

题目： 数字水印系统设计—彩色图像水印

院（系） 信息科学与工程学院

专    业 电子信息工程

届    别 2012 届

学    号 0815241053

姓    名 许志伟

指导老师 冯桂 教授

华侨大学教务处印制

2012 年 05 月

## 摘 要

随着数字图像产品的普及和应用,人类在生活中对于数字图像产品的安全性和版权问题日益重视,也由此加强了对数字图像水印技术的研究。本论文结合图像加密技术和经典数字水印算法,提出了一种基于变换域的彩色图像水印系统的设计方法。由于人眼对图像的强度高频分量区的视觉误差小,本论文利用人类视觉系统(HVS)对彩色图像的强度分量进行水印的嵌入,并利用 Logistic 混沌加密算法提高水印的隐蔽性。

同时,为提高其抗压缩能力,算法一中采用 DWT+DCT,并且用 DCT-8\*8 分块作法,嵌入水印。在保证不可见性良好的情况下,通过适当调节嵌入强度,很好地实现了水印的抗剪切、滤波、噪声等常见攻击。经实验数据分析,该算法在图像不可见性、鲁棒性上均有良好的效果;算法二中采用纯 DWT 将水印嵌入到低频区,通过邻域差值算法选出 3\*1024 个的平滑区的像素,进行三次的水印嵌入,在水印提取时根据概率大小进行判定,获得水印。算法二在抗剪切、滤波、噪声等常见攻击中有良好的鲁棒性,尤其是在抗压缩能力上比算法一更具鲁棒性。

**关键词:** 彩色图像; 数字水印; 小波变换; 离散余弦变换; Logistic 混沌加密。

## ABSTRACT

With the popularization of digital image products, the issues about the security and copyright of the related digital image products stand out. Thus, we emphasis more on the design of digital image watermarking technology. This paper presents a scheme, combining with image encrypt and typical digital image watermark, to design a color image watermark system based on DWT and DCT. The algorithm of the first method embeds the target logo into the intensity of color image based on HVS and improves the security of logo by Logistic-encrypt technology.

To strength the quality of anti-compress, a method of  $8 \times 8$  block and DCT is considerable. The result shows us a perfect effect of this algorithm with features of good sightless and anti-attack, including cropping, filtering, adding noise, JPEG compression, etc; the algorithm of the second method embeds the logo in low-frequency based on 2-level DWT, then repeat embedding the same logo 3 times in the smooth-area selected the pixels of short distance among  $3 \times 1024$  similar pixels, taken by calculating the distance between a target-pixel and the four ones around it. We obtain the target-logo by the result of high-possibility. The second method has good effect against cropping, filtering, adding noise, especially the excellent ability of anti-compression.

**Keywords:** color image, digital watermarking, discrete wavelet transform (DWT), discrete cosine transform (DCT), logistic encrypt.

# 目 录

摘要

ABSTRACT

第一章 绪论	1
1.1 数字水印的研究背景	1
1.2 数字水印技术的国内外发展现状	1
1.3 数字水印的应用领域	3
1.4 数字水印的分类和特点	4
1.5 本论文的主要内容和结构安排	5
1.5.1 本论文的主要内容	5
1.5.2 本论文的结构安排	6
1.6 本章小结	6
第二章 数字水印技术	6
2.2 人类视觉模型和图像质量评价	6
2.2.1 人类视觉模型 (HVS)	6
2.2.2 图像的质量评价	7
2.3 数字水印系统的一般模型	8
2.4 典型的数字水印算法	9
2.4.1 空域算法	9
2.4.2 变换域算法	10
2.4.3 压缩域算法	10
2.4.4 生理模型算法	11
2.5 本章小结	11
第三章 水印的预处理	11
3.1 水印加密作用与特点	11
3.2 常见的水印加密算法	12
3.2.1 Logistic 混沌算法	12
3.2.2 其他算法	14
3.3 本章小结	15
第四章 载体图像的预处理	16
4.1 彩色图像和灰度图像的分析	16
4.1.1 彩色图像的分析	16
4.1.2 灰度图像的分析	16
4.2 RGB 和 HSI 的相互转化	16
4.3 水印嵌入位置的选择	17
4.3.1 算法一的嵌入位置选择	18

4.3.2 算法二的嵌入位置选择·····	19
4.4 本章小结·····	20
第五章 基于变换域的水印技术·····	20
5.1 离散小波变换·····	20
5.1.1 离散小波变换的定义·····	20
5.1.2 离散小波变换的特点·····	21
5.2 离散余弦变换·····	22
5.2.1 离散小波变换的定义·····	22
5.2.2 离散小波变换的特·····	22
5.3 本论文的两种水印算法·····	23
5.3.1 水印技术之算法一·····	23
5.3.2 水印技术之算法二·····	25
5.4 本章小结·····	27
第六章 水印攻击实验测试和分析·····	27
6.1 算法一的水印攻击测试·····	27
6.1.1 不同测试图的不可见性（嵌入水印后）·····	27
6.1.2 抗剪切的性能分析·····	28
6.1.3 抗亮度变化的性能分析·····	29
6.1.4 抗噪声的性能分析·····	29
6.1.5 抗滤波的性能分析·····	30
6.1.6 抗 JPEG 压缩的性能分析·····	30
6.1.7 抗旋转攻击的性能分析·····	31
6.2 算法二的水印攻击测试·····	31
6.2.1 不同测试图的不可见性（嵌入水印后）·····	32
6.2.2 抗剪切的性能分析·····	32
6.2.3 抗亮度变化的性能分析·····	33
6.2.4 抗噪声的性能分析·····	33
6.2.5 抗滤波的性能分析·····	34
6.2.6 抗 JPEG 压缩的性能分析·····	34
6.2.7 抗旋转攻击的性能分析·····	35
6.3 系统界面设计·····	35
6.4 本章小结·····	36
第七章 结 语·····	36
参考文献·····	39
后记·····	41
附录（英文原文）·····	42
附录（英文翻译）·····	50

# 第一章 绪 论

## 1.1 数字水印的研究背景

随着信息时代的到来和数字产品的应用，尤其是因特网的普及，数字作品的便利性和不安全性是并存的。当前的信息保护主要是通过加密和解密措施，在设置密钥后进行信息的获取。但这些简单的密码特性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成为一项迫切的工作。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，是信息隐藏技术研究领域的一个重要分支。利用数字嵌入法隐藏在数字图像中，用以证明创作者对其作品的所有权。在现实生活中，我们往往会更希望有一些能够利用不让人感觉出来的保护措施对我们的产品进行版权信息的保护，因此，对于数字水印的研究一直成为人们研究领域的一个关键热点。

## 1.2 数字水印技术的国内外发展现状

早期的数字水印技术针对的是数字图像进行研究的，关于该技术的论述首先见于 Tirkel 等人发表的一篇文章题为《电子水印》的文章<sup>[01]</sup>，在这篇文章中，对于灰度图像的水印处理主要是运用最低有效位（LSB，Least Significant Bit）。其中，一种是使用一个  $m$  序列来置换图像的最低有效位，另一种是向图像的最低有效位叠加一个  $m$  序列，并使用自相关函数进行检测的方法。同时，Tirkel 提出了可以用扩频技术向静止图像添加水印，但是该水印的鲁棒性很差，对于常见攻击，水印无法正确提取出来。

Cox 等人<sup>[02]</sup>提出了一种基于图像全局变换的数字水印方法。其指出加载在图像的视觉敏感部分的数字水印才能有较强的鲁棒性。这种方案是对整个图像进行 DCT 变换，后将数字水印加载在预先决定的范围内，除去 DC 分量的低频分量上。

为了能够在提取水印时不用到原始数据，Pitas 提出了一种盲水印方案<sup>[03]</sup>。它将灰度图像  $I$  的像素集划分为随机选择的两个有相同像素个数的子集合  $A$  和

B, 假设划分方法为 S, 将一个小的正数 K 加到子集合 A 中的每一个像素值上, 生成嵌入水印的图像。为检测图像 I' 中是否有水印, 用同样的划分方法 S, 划分为 A' 和 B', 分别计算 A' 和 B' 像素中的平均像素值, 两者之差若为原始图像中 K, 就说明有水印; 反之, 没有水印。但是该算法是一种空间域算法, 它的鲁棒性有待进一步提高。之后, Voyatzis 等<sup>[04]</sup> 利用混沌方法进行水印的嵌入, 提高了水印的鲁棒性, 但该算法仍局限于空域; Kundur 等人<sup>[05]</sup> 提出了 DWT 算法, 通过修改小波系数, 进一步提高了水印的鲁棒性。

Zhao 和 Koch 描述了一种称作 Syscop 的水印系统<sup>[05]</sup>, 它通过生成一个伪随机序列来选择将要嵌入水印的图像块, 对块进行 DCT 变换和量化, 通过块中的中频段的 8 个可能位置的量化 DCT 系数中的 3 个进行水印的嵌入。

Hsu 和 Wu 等人<sup>[06]</sup> 提出了基于可视化模型的算法, 他们在 8\*8 大小的图像块的 DCT 系数中之字形地选择 4\*4 个中频系数组成小块, 通过比较相邻两个小中频系数块中相应位置上系数的大小进行标志图像水印的嵌入, 由于采用了可视化模型, 水印的不可见性得到了大大的提高。

黄继武<sup>[07]</sup>、易开样<sup>[08]</sup> 等提出了一种 DCT 域数字水印算法。把图像分成 8\*8 的小块, 并进行 DCT 变换, 得到由 DCT 系数组成的频率块, 然后随机选择分块嵌入水印。在水印信号提取时, 选取相同位置的 DCT 系数, 并根据系数之间的关系抽取比特信息。但是该算法的鲁棒性不是很好。

牛夏牧等人<sup>[09]</sup> 提出一种基于小波多分辨率分解的数字水印技术, 利用灰度级二维数字水印图像可以实现多重水印嵌入, 并且灰度图像所包含的信息量和可感知性及保密性是传统的数字水印无法比拟的。潘容等人<sup>[10]</sup> 在上述方法的基础上进行了改进, 将水印图像扩展到原始载体图像同样的大小, 将不同方向/不同频带的水印分别以不同的强度嵌入对应方向和频带的原始图像中, 最后检测水印时, 用 F 范数定义抽取水印与原始水印的相似度。

王向阳等<sup>[11]</sup> 提出了一种 DCT 域自适应彩色图像二维数字水印算法, 将灰度图像 (二维数字水印) 嵌入到原始彩色图像中。该算法将水印图像进行 8\*8 分块 DCT 变换, 并量化得到 DCT 系数量化矩阵。保留前 10 个系数 (一个 DC 分量

和 9 个 AC 分量, 其余舍弃), 将前 5 个量化成 8 位, 后 5 位量化成 4 位, 得到压缩编码后的一维二进制序列再进行置乱。然后将原始彩色图像由 RGB 空间转换为 YCbCr 空间, 进行分块, 由人眼视觉系统嵌入水印。

Hernandez 等人<sup>[12]</sup>利用图像小波系数和人眼视觉特性之间关系, 提出一种小波域的水印算法, 它能够自适应地将水印嵌入到小波系数中, 在提取时由载体图像和随机序列之间的相关性来检测水印, 是一种盲检测。

此外, 文献<sup>[34]</sup>的算法是对图像进行三级小波分解, 将高斯噪声作为水印嵌入到小波域的第三层子带上。该算法中设定了两个比例因子, 对 LL3 子带取  $a_1$ , 其他子带为  $a_1$  的百分之一。

从上述的各种时期不同水印研究方法, 从最早的较为简单的鲁棒性差的水印到后期灰度图像水印的鲁棒性改善, 再到近期彩色图像的水印的各项综合的发展, 我们可以看出数字水印技术不论在国内还是国外都一步步发展并得到改良。我们本次所做的算法就是建立在这些前人所研究的基础上, 综合各种方法的优点, 将水印嵌入到彩色图像中, 并在水印的不可见性和鲁棒性上均衡起来。

### 1.3 数字水印的应用领域

当数字水印应用于版权保护时, 多数应用于电子商务、在线或离线地分发多媒体内容以及大规模的广播服务。数字水印用于隐藏标识时, 可在医学、制图、数字成像、数字图像监控、多媒体索引和基于内容的检索等领域得到应用。数字水印的认证方面主要 ID 卡、信用卡、ATM 卡等上面数字水印的安全不可见通信将在国防和情报部门得到广泛的应用。以下几个引起普遍关注的问题构成了数字水印的研究背景。

**1.数字作品的知识产权保护。**由于数字作品的拷贝、修改非常容易, 所以采用数字水印可以使版权标志不可见或不可听, 既不损害原作品质量, 又达到了版权保护的目, 这种应用要求非常高的鲁棒性。

**2.商务交易中的票据防伪。**由于货币、支票以及其他票据的伪造变得更加容易, 并且在传统的流通中会出现大量过渡性的电子文件, 数字水印技术可以为各种票据提供不可见的认证标志, 从而可以大程度地增加伪造的难度。



**3.声像数据的隐藏标识和篡改提示。**数字水印技术采用隐藏标识的方法，把数据标识信息非直接嵌入到原文件，并且不可见，只有通过特殊的阅读程序才可以读取。这种方法已被国外一些公开的遥感图像数据库采用。

#### **1.4 数字水印的分类和特点**

数字水印技术有很多种类型，对于不同的用途、不同的算法技术、不同的性质，其可以有不同的种类用于专门的设计指标的设定，我们可以从不同的角度进行划分，使得水印技术在不同方向的研究上有更为明确的分类：

##### **1.按水印的特性划分**

按水印的特性可以将数字水印分为鲁棒性水印和脆弱性水印两类。

①鲁棒性水印主要用于在数字作品中标识著作权信息，它要求水印技术具有良好的鲁棒性，即能够抵抗一定的几何攻击和压缩攻击，以便能够得到正确的水印，实现水印的信息保护作用。

