

# 数字水印技术在数字版权保护中的应用

郑玉平

2015 年 12 月

中图分类号：

UDC 分类号：

## 数字水印技术在数字版权保护中的应用

作者姓名	<u>郑玉平</u>
学院名称	<u>继续教育学院</u>
指导教师	<u>钟宏 副教授</u>
答辩委员会主席	<u>陈英 教授</u>
申请学位级别	<u>工学硕士</u>
学科专业	<u>计算机应用技术</u>
学位授予单位	<u>北京理工大学</u>
论文答辩日期	<u>2015 年 12 月</u>

# **Application of Digital Watermarks techniques in Digital Right Management**

Candidate Name : **Zheng Yuping**  
Faculty Mentor: **A. P. Zhong Hong**  
Chair, Thesis Committee : **Prof. Chen Ying**  
Degree Applied: **Master of Engineering**  
Major : **Computer application technology**  
Degree by: **Beijing Institute of Technology**  
The Date of Defence : **Dec , 2015**

## 研究成果声明

本人郑重声明 :所提交的学位论文是我本人在指导教师的指导下进行的研究工作获得的研究成果。尽我所知 ,文中除特别标注和致谢的地方外 ,学位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理工大学或其它教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的合作者对此研究工作所做的任何贡献均已在学位论文中作了明确的说明并表示了谢意。

特此申明。

签名：

日期：

## 摘要

随着互联网技术的发展和多媒体技术的普及，数字媒体走进了人们的日常生活，网络成为人们获取信息的主要媒介。如何保护版权所有者的合法权益不受侵害成为社会关注的热点。在此背景下，“数字水印”技术应运而生，数字水印技术是通过特定的算法将水印信息嵌入数字媒体信息中，它要求不影响原始信息的实际应用价值，又要求能在需要时提取出嵌入的水印信息。由于数字水印算法涉及多个学科领域，应用范围不断扩大，它已经成为国内外研究的热点。本课题在前人的研究基础上，提出一种新的数字水印算法。本文所做的工作如下：

本文首先介绍了数字水印技术的研究现状及基础知识，包括数字水印的概念、特性、分类、应用领域以及常见攻击操作等。在数字水印系统的数字水印处理模块利用 Arnold 变换对水印图像进行置乱处理，结合 DCT 变换、人类视觉系统特性，确定嵌入强度因子，动态调整嵌入强度，提出了一种自适应算法。在 MATLAB 平台下对算法进行仿真验证。论文最后还提出了下一步研究工作的方向。

**关键词：**数字水印技术，DCT，Arnold 置乱，HVS，自适应

## **Abstract**

With the development of Internet technology and the popularization of multimedia technology, digital media has come into people's daily life. The network has become the main medium for people to obtain information. How to protect the legitimate rights and interests of the copyright owner is not subject to infringement of social concern. Under this background, the digital watermarking technology emerged, the digital watermarking technology is embedded in the digital media information through a specific algorithm, which requires no impact on the actual application value of the original information, but also the need to extract the embedded watermark information. As the digital watermarking algorithm involves many subjects, the application scope is expanding, it has become a hot spot of domestic and foreign research. In this paper, a new digital watermarking algorithm is proposed based on the previous studies. The work done in this paper is as follows:

This paper first introduces the research status and basic knowledge of digital watermarking technology, including the concept, characteristics, classification, application fields and common attacks. In the digital watermarking system, the watermarking image is scrambled by Arnold transform and the DCT transform and the human visual system characteristic. Simulation and verification of the algorithm based on the MATLAB platform. At the end of the paper, the next step is also proposed.

**Key Words:** Digital watermarking technology, DCT, Arnold scrambling, HVS, adaptive

# 目录

第 1 章绪论 .....	1
1.1 研究背景和意义 .....	1
1.2 数字水印技术国内外研究现状 .....	3
1.3 数字版权保护系统国内外研究现状 .....	5
1.4 论文主要研究内容和结构 .....	6
第 2 章 数字水印技术相关理论 .....	8
2.1 数字水印概论 .....	8
2.1.1 数字水印的定义及特性 .....	8
2.1.2 数字水印的分类 .....	8
2.1.3 数字水印的主要应用领域 .....	9
2.2 数字水印技术基本原理 .....	10
2.3 经典的数字水印算法 .....	11
2.3.1 空域算法 .....	11
2.3.2 变换(频)域算法 .....	12
2.3.3 其它算法 .....	13
2.4 数字水印的攻击 .....	14
2.5 数字水印评价体系 .....	15
2.5.1 不可感知性 .....	16
2.5.2 鲁棒性 .....	17
2.6 编程仿真平台——MATLAB 介绍 .....	17
2.6.1 MATLAB 优点介绍 .....	17
2.6.2 MATLAB 函数介绍 .....	18
2.7 本章小结 .....	19
第 3 章 基于 DCT 的数字图像水印方案 .....	20
3.1 系统功能模块 .....	20
3.2 数字水印系统基础框架 .....	20
3.2.1 水印的生成 .....	21
3.2.2 水印的嵌入 .....	21
3.2.3 水印的提取检测 .....	22
3.3 水印算法 .....	23
3.4 人类视觉系统及 WATSON 模型 .....	23
3.4.1 人类视觉系统 .....	23
3.4.2 Watson 模型 .....	24
3.5 本章小结 .....	25
第 4 章 基于 DCT 的数字水印算法的改进 .....	26
4.1 现有 DCT 算法描述 .....	26

