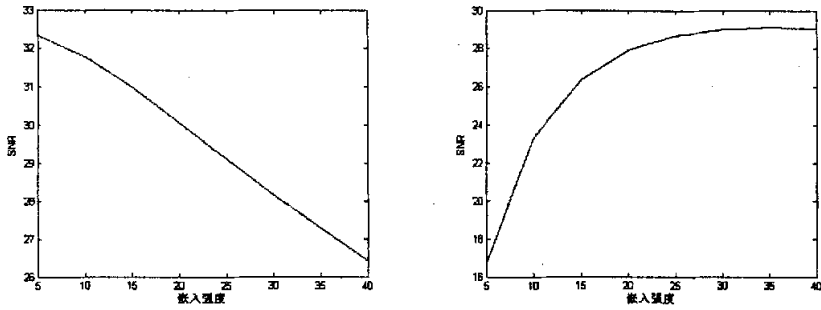
Figure 4-13 The relationship between the SNR of the output image and extracted watermark with the first embedding strength



a) The SNR of the output image b) The SNR of the extracted watermark

图 4-14 第二类嵌入强度与输出图像质量及提取图像质量关系曲线

Figure 4-14 The relationship between the SNR of the output image and extracted watermark with the second embedding strength



a) 输出图像信噪比曲线

b) 提取图像信噪比曲线

a) The SNR of the output image

b) The SNR of the extracted watermark

图 4-15 第三类嵌入强度与输出图像质量及提取图像质量关系曲线

Figure 4-15 The relationship between the SNR of the output image and extracted watermark with the third embedding strength

2、对于水印二：

分别对不同类嵌入不同强度的水印（选择对第一类的 $\alpha_1=10$ ，第二类的 $\alpha_2=30$ ，第三类的 $\alpha_2=20$ ），得到的结果如图 4-16 所示：



a) 含水印的输出图像 (SNR=30.229) b) 提取出的水印图像 (SNR=27.6341)

a) The image with watermark (SNR=30.229) b) The extracted watermark (SNR=27.6341)

图 4-16 嵌入水印二后得到的图像以及提取出的水印图像

Figure 4-16 image with the second watermark and the extracted watermark

若按固定嵌入强度提取水印，则提取出的水印图像的信噪比为如表 4-2 所示：可以看出，如果按固定嵌入强度提取水印，则提取效果并不理想。

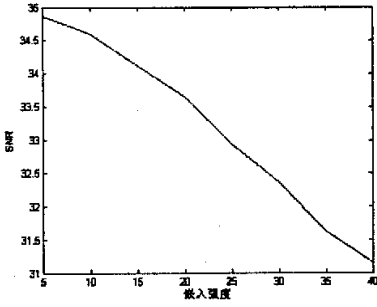
固定其中两类嵌入强度（嵌入强度取 $\alpha=20$ ），观察第三类嵌入强度与输出

图像质量及提取图像质量的关系。结果如图 4-17、4-18、4-19 所示：

表 4-2 按固定嵌入强度提取水印图像的信噪比

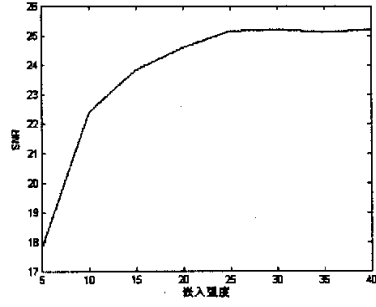
Table 4-2 The SNR of the watermarks extracted at the fixed strength

嵌入强度	5	10	15	20	25	30	35	40
输出信噪比	-10.449	-1.891	4.4026	8.322	8.599	7.4066	6.2454	5.3412



a) 输出图像信噪比曲线

a) The SNR of the output image

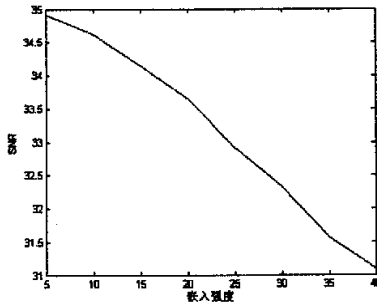


b) 提取图像信噪比曲线

b) The SNR of the extracted watermark

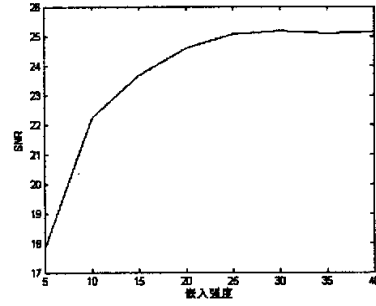
图 4-17 第一类嵌入强度与输出图像质量及提取图像质量关系曲线

Figure 4-17 The relationship between the SNR of the output image and extracted watermark with the first embedding strength



a) 输出图像信噪比曲线

a) The SNR of the output image

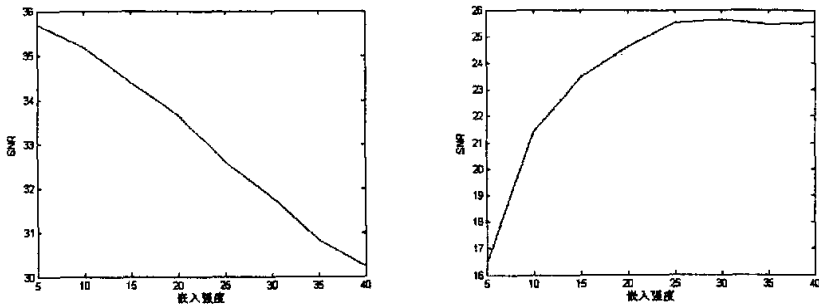


b) 提取图像信噪比曲线

b) The SNR of the extracted watermark

图 4-18 第二类嵌入强度与输出图像质量及提取图像质量关系曲线

Figure 4-18 The relationship between the SNR of the output image and extracted watermark with the second embedding strength



a) 输出图像信噪比曲线

b) 提取图像信噪比曲线

a) The SNR of the output image

b) The SNR of the extracted watermark

图 4-19 第三类嵌入强度与输出图像质量及提取图像质量关系曲线

Figure 4-19 The relationship between the SNR of the output image and extracted watermark with the third embedding strength

结论:

综合三类嵌入强度与输出图像质量及提取图像质量关系曲线, 我们可以看出随着嵌入强度的增大, 输出图像的质量下降很快, 而提取图像的质量则提高的并不明显。并且当嵌入强度过大时, 输出图像质量及提取图像都有小幅度的下降, 这就意味着不能一味地增大嵌入强度。单独观察每一类嵌入强度, 同时在输出图像质量及提取图像质量间取折衷, 我们得出如下结论: 第一类嵌入强度取 $\alpha_1 = 15$, 此时输出图像质量 $SNR_1 = 34.1174$, 提取图像质量 $SNR_2 = 23.8204$ 。第二类嵌入强度取 $\alpha_2 = 20$, 此时输出图像质量 $SNR_1 = 33.6549$, 提取图像质量 $SNR_2 = 24.6014$ 。第三类嵌入强度取 $\alpha_3 = 25$, 此时输出图像质量 $SNR_1 = 32.5892$, 提取图像质量 $SNR_2 = 25.5153$ 。

综合嵌入水印一及嵌入水印二后输出图像质量及提取图像质量关系曲线, 我们可以看出: 随着嵌入的水印信息不同, 嵌入强度也有所变化。

4.5 两种算法鲁棒性的比较

为了比较两种算法的鲁棒性, 本文对两种算法的输出图像进行攻击, 包括脉冲噪声攻击、高斯噪声攻击以及 JPEG 压缩攻击, 观察两种算法在攻击下提取出的水印图像的质量。

- 1、对含水印的图像进行脉冲噪声攻击，提取出的水印图像质量如表 4-3 所示：
 （其中典型算法中嵌入强度 $\alpha = 20$ ，改进算法中设定第一类嵌入强度为 $\alpha_1 = 10$ ，第二类嵌入强度为 $\alpha_2 = 30$ ，第三类嵌入强度为 $\alpha_3 = 20$ ）

表 4-3 加入脉冲噪声后提取出的水印图像质量

Table 4-3 The SNR of the watermark extracted from the image with salt & pepper noise

SNR		脉冲噪声（密度）						
		0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
水印一	典型算法	28.077	20.056	13.7	8.694	5.306	3.025	0.213
	改进算法	25.675	20.361	14.81	10.09	8.257	5.386	2.451
水印二	典型算法	23.684	16.277	10.878	6.533	2.88	-1.52	-3.45
	改进算法	27.634	20.49	13.723	9.3	6.643	3.68	1.432

- 2、对含水印的图像进行高斯噪声攻击，提取出的水印图像质量如表 4-4 所示：
 （其中典型算法中嵌入强度 $\alpha = 20$ ，改进算法中设定第一类嵌入强度为 $\alpha_1 = 10$ ，第二类嵌入强度为 $\alpha_2 = 30$ ，第三类嵌入强度为 $\alpha_3 = 20$ ）