②脆弱性水印主要用于图像信息的完整性保护，它的特性与鲁棒性水印刚好相反，它要求所具有的水印算法在含水印图像被篡改后所提取的水印发生明显的变化，以让检测者知道该图像是否被篡改过。

##### **2.按水印附载的媒体划分**

按水印所附载的媒体划分，我们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网格模型的网格水印等。

##### **3.按检测过程划分**

按水印的检测过程划分，有明文水印和盲水印。

①明文水印在检测过程中需要原始数据，比如原始载图等。

②盲水印在提取水印时只需要相应的密钥而不需要任何，不需要原始数据。一般来说，明文水印的鲁棒性比较强，但其应用受到存储成本的限制。目前学术界研究的数字水印大多数是盲水印。

##### **4. 按水印的用途划分**

按水印的用途划分，有票据防伪水印、版权保护水印、篡改提示水印和隐蔽标识水印。

①票据防伪水印是一类比较特殊的水印，主要用于打印票据和电子票据的防伪。一般对票据不能有过多修改，并且人们必须考虑票据流通中的破损、图案模糊等情形，采用较为简单的数字水印算法。

②版权标识水印是目前研究最多的一类数字水印，主要要求算法有良好的鲁棒性和不可见性，在容量要求上不做过多的限制。

③篡改提示水印是一种脆弱水印，目的是标识宿主信号的完整性和真实性。

④隐蔽标识水印的目的是将保密数据的重要标注隐藏起来，限制非法用户对保密数据的使用。

## 5. 按水印隐藏的位置划分

按数字水印的隐藏的位置划分，可将其分为时（空）域水印、频域水印、时/频域水印和时间/尺度域水印。

时（空）域水印是直接在信号空间上叠加水印信息，而频域水印、时/频域水印和时间/尺度域水印则分别是在 DCT 变换域、时/频变换域和小波变换域上隐藏水印。

## 6. 数字水印应该具有以下几个特征：

①安全性：水印技术的安全性可以通过对水印图像的预处理来进行保护，同时所采用的密钥要有一定的管理；

②不可见性：数字水印应是不可知觉的，嵌入了水印之后的图像时人眼看不出来有明显变化，且应该保证原始载图在嵌入水印后有良好的图像质量；

③鲁棒性：这是指含水印的图像在经过不同的攻击，比如剪切、滤波、压缩、亮度变化、锐化、旋转等，我们用所设定的方法提取出的水印能够在一定程度上表示我们原始水印图像的信息，即提取的水印要能保证一定的信息。一幅有良好鲁棒性的图像，在经过攻击测试后仍能提取出相应的水印。

## 1.5 本论文的主要内容和结构安排

### 1.5.1 本论文的主要内容

本论文主要讨论对于彩色图像中嵌入预定的二值水印图像，并保证载体图像在嵌入水印之后具有良好的不可见性和鲁棒性，能够抵抗多种常见的几何攻击和压缩攻击。本算法基于人类对于彩色图像中的强度分量的视觉误差小这一特点，选择在其强度分量上嵌入水印图像。基于已被大家熟悉研究的几种经典的数字图

像水印技术算法：小波域算法和频域算法，本论文主要采用 DWT 与 DCT 相结合的方式在强度分量嵌入水印。具体为将原始 512\*512 的载体图像进行一级小波分解，取出其高频分量，进行 8\*8 分块，以对应 JPEG 压缩的量化方式，然后对分块进行离散余弦变换。按照 JPEG 量化方式，取出两个 JPEG 亮度相同的点，通过二值水印的值改变两者的大小关系，从而通过简单的相应位置离散余弦变换值大小的比较提取水印。同时在嵌入过程中为保证方案的抗攻击性，应适当调节嵌入系数，并在方案的不可见性和鲁棒性之间折衷，取得良好效果。同时本论文的另一种算法，是将水印嵌入到低频区，利用差值法选择平滑区的像素，进行水印的三次嵌入，在提取时根据提取出的概率来决定水印构成。

### **1.5.2 本论文的结构安排**

- (1)介绍数字水印的相关概念、研究现状和相关应用。
- (2)人类在数字图像水印技术方面取得的成果，如数字图像水印系统的模型、嵌入算法和图像分析。
- (3)对于水印的加密保护的研究。
- (4)分析灰度图像与彩色图像，研究人类在彩色图像中嵌入水印所应进行的处理。
- (5)对具体水印嵌入、提取方式和算法的分析。
- (6)研究本算法的水印抗攻击能力，对实验结果进行分析，并得出结论。
- (7)总结本次对水印技术算法的研究。

### **1.6 本章小结**

本章主要讨论一些数字水印技术概括性的研究方法和实际应用的研究，对于一项技术的研究，我们首先要了解其有什么作用，如何去实现我们所需要的功能以及它所发展到现在的一个程度状况，以便我们能够在前人的基础上，得到进一步的研究和深化。

## **第二章 数字图像水印技术**

### **2.2 人类视觉模型和图像质量评价**

#### **2.2.1 人类视觉模型（HVS）**

人类视觉系统即 Human Visual System，简称 HVS。人类视觉系统（HVS）作为一种图像处理系统，它对图像的认知是非均匀和非线性的。人眼对于图像的视觉特性主要包括：对亮度信号比对色度信号敏感；对低频信号比对高频信号敏感；对静止图像比对运动图像敏感；对图像水平线条和垂直线条比对斜线条敏感等。

人类视觉系统（HVS）的研究包括光学、色度学、视觉生理学、视觉心理学、解剖学、神经科学和认知科学等许多科学领域。人眼类似于一个光学信息处理系统，但它不是一个普通的光学信息处理系统，从物理结构看，人类视觉系统（HVS）由光学系统、视网膜和视觉通路组成，其视觉信息处理模型如下所示。

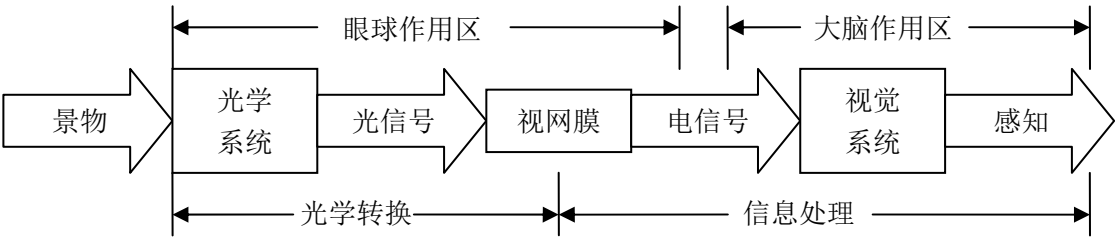


图 2.1 人类视觉系统（HVS）视觉信息处理模型

对于人眼不敏感、无关紧要的信息，我们允许有较大的失真；相反，对于人眼比较敏感的信息，应尽量避免其失真。人们通常将包含在色度信号、图像高频信号和运动图像中的一些数据视为冗余信息（视觉冗余度），可以利用人类视觉系统（HVS）特性来进行视觉冗余度的压缩，即去除那些相对于人眼而言属于看不到或可有可无的图像数据。

### 2.2.2 图像的质量评价指标

在数字图像水印技术应用中，嵌入了水印的图像与原始载体图像在视觉上有一定的误差，我们成为不可见性；同时，在图像压缩、传送、采集等过程中，处理后的图像与原始的图像也有一定的误差。因此，判定这种误差程度，我们通常计算图像的质量评价参数，用以衡量图像的质量。

传统的图像质量评价方法可以分为两种：主观评价和客观评价。

1.主观评价的方法是通过实际观察，由观察者有主观臆想根据自身的评价尺度或者自身视觉感知来评定图像的视觉效果，从而对图像的质量做出评价，按照所定的图像质量等级进行评级，最后把所有观察者的评级结果加权平均，得出最后的结果即为图像的主观质量评价。由于图像的优良程度一般都有人的视觉感觉

来衡量，所以这种情况下的评价方法似乎更符合人类的视觉评价。但是，在一些特定的情况下，比如人体疲劳、情绪等因素会导致这种主观评价的效果远远降低，故可以通过客观评价，更为客观地对图像进行质量衡量。

2.客观评价方法是将未经处理的图像与处理后的图像通过误差测量进行比较，这种方式主要是基于数据传输过程中均方信噪比。几种常用的测试参数有峰值信噪比(PSNR)、均方误差(MSE)等。

(1)峰值信噪比 PSNR (Peak Signal to Noise Ratio)的定义如下：给定一幅大小为  $M*N$  的处理后的图像  $f(x, y)$ 和未经处理的图像  $f_0(x, y)$ ，则图像的 PSNR 为：

$$PSNR=10*\lg \frac{M*N*f_{\max}^2}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y)-f_0(x, y)]^2}, \text{ 其中 } f_{\max} \text{ 为最大的灰度值} \quad (2.1)$$

(2)均方误差 MSE (Mean Square Error) 的定义如下：

$$MSE = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y)-f_0(x, y)]^2}{M*N}, \text{ 其中 } PSNR=10*\lg \frac{f_{\max}^2}{MSE} \quad (2.2)$$

(3)对于彩色 RGB 图像的评定，通常分为 R、G、B 三者相互组合表示，共为 24bit，故相应的峰值信噪比可表示为：

$$PSNR = 10*\lg \frac{255^2*3}{[MSE(R)+MSE(G)+MSE(B)]}, \quad (2.3)$$

其中  $MSE(R)$ 、 $MSE(G)$ 、 $MSE(B)$  分别是 RGB 三个原色的均方差。

另外，上述方式也可以表示为：

$$\overline{PSNR} = (PSNR_R + PSNR_G + PSNR_B) / 3, \quad (2.4)$$

其中  $PSNR_R$ 、 $PSNR_G$ 、 $PSNR_B$  分别是 RGB 三个原色的峰值信噪比。

MSE 与主观评价的相关性较差，其结果常常与人的主观感觉不一致，因此通常不用 MSE 作为图像质量评价指标。大多数情况下采用的是 PSNR 作为图像质量评价指标，其优点是便于计算和理解，能比较准确地测试出图像的质量。一般情况，PSNR 高的图像质量较好，通常，当  $PSNR>28(db)$ 时，图像质量差异不太显著；当高于  $35\sim40(db)$ 时，人眼分辨不出误差。

### 2.3 数字水印系统的一般模型

我们这里主要介绍数字图像水印的构建模型<sup>[13]</sup>

1. 水印的嵌入就是把水印信号  $W=\{w(k)\}$  嵌入到原始产品  $X=\{x_0(k)\}$  中，一般

水印嵌入可以描述为  $x'(k)=x_0(k)\oplus h(k)*w(k)$  (2.5)



图 2.2 水印嵌入框图

2. 水印的提取和检测可以作用于任何产品，提取和检测时可以有原始产品的参与，也可以不用原始产品的参与。但是一般情况下，我们比较亲睐于不用原始产品的参与，这样更有利用产品的保护和水印提取的实际性。



图 2.3 水印提取框图



图 2.4 水印检测框图

## 2.4 典型的数字图像水印算法

通常数字图像水印技术中，水印的嵌入和提取算法，可分为空域算法、频域算法和变换域算法。具体每部分介绍如下。

### 2.4.1 空域算法

空间域的算法就是直接改变像素的值来嵌入水印。主要是建立在视觉基础上，利用人的视觉系统(HVS)分辨率的限制，当迭加信号的幅度低于 HVS 的对比度门限，HVS 就无法感觉到信号的存在。对比度门限受到视觉系统的空间、时间和频率特性的影响。最低比特位替换的方法，即 ISB 编码(位平面插入工具)，是较为常见的替换系统，用秘密信息替换宿主载体中的最低比特位(视觉小重要部分)，这样做可以有较大的水印容量，并且在视觉或者听觉上几乎不可察觉。这个算法首先将一个密钥输入序列发生器，产生水印信息；然后将水印信号重排

成一维信号并逐点替换宿主载体中的最低位，检测时使用了相关性检测的方法。但是由于最低有效位的数据最有可能在常见的信号处理过程(如数据压缩和低通滤波)中丢掉，所以这种方法鲁棒性很差。Patchwork 算法，也是常用的算法，它利用像素的统计特征将信息嵌入像素的亮度值中。该算法任意选择 N 对图像点，增加其一点的亮度的同时，相应降低另一点的亮度值，来作为嵌入一个比特的水印信号信息，这样图像的平均亮度保持不变。只是此算法嵌入的比特率低，不能抵抗共谋攻击。

空域法是通过直接修改图像的像素值来嵌入水印的，算法实现简单，不可见性也很好，但鲁棒性很差，因此实用价值不大，有代表性得算法有 LSB, Patchwork 等。

#### 2.4.2 变换域算法

变换域的方法一般是将图像做某种变换(有时也要进行一些处理)在变换域中嵌入再将水印信，即对变换系数进行操作。提取时，需要在变换域上进行。日前，许多算法都利用了扩频通信的技术。实际中应用的比较广泛的是基于 DCT 和 DWT 的方法。DCT 域的嵌入算法最早的时候是随机的选取一些区域加入水印而不是将水印嵌入到整个图像上。NEC 实验室的 Cox 等人基于扩频通信的原理，提出了一种比较具有代表性的观点：水印应该嵌入到视觉上最重要的地方(主要对应于频域的低频系数)。他们对整幅图像做一维离散余弦变换，选取 1000 个最大的低频 DCT 系数(小包括直流分量)，然后将服从高斯分布的随机实数序列作为水印叠加到这些系数上。检测时通过计算高斯序列与从含水印图像中得到的 1000 个改动过的 DCT 系数的相关性，来判断水印的存在与否。该算法具有较强的鲁棒性、安全性、透明性等。