4.2 基于 DCT 水印算法的改进.....	27
4.2.1 改进思路 .....	27
4.2.2 对水印进行置乱处理 .....	28
4.2.3 水印嵌入算法 .....	29
4.3 算法实现.....	33
4.3.1 水印的嵌入 .....	33
4.3.2 水印的提取 .....	33
4.3.3 水印的检测 .....	34
4.4 本章小结.....	34
第 5 章 改进算法的仿真及检测结果 .....	36
5.1 测试要求.....	36
5.2 实验测试及结果分析.....	36
5.2.1 二值图像作为水印进行测试分析 .....	36
5.2.2 随机序列为水印进行测试分析 .....	39
5.3 本章小结.....	41
结论 .....	42
参考文献 .....	44
致谢 .....	42



# 第 1 章绪论

## 1.1 研究背景和意义

随着信息技术的飞速发展，网络成为当下人们获取信息的主要媒介。通过网络，人们可以很便捷的获取如电子书、图片、视频、音乐等数字媒体内容。数字出版和数字阅读的出现和发展在影响着人们的生活。一方面网络使得数字内容的传播成本降低、便捷性提高，人们突破了地域限制，可以很方便的通过互联网传递信息或者获取自己所需的多媒体内容。中国新闻出版研究院发布的第八次全国国民阅读调查显示，2010年，在我国 18 至 70 周岁成年人中，数字阅读人群达到 2.525 亿；另一方面网络也为数字内容的安全性带来了隐患，数字内容的特殊性使得不法分子可以用很低的成本获取未经授权的信息，而一旦发生侵权行为，也很难进行取证。如果忽视数字作品的版权保护，不仅会使作者和出版商的合法权益受到侵害，更会影响数字出版业的健康发展。美国唱片工业协会发布的报告表明侵权和盗版每年会给全球造成几十亿甚至上百亿的损失。近年来国内出现的数字版权纠纷案件，如：2008 年中文在线状告“诺亚舟”侵权、2009—2011 年中华书局诉汉王科技侵权、2010—2011 年盛大文学诉百度侵权，2012 年书生网络诉盛大文学侵权等，这样的数字版权纠纷，几乎在数字出版产业大发展的同时就进入了爆发状态。据最高人民法院统计，2010 年全国地方法院共新收著作权案件 24719 件，比 2009 年增长 61.54%，而多数是数字版权纠纷。这表明数字作品的版权保护已成为数字出版行业内关注的热点问题<sup>[1]</sup>。《国家中长期科学和技术发展规划纲要》强调，“保护知识产权，维护权利人利益，不仅是我国完善市场经济体制、促进自主创新的需要，也是树立国际信用、开展国际合作的需要”。《国家“十一五”文化发展规划纲要》中，“数字版权保护技术”作为重大文化技术专项被列入科技创新的重点<sup>[2]</sup>。数字网络环境下的版权保护需要法律、技术双管齐下，法律是版权保护的根本，技术是版权保护的手段<sup>[3]</sup>。目前，国内数字版权保护主要还是依据《著作权法》、《著作权法实施条例》、《著作权集体管理条例》，以及《信息网络传播权保护条例》对著作权进行保护，而许多法律法规的条款落后于实际数字出版产业发展，亟待修订完善，对于数字版权和数字出版相关条例的解释仍有待完善。我们不仅要用法律追究不法分子的盗版行为，更应该合理的利用技术手段防止盗版行为的发生。

本人是北京市实验职业学校出版与发行专业教师，该专业学生将来会在出版行业从事排版、校对、编务管理、发行等工作，维护作者及出版商的合法权益是他们必须具备的职业道德。在实际工作中，深刻的认识到单纯的依靠数字版权保护相关法规不

能从根本上解决目前存在的对数字内容的非法复制、篡改等侵权问题，必须利用一定的技术手段对数字版权加以保护。

最初是利用传统的信息加密技术进行数字版权保护。此技术基于密码编码学和密码分析学理论，对信息进行加密处理，使之变成无意义的密文，从而对信息内容加以隐藏，密钥是此技术的关键因素，即使加密文件在传输过程中被非法拦截，密钥的存在也能保证攻击者无法正确解密，从而实现保护文件的目的。然而单纯的利用此技术进行数字版权保护存在许多不足，如：

（1）加密技术只能实现文件从发送到接收过程中进行保密，当接收方解密后，文件就变成普通文件，不能有效的防止盗版。

（2）一旦获取了解密密钥，就能对内容进行修改，在发生版权纠纷时，也无法进行考证。

（3）为保证加密的强度，加密技术中的大部分加密算法要利用复杂的数学方法来实现，加密与解密过程的运算量不断加大，实时性难以得到保证。并且，当下随着处理器性能的不不断提升，单纯的通过增加密钥长度来保证可靠性的方法不再可靠。

（4）对需要通过网络传播的数字媒体文件进行加密会使得其因观赏性降低而失去交流的意义。

（5）文件加密后形式会变成一堆随机乱码，这种改变更容易引起攻击者的注意和攻击。

基于以上问题，信息隐藏技术应运而生并得到快速发展。该技术主要研究如何把机密信息隐藏于公开信息中，通过传输公开信息来传递机密信息。在传输过程中人们感知的是公开信息，若出现所有权纠纷，可以提取机密信息进行认证判定。