表 4-4 加入高斯噪声后提取出的水印图像质量

Table 4-4 The SNR of the watermark extracted from the image with gauss noise

SNR		高斯噪声（方差）						
		0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
水印一	典型算法	28.077	18.673	11.204	5.446	3.082	1.056	-2.677
	改进算法	25.675	18.910	12.837	9.039	5.611	2.27	1.141
水印二	典型算法	23.684	14.62	8.746	3.92	0.831	-2.721	-3.97
	改进算法	27.634	18.634	11.66	8.71	4.835	1.95	0.992

- 3、对含水印的图像进行 JPEG 压缩攻击，提取出的水印图像质量如表 4-5 所示：
 （其中典型算法中嵌入强度 $\alpha = 20$ ，改进算法中设定第一类嵌入强度为 $\alpha_1 = 10$ ，第二类嵌入强度为 $\alpha_2 = 30$ ，第三类嵌入强度为 $\alpha_3 = 20$ ）

结论：

通过对比表 4-3、表 4-4、表 4-5 中的数据，可以得出如下结论：基于自组织特征映射网络的 DCT 域数字图像水印嵌入算法，可以根据载体图像的细节自适应地调整嵌入强度，实现自适应嵌入。这样不但可以提高输出图像的质量，同时又可以保证提取水印信息的质量。通过对两种算法鲁棒性的比较，可以看出本文所提出的算法其鲁棒性要优于典型算法的鲁棒性。

表 4-5 JPEG 攻击后提取出的水印图像的质量

Table 4-5 The SNR of the watermark extracted after JPEG attacked

SNR		压缩比					
		0%	1%	2%	3%	4%	5%
水印一	典型算法	26.895	26.117	24.765	23.273	21.612	20.018
		6%	7%	8%	9%	10%	11%
		19.059	17.728	16.467	15.235	14.497	13.774
	改进算法	0%	1%	2%	3%	4%	5%
		26.523	25.641	25.156	24.523	22.959	21.212
		6%	7%	8%	9%	10%	11%
20.009	19.393	18.79	17.922	16.787	15.966		
水印二	典型算法	0%	1%	2%	3%	4%	5%
		23.599	23.478	22.97	22.612	21.873	21.198
		6%	7%	8%	9%	10%	11%
	20.681	19.83	18.851	17.689	17.042	16.476	
	改进算法	0%	1%	2%	3%	4%	5%
		26.553	25.685	24.612	23.383	22.708	22.172
6%		7%	8%	9%	10%	11%	
21.201	20.937	19.1	18.349	17.835	17.007		

4.6 本章小结

本章主要介绍了 DCT 变换域数字图像水印算法。

首先,本章介绍了 DCT 变换的一些基础知识,并着重介绍了几种常见的 DCT 域数字图像水印算法。

其次,本章介绍并实现了典型 DCT 域数字图像水印算法,并对嵌入强度与输出图像质量以及与提取的水印图像质量的关系进行了记录。最后,通过实验结果指出了该算法的缺点。

第三,本章提出了一种基于神经网络和 DCT 变换的数字图像水印算法,并对嵌入强度与输出图像质量以及与提取的水印图像质量的关系进行了记录。同时对典型算法与改进算法在输出图像质量方面和提取的水印图像质量方面进行了比较,结果证明本文所提出的改进算法可以嵌入较大强度的水印。

最后,本章对两种算法进行了鲁棒性检测。对两种算法得到的输出图像进行脉冲噪声攻击、高斯噪声攻击、JPEG 压缩攻击,并观察提取出的水印图像的质量。最终得出如下结论:本章所提出的基于神经网络和 DCT 变换的数字图像水

印算法适宜嵌入较大强度的水印信息,并对脉冲噪声攻击、高斯噪声攻击和 JPEG 压缩攻击有一定的抵抗能力,其性能要优于典型算法。

第五章 DWT 变换域数字图像水印技术

自 1986 年以来,小波分析的理论、方法与应用的研究一直方兴未艾。作为一种数学工具,小波变换是对人们熟知的傅立叶变换和窗口傅立叶变换的一个重大突破,为信号分析、图像处理、量子物理及其他非线性科学的研究领域带来革命性的影响,是 20 世纪公认的最辉煌的科学成就之一。由多尺度分析、时频分析、金字塔算法等发展起来的小波分析理论已经成为数据压缩、处理和分析最有用的工具。

离散余弦变换是从图像空间到频率空间的全局变换,而离散小波变换是一种局部的变换。由于离散余弦变换的全局本质,在变换空间中任何一个数据的误差都会影响到图像中的每一个像素,为了限制离散余弦变换的全局影响, JPEG 压缩标准把图像分成了一系列 8×8 的小块。但是,这样一来在进行压缩时就不可避免地出现了“块效应”。此外,离散小波变换的另一个特点是它具有多尺度分析能力。因此,当前最新的图像压缩标准—JPEG2000 和视频的 MPEG7 压缩标准都采用了小波变换。基于压缩标准模型的数字水印算法可以很好地解决与这些标准兼容问题,增强抵抗有损压缩攻击的能力。利用小波变换把原图像分解成多频段的图像,能适应人眼的视觉特性且使得水印的嵌入和检测可以分多个层次进行,小波变换的数字水印算法已经成为当前研究的热点和最重要的研究方向。

5.1 离散小波变换

5.1.1 连续小波变换的定义

线性系统理论中的傅立叶变换是以在两个方向上都无限伸展的正弦波作为正交基函数的,它适用于平稳信号的分析。对非平稳信号分析,简单的纯空域分析或纯频域分析是不适用的,为了同时精确获得信号的空域信息和频域信息,空域分析方法得到了发展,具有代表性的是短时傅立叶变换 (STFT)、Gabor 变换和小波变换。其基本思想是:将空域平面分割为一组“小窗口”,这些“窗口”不重叠地铺满全面,对应于一组正交滤波器,据此可同时获得信号的时频域信息。不重叠地铺满全面,对应于一组正交滤波器,据此可同时获得信号的时频域信息。

窗口面积越小，则在空域和频域上的局部化程度越高。STFT 和 Gabor 变换无论对信号的高频部分还是低频部分，窗函数都是一样的。而小波变换窗具有自适应的空域和频域窗宽，观察高频部分时用窄的时间窗，观察低频部分时用宽的时间窗。

傅立叶分析把一个信号分解成各种不同频率的正弦波，因此正弦波是傅立叶变换的基函数。同样，小波分析把一个信号分解成由基本小波（小波母函数） $\psi(t)$ 经过移位和缩放后的一系列小波，因此小波是小波变换的基函数。在给出小波变换定义之前，需要解释空间 $L^1(\mathbb{R})$ 和 $L^2(\mathbb{R})$ 的含义。 $L^1(\mathbb{R})$ 是指绝对可积函数空间（ L 表示线性空间， \mathbb{R} 表示自变量为实数，但函数值可以为复数），即

$$\text{若 } f(t) \in L^1(\mathbb{R}), \text{ 则 } \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)| dt < +\infty \quad (5-1)$$

$L^2(\mathbb{R})$ 是指能量有限函数空间（也是线性的），即

$$\text{若 } f(t) \in L^2(\mathbb{R}), \text{ 则 } \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt < +\infty \quad (5-2)$$

连续小波变换的定义。对 $\forall \psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$ ，若其傅立叶变换 $\psi(w)$ 满足：

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(w)|^2}{|w|} dw < \infty \quad (5-3)$$

则称 $\psi(t)$ 是一个基本小波，母小波或小波母函数（即小波函数），称

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a \neq 0, b \in \mathbb{R}) \quad (5-4)$$

为由 $\psi(t)$ 生成的依赖于参数 a 和 b 的连续小波。小波 (wavelet) 之所以称之为“小”是指它绝对可积，具有衰减特性。之所以称之为“波”是指它的平均值为 0，具有波动性。因此，连续小波变换对可定义为：

$$W_f(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt \quad (5-5)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{C_\psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{dadb}{a^2} \quad (5-6)$$

式中 $\overline{\psi_{a,b}(t)}$ 表示 $\psi_{a,b}(t)$ 的共轭。

5.1.2 离散小波变换 (DWT) 的定义

针对尺度参数 a 和平移参数 b 可以对连续小波 $\psi_{a,b}(t)$ 和小波变换 $W_f(a,b)$ 离散化。通常, 尺度参数 a 和平移参数 b 的离散化公式分别取 $a = a_0^j$ 和 $b = ka_0^j b_0$, 则离散小波 $\psi_{j,k}(t)$ 可表示为

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi(a_0^{-j}t - kb_0) \quad (5-7)$$

从而离散小波变换对可表示为

$$W_f(j,k) = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi_{j,k}(t)} dt \quad (5-8)$$

$$f(t) = c \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} W_f(j,k) \psi_{j,k}(t) \quad (5-9)$$