#### 2.4.3 压缩域算法

基于 JPEG、MPEG 标准的压缩域数字水印系统不仅节省了大量的完全解码和重新编码过程，而且在数字电视广播及 VOD(Video on Demand)中有很大的实用价值。相应地，水印检测与提取也可直接在压缩域数据中进行。下面介绍一种针对 MPEG-2 压缩视频数据流的数字水印方案。虽然 MPEG-2 数据流语法允许把用户数据加到数据流中，但是这种方案并不适合数字水印技术，因为用户数据可以简单地从数据流中去掉，同时，在 MPEG-2 编码视频数据流中增加用户数

据会加大位率，使之不适于固定带宽的应用，所以关键是如何把水印信号加到数据信号中，即加入到表示视频帧的数据流中。对于输入的 MPEG-2 数据流而言，它可分为数据头信息、运动向量(用于运动补偿)和 DCT 编码信号块 3 部分，在方案中只有 MPEG-2 数据流最后一部分数据被改变，其原理是，首先对 DCT 编码数据块中每一输入的 Huffman 码进行解码和逆量化，以得到当前数据块的一个 DCT 系数;其次，把相应水印信号块的变换系数与之相加，从而得到水印叠加的 DCT 系数，再重新进行量化和 Huffman 编码，最后对新的 Huffman 码字的位数  $n_1$  与原来的无水印系数的码字  $n_0$  进行比较，只在  $n_1$  不大于  $n_0$  的时候，才能传输水印码字，否则传输原码字，这就保证了不增加视频数据流位率。该方法有一个问题值得考虑，即水印信号的引入是一种引起降质的误差信号，而基于运动补偿的编码方案会将一个误差扩散和累积起来，为解决此问题，该算法采取了漂移补偿的方案来抵消因水印信号的引入所引起的视觉变形。

#### 2.4.4 生理模型算法

近年来，利用人的生理模型的特性，包括 HVS (Human Visual System) 和 HAS (Human Auditory System)，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。一般文献中的基本思想是利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数字水印信号的最大强度，从而避免破坏视觉质量，该算法具有很好的不可见性。

#### 2.5 本章小结

本章主要讨论数字水印技术的一种发展情况以及人们在这个领域的一个研究现状，以便我们在研究水印算法时可以根据前人的经验得到进一步的改善算法，这样一方面有利于我们对将要研究的算法有一个比较清晰的定位，另一方面也有利于我们对整个的水印技术情况有比较全面的了解，从而更好地为我们接下来的工作做好理论铺垫。

## 第三章 水印的预处理

### 3.1 水印加密作用与特点



对于数字图像水印技术，除了在选择适当的嵌入位置与嵌入系数，保证水印的鲁棒性和不可见性外，对于水印图像的预处理也是至关重要的。水印的加密技术电子商务采取的一种常用的安全保密手段，这同样适用于数字图像水印中对于水印信息的加密。我们利用适当的技术手段把重要的数据变为乱码（加密）嵌入，在提取水印过程中再用相同或不同的手段还原（解密）为原始水印图像。

水印加密过程中有两个重要的元素：算法和密钥。算法我们可以采用多种方式，比如 Arnold, Logistic 混沌算法等；密钥的选择亦有多种，可供选择的有加密算法的初始值和置乱次数等。密钥加密技术中的密码体制可以分为对称密钥体制和非对称密钥体制两种。其中，与其相对应的加密方式又称为对称加密方式和非对称加密方式。

1.对称加密采用了对称密码编码技术，它的特点是文件加密和解密使用相同的密钥，即加密密钥也可以用作解密密钥，这种方法在密码学中叫做对称加密算法，对称加密算法使用起来简单快捷，密钥较短，且破译困难，除了数据加密标准（DES），另一个对称密钥加密系统是国际数据加密算法（IDEA），它比 DES 的加密性好，而且对计算机功能要求也没有那么高。IDEA 加密标准由 PGP(Pretty Good Privacy) 系统使用。

2.与对称加密算法不同，非对称加密算法需要两个密钥：公开密钥（public key）和私有密（private key）。公开密钥与私有密钥是一对，如果用公开密钥对数据进行加密，只有用对应的私有密钥才能解密；如果用私有密钥对数据进行加密，那么只有用对应的公开密钥才能解密。因为加密和解密使用的是两个不同的密钥，所以这种算法叫作非对称加密算法。

本论文采用的是对称加密方式，因为本论文的密钥为混沌置乱的初始值  $x(1)=0.5$ ，对于水印图像的嵌入不需要专门的数据传送，在对方得到含水印的彩色图像时即可进行水印的提取，此方式又称为盲检测。在提取时只需告诉对方这个密钥值即可提取出原始的水印，无需另外设置的密钥。

## 3.2 常见的水印加密算法

### 3.2.1 Logistic 混沌算法

混沌现象(Chaos)是自然界中客观存在的、有界的、不规则的、复杂的运动形式。混沌是一种复杂的非线性、非平衡、确定的、类似随机的动力学过程[43]。

混沌加密技术已成为一种新兴的加密技术。

动力学的特点使得混沌序列宽频带，类随机，难以破译；随初始值的不同能产生大量相关性较弱，具有很好的类白噪声特性的混沌序列，加密空间大；由确定性系统产生，使得混沌序列可控制可再生，为加密和解密提供了能。Logistic 映射是非常简单但得到广泛应用的动力系统，它的一种定义形式如下：

$$x(i+1) = n * x(i) * (1 - x(i)) \quad (3.1)$$

其中  $0 < n \leq 4$  称为分枝系数， $x(i) \in (0, 1)$  称为状态。当  $0 < x(i) \leq 1$ ， $3.6 \leq n \leq 4$  时，Logistic 映射工作于混沌状态。当  $n=4$  时，其概率分布密度：

$$\rho(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi \sqrt{x*(1-x)}}, & 0 < x < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3.2)$$

**1.混沌加密步骤如下所示：**

**步骤 1：**取  $x(1)=0.5$  为密钥，或者调节系数  $n=3.7$  为密钥，密钥可以为一个或者多个，在此取  $x(1)=0.5$  为密钥。

**步骤 2：**32\*32 的水印排列成一维 1024 个的序列。利用  $x(i+1) = n * x(i) * (1 - x(i))$  生成与水印像素个数（1024）一样的乱序列，并用 sort 进行排序，提取出相应的位置和数值。

**步骤 3：**利用  $Scrambled(i) = J(num(i))$ ，其中  $Scrambled(i)$ 、 $J(num(i))$  分别是新的混沌水印和原始置乱后的水印值。

**2.混沌解密步骤如下所示：**

**步骤 1：**得到所给的密钥  $x(1)=0.5$ ，利用  $x(i+1) = n * x(i) * (1 - x(i))$  生成与水印像素个数（1024）一样的乱序列，并用 sort 排序，提取出相应的位置和数值。

**步骤 2：**利用  $Iscamble(num(i)) = M(i)$ ，其中  $Iscamble(num(i))$ 、 $M(i)$  分别是目标水印和提取的置乱水印值。

**步骤 3：**最后将得到的  $Iscamble(num(i))$  目标水印排列成 32\*32 的矩阵形式，得到最终的目标图像。

由上述得到的加密水印图像如下图所示：



图 3.1 原始二值水印图像



图 3.2 混沌置乱后的二值水印图像

### 3.2.2 其他算法

#### 1. Arnold 变换

Arnold 变换，俗称“猫脸变换”(Cat mapping)，是 V.J.Arnold 在遍历理论的研究中提出的一类裁剪变换，它可以抽象为在平面单位正方形内绘制一个猫脸图像，这个猫脸图像由清晰变模糊。将图像看作平面区域上的二元函数  $Z=F(x, y)$ ,  $(x, y) \in R$ ，通常区域  $R$  是一个矩形(讨论  $R$  为正方形的情况)，对  $R$  中的任意点  $(x, y)$ ，相对应的函数值  $F(x, y)$  代表图像的信息(如灰度值等)。随着图像的数字化的， $Z=F(x, y)$  可看作一个二维离散点阵，元素本身代表了图像的信息。简言之，离散化的数字图像相当于元素之间有相关性的一类特殊矩阵，对这一矩阵进行如下变换可以得到新的矩阵，从而实现图像的置乱处理。设有单位正方形上的点  $(x, y)$ ，将点  $(x, y)$  变到另一点  $(x', y')$  的变换为：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

此变换称作二维 Arnold 变换，具体到数字图像中，把式(3.3)中的二维 Arnold 变换改写为：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \pmod{N} \quad (3.4)$$

由此，Arnold 变换即式(3.4)，其中  $x, y \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$ ，而  $N$  是图像矩阵的阶数。记式(3.3)中的变换矩阵为  $A$ ，右端  $(x, y)^T$  为输入，左  $(x', y')^T$  为输出，做迭代程序如下：

$$\begin{cases} P^{n+1} = A * P^n \pmod{N} \\ P_{xy}^n = (x, y)^T \end{cases} \quad (3.5)$$

其中  $n$  代表迭代的次数， $n=0, 1, 2, \dots$ 。当原图像中所有的点均遍历一遍后，便生成了一幅新的图像。

#### 2. 基于采样技术的数字图像置乱算法

从采样理论的角度看,图像是在二维连续曲面上按照某一间隔和某种策略进行采样所得到的一个二维离散点的阵列。不同的采样策略得到的图像质量会存在着一定的差异,但在视觉上通常都具有基本上相同的形态。先将图像分成大小相同的矩形或正方形小块,然后依序抽取其中的一个像素组合成新的图像块,最后按某种排列方式拼成一幅新的图像。上述采样方式具有如下特点:

- (1)采样过程不改变原图的直方图,像素只是发生位移。
- (2)采样后形成原图的缩略图组合,随着迭代的进行逐渐形成能量分散的图像。

### 3.基于幻方变换的置乱技术

以自然数  $1, 2, \dots, n \times n$  为元素的  $n$  阶矩阵

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

满足  $\sum_{j=1, 2, \dots, n}^n a_{ij} = \sum_{i=1, 2, \dots, n}^n a_{ij} = \sum_{i=1}^n a_{ii} = \sum_{i+j=n+1}^n a_{ii} = \frac{n^*(n^2+1)}{2}$ , 则称矩阵  $A$  为标准幻方。

### 4.基于 Hilbert 变换的置乱技术

1891 年,德国数学家 Hilbert 给出一种比较简单的填满一个正方形平面中所有点,但曲线却不自交的曲线,人们称这类曲线为 Hilbert 曲线。如果按照 Hilbert 曲线的走向遍历图像中的所有点,就可以得到 Hilbert 变换图像,其做法类似于幻方变换。

### 5.多步置乱变换

实际中为取得满意的置乱效果,可采用多步置乱变换。如首先按图像块置乱,再按图像块中的维数进行置乱。为了叙述方便,下面以一个例子说明:将  $128 \times 128$  的图像分成  $32 \times 32$  的图像块,结果得到  $4 \times 4 = 16$  个小图像块。对这 16 个图像块再利用  $4 \times 4$  的幻方或 Hilbert 变换进行置乱,以取消图像像素点在邻域中空间位置上的相关性。再将得到的图像在行、列两个方向上分别进行上、下及左、右的隔行(或隔列)的整行(或整列)的元素交换,以消除图像相邻行(或列)的位置相关性。

### 3.3 本章小结

对于水印的加密处理时在所难免,因此我们在对上述几种算法进行比较之后,采取原理相对比较好理解的 Logistic 混沌置乱进行处理。这种处理法将置乱序列的初始值作为密钥,在提取出乱水印后,只需给对方该密钥

即可还原出正确的水印。其中要注意的是，这种方法在进行序列排序时所选取的序列标号 num 在解密时应对应到提取的水印序列中，否则会出现乱码。

## 第四章 载体图像的预处理

### 4.1 彩色图像和灰度图像的分析

#### 4.1.1 彩色图像的分析

本论文是针对彩色图像进行水印的操作，在介绍前首先描述一下彩色图像的构成以及与灰度图像的区别，以便更好地掌握不同类型图像之间的水印技术。彩色图像是多光谱图像的情况之一，基于人类视觉系统，通常采用 R、G、B 三个基色分量表示，是对人眼的光谱量化性质的近似。我们所用的标准测试彩色图是 Matlab 图库的 24 位真彩色图像（true-color），故在此对真彩色图像做详细分析。该图像中，R、G、B 的比重为 1:1:1，如果不选取出强度分量而直接在 R、G、B 上进行处理，其比重应改为 0.299:0.587:0.114 才有比较好的视觉效果(文献[19])。每一个基色都为 8bit 组成，真彩色图为 24bit，每一个基色的图像可看做是单一的灰度图，其强度等级为  $2^8=256$  级。

#### 4.1.2 灰度图像的分析

我们在这个过程中，利用的是彩色图像的强度分量 I 进行水印的操作。在了解了 R、G、B 三个原色之间的比例以及相应 H、S、I 之间对于人类视觉系统的影响。我们可以将人眼对于强度分量的误差分辨小的原理，将 I 分量当做灰度图像进行处理，即可以加强水印嵌入的效率，也可以保证水印技术的不可见性。

一幅 24bit 的真彩色图像可用 R、G、B 表示，三个通道的缩览图都是以灰度显示的。用不同的灰度色阶来表示“红，绿，蓝”在图像中的比重。灰度图像和我们上述所分析的单一的一个基色的原理是一样的，具有 8bit 像素，256 级，与彩色图区别的是彩色图可以看做是三幅不同通道的灰度图的叠加。所以我们只要将 24bit 彩色图进行适当的分离出 8bit，我们就可以当做灰度图像进行处理。