数字水印技术<sup>[4]</sup>是信息隐藏技术的一个重要分支，它的出现为数字作品的版权保护和盗版行为的追踪提供了有效保证和依据。1993 年正式提出后即成为关注和研究的热点，目前其研究成果已应用于数字版权保护、拷贝保护<sup>[5]</sup>、盗版跟踪、信息隐藏和隐藏通信、隐式注释、完整性保护、认证和篡改检测、商务交易中的票据防伪、广播监控等方面。数字水印技术通过信息技术处理将版权信息、认证信息等作为数字水印嵌入到原始数字内容(音频、视频、图片、文档、软件等)当中，不影响原始数字内容的使用价值，也不容易被感知到。通过恢复和检测被嵌入的水印信息，可以鉴别信息的失真情况，确认是否被篡改，从而为版权保护提供有效证据。如果水印丢失，水印系统会失效。作为一种数字版权保护技术，水印系统中必须能体现数字水印的安全

性、鲁棒性、不可感知性的特点。

到目前为止，数字水印技术虽然是研究的热点，但由于其横跨数字信号处理、图像处理、密码学应用、算法设计等多学科的学术特点，其学科理论体系还要不断完善，研究的深度和广度还有待挖掘。不断加深对数字水印技术的研究，能使其在广泛的应用领域中发挥更大的作用。所以结合数字内容的特点，研究数字水印技术，探讨合适有效的版权保护系统是十分有必要的，这对于有效地保护版权人和出版商的权益、促进数字出版行业积极健康的发展有非常重要的意义。

## 1.2 数字水印技术国内外研究现状

数字水印的概念是由 Tirkle<sup>[6]</sup>等人于 1993 年提出的。Van Schyndel<sup>[7]</sup>等人于 1994 年在 ICIP(International Conference on Image Processing)上发表了题为“ A digital watermark ”的论文，这是第一篇在主要会议上发表的关于数字水印的文章，从此，数字水印受到了越来越多的关注，并迅速发展成为信息安全领域中一个新的研究热点和方向<sup>[8]</sup>。

在研究初期，许多国家的大公司和企业甚至政府机构，如美国财政部和军方，都投入了大量的财力、物力对数字水印这一新兴技术进行研究。大量的财力、物力的投入使得数字水印技术的发展速度加快，在一些对信息安全、密码学和信息处理领域存在重要影响的国际会议上不断把数字水印技术的讨论进行深入。许多高质量的论文在国际上发表，数字水印技术的专刊或专题新闻报道<sup>[9]</sup>在国际权威期刊如《IEEE 图像处理》、《IEEE 会报》、《IEEE 通信选题》、《IEEE 消费电子学》等出版。

国际上知名的大学，如英国的剑桥大学，美国的麻省理工学院、南加州大学、普林斯顿大学、普渡大学，瑞士洛桑联邦工学院，和一些研究机构，如微软美国研究院，朗讯尔实验室，IBM，Intel，NEC 等<sup>[10]</sup>都先后投入到了数字水印技术的研究中，并在不同领域取得了巨大成果，有的已申请了数字水印方面的专利。

相对国外而言，国内对于数字水印技术的研究虽然起步较晚，但反应非常迅速，已经有相当一批有实力的科研机构投入到数字水印技术研究领域中来。从 1999 年北京电子技术应用研究所举行的全国信息隐藏学术研讨会至今已经成功举办了十二届，该会议不仅为致力于信息隐藏研究的专家学者提供了广泛的交流机会，也大大推动了我国信息隐藏技术的发展<sup>[11]</sup>。另外，数字水印技术也是国家自然科学基金、863 等项目的研究内容。我国的中国科学院、北京邮电大学、国防科技大学、清华大学、北方工业大学、上海交通大学、天津大学、中国科技大学、北京大学、北京理工大学、中

山东大学等知名学府和一些研究机构在数字水印技术的研究上都取得了一番成就。从总体上看,我国对数字水印技术的相关研究与世界水平同步,而且在研究思路上有独特之处。在中央广播影视作品数字版权管理论坛筹备的国家标准中,数字水印就是其中一个重要内容<sup>[12]</sup>。在国内有一些公司从事数字水印技术的研究及产品的研发,一些成果已经进入实用,如华旗公司已经成功在数码相机中应用数字水印技术,通过拍照时生成的数字水印的变化来判断照片的真实性,使相机具有防伪功能。

随着对数字水印技术研究的不断深入,数字水印的相关技术、概念、算法层出不穷。数字水印的算法主要分为空域算法和变换域(频域)两大类。

在空域有 Trikel<sup>[13]</sup>等人提出的最低有效位算法(LSB), Bender<sup>[14]</sup>等人提出的 Patchwork 算法, Voyatzis<sup>[15]</sup>引入混沌方法的水印算法, Wang<sup>[16]</sup>等人提出的基于对称交换算法和编码交换算法。

在变换域,目前比较典型的有由 Cox<sup>[17]</sup>等人提出的 DCT 域算法, Ruanaith<sup>[18]</sup>等人根据 Hayers 的理论<sup>[19]</sup>提出的基于 DFT 域的数字水印算法, Podilchuk 等<sup>[20]</sup>基于的合小波变换域的数字水印算法。还有一些变换域数字水印算法,是上述算法的改进及发展,如 Huang<sup>[21]</sup>等人提出的将 SVD 和 DCT 变换结合的算法, Zhao<sup>[22]</sup>等人提出的针对静止图像和局部小波变换混沌数字水印的算法, Santa 等人<sup>[23]</sup>提出的基于 DWT 的数字图像版权保护的数字水印算法等。