式中, $\langle \dots \rangle$ 为内积操作; c 是与信号无关的常数, 对应于式 (4-6) 中的 $C_{\psi}^{-1/2}$ 。

5.1.3 多分辨率分析

Mallat 将计算机视觉领域的多尺度思想引入到小波分析中, 提出了构造小波基的多分辨率分析方法 (multiresolution analysis, MRA)。其思想是将 $L^2(\mathbb{R})$ 中的函数 $f(t)$ 表示为一系列的逐级近似, 而各级近似对应不同的分辨率 (或尺度)。称满足如下条件的 $L^2(\mathbb{R})$ 中的一系列子空间 $\{V_m; m \in \mathbb{Z}\}$ 及一个函数 $\varphi(t)$ 为一个正交 MRA:

① 单调性: $V_m \subset V_{m+1} \quad \forall m \in \mathbb{Z}$, 即 $\dots \subset V_{-2} \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset V_2 \subset \dots$;

② 逼近性: $\bigcap_{m \in \mathbb{Z}} V_m \Leftrightarrow \{\Phi\}$, $\text{close}\left(\bigcup_{m \in \mathbb{Z}} V_m\right) = L^2(\mathbb{R})$;

③ 伸缩性: $f(t) \in V_m \Leftrightarrow f(2t) \in V_{m+1}, \quad \forall m \in \mathbb{Z}$;

④ 平移不变性: $f(t) \in V_m \Leftrightarrow f(t - 2^{-m}k) \in V_m, \quad \forall k \in \mathbb{Z}, \forall m \in \mathbb{Z}$;

⑤ 可构造性: 存在 $\varphi(t)$, 使 $\{\varphi(t-n); n \in \mathbb{Z}\}$ 构成子空间 V_0 的一组 Riesz 基

其中, \mathbb{R} 表示全体实数, \mathbb{Z} 表示全体整数。

由条件③和⑤可知, 基函数系 $\varphi_{m,n}(t) = 2^{\frac{m}{2}} \varphi(2^m t - n), n \in Z$, 构成 V_m 空间的标准正交基。由于 $\{V_m\}_{m \in Z}$ 不是 $L^2(R)$ 的正交分解, 函数系 $\{\varphi_{m,n}(t); m, n \in Z\}$ 不能构成 $L^2(R)$ 标准正交基, 人们称 $\varphi(t)$ 为该多尺度分析的生成元或尺度函数。

在 MRA 中, 设 V_m 在 V_{m+1} 中的正交补空间为 W_m , 即 $W_m \perp V_m$, 且 $V_{m+1} = V_m \oplus W_m$, 同时对于 W_m 隐含有两两正交的性质, 即 $W_m \perp W_n, m \neq n$, 且 $f(t) \in W_0 \Leftrightarrow f(2^m t) \in W_m$ 。有条件①和②的 $L^2(R) = \bigoplus_{m \in Z} W_m$, 其中 W_m 构成 $L^2(R)$ 的正交分解。如果存在函数 $\psi(t)$, 他的整数平移 $\{\psi(t-n); n \in Z\}$ 构成 W_0 的标准正交基, 则函数系 $\{\psi_{m,n}(t); n \in Z\}$ 构成 $L^2(R)$ 的标准正交基。

由于 $\varphi(t) \in V_0 \subseteq V_1$ 且 V_1 有标准正交基 $\{\sqrt{2}\varphi(2t-n); n \in Z\}$, 故必存在唯一的系数序列 $\{h_n; n \in Z\} \in l^2(Z)$, 使得

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_{n \in Z} h_n \varphi(2t - n) \quad (5-10)$$

系数序列的计算公式为:

$$h_n = \langle \varphi(t), \sqrt{2}\varphi(2t-n) \rangle = \sqrt{2} \int_R \varphi(t) \bar{\varphi}(2t-n) dt \quad (5-11)$$

5.1.4 图像的二维正交小波分解

小波变换用于图像分析的基本思想就是把图像进行多分辨率分解, 将图像分解成不同空间、不同频率的子图像。图像经过小波变换后被分割为四个频带: 水平、垂直、对角线和低频, 低频部分还可以继续分解。对一幅图像来说, 小波变换构成了对它的多尺度时频分解。图 5-1 给出了对 Lena 图像的二级小波分解。

左上角 (LL_2) 是最低频段滤波后的低尺度逼近, 同级分辨率下, HL_2 块包含了水平方向高通、垂直方向低通滤波后所保留的细节信息。同样的, LH_2 块保留的是水平方向低通、垂直方向高通滤波后所得的细节信息, HH_2 块包含的是水平和垂直方向都经过高通滤波后的细节信息。相同的处理过程在中分辨率层和高分

分辨率重复进行。

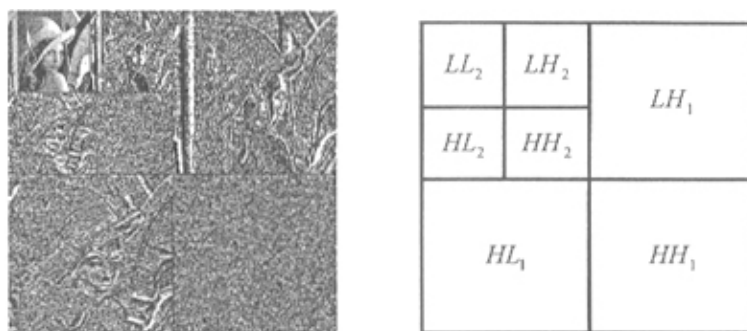


图 5-1 Lena 图像二层小波分解图及分解结构

Figure 5-1 Two-Layer wavelet decomposing of Lena and the decomposing structure

图像经过小波变换后生成的小波图像的数据总量与原图像的数据总量相等，生成的小波图像具有与原图像不同的特性，表现在图像的能量主要集中在低频部分，而水平、垂直和对角线部分的能量则较少；水平、垂直和对角线部分表征了原图像在水平、垂直和对角线部分的边缘信息，具有较明显的方向特性。低频部分可以称作亮度图像，水平、垂直和对角线部分可以称作细节部分。

5.2 DWT 变换域数字图像水印技术

5.2.1 DWT 变换域数字图像水印技术的框架

DWT 变换域图像水印算法可以分为水印嵌入、水印提取（检测）两部分。其过程可以用图 5-2 和图 5-3 来表示，图中虚线部分表示水印检测时不需要原始载体的参与。

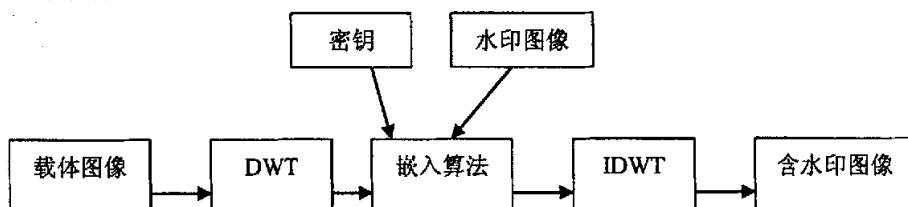


图 5-2 小波域图像水印嵌入算法框图

Figure 5-2 The frame of the DWT-domain watermark embedding algorithm

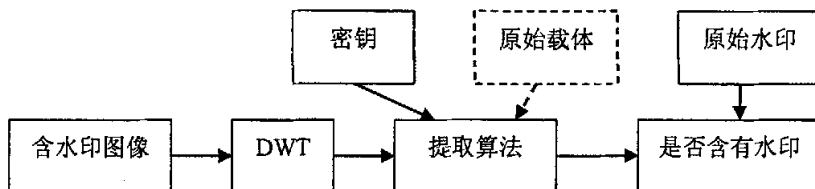


图 5-3 小波域图像水印提取（检测）算法框图

Figure 5-3 The frame of the DWT-domain watermark extracting (detecting) algorithm

从图上可以清楚地看到，小波水印的添加和提取都是在小波域中进行的。在此过程中，小波的类型、小波的选取、水印添加的强度以及水印添加的位置都会影响到水印系统的性能，包括水印的鲁棒性和视觉的不可见性。

5.2.2 几种常见的 DWT 变换域图像水印算法

下面介绍一些 DWT 变换域图像水印算法：

1、基于低频子带方法

最早的研究者将水印嵌入到代表了载体图像的最低分辨率近似分量的系数中。陈青等^[35]将一个二进制随机水印信号嵌入到一组按重要性选出的小波系数中，为了使不可见水印具有更高的鲁棒性，在嵌入过程中将水印信号作为量化噪声嵌入小波零树编码的数字图像中。周亚训等^[36]将离散小波变换和离散余弦变换相结合，将原始图像经适当的离散小波变换分解成一个逼近子图和多个细节子图，对逼近子图再进行离散余弦变换，将水印嵌入到中高频段 DCT 系数中。王卫卫^[37]等利用小波系数自身的特点和各层小波系数之间的树结构关系对最低频逼近系数进行分类，一类对应于强纹理区域，另一类对应于弱纹理区域，对不同类型采取不同的嵌入对策，以保证水印的不可见性。