### 4.2 RGB 和 HSI 的相互转化

在本论文中，我们使用到 HSI 彩色模型。HSI 彩色模型是基于人类视觉感知原理，它的三个分量分别是色度(H)、饱和度(S)和强度(I)。该模型中的色度分量描述其纯颜色属性；强度主要描述其亮度状况，属于主观描述子，它是我们之后要进行处理的重要组成部分；饱和度则反映了纯色被白光稀释的程度，强度的大小变化并不影响饱和度。因此，利用数字图像 HSI 彩色模型中饱和度分量及色度分量与强度分量的独立性，提出了一种基于 HSI 色彩空间模型的数字水印算法。实验证明，我们所采用的方法既可以保证水印图像的不可见性，同时又能保证较强的鲁棒性。

对于给定的一幅以 RGB 格式进行存储的彩色图像，将其转换到 HSI 模型空间后，其中每一个像素的 H、S、I 分量可由如下方式计算得到：

$$\begin{cases} H = \begin{cases} q, B \leq G \\ 360 - q, B > G \end{cases} \\ S = 1 - \frac{3}{R+G+B} * [\min(R, G, B)], \\ I = \frac{1}{3} * (R+G+B) \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\text{其中, } q = \arccos \frac{(R-G) + (R-B)}{\left[ (R-G)^2 + (R-B) * (G-B)^{1/2} \right]}$$

本文水印嵌入算法中采用的 HSI 模型到 RGB 模型的转换算法如下：在[0, 1]内给出图像像素的 H、S、I 各分量值，可根据各 H 分量所处的不同扇形区间，得到三组值：

$$\begin{array}{lll} \text{当 } 0 \leq H \leq 120 \text{ 时,} & \text{当 } 120 \leq H \leq 240 \text{ 时,} & \text{当 } 240 \leq H \leq 360 \text{ 时,} \\ \begin{cases} B = I * (1 - S) \\ R = I * \left[ 1 + \frac{S * \cos H}{\cos(60 - H)} \right] \\ G = 3 * I - R - B \end{cases} & \begin{cases} R = I * (1 - S) \\ G = I * \left[ 1 + \frac{S * \cos(H - 120)}{\cos(180 - H)} \right] \\ B = 3 * I - R - G \end{cases} & \begin{cases} G = I * (1 - S) \\ B = I * \left[ 1 + \frac{S * \cos(H - 240)}{\cos(300 - H)} \right] \\ R = 3 * I - G - B \end{cases} \end{array} \quad (4.2)$$

在实际应用中，上述方法计算简单且显示出 HSI 模型独立控制色调、饱和度和强度的能力。本文正好利用了两种模型空间的这种简单的转换关系，达到了单独在饱和度分量中嵌入水印信息的目的。

### 4.3 水印嵌入位置的选择

4.3.1 算法一的嵌入位置选择

本论文所提出的算法一中，由于人眼对于小波分解后的高频分量部分敏感度不高，所以水印的嵌入选择在高频 HH 中。对二维小波一级分解的各分量分布如下所示：



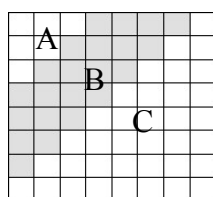
图 4.1 I 分量一级小波分解

可以看出，对于高频分量是比较光滑的，主要是一些轮廓部分，而实际嵌入过程中，若是嵌入强度没有选择好，其不可见性的缺陷一般表现在图像的轮廓，比如 Lena 的帽子边缘处。所以嵌入强度的选择也至关重要。

16	11	10	26	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 4.1 JPEG-8\*8 亮度量化表

按照上述的亮度量化表的值，我们在对应于如下 8\*8 的 DCT 中频系数中取出（4,1）、（2,3）两个像素点进行嵌入。该图中，我们可以选择的中频系数有 22 个，低频系数有 6 个，高频系数有 36 个，对应于亮度量化表，可供选取的系数点有两对（4,1）、（2,3）和（5,2）、（4,3），但是这两对的选取也会影响图像的鲁棒性，在进行实验测试后，我们选择效果比较好的（4,1）、（2,3）这一对。



其中，A-低频区，B-中频区，C-高频区

图 4.2 分块频率分布区

这个位置的选择,我们首先用 DWT 选择出一级小波分解后的高频分量,在高频分量区进行分块,这时若直接选择高频的 (4,1)、(2,3) 嵌入水印,会使得图像不可见性很差,所以我们对子块进行 DCT 选出其中频系数的 (4,1)、(2,3) 进行水印的嵌入。

### 4.3.2 算法二嵌入位置的选择

由于在算法二中,我们要求水印图像的抗压缩能力要改善,因此我们根据压缩的原理,将水印嵌入到图像小波后的二级低频分量中,小波二级分解如下图:

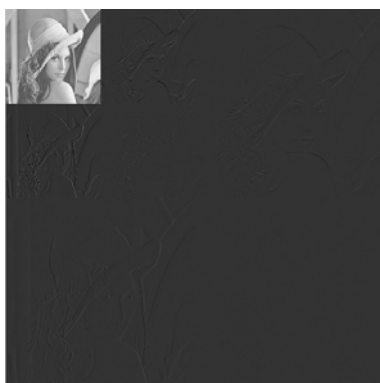


图 4.3 I 分量二级小波分解

我们将水印嵌入到低频分量比较平滑区,因为我们嵌入的水印算法中,要进行像素与其对应邻域四个像素进行比较,根据水印取出大小值进行系数的调节。我们通过隔列方法,对低频区得到像素与其邻域像素的差值大小作为选定平滑区的依据,将得到的差值大小进行从小到大的排序,取出前  $3 \times 1024$  个标号,找出其对应的原始像素位置,进行水印系数的调节。我们进行邻域像素差值大小计算图如下可见:

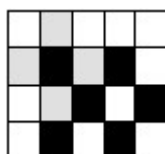


图 4.4 像素差值算法根据图

我们根据上图所示,将灰色所围的黑色像素作为目标像素,灰色的为其邻域



像素，按照差值方式得到其差值大小进行比较。同时，我们每一行目标像素要进行错开，是为了保持图像邻域像素值的可靠性。

#### 4.4 本章小结

本算法中，我们主要研究对于灰度图像与彩色图像在水印技术中的区别，因为我们日常所用的图像除了彩色图像，还有灰度图像，很多数字水印是对于灰度图像进行研究，而我们所要做的是对彩色图像进行处理，这就要求我们在阅读他人灰度图像水印技术的同时，应用到彩色图像，这就要求我们对灰度图和彩色图有一个比较清晰的分析。

在选取了彩色图的强度分量后，我们可将其作为灰度图进行处理，具体的嵌入、提取和攻击测试，我们将在以下的文章中进行介绍。

## 第五章 基于变换域的水印技术

### 5.1 离散小波变换 (DWT)

#### 5.1.1 离散小波变换的定义

小波变换是由傅里叶变换平移和伸缩构成的，其定义如下：

设  $\psi(t) \in L^2(R)$ , 傅里叶变换为  $\hat{\psi}(w)$ ，当  $\hat{\psi}(w)$  满足允许条件：

$$C = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(w)|^2}{w} dw < \infty \quad (5.1)$$

或者相应等价于

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (5.2)$$

称函数  $\psi(t)$  为一个母小波，由该母小波进行伸缩和平移得到：

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (5.3)$$

式子中  $a$  为尺度因子,  $b$  为平移因子,  $\psi_{a,b}(x)$  为依赖于参数  $a, b$  的小波基函数。鉴于  $a, b$  是连续变化的，故  $\psi_{a,b}(x)$  为连续小波基函数。

连续小波变换(Continue Wavelet Transform, 简称为 CWT), 表示式如下:

$$WT_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(x) \psi^* \left( \frac{x-b}{a} \right) dx = \langle f(x), \psi_{a,b}(x) \rangle \quad (5.4)$$

其中,  $WT_f(a,b)$  为小波变换系数,  $\psi^* \left( \frac{x-b}{a} \right)$  为  $\psi \left( \frac{x-b}{a} \right)$  的共轭对数。同傅里叶变换一样小波变换也存在着逆变换, 连续小波的逆变换定义公式如下:

$$f(x) = \frac{1}{C} \iint \frac{1}{a^2} WT_f(a,b) \psi \left( \frac{x-b}{a} \right) da db \quad (5.5)$$

常见的连续小波有 Harr 小波、Morelt 小波、样条小波和 Duabeehies 小波等小波族。其中 Harr 小波是在 1990 年被提出的一种正交函数系, 其表示式如下:

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, 0 \leq x < \frac{1}{2} \\ -1, \frac{1}{2} \leq x \leq 1 \\ 0, \text{其它} \end{cases} \quad (5.6)$$

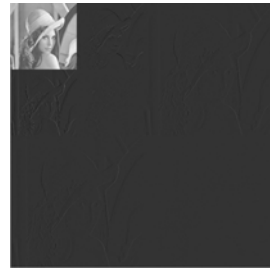
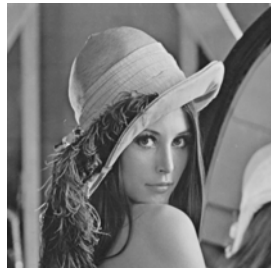


图 5.1 Lena 强度 I 分量图像 图 5.2 二级 DWT 变换后的系数图像

### 5.1.2 离散小波变换的特点

1. 小波变换就像一台带有可变焦距镜头的照相机一样, 可以依据信号调整放大倍数, 以此能够更清晰, 更细致的研究信号的动态特性。
2. 由于小波变换充分的利用了多分辨率的非均匀分布这一特性, 使得其可以良好地解决分辨率中空间和频率上的矛盾。
3. 小波变换在把信号分解到空间和频率的过程中, 保持着能量守恒, 而且信号中含有的信息不会丢失。

4.人的视觉系统对不同空间和频带的敏感性不同，而小波变换对图像的分解正是在独立频带和不同方向上进行的，符合了人眼视觉系统的这一特性，使得可以更容易地分析图像。

## 5.2 离散余弦变换（DCT）

### 5.2.1 离散余弦变换的定义

离散余弦变换（Discrete Cosine Transform, DCT）属于正交变换图像编码方法中的一种。但实际应用 DFT 运算量很大，常常使实时处理发生困难，可以采用 Walsh-Hadamard（WHT）变换，其运算量明显减少，因为 WHT 变换只有加减法而无需乘法。然而采用离散余弦变换，因为其变换矩阵的基向量很近似于托伯利兹矩阵的特征向量，而托伯利兹矩阵又体现了人类语言及图像信号的相关性，因此，DCT 常常被认为是语音与图像信号变换的准最佳变换。图像是二维的，所以在研究时主要用到二维 DCT 变换以及二维 IDCT 来对图像信号进行处理，下面对其进行简单的介绍。

二维离散余弦变换（DCT）定义如下：

$$Y(k, l) = \frac{2}{\sqrt{M \cdot N}} * c(k) * c(l) * \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} X(m, n) * \cos \frac{(2 * m + 1) * k * \pi}{2 * M} * \cos \frac{(2 * n + 1) * l * \pi}{2 * N} \quad (5.7)$$

二维离散余弦逆变换（IDCT）定义如下：

$$X(m, n) = \frac{2}{\sqrt{M \cdot N}} * \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} c(k) * c(l) * Y(k, l) * \cos \frac{(2 * m + 1) * k * \pi}{2 * M} * \cos \frac{(2 * n + 1) * l * \pi}{2 * N}$$

$$\text{其中, } \begin{cases} c(k) = c(l) = 1, k = 1, 2 \dots M - 1, l = 1, 2 \dots N - 1 \\ c(k) = c(l) = \frac{1}{\sqrt{2}}, k = 0, l = 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

### 5.2.2 离散余弦变换的特点

在基于 DCT 的变换编码中，图像是先经过分块（8\*8）后再进行 DCT 变换的，这种变换是局部的，只反映了图像的某一部分的信息。当然也可以对整幅图像进行，但是运算速度比分块 DCT 要慢。图像经 DCT 后，得到的 DCT 系数有两个特点：

1.系数值全部集中到 0 值附近，动态范围很小，这说明用较小的量化比特数即可表示 DCT 系数。

2.DCT 变换后图像能量集中在图像的低频部分，即 DCT 图像中不为零的系数大部分集中在一起，因此编码效率很高。

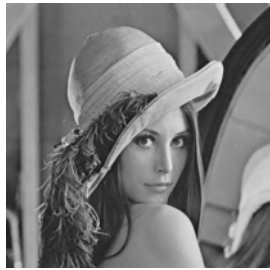


图 5.3 Lena 强度 I 分量图像

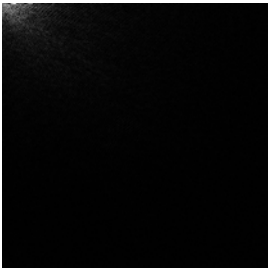


图 5.4 DCT 变换后的系数图像

Lena 图像经过 DCT 变换后的系数图像，可以看出图像 DCT 变换后大部分参数接近于零，只有左上角的低频部分有较大的数值，中频部分的参数值相对较小，而大部分高频参数值非常小，接近于零。

5.3 本论文的两​​种水印算法

5.3.1 水印技术之算法一

1.算法一水印嵌入算法

本算法基于 DWT 与 DCT 相结合的方式，将彩色图像的强度 I 分量提取出来，鉴于人眼对与彩色图像的强度变化误差辨别度小于色度和饱和度，故嵌入于强度分量。对强度 I 分量提取出高频细节分量，进行 8\*8 分块，并进行小块的 DCT 变换，选取适当的两个像素点，按算法方式嵌入。