目前国内外已经使用数字水印技术用于版权保护,但已有的水印算法和水印系统也存在一些问题:

(1) 现有的水印算法很难把所有的水印特性达到较好平衡,在一定程度上限制了实现实际应用。

(2) 伴随信息技术的飞速发展,网络中的多媒体格式越来越多,大多数的数字水印系统对格式有特定要求,这不利于多媒体作品的传播及系统用户的使用。

(3) 一些数字水印系统要求用户必须下载安装软件,为系统的广泛应用带来不便。

所以我们需要改进已有算法,力求在水印各特性之间达到较好平衡,能够更好的在实际中应用。

从数字水印的研究现状可以看出,数字水印技术是近年来发展起来的一项重要的基础研究,但尚未形成完整的学科理论体系与评价标准。研究大多处在应用基础理论研究和应用技术开发阶段,但通过研究改进出更有效的数字水印算法,在水印方案中进行各环节的尝试,能为数字水印的发展积累更多的经验,从而促进数字水印技术在

更多的应用领域取得更为显著的成果。

### 1.3 数字版权保护系统国内外研究现状

数字版权保护系统(DRM) 是对数字化内容进行知识产权保护与管理的工具。它以数字加密技术为基础, 综合一系列软硬件技术, 用以保证数字内容在整个生命周期内的合法使用, 平衡数字内容价值链中各个角色的利益和需求。它通常包括对软件、电子文本、数字图像、音频和视频等媒体文件的保护<sup>[24]</sup>, 在信息安全保护和版权保护等领域都具有非常重要的作用。数字版权保护技术是随着 20 世纪 90 年代计算机技术和网络技术的快速发展而兴起的, 自产生以来就得到了多方关注。

在国内, 数字版权保护技术处于领先地位的是方正和书生公司。方正的 Apabi 数字版权保护技术一直走在国内前列, 且已经形成一个完整的系统。Apabi 系统整套方案的核心是版权保护, 在其中采用了 168 位的加密。在 Apabi 系统中, 主要有四种支柱型产品: Apabi Maker、Apabi Rights Server、Apabi Retail Server 和 Apabi Reader。Apabi Maker 可以将多种格式的电子文档转化成能完全保留原文件中字符和图象的所有信息的 Ebook (图像+文字) 的格式, 不受操作系统, 网络环境的限制。用在出版社端服务器的 Apabi Rights Server 实现电子图书加密和交易的安全鉴定。Apabi Reader 是用来阅读电子书的工具, 通过浏览器, 可以在网上买书, 读书, 下载, 建立自己的电子图书馆, 实现分类管理。书生公司一直紧跟国际数字版权保护技术的发展, 自主研发了一套完整的 DRM 技术核心, 成为与方正公司并驾齐驱的 DRM 技术厂商。书生公司的 SureDRM 数字版权保护系统以安全和加密技术为基础, 包括版权描述语言, 身份标识系统, 设备标识绑定技术等。SureDRM 为书生各种产品包括文档共享管理系统, 数字图书馆系统, 公文服务器等提供了文档保护的技术基础。作为一套整体解决方案, SureDRM 提供不同安全级别, 不同粒度, 不同形式的版权管理机制, 既有离线的数据绑定, 也有在线的数据 DRM。SureDRM 的开放的版权描述接口支持 XrML 等技术标准。SureDRM 提供对各种应用数据和应用系统自身的版权保护, 支持对各种数字媒体, 文字, 图形, 图像, 流媒体等的保护。

在国外, 典型的数字版权保护系统有: Microsoft 的 Digital Asset Server 版权保护方案, 主要是针对于对电子图书的在线销售与在线阅读, 该系统是一种非常紧密的集成, 包括服务器端的 Digital Asset Server(DAS)、客户端的 Microsoft Reader 和微软的 Passport 用户标识和注册系统。Apple 公司的 FairPlay 系统, 主要针对数字音频进行版权保护, 受此系统保护的文件最多只能在五台电脑上播放, 所购买的相同曲目只能刻

录在七张 CD 上；IBM 的 EMMS 保护方案是全面的电子媒体发行和数字授权管理系统，具有开放式体系结构。EMMS 工具将使零售商或最终用户可以将被保护的内容发送给多个用户(比如将音乐作为附件发送给多个接收者的电子邮件上)。最初的接收者拥有全部的使用权，但是如果相同的音乐文件或电子书籍被再次发送的话，下一个接收者只有使用这些数据的有限权力。从盗版音乐站点下载或通过电子邮件传送的歌曲拷贝可能不能完整地播放，或者只能播放一次，或者完全不能播放。这项技术还使发布者可以根据接收者的地理位置在同一个歌曲或图书文件上附加上不同的权力。