2、细节分量方法

由于近似图像系数的分布是很均匀的，而细节分量系数的分布服从拉普拉斯分布。大多数的系数接近于 0，只有很少一部分对应于图像边缘和纹理信息的系数具有较大的峰值，含有较显著的能量。这些在空间域的特征在小波域中是由不同尺度具有渐低的分辨率描述的，因而可进行多分辨率分析，以突出显示图像局部或全局的特征。

为在细节分量系数中可靠地嵌入水印，必须选择一些显著系数进行水印嵌入

或者对水印能量进行加权,以便在显著系数中嵌入更多的能量。水印嵌入强度可以自适应于子带能量,分解层和子带的方向。在一些算法中,系数的显著性由系数和门限的比较而确定。

$$T_i^o = \frac{\max\{c_i^o\}}{2} \quad (5-12)$$

该门限值由在第 L 分解层、方向为 O 的子带的系数绝对值的最大值决定。

Tsekeridon^[38]利用小波变换域的多分辨特性,在小波分解的第一层和第二层的细节分量中嵌入一种循环自相似水印。如果图像受到几何失真攻击,使用这种自相似水印在不需要原始图像的前提下,可以大大简化水印的定位步骤。Kundur^[39]通过修改载体图像的同分辨率层中三个不同方向的细节分量系数的幅度关系,而嵌入一种二值水印。对每一组选中的三个系数进行排序,对中间的系数进行量化以嵌入水印。Davoine^[40]将最低分辨率细节分量分割为不同区域,使每个区域含有近似相同数目的显著系数。将每个区域的显著新书分量进行量化,使其代表水印信息中的一个比特。由于不是局限于对三个系数中的一个进行量化,而是根据鲁棒性的要求确定每个区域中显著系数的个数,这种方法具有较强的灵活性。周四清等^[41]结合人类视觉系统和图像的 DWT 多分辨分解,将水印嵌入到图像小波分解的各个中高频带,频带的选择和嵌入的水印由密钥确定,并实现了水印的盲检测。

3、利用同图像编码的关系

JPEG2000 和 EBCOT 的主要设计目标是:通过对图像块的独立处理和编码获得广泛的应用性和灵活性。为了适应 JPEG2000 的编码处理,研究人员提出了对编码块进行独立操作的水印嵌入算法。

较早提出将基于小波图像编码和水印结合的研究者是 Wang^[42]和 Su^[43]。Wang 的算法是基于多门限小波编解码, Su 则利用最优化截断的嵌入块编码算法,该算法也是 JPEG2000 图像压缩标准的基础。上述两种水印算法在选中的细节子带中的显著系数上添加伪随机高斯噪声。水印的嵌入和提取在图像的压缩和解压过程中进行,这样就可以避免为水印的嵌入和提取而进行第二次变换域计算。

5.3 一种 DWT 变换域数字图像水印算法实现

本章实现一种典型的小波域图像水印算法,该算法的实现框图如图 5-4 所示:

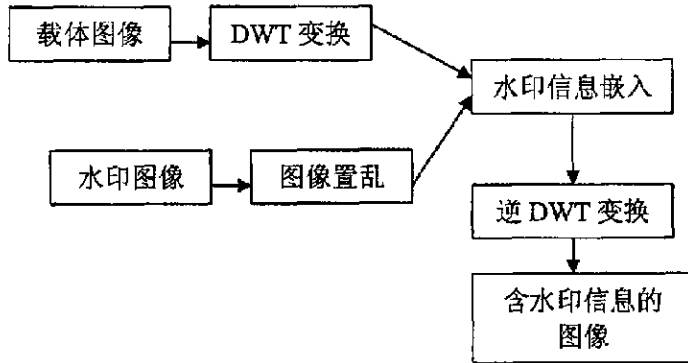


图 5-4 典型小波域图像水印算法

Figure 5-4 The classic algorithm in DWT-domain

1. DWT 变换

为了使嵌入的水印对有损压缩(如 JPEG)具备较强的鲁棒性,在水印的嵌入过程把原始图像经过二维小波变换(DWT)分解为二层多分辨率金字塔结构,如图 5-5 所示:

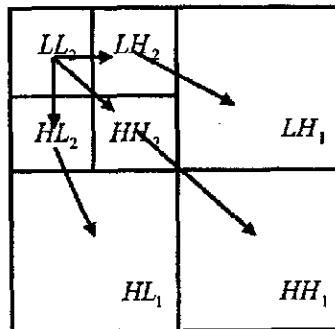


图 5-5 多分辨率金字塔结构

Figure 5-5 The structure of the multidecomposition

其中,多分辨率分解的第二层中,最低频子带 LL_2 包含了原始图像的最低分辨率信息,而 LH_2 、 HL_2 和 HH_2 是 LL_2 的精细图像信息,第二层中 LH_2 、 HL_2 和 HH_2 图像包含了第一层参考图像 (LH_1 、 HL_1 和 HH_1) 的粗糙信息。在以小波方式分

解的图像数据中可以构成若干个如图 5-5 所示的树状结构，在每个树状结构中，粗糙信息层中的小波系数是其下一个精细层次中的四个对应位置的小波系数的父节点，它代表了精细层中的四个对应位置的小波系数的幅度平均值，而该四个对应位置的小波系数称为其父节点的子节点。

2、水印嵌入

在嵌入位置上，考虑到 LL_2 为图像的最低频子带，并且人眼对低频信息的改变比较敏感，同时 HH_1 为图像的最高频子带，其 DWT 系数的值很小，不能嵌入很强的水印。因此，在选择水印嵌入位置时，选择 LH_2 、 HL_2 、 HH_2 、 LH_1 和 HL_1 作为水印嵌入的子带。在这些子带中，对数值较大的系数进行修改以嵌入水印信息。

3、逆 DWT 变换

经过对 DWT 系数进行修改，水印信息嵌入到了载体图像中。对该图像进行逆 DWT 变换，最终得到含水印信息的图像。

4、水印的提取

水印的提取过程为嵌入过程的逆过程。典型算法的提取过程为非盲水印提取，即在提取过程中需要原始载体图像和原始水印图像的参与。

5.4 实验结果

本文所采用的载体图像如图 3-1，水印图像如图 3-2。

在特定嵌入强度下，经过水印嵌入算法后，输出图像如图 5-6 所示：

本文在嵌入强度的研究中采用了大范围的嵌入强度变化，以便对算法的优缺点进行比较，嵌入的强度 α 从 5 到 40 变化。图 5-7 为在不同嵌入强度下原始载体图像经过典型算法嵌入水印一后的输出图像信噪比，以及相应嵌入强度下提取出的水印图像的信噪比，（其中嵌入强度 α ：5—40）。图 5-8 为在不同嵌入强度下原始载体图像经过典型算法嵌入水印二后的输出图像信噪比，以及相应嵌入强度下提取出的水印图像的信噪比，（其中嵌入强度 α ：5—40）



a) 含水印一的输出图像 (SNR=32.78) b) 含水印二的输出图像 (SNR=37.128)
 a) The image with the first watermark b) The image with the second watermark

图 5-6 含水印信息的图像 (嵌入强度 $\alpha = 15$)

Figure 5-6 The image with watermark (the embedding strength: $\alpha = 15$)

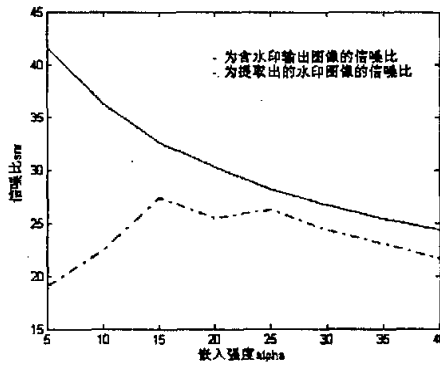


图 5-7 输出图像质量及提取的水印图像质量 (含水印一)

Figure 5-7 The SNR of the output image and the extracted watermark (with the first watermark)

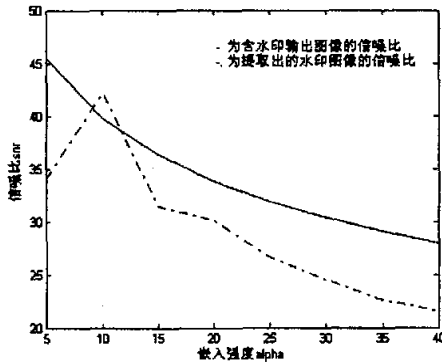


图 5-8 输出图像质量及提取的水印图像质量 (含水印二)

Figure 5-8 The SNR of the output image and the extracted watermark (with second watermark)

总结:

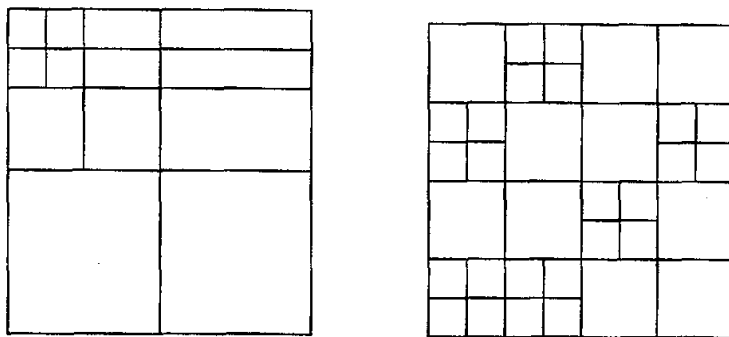
典型算法利用了小波变换的多分辨率特性,同时考虑了视觉系统在相邻小波变换域内的掩蔽特性,取得了不错的效果。但通过图 5-7 和图 5-8 中的曲线可以看出,在较大嵌入强度下,含水印的输出图像的质量和提取的水印图像的质量都不是很理想。因此本文针对典型算法中存在的缺点提出了改进算法。

5.5 改进型 DWT 域图像水印算法

典型算法虽然充分利用了小波变换的多分辨率特性,并且考虑了视觉系统在相邻小波变换域内的掩蔽特性,但很少考虑数字图像经过小波变换后的各个子带图像中相邻小波系数之间存在着很强的相关性问题。本文提出了一种 DWT 与 DCT 相结合的图像水印算法。本算法采用小波变换的多分辨率特性和离散余弦变换的能量压缩能力以及解相关能力,将小波包变换和离散余弦变换相结合,不但提高了算法的安全性,同时提高了算法的鲁棒性。

5.5.1 小波包变换

传统金字塔分解与小波包分解的对比如图 5-9 中 a) 和 b) 所示。这两种分解方法的主要区别在于:金字塔算法每次只对低频子带进行进一步分解,而小波包算法可以对任意的子带进行进一步分解,因此分解结构就可以作为密钥以增强算法的安全性。本文利用混沌序列发生器产生一种随机分解结构,并将此分解结构作为密钥由算法持有者保存,以增加算法的安全性。



a) 传统金字塔分解

b) 小波包分解结构

a) The traditional wavelet structure

b) The structure of wavelet packet decomposition

图 5-9 传统金字塔分解与小波包分解的对比如图

Figure 5-9 The traditional wavelet structure and the structure of wavelet packet decomposition

5.5.2 算法框图

本算法的实现框图如图 5-10 所示：

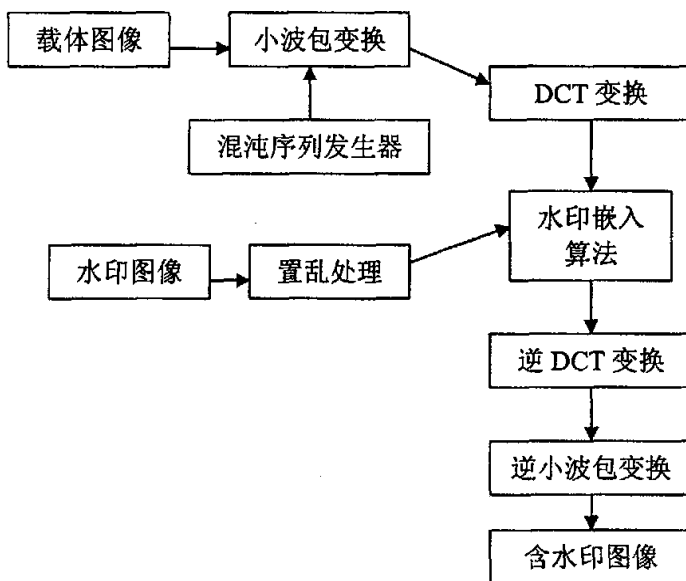


图 5-10 小波包变换与离散余弦变换相结合的数字水印嵌入算法框图

Figure 5-10 The frame of the algorithm based on the wavelet packet transform and the DCT

1、混沌序列发生器

混沌现象是非线性动力系统中出现的确定性的、类似随机的过程。利用其对初值的敏感依赖性，可以提供数量众多、非相关、类似随机而又确定可再生的信号。因此，利用混沌序列作为水印信号，具有易于生成、数量众多以及初始条件敏感的优势，将混沌序列的初始值作为嵌入和检测提取信号的密钥，不仅简单而且实用。

混沌现象是在非线性动力系统中出现的类似随机的过程，这种过程既非周期又不收敛。一个一维离散时间非线性动力系统定义如下：

$$x_{k+1} = \tau(x_k) \quad (5-13)$$

式中： $x_k \in V$ $k = 0, 1, 2, \dots$ 。我们称状态 $\tau: V \rightarrow V$ 是一个映射，它将当前状态 x_k 映射到下一个状态 x_{k+1} 。如果从一个初始值开始，根据式 (4-13) 就可得到一个序列。这个序列 $\{x_k, k = 0, 1, 2, 3, \dots\}$ 称为该离散动力系统的一条轨迹。

定义：如果 $\tau: V \rightarrow V$ 满足三个条件：①具有对初始条件的敏感依赖性；②是拓扑传递的；③周期点在 V 中稠密。则说对应的动力系统在 V 上是混沌的。

一个非常简单却被广泛研究的动力系统是 logistic 映射，定义如下：

$$x_{k+1} = \mu x_k (1 - x_k) \quad (5-14)$$

式中： $0 \leq \mu \leq 4$ ，称为分枝参数。当 $x_k \in (0, 1)$ 且 $3.5699456 < \mu \leq 4$ 时，logistic 映射工作于混沌状态。也就是说，由两个不同初始状态 x_0 ，式 (5-14) 所生成的两个序列是非周期、不收敛、不相关的。

Logistic 序列的上述性质表明，由于混沌动力系统有确定性，其统计特性等同于白噪声，因而被应用于数字通信和多媒体数据安全等领域的噪声调制。该系统具有以下优点：

(1) 只需混沌映射参数和初始条件就可以方便地生成，不必浪费空间来存储整个序列；

(2) 利用初始条件可获得数量极多的混沌序列；

(3) 具有白噪声的统计特性，可以用于需要噪声调制的众多应用场合。

2、小波包变换

由混沌序列发生器产生一个长度为 16 的伪随机序列，并设定一个阈值。根据设定的阈值，对 16 位的伪随机序列进行二值化，将序列转化为二值序列。对原始载体图像进行二级小波包分解，则产生出 16 个子带。根据二值序列的值，每两位确定一个待分解的子带的位置，并对待分解的子带进行二维小波变换，最终形成如图 5-11 所示的小波树结构。

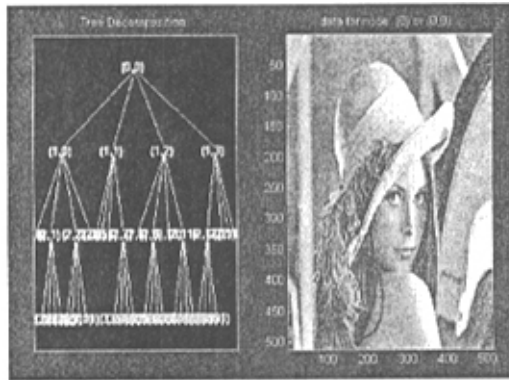


图 5-11 小波包分解后的小波树结构

Figure 5-11 The tree structure of the wavelet packet transform

3、DCT 变换

典型算法中，虽然充分利用了小波变换的多分辨率特性，并且考虑了视觉系统在小波变换域内的掩蔽特性，但很少考虑数字图像经过小波变换后的各个子带图像中相邻小波系数之间存在着很强的相关性。因此，本文将小波包变换和离散余弦变换结合应用到数字水印的嵌入过程中，利用离散余弦变换的去相关能力和能量压缩能力解决由于离散小波变换带来的不足。

载体图像在经过了小波包变换后形成了如图 5-11 所示的小波树分解结构，对各子带进行 DCT 变换，水印嵌入的顺序是从精细子带到粗糙子带（与 DCT 变换采用的之字形顺序相反，如图 5-12 所示，不搜索各子带的直流系数）。