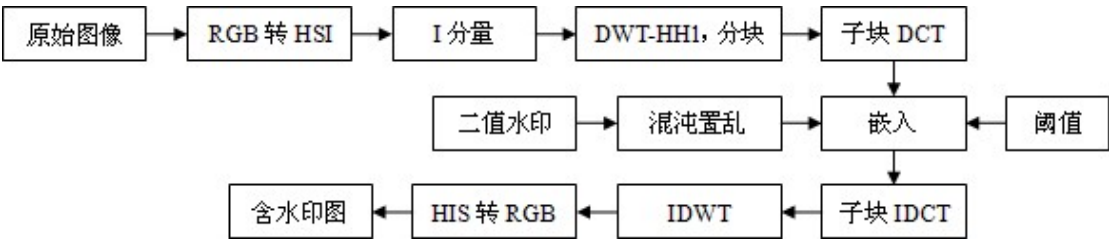


图 5.5 水印嵌入流程图

具体步骤如下：

- 步骤 1：** 将水印图像进行混沌置乱加密，按照 Logistic 混沌加密方法；
- 步骤 2：** 按照 RGB 转 HSI 的方式，提取出原始载图的强度 I 分量，详细算法借鉴上述转换算法；
- 步骤 3：** 对强度 I 分量进行一级小波分解，提取出 HH 高频细节分量，因为对于对角线分量 HH，变化主要在一些细节轮廓上，适当地调节嵌入强度可以保证很好的不可见性。按照 JPEG 压缩方式的 8\*8 模式，讲 HH 分量进行 8\*8 分块。由

于 JPEG 压缩采用 DCT，故此将 8\*8 分块进行 DCT 变换，得到离散余弦系数，选取出 JPEG 亮度量化对应的 (4, 1) 和 (2, 3) 进行小波系数的调节，调节方式如下：

先保证其嵌入前的相对大小关系：

$$\begin{cases} B_k(4,1) \geq B_k(2,3), W_k = 1 \\ B_k(4,1) < B_k(2,3), W_k = 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

满足了上述不等式可用交换法，同时应保证  $|B_k(4,1) - B_k(2,3)| \geq 2 * Gate$ ，这样是用于拥有良好的鲁棒性。

$$\begin{aligned} &\text{当 } W_k = 1 \text{ 时, } \begin{cases} B_k(4,1) = B_k(4,1) + Gate \\ B_k(2,3) = B_k(2,3) - Gate \end{cases} \\ &\text{当 } W_k = 0 \text{ 时, } \begin{cases} B_k(4,1) = B_k(4,1) - Gate \\ B_k(2,3) = B_k(2,3) + Gate \end{cases} \end{aligned} \quad (5.10)$$

其中，Gate 是嵌入强度，即门限，经实验分析，嵌入的 Gate=50 为宜。

**步骤 4：**对嵌入的 DCT 分块进行 IDCT，对其余 1023 块分块重复上述步骤 3。

**步骤 5：**对得到的嵌入水印的强度 I 分量进行 IDWT，并由 HSI 转 RGB 方式还原为彩色图像，并对原始载图和含水印载图进行图像质量分析，审查其不可见性情况。

## 2. 算法一水印提取算法

本算法水印的提取原理相对简单，应用上述的嵌入方式。

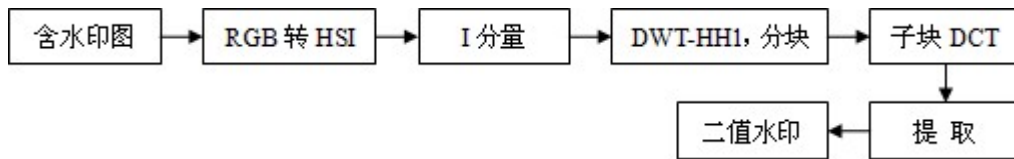


图 5.6 水印提取流程图

具体步骤如下所示：

**步骤 1：**将含水印的彩色图像进行强度分量 I 提取，并进行 DWT 提取 HH 分量，进行 8\*8 分块，共 1024 块。

**步骤 2：**每块进行 DCT 变换，提取出 (4, 1) 和 (2, 3) 两个像素，进行如下比较，得出所要的加密水印

$$\begin{cases} W_k = 0, B_k(4,1) < B_k(2,3) \\ W_k = 1, B_k(4,1) \geq B_k(2,3) \end{cases} \quad (5.11)$$

**步骤 3:** 将得到的加密水印进行解密，得到最终的水印图像。

### 3.算法一实验结果和数据分析

载图图像为 512\*512，水印图像为 32\*32

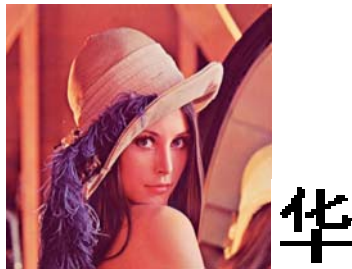


图 5.7 原始 Lena 和原始二值水印

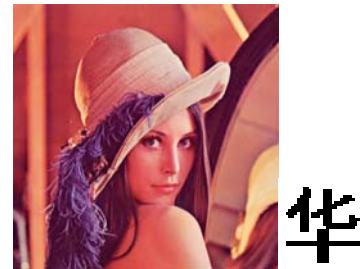


图 5.8 含水印的 Lena 和提取的二值水印

客观评价的参数

表 5.1 原始图像与嵌入水印后的图像质量分析

载体图像	PSNR(db)	水印图像	NC
原始 Lena	35.2776	原始水印图像	1.0000
含水印 Lena		提取出的水印图像	

由上述数据分析：可以看出原始的 Lena 图和含水印 Lena 图在视觉上看不出有任何变化。在无攻击下，所提取出的二值水印也没有任何变化。经数据分析，该方法具有良好的不可见性，下面进行攻击实验的测试，评定其鲁棒性。

### 5.3.2 水印技术之算法二

#### 1.算法二水印嵌入算法

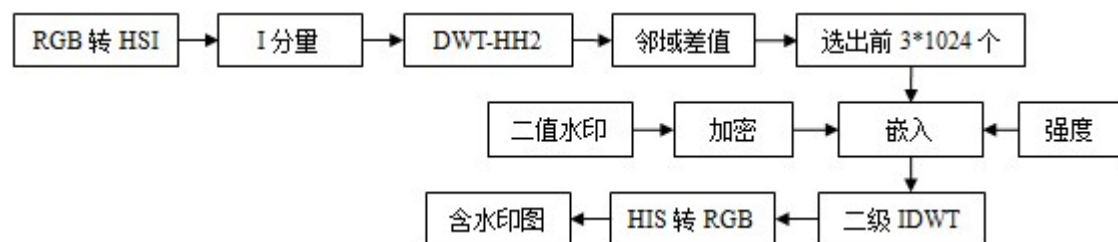


图 5.7 水印嵌入算法框图

具体步骤如下：

**步骤 1:** 将原始彩色图像提取出强度 I 分量，并进行二级小波分级，提取出 LL2 分量；

**步骤 2:** 对如上操作得到的 LL2 进行隔列比较，取出前 3\*1024 个比较平滑的像素，可采用一个像素与其对应的四个周边像素的差值大小来判定平滑与否，找出对应标号的原像素，用于水印的嵌入，嵌入一次需要 1024 个，我们在此嵌入三

次，提高其鲁棒性；

**步骤 3:** 将 32\*32 的水印进行混沌加密；

**步骤 4:** 嵌入算法如下公式所示：

$$\begin{cases} x'(i, j) = \min\{x(i, j), AV(i, j)\} * (1 - st), w(i, j) = 0 \\ x'(i, j) = \max\{x(i, j), AV(i, j)\} * (1 + st), w(i, j) = 1 \end{cases}$$

其中， $AV(i, j) = [x(i, j-1) + x(i, j+1) + x(i-1, j) + x(i+1, j)] / 4$  (5.12)

**步骤 5:** 上述方式嵌入之后进行二级小波逆变换，还原成 RGB 彩色含水印图；

## 2. 算法二水印提取算法

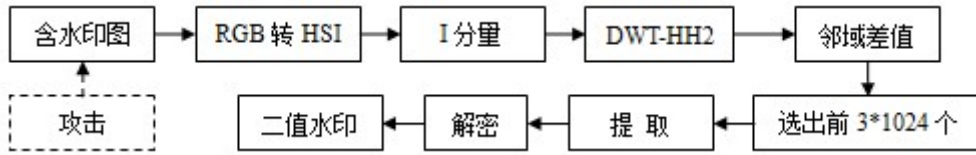


图 5.8 水印提取算法框图

具体提取步骤如下所示：

**步骤 1:** 将含水印的 RGB 图进行提取出其强度 I 分量，并进行二级小波提取出其 LL2 分量；

**步骤 2:** 对 LL2 进行隔列比较，并选出前 3\*1024 个比较平滑的像素，用于提取；

**步骤 3:** 提取算法如下所示：

$$\begin{cases} w'(i, j) = 0, x'(i, j) \leq AV(i, j) \\ w'(i, j) = 1, x'(i, j) > AV(i, j) \end{cases}$$

其中， $AV(i, j) = [x'(i, j-1) + x'(i, j+1) + x'(i-1, j) + x'(i+1, j)] / 4$  (5.13)

**步骤 4:** 我们根据上述判断后，得到三次提取结果的判断值，取概率大的作为最终结果。根据得到的密钥，将提取出的  $w'(i, j)$  解密得到我们所需的水印图像。

## 3. 算法二实验结果和数据分析

载图图像为 512\*512，水印图像为 32\*32

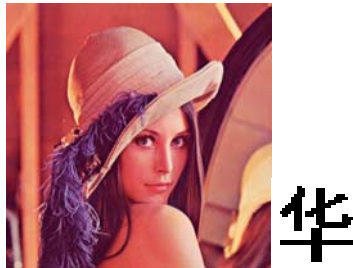


图 5.9 原始 Lena 和原始二值水印



图 5.10 含水印的 Lena 和提取的二值水印

客观评价的参数

表 5.2 原始图像与嵌入水印后的图像质量分析

载体图像	PSNR(db)	水印图像	NC
原始 Lena	46.0578	原始水印图像	1.0000
含水印 Lena		提取出的水印图像	

由上述数据分析：在嵌入的方式效果上，算法二的要比算法一的好一些，因为算法二是选择在低频区的邻域像素平滑区。但是两者算法的不可见性都很好，因为都有在一般界限 30db 以上，人眼视觉效果比较好。

5.4 本章小结

对于我们所提出的算法一，我们在选取了适当的嵌入位置与强度后，可以得到良好的鲁棒性和不可见性。该方法是鉴于人眼的视觉模型 HVS，我们选取图像小波变换后的高频部分进行嵌入，在进行分块 DCT 是为了适应于 JPEG 压缩以及中频系数值与嵌入强度相对影响。对于所选取的中频系数也是有一定的依据，按照 JPEG 的亮度量化表，因为我们所选的彩色图像的 I 分量就是该彩色图像的亮度分量，因此我们按照 JPEG 的亮度量化表来选取。

对于算法二，我们在综合了其对于各种攻击的鲁棒性后，是为改善其抗压缩能力而提出的，我们选的嵌入位置为二级小波的低频区，采用差值大小比较法得到前 3\*1024 个的像素，进行三次水印嵌入，取出概率大的作为提取水印的标准。我们在算法二中的系数调节方法和算法一的是差不多，整体与算法一的差距在于对于压缩鲁棒性的问题。

第六章 水印攻击实验测试和分析

6.1 算法一的水印攻击测试

6.1.1 不同测试图的不可见性（嵌入水印后）





# 华华华华

图 6.1 Lena 原图、Lena 嵌入后的图像、Baboon 原始图像、Baboon 嵌入后的图像  
和对应于上图所提取的水印图像

表 6.1 各个不同图像嵌入图像前后质量分析

	Lena	Sailboat	Pepper	Baboon	Barbara	Boats	Goldhill
PSNR(db)	35.2772	34.3003	34.7376	34.0760	33.3659	34.6003	33.4827
NC	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

**小结：**从上述的实验数据可以得出对于所测的彩色图像，本算法具有一定的通用性，对于水印的嵌入和提取，其拥有良好的不可见性。

## 6.1.2 抗剪切的性能分析

表 6.2 剪切攻击数据记录

攻击类型	中心	边缘	四分之一	一半
PSNR(db)	12.0170	9.8054	12.9119	10.4551
NC	0.8667	0.7428	0.8720	0.7089



图 6.2 四种剪切方式和对应于上图所提取的水印图像

**小结：**从上述的剪切攻击实验操作中，我们可以看出对于大面积的剪切，该方法仍具有一定良好的鲁棒性。

6.1.3 抗亮度变化的性能分析

表 6.3 亮度变化攻击数据记录

攻击类型	提升 1 档	提升 2 档	降低 1 档	降低 2 档
PSNR (db)	11.7122	9.1451	16.6499	15.3096
NC	1.0000	0.9968	1.0000	1.0000



华华华华

图 6.3 四种亮度变化方式和对应于上图所提取的水印图像

小结：该攻击的亮度变化档数由攻击软件的强度决定，强度的一半为一档，以此类推。从该实验数据中，我们可以看出，对于亮度的变化，其具有很好的鲁棒性，所提取的水印基本不受影响。

6.1.4 抗噪声的性能分析

表 6.4 噪声攻击数据记录

攻击类型	椒盐 0.1	椒盐 0.3	高斯 0.1	高斯 0.25
PSNR (db)	14.9384	10.2257	11.6484	9.1485
NC	0.9948	0.9170	0.9525	0.8535