虽然数字版权保护技术得到了广泛研究，存在一些典型的应用系统，但在应用过程中进行数字版权保护的同时还存在一些问题<sup>[25]</sup>：

(1) 用户使用不便。用户需要经过繁琐的验证申请，才能通过指定的播放器对媒体内容进行使用或观看，很容易给用户带来不满，从而可能拒绝使用该系统。另外现有的系统一般都只能支持某种特定格式，而现实中大部分用户都要求能支持多种不同的媒体和格式，对格式的限制使得用户使用不便，同时也限制了产品的普及应用。

(2) 服务器端压力过大。多媒体文件需要占用较大的内存，上传、下载都需要较高的带宽，会使得服务器端带宽资源紧张，压力过大。

(3) 产品相互不兼容。大多数研究机构或公司都是为满足部分人群的需求开发数字版权保护系统，并没有形成较好的规范，各系统之间不能很好的进行信息交换。目前此问题已经引起了人们的重视，已经有部分组织和研究机构对数字版权保护技术的互操作性和规范性进行研究，并做出了一定的贡献。

## 1.4 论文主要研究内容和结构

本文首先介绍数字水印技术的相关概念和典型算法，在此基础上，对面向数字图像的基于 DCT 变换的水印传统算法进行改进，并利用 MATLAB 软件搭建一个数字水印系统，本文大致结构如下：

第一章为绪论，介绍论文的研究背景，数字水印技术的研究现状和数字版权保护系统的研究现状，然后结合现状，分析数字水印技术改进的方向。最后描述论文的结构安排。

第二章介绍数字水印技术的相关基础理论研究，主要包括数字水印技术的定义、特征、分类、应用领域和发展前景、水印的基本框架、典型算法、性能评估体系，水印常见攻击方法，此外还对 MATLAB 软件及常用函数进行了介绍。

第三章为基于 DCT 的数字图像水印方案，对水印系统功能模块和流程进行具体说

明。

第四章为基于 DCT 的数字水印算法的改进，首先对传统的 DCT 算法进行介绍，之后提出了改进思路及具体作法。

第五章为实验测试，利用 MATLAB 软件对提出的算法进行编程仿真，对结果进行分析，对算法性能进行评估。

## 第 2 章 数字水印技术相关理论

### 2.1 数字水印概论

#### 2.1.1 数字水印的定义及特性

数字水印技术，是指将数字、序列号、文字、图像标志等特定信息（即水印）嵌入到数字媒体内容中，以起到版权保护、秘密通信、数据文件的真伪鉴别和产品标识等作用<sup>[26]</sup>。嵌入的这些信息不影响原数字媒体的欣赏价值，并且不易被提取或修改。一旦发生所有权纠纷时，可以把水印提取出来，进行检测，从而证明版权的归属。不同情况下对数字水印的要求不同，一般认为嵌入的数字水印应该具有如下特征：

##### （1）鲁棒性

数字内容中嵌入的水印，应能经受各种人为的或无意的攻击，如内容篡改、滤波、图像压缩、裁剪、位移等。数字内容中嵌入的数字水印在经过这些处理后，已产生部分失真，但要求还能提取识别出来。

##### （2）安全性

对于版权保护的目标而言，水印的安全性是如下定义的：在非法者获得部分信息的条件下经过非法篡改操作，仍可以准确提取并验证数字水印，为产权维护或者完整性维护给出确定的结果<sup>[27]</sup>。

##### （3）不可感知性

也称隐蔽性，指数字内容在嵌入水印后质量无明显下降，即数字水印不影响人类对原作品的感知。

##### （4）嵌入容量

指原数字内容在保证表现形式的前提下能加载的数字水印的大小。一般要将作者信息或产品的认证信息嵌入其中。这样在发生版权纠纷时，才能提取识别出水印，达到有效的保护版权的目的。

#### 2.1.2 数字水印的分类

按照不同的分类标准，数字水印可以分为不同类型，常见的分类方法如下：

（1）按水印使用的目的不同，可以将水印分为鲁棒水印、易碎水印和半易碎水印。即使嵌入鲁棒水印的数字内容遭到一定程度的破坏，水印也能检测出来。鲁棒水印主要应用于版权保护，脆弱水印和半脆弱水印主要应用于认证。嵌入脆弱水印的数字内容发生任何形式的改变，就检测不出水印，半脆弱水印可以接受一定的失真，只



有当数字内容被恶意篡改时，水印检测不出来。

(2) 按水印是否可被感知，分为可见水印和不可见水印。可见水印一般用于明确标识版权，如电视台画面上显示的台标。不可见水印隐藏于数字内容中，不影响数字内容的视觉效果，在需要时提取出来作为证据保护版权所有者的合法权益。

(3) 按水印嵌入的数字内容格式不同，分为文本水印、图像水印、音频水印和视频水印等。

(4) 按水印检测过程，分为明文水印和盲文水印。需要原始数字内容和原始水印进行检测的为明文水印。检测过程中不需要原始数字内容，也不需要原始水印的为盲文水印。

(5) 按水印的嵌入位置，分为空间域水印和变换域水印。空间域水印的嵌入是通过修改图像的像素值来完成。变换域水印首先对数字内容进行某种变换，然后通过修改变换系数来嵌入水印。

除此之外，数字水印还有一些其他的分类标准。这些水印不是并列存在，而是相互重叠的，当然数字水印的分类结果会随着分类标准的不同发生变化。

### 2.1.3 数字水印的主要应用领域

随着研究的不断深入，数字水印技术的研究成果初步应用于不同的领域，主要有以下几个方面：

#### (1) 数字版权保护

在保证不影响数字内容质量的前提下，嵌入含有版权信息的水印，在受到攻击后，可以提取嵌入的水印，证明版权的所有情况。在实际应用中已取得了一些成果，如常用软件 Photoshop 中集成的数字水印插件。此应用领域要求水印具备较好的鲁棒性、隐蔽性、安全性。