4、嵌入位置

在水印嵌入位置的问题上，采用与第三章所述的嵌入方法相同，即改变 DCT 变换系数的中低频系数，以抵抗压缩攻击。

5、水印提取

水印提取过程是水印嵌入过程的逆过程。本算法的提取过程为非盲水印提取，即在提取过程中需要原始载体图像和原始水印信息的参与。

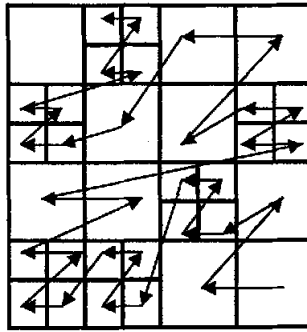


图 5-12 嵌入顺序

Figure 5-12 The order of embedding

5.6 实验结果

本文采用图 3-1 所示的 Lena 图像为载体图像嵌入水印，采用图 3-2 所示的两个二值图像为水印信息嵌入水印。

图 5-13 为在不同嵌入强度下载体图像嵌入水印一后的输出图像信噪比，以及相应嵌入强度下提取出的水印图像的信噪比，（其中嵌入强度 α ：5—40）

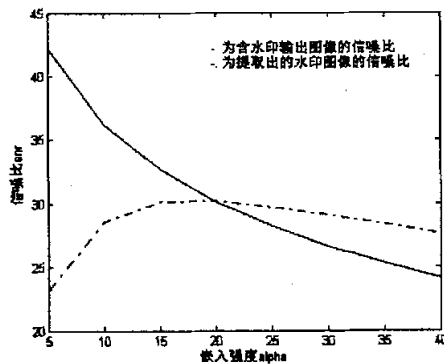


图 5-13 输出图像及提取的水印图像信噪比

Figure 5-13 The SNR of the output image and the extracted watermark (with the first watermark)

图 5-14 为在不同嵌入强度下载体图像嵌入水印二后的输出图像信噪比，以及相应嵌入强度下提取出的水印图像的信噪比，（其中嵌入强度 α ：5—40）

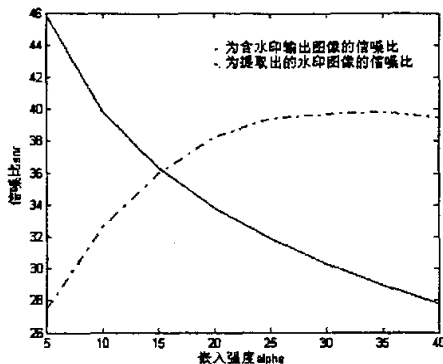


图 5-14 输出图像及提取的水印图像信噪比

Figure 5-14 The SNR of the output image and the extracted watermark (with second watermark)

5.7 两种算法比较

1、含水印输出图像的质量及提取的水印图像质量的比较

图 5-15 所示为两种算法嵌入水印一后，含水印输出图像的信噪比曲线。其中“-”为典型算法含水印输出图像信噪比曲线，“-.”为本算法含水印输出图像信噪比曲线。

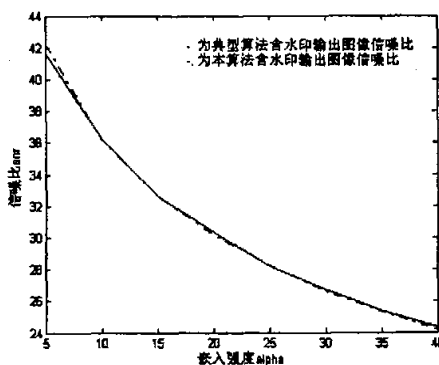


图 5-15 含水印输出图像的信噪比曲线（嵌入水印一）

Figure 5-15 The SNR of the output image by each algorithm (with the first watermark)

图 5-16 所示为两种算法提取出的水印图像的信噪比曲线。其中“-”为典型算法提取出的水印图像的信噪比曲线，“-.”为本算法提取出的水印图像的信噪比曲线。

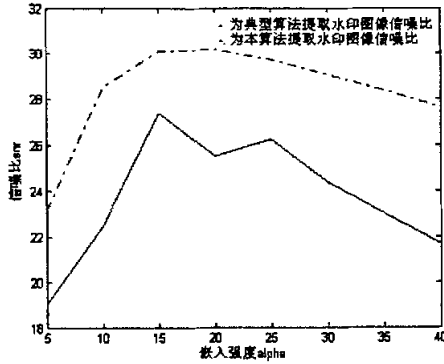


图 5-16 提取的水印图像一的信噪比曲线

Figure 5-16 The SNR of the watermark by each algorithm (with the first watermark)

由图 5-15 及图 5-16 可以看出，在相同嵌入强度下两种算法含水印的输出图像的信噪比大致相同，但本算法提取出的水印图像信噪比要高于典型算法提取出的水印图像信噪比。并且在嵌入强度由弱到强的变化过程中，本算法提取出的水印图像信噪比的下降趋势要较典型算法提取出的水印图像信噪比的下降趋势缓慢，即嵌入强度对本算法的影响要小。这一优点说明在保证提取水印图像质量的前提下，本算法可以嵌入较大强度的水印图像。

图 5-17 所示为两种算法嵌入水印二后，含水印输出图像的信噪比曲线，其中“-”为典型算法含水印输出图像信噪比曲线，“-.”为本算法含水印输出图像信噪比曲线。

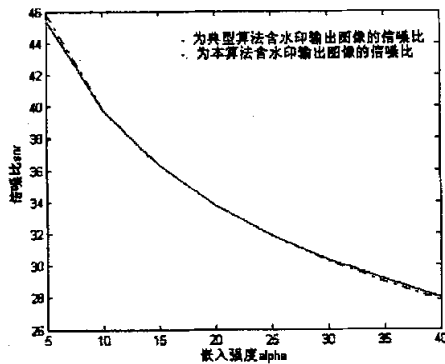


图 5-17 含水印输出图像的信噪比曲线（嵌入水印二）

Figure 5-17 The SNR of the output image by each algorithm (with the second watermark)

图 5-18 所示为两种算法提取出的水印图像的信噪比曲线。其中“-”为典型算法提取出的水印图像的信噪比曲线，“-.”为本算法提取出的水印图像的信噪比

曲线。

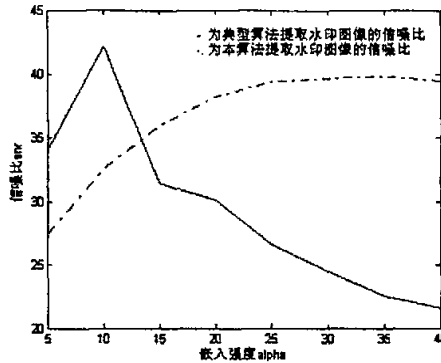


图 5-18 提取的水印图像二的信噪比曲线

Figure 5-18 The SNR of the watermark by each algorithm (with the second watermark)

由图 5-17 及图 5-18 可以看出在相同嵌入强度下两种算法含水印输出图像的信噪比大致相同，但提取出的水印图像的信噪比的变化趋势却有很大不同。两种算法提取出的水印图像信噪比的变化趋势虽然都呈先升后降，但典型算法信噪比的下降趋势很快，而本算法信噪比的下降趋势很缓慢，即嵌入强度对本算法的影响不大。这一优点说明在保证提取水印图像质量的前提下，本算法可以嵌入较大强度的水印图像。

2、鲁棒性比较

1) 本文对两种算法进行了加噪攻击，以对比两种算法的鲁棒性。

表 5-1 所示为对两种算法进行脉冲噪声攻击后，所提取出的水印图像的信噪比，其中嵌入强度 $\alpha = 15$ 。

表 5-1 脉冲噪声攻击后提取出水印图像的信噪比

Table 5-1 The SNR of the extracted watermark (with salt & pepper noise)

SNR		脉冲噪声 (密度)						
		0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
水印一	典型算法	27.394	20.803	13.276	10.039	6.601	1.734	-0.356
	改进算法	30.093	24.027	18.367	13.954	10.249	6.468	2.54
水印二	典型算法	31.466	23.907	19.028	14.552	11.371	7.031	3.361
	改进算法	36	31.096	25.985	21.032	18.163	12.994	9.961

表 5-2 所示为对两种算法进行高斯噪声攻击后，所提取出的水印图像的信噪比，其中嵌入强度 $\alpha = 15$ 。

表 5-2 高斯噪声攻击后提取出水印图像的信噪比

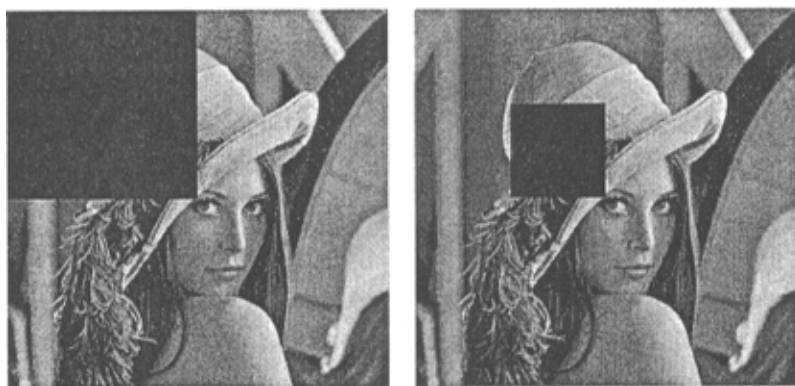
Table 5-2 The SNR of the extracted watermark (with gauss noise)