华华华华

图 6.4 四种噪声添加方式和对应于上图所提取的水印图像

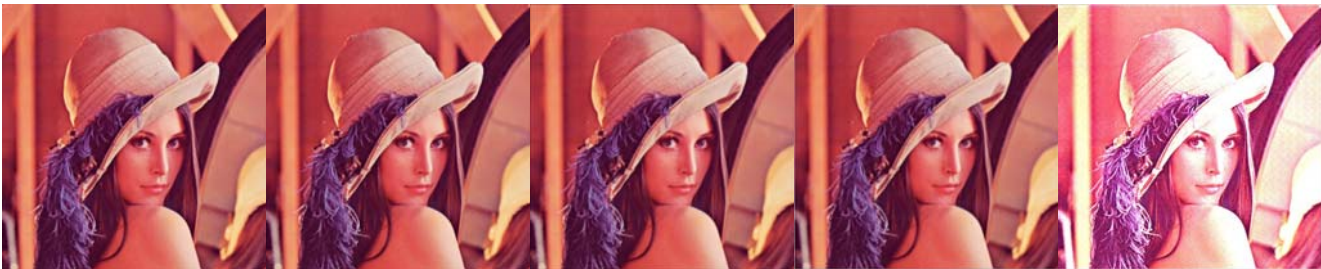
小结：从上述添加噪声的攻击实验中，我们可以看出对于添加噪声的攻击，

该算法具有良好的鲁棒性。在该攻击中，所添加的噪声强度很大，如上所示，但是提取出的水印仍具有比较好的质量。

6.1.5 抗滤波的性能分析

表 6.5 滤波攻击数据记录

攻击类型	中值 3*3	维纳 3*3	低通 3*3	均值 3*3	锐化 3*3
PSNR (db)	32.6611	35.0462	31.4466	30.5675	5.6708
NC	0.9844	1.0000	1.0000	0.9705	1.0000



华华华华华

图 6.5 五种滤波方式和对应于上图所提取的水印图像

**小结：**该算法攻击中，中值滤波的原理是将窗口所包含的像素点，取出其中间点的像素值分配给其他相邻的像素；维纳滤波的原理是是将窗口所包含的像素点，进行求其均方误差。从上述实验数据中，我们可以看出对于一般的滤波攻击，该算法仍具有良好的鲁棒性，尤其是对于维纳滤波而言。另外，我们的水印嵌入到图像的高频部分的中频系数中，理论上对于锐化攻击能够具有良好的鲁棒性；理论上对于平滑攻击的鲁棒性会稍微差点，因为我们所做的平滑攻击可视为低通滤波，这样会使得我们嵌入水印的高频部分丢失系数较低的一部分。从实验数据可以看出，锐化攻击的鲁棒性很好，对于平滑攻击其提取出的水印还是不错的，因为我们攻击的强度也挺大的。

6.1.6 抗 JPEG 压缩的性能分析

表 6.6 JPEG 压缩攻击数据记录

攻击类型	Q=0.9	Q=0.8	Q=0.65	Q=0.5
PSNR (db)	31.6115	31.3252	31.1795	31.5827
NC	1.0000	1.0000	0.9341	0.7843



图 6.6 四种压缩方式和对应于上图所提取的水印图像

**小结：**JPEG 压缩是我们对于图像压缩一种比较常见的压缩方法，在此对其做 JPEG 压缩攻击是从实际应用出发。从上述的实验数据可以看出，对于 JPEG 压缩，该算法鲁棒性在  $Q=0.5$  以上是比较好的，这归咎于我们嵌入的算法的局限性，因为我们嵌入是选取两个中频 DCT 系数，在大量的压缩后，这两个中频系数会发生比较大的变化，导致无法完整地提取出原始水印。

### 6.1.7 抗旋转攻击的性能分析

表 6.7 旋转攻击数据记录

攻击类型	旋转 (0.1)	旋转 (0.2)
PSNR (db)	34.8306	30.0659
NC	1.0000	0.6321

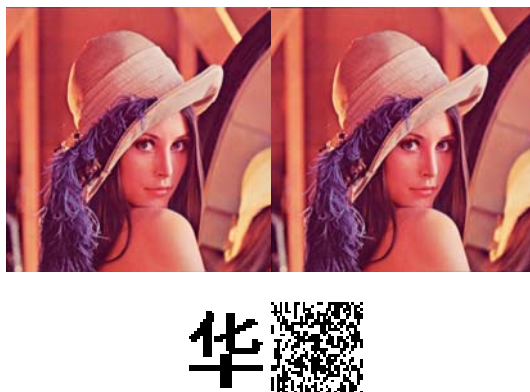


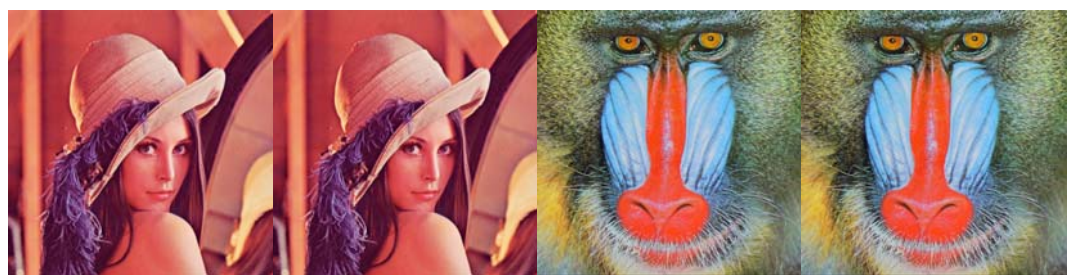
图 6.7 两种旋转方式和对应于上图所提取的水印图像

**小结：**对于一般的几何攻击，该算法都具有良好的鲁棒性，但是由于我们所做的嵌入算法是由两个中频值来决定，所以对于旋转，一旦其旋转到一定的角度使得这两个中频值的位置发生错乱，就会使得其抗旋转能力大大减小。

### 6.2 算法二的水印攻击测试



6.2.1 不同测试图的不可见性（嵌入水印后）



华 华 华 华

图 6.8 Lena 原图、Lena 嵌入后的图像、Baboon 原始图像、Baboon 嵌入后的图像  
和对应于上图所提取的水印图像

表 6.8 各个不同图像嵌入图像前后质量分析

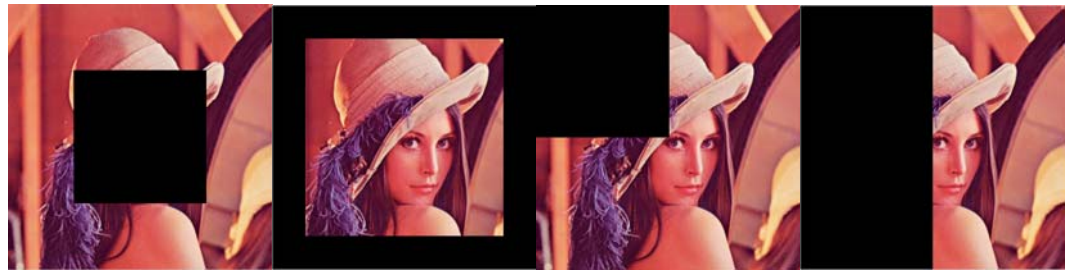
	Lena	Sailboat	Pepper	Baboon	Barbara	Boats	Goldhill
PSNR(db)	46.0578	43.2480	46.6536	41.1401	38.2513	43.1851	38.2351
NC	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

小结：从上述的实验数据可以得出对于所测的彩色图像，本算法具有一定的通用性，对于水印的嵌入和提取，其拥有良好的不可见性。

6.2.2 抗剪切的性能分析

表 6.9 剪切攻击数据记录

攻击类型	中心	边缘	四分之一	一半
PSNR (db)	6.3121	6.3060	6.3137	6.3081
NC	0.9751	0.6558	0.8947	0.7852



华 华 华 华

图 6.9 四种剪切方式和对应于上图所提取的水印图像

**小结：**从上述的剪切攻击实验操作中，我们可以看出对于大面积的剪切，该方法仍具有一定良好的鲁棒性,由于其嵌入是按照像素与相邻四个差值最低的位置进行选择，到第三次嵌入可能是差值比较大的位置，所以还是有一定的缺陷。

6.2.3 抗亮度变化的性能分析

表 6.10 亮度变化攻击数据记录

攻击类型	提升 1 档	提升 2 档	降低 1 档	降低 2 档
PSNR（db）	12.2697	7.2913	16.8371	12.2256
NC	1.0000	0.9633	1.0000	1.0000

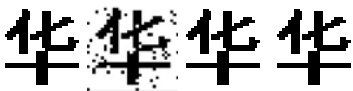
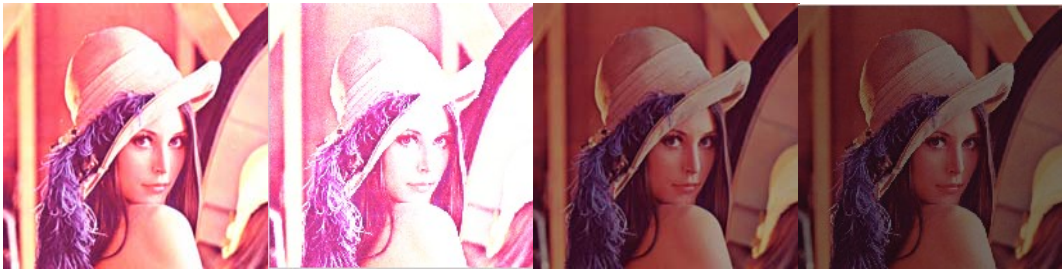


图 6.10 四种亮度变化方式和对应于上图所提取的水印图像

**小结：**从该实验数据中，我们可以看出，对于亮度的变化，其具有很好的鲁棒性，所提取的水印基本不受影响。

6.2.4 抗噪声的性能分析

表 6.11 噪声攻击数据记录

攻击类型	椒盐 0.01	椒盐 0.05	高斯 0.003	高斯 0.25
PSNR（db）	6.3213	6.3212	6.3213	6.3212
NC	0.9863	0.8538	0.973837	0.8575



图 6.11 四种噪声添加方式和对应于上图所提取的水印图像

**小结：**从上述添加噪声的攻击实验中，我们可以看出对于添加适当噪声的攻击，该算法具有良好的鲁棒性，因为是在低频部分嵌入的水印，所以其噪声分量不能太大，否则影响其不可见性，这一点比不上算法一的效果。

6.2.5 抗滤波的性能分析

表 6.12 滤波攻击数据记录

攻击类型	中值 3*3	维纳 3*3	低通 3*3	均值 3*3	锐化 3*3
PSNR (db)	6.3211	6.3212	6.3210	6.3210	6.3563
NC	0.9981	0.9994	0.9980	0.9974	0.9987



华 华 华 华 华

图 6.12 五种滤波方式和对应于上图所提取的水印图像

**小结：**该算法攻击的效果和算法一的是差不多的，因为这种算法是采用邻域像素来比较的，所以在中值滤波和均值滤波上效果会比较好。

6.2.6 抗 JPEG 压缩的性能分析

表 6.13 JPEG 压缩攻击数据记录

攻击类型	Q=0.78	Q=0.58	Q=0.38	Q=0.18
PSNR (db)	32.8830	31.7850	30.9281	29.0996
NC	0.9994	0.9974	0.9863	0.8558



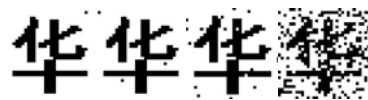


图 6.13 四种压缩方式和对应于上图所提取的水印图像

**小结：**JPEG 压缩是我们对于图像压缩一种比较常见的压缩方法，在此对其做 JPEG 压缩攻击是从实际应用出发。本算法与算法一差距最大的是抗压缩攻击的效果，由于 JPEG 效果的特点，我们将水印嵌入到低频分量，因此对于压缩攻击，我们的图像具有良好的鲁棒性，Q 值可达到 0.2 左右。

### 6.2.7 抗旋转攻击的性能分析

表 6.14 旋转攻击数据记录

攻击类型	旋转（0.1）	旋转（0.6）
PSNR（db）	35.4839	23.4226
NC	1.0000	0.8432

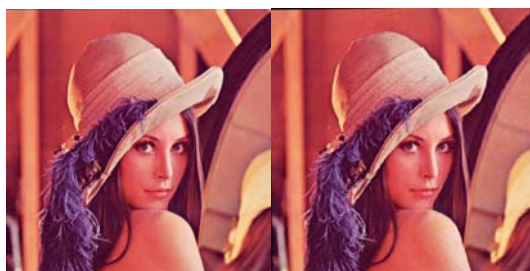


图 6.14 两种旋转方式和对应于上图所提取的水印图像

**小结：**对于一般的几何攻击，该算法都具有良好的鲁棒性，但是由于我们做的嵌入算法是由像素邻域关系来决定，所以对于旋转，一旦其旋转到一定的角度使得这像素关系的位置发生错乱，就会使得其抗旋转能力大大减小。

### 6.3 系统界面设计

为方便我们进行水印的操作，特制作了比较精炼的 GUI 界面，如下图所示：





图 6.15 基于 matlab 的人机界面 GUI

我们可以看出这个界面包含了我们所需的各种基本攻击和两种算法的嵌入提取功能，可以计算出提取出的水印的 NC 值，并且在攻击后的图像上有显示其相对应的 PSNR 值，用于图像质量的计算。本界面精简且操作方便。

#### 6.4 本章小结

本章对于水印的攻击测试，都是运用 Matlab 函数调用形式，从如上实验数据分析，可以看出：本算法一在抗剪切、亮度变化、噪声、滤波有良好的鲁棒性，而在抗压缩、抗旋转上没有很好的鲁棒性，这是由于本算法一嵌入方式中，嵌入到高频区，并采用两个像素点的比较，在旋转后会使得这两个点错位，检测时不能正确找出嵌入了水印的两个点，所以这是本算法的缺陷。但是，综合上述实验，对于一般的几何攻击和压缩攻击，该算法还是有很好的鲁棒性，尤其是对于剪切、噪声、滤波、亮度、压缩等；本算法二在抗剪切、亮度变化、噪声、滤波、压缩有良好的鲁棒性，而在抗旋转上效果不是很好，这一点与算法一的分析是一致的。