#### (2) 拷贝保护

DVD 拷贝保护技术是此项应用的典型实例，为了对 DVD 拷贝保护，通过对 DVD 设置拷贝权限，在 DVD 数据中加入水印信息，使得 DVD 机可以根据水印信息来断定是否合法和是否能拷贝，从而保护制造商的正当权益。

#### (3) 票证防伪

受高质量输入、输出设备发展的影响，伪造货币、支票和证书等变得比较容易，国外已经对用于票证防伪的数字水印技术进行研究，需要时可以快速的通过判断水印的有无辨别真伪。

#### (4) 内容认证

也叫真伪鉴别，一般在电子印章和电子票据中采用脆弱水印来检验其真实性和完整性。

#### (5) 盗版跟踪

在数字版权保护中，我们希望防止非法复制和篡改数字作品，同时也希望在盗版作品中根据提取出的指纹来追踪非法拷贝传播者的信息，从而维护版权所有者的正当权益。

#### (6) 广播监控

为统计视频、音频节目播出的时间地点，在需要检测的片断播出前，嵌入唯一的数字水印作为标识，通过分析其中的水印来统计播出的时长及地点。

## 2.2 数字水印技术基本原理

一个完整的水印系统<sup>[28]</sup>包括水印的生成、嵌入，检测和提取。所有的水印系统都包含这些基本模块，如图 2.1 所示：

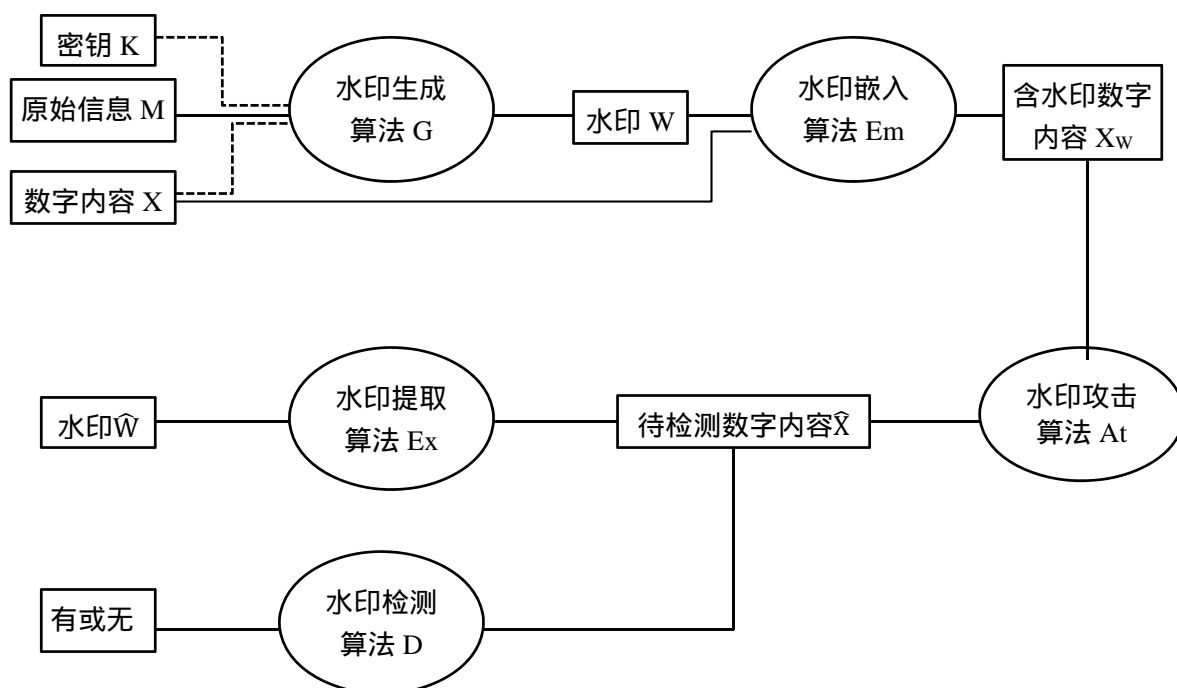


图 2.1 数字水印系统基本框图

水印的基本框架可定义为九元体  $(M, X, W, K, G, Em, At, D, Ex)$ ，分别解释如下：

$M$ ：所有可能原始信息的集合。

X : 要进行保护的数字内容的集合。

W : 水印信号的集合。

K : 水印密钥的集合。

G : 水印生成算法。即  $G : M \times X \times K \rightarrow W$  或  $W = G(M, X, K)$ , 需要注意的是 X 不一定参与此过程。图中虚线表示此过程不是必须参加的。

$E_m$  : 水印嵌入算法。即  $E_m : X \times W \rightarrow X_w$  或  $X_w = E_m(X, W)$ , 需要说明的是, 有时在嵌入算法中包含嵌入密钥以提高安全性。

$A_t$  : 水印攻击算法。即  $A_t : X_w \times K \rightarrow \hat{X}$  或  $\hat{X} = A_t(X_w, K)$ ,  $K$  为伪造的密钥,  $\hat{X}$  为攻击后的待检测的数字内容。