SNR		高斯噪声 (方差)						
		0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
水印一	典型算法	27.394	16.072	11.768	6.357	2.264	0.195	-1.361
	改进算法	30.093	19.992	14.502	11.309	5.776	1.33	-0.021
水印二	典型算法	31.466	18.778	15.002	9.537	4.881	1.096	-0.521
	改进算法	36	25.559	20.768	15.37	9.92	7.628	4.308

通过表 5-1 和 5-2 可以看出, 本文所采用的算法对脉冲噪声和高斯噪声的抗攻击能力都强于典型算法。并且抗脉冲噪声攻击的能力要好于抗高斯噪声攻击的能力。

2) 本文对两种算法进行了剪切攻击, 以对比两种算法的鲁棒性

对含水印的载体图像进行剪切。本文对含水印的图像进行范围不同的两次剪切, 如图 5-19 所示, a) 为对图像进行四分之一剪切, b) 为对图像进行十六分之一剪切。其中嵌入强度 $\alpha = 15$ 。



a) 四分之一剪切

b) 十六分之一剪切

a) The image cutted quarter part

b) The image cutted one of 16 equal parts

图 5-19 对含水印的图像进行剪切

Figure 5-19 Cutted image with the watermark

相应提取出的水印图像如图 5-20 所示,



a) 改进算法在四分之一剪切后提取的水印一

a) The extracted watermark from the image cutted quarter parts through the improved algorithm



b) 典型算法在四分之一剪切后提取的水印一

b) The extracted watermark from the image cutted quarter parts through the classic algorithm



c) 改进算法在四分之一剪切后提取的水印二

c) The extracted watermark from the image cutted quarter parts through the improved algorithm



d) 典型算法在四分之一后剪切后提取的水印二

d) The extracted watermark from the image cutted quarter parts through the classic algorithm



e) 改进算法在十六分之一剪切后提取的水印一

e) The extracted watermark from the image cutted one of 16 equal parts through the improved algorithm



f) 典型算法在十六分之一剪切后提取的水印一

f) The extracted watermark from the image cutted one of 16 equal parts through the classic algorithm



g) 改进算法在十六分之一剪切后提取的水印二

g) The extracted watermark from the image cutted one of 16 equal parts through the improved algorithm



h) 典型算法在十六分之一剪切后提取的水印二

h) The extracted watermark from the image cutted one of 16 equal parts through the classic algorithm

图 5-20 对图像进行剪切后提取出的水印图像

Figure 5-20 The watermarks extracted from the image cutting some parts

通过 5-20 各图所示, 可以看出在相应剪切度下, 本文算法提取的水印图像的质量

量要优于典型算法提取的水印图像的质量。

3) 本文对两种算法所输出的含水印的图像进行 JPEG 压缩攻击, 以对比两种算法的鲁棒性。其中嵌入强度 $\alpha = 15$, 结果如表 5-3 所示。

表 5-3 两种算法输出图像 JPEG 压缩攻击后提取的水印图像的质量

Table 5-3 The SNR of the extracted watermark from image attacked by the JPEG compression

SNR		压缩比					
水印一	典型算法	0%	1%	2%	3%	4%	5%
		26.307	25.39	22.953	20.675	18.86	17.214
		6%	7%	8%	9%	10%	11%
	15.833	14.584	13.453	12.332	11.439	10.573	
	改进算法	0%	1%	2%	3%	4%	5%
		28.44	26.946	24.888	22.349	20.99	19.019
6%		7%	8%	9%	10%	11%	
17.21	16.187	15.436	14.018	12.9217	11.0453		
水印二	典型算法	0%	1%	2%	3%	4%	5%
		30.507	29.443	26.815	24.515	22.579	20.602
		6%	7%	8%	9%	10%	11%
	19.007	17.316	16.345	15.307	14.105	13.107	
	改进算法	0%	1%	2%	3%	4%	5%
		34.508	32.895	29.506	27.837	25.973	23.916
6%		7%	8%	9%	10%	11%	
21.153	19.539	18.699	17.125	15.9505	13.915		

通过表 5-3 所示的结果, 我们可以看出, 本文所提出的算法在抗 JPEG 压缩方面要优于典型算法。

结论:

本文所提出的基于小波包和 DCT 相结合的数字水印嵌入算法, 不但增强了算法的安全性, 在嵌入过程中也充分考虑了 DWT 变换和 DCT 变换的优缺点, 将二者的优点相结合。通过实验结果可以看出, 嵌入强度对本算法的影响很小, 因此我们可以适当提高嵌入强度, 以提高算法的鲁棒性。同时, 通过实验对两种算进行鲁棒性比较, 结果可以看出, 本文所提出的算法, 在抵抗噪声攻击方面、抗剪切方面以及抗 JPEG 压缩方面都较典型 DWT 算法有所提高。因此, 可以得出结论: 本文所提出的基于小波包和 DCT 相结合的数字水印嵌入算法要优于典型 DWT 数字水印嵌入算法。

5.8 本章小结

本章主要介绍了 DWT 变换域数字图像水印算法。

首先,本章介绍了 DWT 变换的一些基础知识,并介绍了几种常见 DWT 域数字图像水印算法。

其次,本章介绍并实现了典型 DWT 域数字图像水印算法,并对嵌入强度与含水印的输出图像质量以及与提取的水印图像质量的关系进行了记录。通过实验结果指出了该算法的缺点。

第三,本章提出了一种基于小波包变换和 DCT 变换相结合的数字图像水印算法,并对嵌入强度与含水印的输出图像质量以及与提取的水印图像质量的关系进行了记录。

最后,本章对两种算法进行了鲁棒性检测。对两种算法得到的输出图像进行脉冲噪声攻击、高斯噪声攻击、JPEG 压缩攻击,并观察提取出的水印图像的质量。最终得出如下结论:本章所提出的基于小波包变换和 DCT 变换相结合的数字图像水印算法适宜嵌入较大强度的水印信息,并对脉冲噪声攻击、高斯噪声攻击和 JPEG 压缩攻击有一定的抵抗能力,其性能要优于典型算法。

总结

数字水印技术在数字产品的版权保护、真伪鉴别、盗版跟踪、篡改提示、使用控制等方面有非常广泛的用途，已经受到国际学术界和企业界的高度关注。

本文对数字水印技术的理论和方法进行了较为全面的介绍，归纳起来，本文的工作成果主要包括以下几点：

(1) 对空域数字图像水印技术进行了比较详细的介绍，实现了 LSB 算法并对该算法的鲁棒性进行了检测，指出了该算法的优缺点。

(2) 通过实现 DCT 域数字图像水印技术典型算法并对实验结果进行分析，指出典型算法的缺点。根据算法的缺点，将神经网络引入数字图像水印技术中，通过对载体图像进行分块并提取特征值，利用具有自组织、自学习能力的自组织特征映射网络对图像块进行分类，并根据分类的不同嵌入不同强度的水印信息。将此技术应用到 DCT 域数字图像水印算法中，实现水印嵌入强度的自适应调整。通过对两种算法的实验结果进行分析，得出本文所提出的算法可适宜嵌入较大强度的水印信息。通过水印攻击方法，对两种算法的输出结果进行了噪声攻击和 JPEG 压缩攻击，比较攻击后提取的水印信息的质量得出本文所提出算法的鲁棒性更强。

(3) 通过实现 DWT 域数字图像水印技术典型算法并对实验结果进行分析，指出典型算法的缺点。根据算法的缺点，本文引入小波包变换，并将小波包变换与 DCT 变换相结合提出了一种改进型 DCT 域数字图像水印算法。这种算法不但安全性得到了提高，同时将 DCT 与 DWT 相结合，使得由于数字图像经过小波变换后的各个子带图像中相邻小波系数之间存在的相关性得以很好的去除。通过对实验结果的分析以及与典型算法实验结果的对比，可以看出本文所提出的算法适宜嵌入较大强度的水印信息。并且通过水印攻击算法，对两种算法的输出图像进行噪声攻击和 JPEG 压缩攻击，比较攻击后提取的水印信息的质量得出本文提出算法的鲁棒性更强。

下一步研究的工作：

(1) 引入新的神经网络模型。引入有监督学习算法的神经网络模型对图像

进行分类。比较有监督学习算法的神经网络模型与无监督学习算法的神经网络模型对含水印的输出图像质量及提取图像的质量的影响。从而选择更好的分类器。

(2) 对本文所提出的算法进一步进行改进。例如在改进型 DCT 域数字水印嵌入算法中, 可以尝试在不同的图像块中嵌入不同长度的水印信息, 提高嵌入的自适应性等等。

数字水印技术是一个新兴的研究领域, 如今还有许多未触及的研究课题, 现有技术也需要改进和提高。通过对现有技术的分析, 数字水印技术今后可能的研究方向为:

(1) 进一步对算法进行深入的分析和研究。通过对现有的数字水印算法的鲁棒性、安全性、抗攻击性等特性的研究, 并结合数字信号处理技术, 找出它们之间的关系, 从而发现更好的数字水印技术。可以采用分类效果更好的神经网络分类器, 来提高分类的质量, 并将神经网络与各种变换相结合, 寻求最优的组合。

(2) 开展公钥数字水印系统研究。即使用一个专有的密钥来叠加水印信号, 而任何人均可通过一个公开的密钥来检测出水印信号, 但是用公开的密钥来推导专有密钥和用公开密钥来去除水印信号这两个过程都很困难。

(3) 基于高层信息级别的水印系统的开发。建立于地层符号级的水印系统完全依赖于计算技术, 容易受到攻击。而基于更高层信息特征, 比如说图像的内容, 文本的语义等设计的水印系统, 可以具有更高的鲁棒性。

(4) 水印基本原理和评价方法的研究, 包括水印理论模型、水印结构、水印嵌入方法、水印检测算法、水印性能评价以及水印的标准化等。

参考文献

1. Byun S.-C, Ahn B.-H. Symmetric and Asymmetric Cryptography Based Watermarking Scheme for Secure Electronic Commerce via the Internet[C]. In: Lecture Notes in Computer Science, 2003, 607-612
2. 张焕国, 郝彦军, 王丽娜, 数字水印、密码学比较研究[J]. 计算机工程与应用. 2003 (9): 63-67
3. Cox I J, Miller M. L. The first 50 years of electronic watermarking. EURASIP J. of Applied Signal Processing, 2002, 2: 126~132
4. Kundur D, Hatzinakos D. Digital watermarking for telltale tamper-proofing and authentication. Procession of the IEEE Special Issue on Identification and Protection of Multimedia Information, 1999, 87 (7): 1167~1180
5. Bender W, et al. Techniques for data hiding. IBM Systems Journal, 1996, 35 (3&4): 313~336
6. Boney L, Tewfik A, Hamdy K. Digital watermarks for audio signals. IEEE Int. Conf. on Multimedia Computing and Systems, 1996, 1: 473~480
7. Wolfgang R, Podilchuk C, Delp E. Perceptual watermarks for digital image and video. Proceedings of the IEEE, 1999,87 (7): 1108~1112
8. Hartung F, Kutter M. Multimedia watermarking techniques. Proceeding of the IEEE, 1999, 87 (7): 1079~1107
9. Boney L, Tewfik A, Hamdy H. Digital watermarks for audio signal. IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems. 1996, 1: 473~480
10. Tilki J F, Beex A A. Encoding a hidden digital signature onto an audio signal using psychoacoustic masking. 7th International Conference on Signal Proceeding Application Technology, 1996, 7: 476~480
11. Su J K, Hartung F, Girod B. Digital Watermarking of Text. Image and Video Documents. Computer & Graphics, 199822 (6): 687~695

12. Low S H, et al. Document marking and identification using both line and word shifting. Proc. IEEE INFO COM'95, 1995: 853~860
13. I. Kitamura, S. Kanai and T. Kishinami. Copyright Protecting of Vector Map Using Digital Watermarking Method Based on Discrete Fourier Transform. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'01), July 9~13, 2001, 3: 1191~1193
14. 王秋生, 孙圣和. 基于量化数字音频信号频域参数的水印嵌入算法. 声学学报, 2002, 27 (4): 379~385
15. 孙圣和, 王秋生. 矢量变换域内数字图像水印嵌入算法. 电子学报, 2001, 12 (A): 1782~1784
16. M. Farzam and S. Shirani. A Robust Multimedia Watermarking Technique Using Zernike Transform. IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing, Cannes, France, 2001: 529~534
17. W. B. Luo, G. L. Heileman and C. E. Pizano. JPEG Domain Watermarking. Proceedings of SPIE, 2002, 38 (23): 1424~1425
18. W. Puech, P. Montesinos and M. Dumas. Color Image Watermarking Robust to JPEG Compression. European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision (CGIV), 2002: 81~85
19. Voyatzis G, Pitas I. The use of watermarks in the protection of digital multimedia products. Proceedings of IEEE, 1999, 87 (7): 1197~1207
20. 钟伟, 马希俊, 余松焯. 一种使用 Legendre 阵列的图像水印. 通信学报, 2001, 22 (1): 1~6
21. 武拴虎, 谈正. 基于混沌序列的视频图像数字水印隐藏与多分辨率检测. 西安交通大学学报, 2000, 43 (6): 35~39
22. Tirkel A Z, et al. Electronic watermark. Digital image computing Technology and Applications (DICTA'93), 1993, Macquarie University, 666~673
23. B. G. Mobasseri. A Spatial Digital Video Watermark that Survives MPEG. International Conference on Information Technology: Coding and Computing, March 27~29, 2000: 68~73

24. Z. M. Lu, Q. M. Ge and X. M. Niu. Robust Adaptive Video Watermarking in the Spatial Domain. The 5th International Symposium on Test and Measurement (ISTM'2003), Shenzhen, China, June 1~5, 2003: 1875~1880
25. Bender W, et al. Techniques for data hiding. IBM System Journal, 1996, 35 (3&4): 313~336
26. Langelaar G C, van-der-Lubbe J C A, Lagendijk R L. Robust labeling methods for copy protection of images. Proceeding of IS&T and SPIE, Storage and Retrieval for Image and Video Databast, 1997, 3022: 298~309
27. Kutter M, Jordan F, Bossen F. Digital signature of color images using amplitude modulation. Proceeding of SPIE, storage and retrieval for image and video database, 1997, 3022: 518~526
28. Cox I J, et al. A Secure Robust Watermark for Multimedia. Workshop on Information Hiding, Cambridge, UK, 1996, Number 1174 in Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, 185~206
29. Podilchuk C I, Zeng W J. Image-Adaptive Watermarking Using Visual Models. IEEE Journal on Selected Areas in Communicatons, 1998, 16 (4): 525~539
30. Tao B, Dickinson B. Adaptive Watermarking in the DCT Domain. International Conf. on Accoustics, Speech, and Signal Proceeding (ICASSP), 1997, 4: 2985~2988
31. Barni M, et al. A DCT-domain system for robust image watermarking. Signal Proceeding, 1998,66:357~372
32. 胡臻平, 葛孚华, 李天牧. 基于分形压缩编码的数字水印技术. 计算机应用, 2001, 12 (3): 34~36
33. Der-Chyuan Lou, Jiang-Lung Liu, and Ming-Chiang Hu. Adaptive Digital Watermarking Using Neural Network Technique. IEEE, 2003 (3): 325~332
34. Mei shi-chun, et al. Decision of Image Watermarking Strength Based on Artificial Neural-Networks. Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP'02), Vol. 5: 2430~2434

35. 陈青, 苏祥芳, 王延平. 采用小波变换的鲁棒性隐形水印算法. 通信学报, 2001, 22 (7): 61~65
36. 周亚训, 叶庆卫, 徐铁峰. 基于小波和余弦变换组合的图像水印方案. 电子学报, 2001, 29 (12): 1693~1695
37. 王卫卫, 杨波, 宋国乡. 基于图像小波变换低频系数的数字水印算法. 信号处理, 2001, 17 (6): 554~557
38. Tsekeridon S, Pitas I. Embedding self-similar watermarking in the wavelet domain. IEEE Int. Conf. on Acoustics, Systems and Signal Proceeding, 2000: 1967~1970
39. Kundur D. Improved digital watermarking through diversity and attack characterization. Proc. Workshop on Multimedia Security at ACM Multimedia'99, 1999: 53~58
40. Davoine F. Comparison of two wavelet based image watermarking schemes. Proceedings of the IEEE international conference on image processing, 2000, 3: 682~685
41. 周四清, 余英林. 基于多分辨率和 HVS 的盲水印图像隐藏方法. 计算机工程与应用, 2001, 13: 71~72
42. Wang H J, Kuo C J. An integrated approach to embedded image coding and watermarking. Proceedings of IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6: 243~250
43. Su P C, Wang H J, Kuo C J. Digital Watermarking on EBCOT Compressed Images. SPIE's 44th Annual Meeting Applications of Digital Image Processing XX II (SD41), 1999

攻读硕士学位期间发表和投出的学术论文

1. 宋文星, 孙光民, 刘伟平, 基于神经网络的图像混合噪声消除, 信息技术, 55~58, 第 11 期, 2005 年
2. Hui Yu, Guangmin Sun, Wenxing Song, Xiao Li. Human Motion tracking based on Neural Network. 2005 International Conference on Communications, Circuits and Systems. Hong Kong, China, 2005. 5, 979-982, EI 收录, ISTP 收录。

致谢

本论文是在导师孙光民教授的悉心指导下完成的，在此表示深深的感激之情。在攻读硕士论文的三年之中，曾经得到老师们、同学们以及朋友们的来自各方面的帮助，得到了家人无微不至的关怀和支持，在此一并表示深深的感谢！