本算法二与算法一比较明显的差距在于抗噪声和抗压缩上。算法一的抗噪声能力强，这是由高频区的离散傅里叶变换的中频值决定的，而算法二嵌入在低频且用重复嵌入法，使得其抗压缩能力明显改善。

## 第七章 结 语

本次的毕业设计对我而言，其分量和研究的程度都比我之前学习的理论知识

和实践课程要来得详细和系统。对我个人而言，我对于图像和信号方面的比较感兴趣，同时鉴于我所报的研究生研究方向，我选择了冯老师的彩色图像水印系统这个课题。在最初看到这个课题时我非常感兴趣，但是当时正逢考研关键期，所以主要是确认下任务书的内容和我既要做的课题的安排。在寒假在家我借了好多相关的书籍回家查询阅读，但是当时自己一个人研究感觉挺盲目的，看的越多后面感觉挺乱的，有做了些笔记，但用处不大。回校后开始进行进一步阅读，并确认我要做的方案，写好了开题报告后其实我觉得那个方案到底行不行心里也没底。有一段时间在考研复试临考前我回家了，在家 7 到 8 天，我把 RGB 转 HIS，水印加密和初步的灰度水印、二值水印的嵌入、提取程序写出来，并做了一些测试，发现效果不是很好，但是整体一个设计框架出来了，对于当中所出现的问题也可以有针对性的一一找出，并配合老师的帮助解决。在开学到 4 月 15 日，除了毕设，考研的复试也是我比较重要的一部分，尤其是在刚开学出成绩那段。所以 15 日回校后，对于毕设的研究我更加有了紧迫感。其实，之前我主要是研究灰度水印的嵌入和提取，但是做到 25 日左右，我实在做不出来，可能是由于这方面水印的只是实在学得很少，又是一个人自己研究，挺吃力的。所以，我有多次请教老师，也希望能够得到研究生学长学姐的帮助，对于毕设，我并没有把它当做一项很被动的任务，我希望通过毕设我可以学习这一方面的知识，和别人共同探讨。但是迫于时间问题，虽然说我有一整个学期的时间，但是除了中间一段时间写出了整体的一个程序，但在 4 月 15 日之前，我更多的是准备复试，这个我之前有跟冯老师聊过，老师也挺能理解。因此，在回校后我加紧脚步。从 15 日一直研究到 25 日，我感觉灰度的都做不出来，有点担心时间不够，但是心态挺不好的，所以我回家了。可能回家后，整个人心态好一点了，所以着手先做二值水印的，回家的前三天其实也挺痛苦的，因为我还是在拼命做毕设，有时早上 7:30 起床就开了电脑，一直到晚上 10:30。经过多次尝试与阅读硕士文献，可以说最后做出的结果还是比较好的，所以我当时的第一想法就是先把程序完善，论文写好，之后有时间研究下灰度水印和 JND 部分（因为这部分我挺感兴趣的，但是二值中没有用到，我先不去研究它）。一直到现在，应该说程序基本可以确定下来，虽然说我的算法也并非很难，但是这也更让我懂得了自己这方面知识的缺陷，也更加大了学习不同水印的兴趣。

5月8号去老师那里验收程序时，冯老师讲到将水印嵌入到高频会使得其抗压缩能力减弱，最好嵌入到低频，于是回去后我研究了下，其实之前对于水印的研究自己蛮有心得，因此这次研究低频的主要是嵌入和提取算法。参考了一些文献后，写了程序，发现效果如期一样。

在打算将两种算法都写入论文后，我发现这个操作挺不方便，因此我特意做了一个GUI界面，这个界面之前是没有学过的，包括matlab都是我们自学的，所以刚开始做界面感觉挺难的，差点不想做，之后想到能多学就多学些，所以我一直研究了很久，终于做出来，界面可以在上述论文中找到。

水印研究到现在，我也非常感谢家人在这段时间的鼓励与开导。同时，在28日即将答辩前，我非常感谢冯老师对我的指导，不管从最初我选择了老师的课题，跟老师说我会在下学期好好做毕设，还是到期间程序的一次次调试，老师都能够非常细心地问我讲解。应该说，如果没有冯老师的帮助与鼓励，可能我到现在的毕设进度都赶不上答辩日期。所以，作为学生，我非常感谢冯老师一路的帮助与指导，也在此希望老师能够在自己的研究领域有进一步的发展！

## 参 考 文 献

- [01].Tirkel A Z, et al. Electronic watermark. Digital image computing [J], Technology and Applications, 1993, Macquarie University, 1:666-673.
- [02].Q. T. Jiang, The design of multifilter banks and orthonormal multiwavelets bass [J]. IEEE Trans SP, 1998: 3292-3304.
- [03].Pitas I. A method for signature casting on digital images [J]. IEEE International Conference on Image Processing, 1996, 3:215-218.
- [04].Voyatzis G, Pitas I. Embedding robust watermarks by chaotic mixing [J]. 13<sup>th</sup> International Conference on Digital Signal Processing, 1997, 1:213-216.
- [05].J. Lebrun, M. Vetterl: Balanced Multiwavelets theory and design [J]. IEEE Trans SP, 1996: 484-496.
- [06].Chiou-Ting Hsu and Jz-Ling Wu. Hidden Digital watermarks in images [J]. IEEE Trans. Image Processing, Jan 1999:128-131.
- [07].黄继武, Yun Q.SHI.DCT 域图像水印: 嵌入对策和算法[J]. 电子学报, 2004.4(4): 1-4.
- [08].易开祥.自适应二维数字水印系统[J].中国图象图形学报, 2001,5(6): 444-449.
- [09].牛夏牧,陆哲明,孙圣和.基于多分辨率分解的数字水印技术[J].电子学报,2000.11,28(8): 1-4.
- [10].Rong Pan, Youxing Gao, A New Wavelet Watermarking Technique [Z]. Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, Shanghai, P.R. China, June 10-14, 2002:2065-2069.
- [11].王向阳,杨红颖.DCT 域自适应彩色图像二维数字水印算法研究[J].计算机辅助设计与图像学学报,2004.2,16(2): 243-247.
- [12].Victor V. Hernandez Guzman, Mariko Nakano Miyatake, Hector M. PerezMeana. Analysis of a Wavelet-based Watermarking Algorithm [Z].Proceeding of the 14th International Conference on Electronics, Communications and computers,IEEE,2004,2074:128-132.
- [13].王炳锡, 彭天强著, 信息隐藏技术[M].国防工业出版社,2007.9: 58-60.
- [14].朱虹等.数字图像处理基础[M].科学出版社,2005.4: 1-265.
- [15].孙胜和等.数字水印技术及应用[M].科学出版社,2004: 1-713.
- [16].杨枝灵等.Visual C++数字图像获取、处理及实践应用[M].人民邮电出版社,2003.1: 1-613.
- [17].R.C.冈萨雷斯等著,阮秋琦等译,数字图像处理[M].电子工业出版社,2003: 1-473.
- [18].章毓晋.图象工程·上册,图象处理和分析[M].清华大学出版社,1993.3: 1-291.
- [19].章毓晋.图象工程·下册,图象理解与计算机视觉[M].清华大学出版社,2000.8: 1-272.
- [20].倪林.小波变换与图像处理[M].中国科学技术大学出版社,2010.6: 1-199.
- [21].李弼程,罗建书.小波分析及其应用[M].电子工业出版社,2003.5: 1-237.

- [22].钮心忻.信息隐藏与数字水印[M].北京邮电大学出版社,2004: 1-181.
- [23].张德丰.Matlab 小波分析与工程应用[M].国防工业出版社,2008.2: 1-329.
- [24].徐晨,赵瑞珍,甘小冰.小波分析·应用算法[M].科学出版社,2004: 1-181.
- [25].金聪.数字水印理论与技术[M].清华大学出版社,2008.8: 1-204.
- [26].杨榆.信息隐藏与数字水印实验教程[M].国防工业出版社,2010.1: 1-205.
- [27].陈紫达著;戴在平指导.小波变换与图像处理[D].华侨大学,2010.4.
- [28].陈紫达著;戴在平指导.基于分形编码的图像水印算法研究[D].华侨大学,2010.4.
- [29].廖家亮著;冯桂指导.二值文本图像数字水印算法研究[D].华侨大学,2010.4.
- [30].杨艺敏著;冯桂指导.自适应彩色图像水印算法研究[D].华侨大学,2008.12.
- [31].郑剑雄著;冯桂指导.基于 ICA 的数字水印盲算法及其在 DSP 上的实现[D].华侨大学,2006.12.
- [32].宋俊辉, 鲁骏著.彩色图像水印嵌入和提取模型研究[J].现代商贸工业, 2011 年第 17 期: 282-283.
- [33].王炳锡, 彭天强著, 信息隐藏技术[M].国防工业出版社,2007.9: 58-60.
- [34].Hsu, Chiou-Ting, Wu, Ja-Ling, Multi-resolution Watermarking for Digital Images[M], IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing. 1998:1097-1101.

## 后 记

本论文的处理对象是彩色图像水印，其不同于灰度图像，因为一般测试的彩色图像是 24bit-256 级，而灰度图像是 8bit-256 级，一般在 matlab 中撰写程序时其运用过程中更多的是采用数据的 double 类型和 uint8 类型，直接用于处理 24bit 的彩色图像显然不可行。在很多彩色水印方法中，可以采用分别提取 R、G、B 分量，再分别进行水印的嵌入，最后还原成彩色图时按照人眼视觉效果，设定合适的 RGB 分量的比重进行合成；另外一种方法是将 RGB 转化为 HSI，是水印和人眼视觉效果，选取合适的分量，比如饱和度 S 或者强度 I 分量进行水印的嵌入。由于前者的嵌入方式计算量大，而且三个分量都进行嵌入，一旦一个分量的不可见性不好就会影响整体的效果，再加上所设置的 RGB 分量的叠加比重不好确定，要根据经验值，比较麻烦，所以本算法采用 RGB 转 HIS 方式嵌入水印。

我们所使用的水印算法是通过在强度 I 分量进行一级小波分解的高频分量嵌入水印，这样一个好处是图像在嵌入强度较大的情况下其不可见性也可以很好，但是一个缺陷就是对于低通滤波和 JPEG 压缩攻击的鲁棒性没有优良的效果，这是因为低通滤波和 JPEG 压缩是针对滤除高频分量的，如果攻击强度很大的情况下，可能会使得我们嵌入水印的高频分量丢失，造成水印提取的效果不好。因为我们选择的是高频分量处嵌入，所以对于专门对高频分量处理的攻击，其鲁棒性理论上是不大好的；同样的，如果我们嵌入在低频分量，那么对于高通滤波和锐化攻击，其鲁棒性也不会很好，所以每种嵌入方法都有一定的局限性。但是如果我们能够将水印即嵌入到高频又嵌入到低频，那么其抗滤波和 JPEG 压缩的鲁棒性应该会好很多，但是鉴于本算法的实际可行性，我们在这里没有做类似进一步的处理。对于算法二的原理也比较简单，我们把水印嵌入到低频可以提高其抗压能力，同时，我们的嵌入算法也对其他的攻击有一定良好的鲁棒性。

希望后人能够针对这个思路，在高频和低频分量上同时做出水印的处理，提高其抗滤波和 JPEG 压缩的鲁棒性。

作者：许志伟  
2012 年 5 月 6 日

## 附录（英文翻译）

### 一种基于离散小波变换的稳健数字图像水印方案

#### 摘要

本论文提出了一种基于小波的图像水印方案，利用量化技术，水印被嵌入到变换载图的低频  $LL_n$  子带的所有子块中。从所有子块中提取去水印用以从已含水印的图像中提取出水印。已知了量化步长，水印维数，小波变换的水平后，在无需利用原始图像的情况下，即可提取出水印。预期算法的鲁棒性用如下攻击方式来测试：JPEG2000 和旧式 JPEG 压缩，增加椒盐噪声，中值滤波，旋转，剪切和缩放。提出预期实验结果，并进行讨论。

#### 1.引言

如今，由于数字媒体易被复制和修改，保护数字媒体的版权已变成一项重要的事宜。现今已提出了许多水印技术用以解决多媒体图像的版权保护问题。空域和变换域图像水印的两种普遍的方法。将水印嵌入到变换域通常有助于增加不可见性，安全性和鲁棒性。因此，至今的大多数图像水印方法都在变换域，并主要运用如下三种变换方式：DFT[1]，DCT[2]，DWT[3]。在水印提取方案中，水印算法通常分为盲水印和非盲水印两种。非盲水印在水印提取时需用到原始图像，而盲水印则不需要。

本论文框架如下。第二部分讨论了水印嵌入与提取的预期算法。第三部分是实验结果。

#### 2.预期的水印方案

现今，大多数水印算法都利用小波和量化技术；小波域水印利用改变图像的高频分量的方法（如压缩、低通滤波）来增加其鲁棒性。但由于水印的每一像素通常仅嵌入到载图的某一区域，故变换域无法抵抗类似于损坏整幅含水印图像的攻击。

大多数基于小波的水印方法把小波子带分成小的方块，然后通过量化子带系

数把水印的每一位嵌入到一个子块中，而非通过剪切攻击来增加方案的鲁棒性。这里提出了一种在每一子块中嵌入一位水印的方法。因此，目标水印的每一位都被存于每一子块的系数中用以保持水印固定的容量。