D : 水印检测算法。即  $D : \hat{X} \times K \rightarrow \{0, 1\}$  或  $D(\hat{X}, K) = \begin{cases} 1 & H_1 \\ 0 & H_0 \end{cases}$ ,  $H_1$  和  $H_0$  表示假设实验,  $H_1$  表示水印存在,  $H_0$  表示水印不存在。

$E_x$  : 水印提取算法。即  $E_x : \hat{X} \times K \rightarrow \hat{W}$  或  $\hat{W} = E_x(\hat{X}, K)$ ,  $\hat{W}$  表示提取出的水印。

## 2.3 经典的数字水印算法

随着数字水印技术研究的不断深入, 各种算法层出不穷, 这些算法很多是对具有代表性的典型算法进行改进, 熟悉传统算法是保证研究工作能继续深入的一个重要内容。以下对几种典型算法进行介绍, 并对其加以分析比较。

### 2.3.1 空域算法

初期人们对数字水印的研究大多是基于空域的, 即将水印信息直接嵌入到原始数字内容中。算法相对简单, 实时性强, 但鲁棒性差, 嵌入的水印信息量也不能太多, 否则影响人类对原数字内容的感知质量。早期典型的空域算法有 Van Schyndel 在 199 年发表的名为 “A digital watermark” 的论文中提到的最低有效位 LSB 图像水印算法<sup>[29]</sup>、Patchwork 算法<sup>[30]</sup>等。

#### (1) 最低有效位 (Least Significant Bit, LSB) 算法

此算法是把水印嵌入到图像中最不重要的像素位, 从而保证水印的不可感知性。此类算法优点是算法较为简单, 不可感知性好, 但由于把水印嵌入在最不重要的像素位, 水印的鲁棒性差, 水印信息容易在数据压缩、滤波等操作下损失。

#### (2) Patchwork 算法

此算法是通过改变图像数据的统计特性将信息嵌入到像素的亮度中。方法是随机选择  $N$  对像素点  $(a_i, b_i)$ , 通过调整这  $N$  对像素点的亮度, 改变分布中心, 但要使整个

图像的平均亮度保持不变。最后采用统计的方法来对水印进行检测。为了抵抗诸如如有损压缩以及滤波的处理,它将像素点对扩展成小块的像素区域(patch),增加一个 patch 中的所有像素点的亮度值,同时减少对应另外一个 patch 中所有像素点的亮度值<sup>[31]</sup>。该算法的优点是隐蔽性好,对 JPEG 压缩、剪切操作有一定的抵抗能力,能实现盲检测,不足是嵌入的水印信息量有限。

### (3) 文本水印算法

此算法主要是通过微调整文档结构,如调整字符间距,行间距或者改变字符特征等方法来嵌入水印<sup>[32]</sup>。对于此算法,非法攻击者可通过随机化处理字符间距、行距从而达到破坏水印的目的。此算法抵抗攻击能力差。

总之,空域算法的优点是算法实现简单,不足是嵌入的水印信息量少,水印鲁棒性较差。目前空域算法已经很少单独使用。

### 2.3.2 变换(频)域算法

变换域算法是通过修改数字内容的变换系数来完成水印嵌入过程。原数字内容首先进行一种特定的正交变换,嵌入空间对应的变换系数遵循一定的规则被修改、替换或交换。变换域算法可以嵌入较多的信息但不影响可感知的数字内容的质量,常用的变换域算法有离散余弦变换(DCT)、离散傅立叶变换(DFT)、离散小波变换(DWT)等。

#### (1) 离散余弦变换(DCT)

Cox<sup>[16]</sup>等人提出了最早的 DCT 域水印算法,其采用的方法是将整个图像划分为 8\*8 的块,然后对每一块进行 DCT,即离散余弦变换<sup>[33]</sup>。该算法首先将图像进行二维 DCT 变换,然后在适当的频率嵌入水印,最后进行二维 DCT 逆变换得到加入水印的图像。此算法具有较强的鲁棒性,安全性和不可感知性。

#### (2) 离散傅立叶变换(DFT)

离散傅里叶变换是复数变换,具有可分离性、平移特性、旋转特性、缩放特性和共轭对称性的性质,其中的可分离性可以使二维变换用两次一维变换实现,旋转、缩放和平移特性则是在傅里叶变换域涉及抵抗几何攻击数字水印算法的依据<sup>[7]</sup>。此算法水印抵抗压缩能力弱。

#### (3) 离散小波变换(DWT)

离散小波变换(DWT)具有多分辨分析特点,能充分反映人类的视觉特性,特别是 JPEG2000、MPEG—4 压缩标准等都采用了基于小波变换的方法,因而在小波变换域研究

水印是非常重要的。基于 DWT 的数字水印算法使得水印的嵌入变得更为灵活。

变换域算法具有易实现、计算简单的特点，并且充分结合人类感知特性，算法的不可感知性和鲁棒性强，但嵌入、提取水印操作复杂，嵌入的信息量不大，DFT 算法水印抵抗压缩的能力弱，DWT 算法复杂度大，所以本文中采用了 DCT 算法。