当含水印图像的一个区域被损坏时，通过合并提出的水印，利用水印图像的其他区域来提取整幅水印。图 1 显示了从一幅利用 JPEG2000 算法进行压缩的含水印图像中提取出的水印情况。

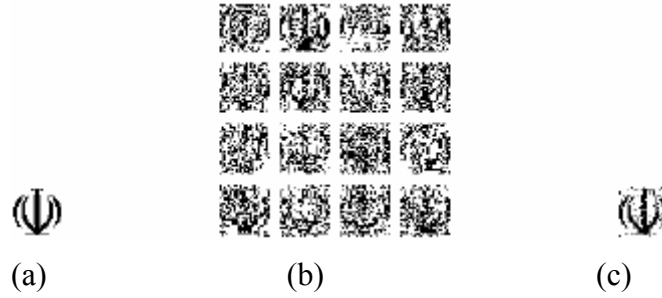


图 1. (a)原始水印 (b)压缩后提取出的水印 (c)合并的水印

## 2.1.水印嵌入算法

假设载体图像是一幅  $N \times N$  像素的灰度图，且目标水印  $W$  是  $M \times M$  的二值图像。

$$I = \{ I(i,j) \mid 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N, 0 \leq I(i,j) \leq 255 \}$$

$$W = \{ W(i,j) \mid 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq M, W(i,j) \in \{0,1\} \}$$

水印通过如下步骤嵌入：

**步骤 1：** 利用 DWT 将载图分成  $n$  阶，选出  $LLn$  子带用以水印的嵌入；

**步骤 2：** 将所选的子带分成  $M \times M$  的小子块  $B_k$ ，图 2 显示子块；

**步骤 3：** 按如下等式，通过量化系数将水印嵌入到所有子块中：

$$q_k'(i,j) = \begin{cases} mQ & mQ < q_k(i,j) \leq (m+0.5)Q \\ (m+1)Q & (m+0.5)Q < q_k(i,j) \leq (m+1)Q \end{cases} \quad W(i,j)=1$$

$$q_k'(i,j) = (m+0.5)Q \quad W(i,j)=0$$

$q_k(i,j)$  表示  $B_k$  子块的小波系数， $q_k'(i,j)$  表示量化后的相应系数； $W(i,j)$  是水印；

$m$  是一个整数， $Q$  是量化步长。

**步骤 4：** 最后将新的载图的系数值重构成含水印图像。

$N$  较小会降低算法的鲁棒性，但会增加执行速度，减小含水印图像的降阶。 $n$  较大同样会增大算法的鲁棒性，但会降低  $LLn$  域维数，从而减少子块 ( $K$ ) 的数量。 $N, M, n, K$  之间有如下可选的关系： $N = M \times K \times 2^n$



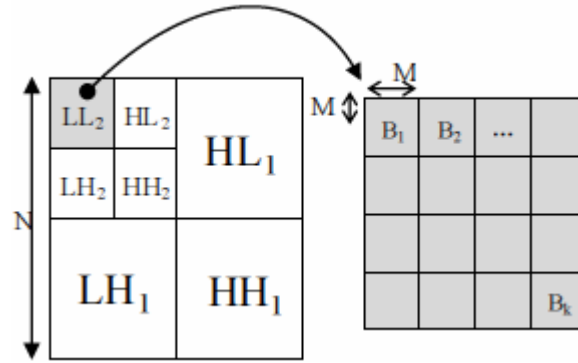


图 2. LL2 子带分解成子块

## 2.2.水印提取算法

尽管大多水印提取方案都需要原始图像，但此方法不用。为提取出水印，需用到载图大小，水印大小，量化阶大小(Q)，分解水平(n)，子块(K)大小。

水印由如下步骤提取出：

**步骤 1:** 利用 DWT 对含水印图像进行 n 阶小波分解，将 LLn 子带分成 M×M 的子块 Bk。

**步骤 2:** 用如下等式，将对应于每一子块(Bk)的水印 Wk 像素提取出来

$$W_k(i,j) = \begin{cases} 1 & (m-0.25)Q \leq q_k(i,j) \leq (m+0.25)Q \\ 0 & (m+0.25)Q < q_k(i,j) < (m+0.75)Q \end{cases}$$

$q_k(i,j)$ 表示子块 Bk 的小波系数，m 是一个整数，Q 是量化阶步长。

**步骤 3:** 若含水印图像完好，所提取出的水印 Wk 与嵌入的水印一样。但若对水印图像进行处理，所提取出的水印结果应通过选取合并来得到最终结果。合并按照如下等式[4]:

$$W(i,j) = \begin{cases} 1 & E(i,j) \geq \frac{1}{2}K \\ 0 & E(i,j) < \frac{1}{2}K \end{cases}$$

$$E(i,j) = \sum_{k=1}^K W_k(i,j)$$

$W_k(i,j)$ 表示从子块 Bk 中提取出的水印， $W(i,j)$ 表示合并的水印，K 是子块数。

## 3.实验结果

如下实验中，选择“飞机”和“胡椒”两幅 512×512 的灰度图像为测试图像。32×32 的二值“Allah”作为水印图像。图 3 是水印。DWT 中用 Haar 小波滤波器。小波分解水平(n)和子块(k)的数目分别为 2 和 16。



图 3. 用以嵌入的水印

预期水印算法由嵌入水印的透明性和鲁棒性来衡量；每次的结果由如下两部分来表述。

### 3.1. 图像质量

PSNR（峰值信噪比）广泛应用于衡量两幅图在像素上的差异性。在水印图像中用 PSNR 评价含水印图像的质量。对一幅  $N_1 \times N_2$  的像素图，其像素灰度值从 0（黑）到  $L_{\max}$ （白），PSNR 定义如下[5]:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{L_{\max} \times L_{\max}}{MSE}$$

MSE 表示平均方差，定义如下:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} [I_o(i, j) - I_w(i, j)]^2}{N_1 \times N_2}$$

$I_o$ 、 $I_w$  分别表示原始图像和含水印图像的灰度值。

此方案中，所选的  $Q$  是否合适至关重要。因为增大  $Q$  会增加含水印图像的可见性，但也会增加其鲁棒性。因此， $Q$  和 PSNR 是矛盾的。

但这种方法并非十分精确，我们无法按照 PSNR 值选择合适的  $Q$  值；含水印图像的下降  $Q$  值门限对于每幅图都是不同的，并且依赖于它的空域频率。图 4 显示了“胡椒”和“飞机”的原始图像和含水印图像。

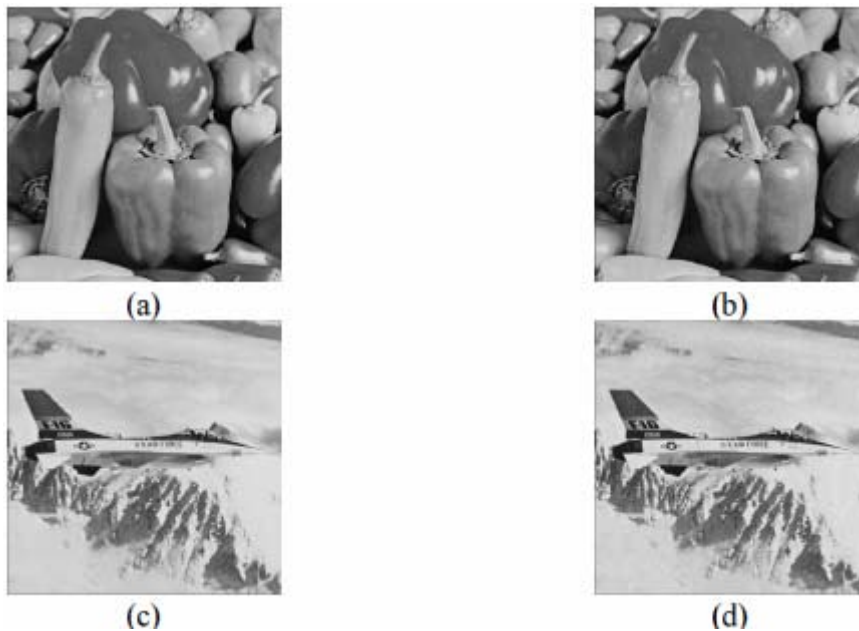


图 4. (a)原始“胡椒”图 (b)Q=35 的含水印“胡椒”图  
(c)原始“飞机”图 (d) Q=35 的含水印“飞机”图

### 3.2.处理后的图像鲁棒性

对于含水印图像进行一系列的损坏，并从损坏的图像中提取出水印。我们利用位校验率(BCR)来评价我们的预期方法，并按以下等式来计算：

$$BCR = \frac{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} W(i, j) \oplus W'(i, j)}{M_1 \times M_2}$$

$W(i, j)$ 和 $W'(i, j)$ 分别表示  $M_1 \times M_2$  大小的原始水印和提取出的水印。

预期水印方案中的鲁棒性由包括椒盐噪声，旋转，缩放，剪切，滤波，JPEG 和 JPEG2000 压缩在内的多种攻击来评价。表 1 表示在以上几种损坏下含水印图像的 PSNR 和 BCR 值。

表 1. 不同损坏处理后的含水印图像的 PSNR(dB)和提取出的水印的 BCR 值

载图	胡椒(Q=35)		飞机(Q=35)	
攻击	PSNR	BCR	PSNR	BCR
JPEG2000(比率=0.1bpp)	36.03	0.99	37.96	0.99
JPEG(Q=20%)	32.30	0.91	32.43	0.93
中值滤波(窗为 $7 \times 7$ )	30.12	0.91	26.76	0.95
椒盐噪声(浓度=0.05)	18.41	0.93	17.85	0.82
图像大小重置(比例=1/4)	27.84	0.98	26.14	0.97
图像旋转(角度=0.5°)	23.31	0.86	22.23	0.91
中心剪切(40%)	9.33	0.98	7.19	0.98
边缘剪切(45%)	9.29	0.95	5.97	0.97

数字图像一般在压缩后进行存储和传送。JPEG 在众多静态图像压缩方法中很普遍。含水印图像通过不同的压缩率进行 JPEG2000 和 JPEG 压缩。图 5(1)和 5(2)显示了图 4 分别在 JPEG2000(0.1bpp)和 JPEG(Q=0.2)下压缩的类型。图 5(b1)和(b2)用高 BCR 值(0.99)和(0.91)显示了相应的提取结果。

我们通过对含水印图像增加椒盐噪声来评价其鲁棒性。在此测试中增加的噪声是 0.05。图 5(a4)是图 4(a)在加椒盐噪声后的图像。图 5(b4)所示提取的高 BCR=0.93 的水印。在图 5(a5)中，尽管小波变换并非旋转不变，但是我们预期的方法可以从小幅度旋转提取出水印。图 5(b5)显示了对 BCR 值为 0.86 的含水印

图像进行 0.5° 旋转后提取出的水印。

正如所料，这种水印方法有很强的抗剪切鲁棒性；我们可以分别从 40% 的中心剪切和 45% 的边缘剪切后的含水印图像中提取出 98% 和 95% 的水印。图 5(a6) 和 (a7) 显示了这些剪切后的含水印图像，图 5(b6) 和 (b7) 显示了相应的水印。



图 5. (a1),(a2),(a3),(a4),(a5),(a6),(a7) 和 (a8) 所示的含水印图像是分别通过 JPEG2000 压缩, JPEG 压缩, 中值滤波, 添加椒盐噪声, 旋转, 中心剪切, 边缘剪切和缩放。(b1),(b2),(b3),(b4),(b5),(b6),(b7) 和 (b8) 分别是相对应的水印。

图像大小重置也是一种普遍的几何变换。含水印图像减小为原始大小的 25% 之后，减小的图像恢复为原始大小。图 5(a8) 所示为图 4(a) 减小并恢复后的类型，图 5(b8) 所示为提取出的高 BCR=0.98 的水印。

以上仿真与分析均证实了预期方案对一般几何变换、滤波、压缩有高的鲁棒性。但此方案无法很好地抵抗旋转和噪声攻击。在某些情况下，无法正确检测出水印。

## 4. 总结

本论文描述了一种基于 DWT 的静态图的数字水印方案。这种方法中，所嵌入的水印的提取无需用到原始图像，这种方案已证实了预期水印算法可以从已经压缩、滤波、剪切和缩放而降阶的含水印图像中提取出水印。虽然此算法对旋转的抵抗性不好，但它可以从经过剪切攻击而损失 35% 区域的含水印图像中完整地提取出水印。

## 参 考 文 献

- [1] Wei W.; Aiding M.; Xiao Bo C., “在 DFT 和一般随机变换中基于相位特点的强健图像水印方法”，第二国际图像与信号处理大会，页码 1-5, 2009 年 10 月.
- [2] Yigang Z.; Jia L., “基于 DCT 的彩色图像盲水印算法”，第二国际图像与信号处理大会，页码 1-3, 2009 年 10 月.
- [3] Dazhi Z.; Boying W.; Jiebao S.; Heyan H., “一种基于 DWT 的强健水印算法”，第二国际图像与信号处理大会，页码 1-6, 2009 年 10 月.
- [4] Soheili, M.R., “利用小波包的冗余水印”，电子和电气工程师协会/美国化学协会国际组织. 参阅“计算机系统与应用”，页码 591-598, 2008 年 3 月 31 日-2008 年 4 月 4 日.
- [5] Ghannam, S.; Abou-Chadi, F.E.Z., “利用小波包的图像水印的强健特性”，页码 83-87, 2008 年 11 月.
- [6] Tzu-Chao L., Chao-Ming L., “基于局部特点的数字图像小波版权保护方案”，信息科学期刊, 179 卷, 问题 19, 页码 3349-3358, 2009 年 9 月.