### 2.3.3 其它算法

除上述空域算法、变换域算法外，常用的数字水印算法还有压缩域算法、扩频技术、人类生理模型技术等。

#### (1) 压缩域算法

数字水印是在数据中隐藏信息从而达到版权保护、内容鉴别或数据保密的目的，而数据压缩是尽量去除冗余信息达到提高传输效率或节省存储空间的目的。可以说，二者是一对矛盾体。压缩域水印算法主要有 JPEG 压缩、MPEG 压缩、VQ 压缩三大类算。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 VCD 中有很大的使用价值。相应地，水印检测与提取也直接在压缩域数据中进行。

#### (2) 扩频技术

具有很强的抗干扰性是扩频技术的一个突出优点。在数字水印技术中，将原始数据的频域看作通信信道  $C$ ，水印看作将通过  $C$  的信号  $S$ ，各种有意、无意的攻击看作噪声  $N$ 。利用扩频技术原理，将水印分布在许多数据频域系数中，加入每个频域系数的信号能量很小且不可随意检测。然而，水印检测过程知道水印的位置和内容，它能够将许多微弱的信号集中起来形成具有较高信噪比的输出值，要破坏水印需要很强的噪声加入所有的频域系数中，但是，破坏水印的同时也造成原始数据质量严重下降。

#### (3) 人类生理模型技术

人类生理模型包括人类视觉系统 HVS(Human Visual System)和人类听觉系统 HAS(Human Audio System)。该模型不仅被多媒体数据压缩系统利用，同样可以供数字水印系统利用。它的基本思想是利用从模型中导出的 JND(Just Noticeable Difference)描述来确定数字内容(图像、声音、视频)的各个部分所能容忍的水印信号的最大强度，从而能够避免破坏人类对数字内容的感知质量，所以此技术具有较好的不可感知性和鲁棒性。

## 2.4 数字水印的攻击

水印攻击是伴随着数字水印技术的发展出现的，并且呈现多而杂的特点，这就要求数字水印系统具有较强的适应攻击能力，因此对数字水印的攻击进行研究是非常必要的。水印攻击的目的就是使嵌入原始数据内容的水印在检测时不能正常检测或恢复，攻击模型如图 2.5 所示。

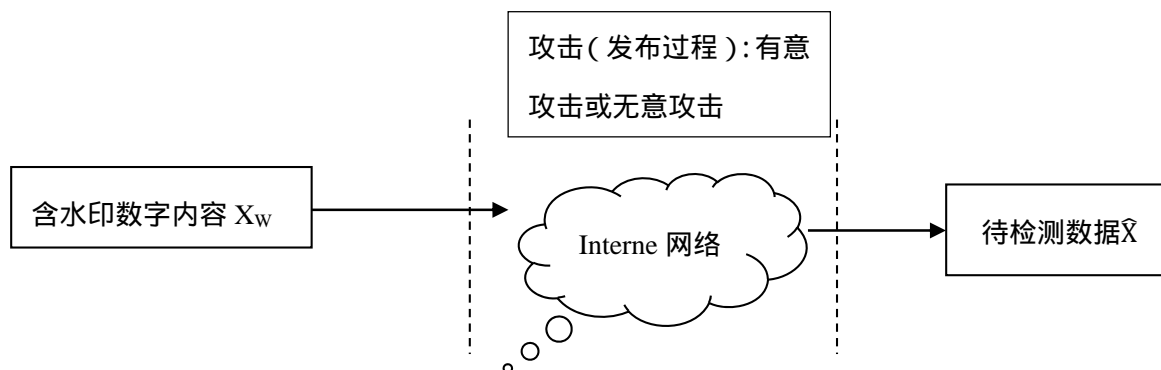


图 2.5 攻击模型

水印攻击就是在含水印数字内容  $X_w$  在网络发布过程及以后受到的常规处理操作或恶意的破坏。 $X_w$  被攻击后生成待检测数据  $\hat{X}$ 。

水印攻击方式有多而杂的特点，存在不同的分类方法，Nikolaidis<sup>[34]</sup>等人将攻击方式分为擦除攻击、协议攻击、表达攻击和合法攻击四类。

### (1) 擦除攻击

擦除攻击 (Removal attack) 主要是破坏水印的嵌入环节，通过修改图像像素的值，试图删除或减弱水印信息。如压缩、缩放、滤波、添加噪声等。擦除攻击包括分析计算攻击和信号处理攻击。

### (2) 协议攻击

协议攻击是通过添加或伪造水印来破坏水印的有效性，使水印的检测结果错误或不明，协议攻击包括拷贝攻击、歧义攻击和合谋攻击。

### (3) 表达攻击

表达攻击主要是破坏水印的检测环节，通过伪装时间上或媒体空间上的改变是水印信号不能被检测或解码<sup>[35]</sup>。表达攻击包括几何攻击和扰乱攻击。

### (4) 合法攻击

与前三种攻击不同，合法攻击是在水印系统提供的技术范围外进行的，是利用法律的漏洞进行的，不涉及技术。

文献[36]中将常见的针对水印图像的攻击方法进行了总结，见表 2.1。

表 2.2 针对数字水印的攻击方法

攻击方法	常见方式
信号增强	锐化、钝化、改变图像的对比度、图像恢复、Gamma 校正等
加性和乘性噪声	高斯白噪声、均匀噪声、斑点噪声、椒盐噪声等
有损压缩	最常见的处理 ,JPEG 压缩 ,JPEG-2000 ,H.261 ,MPEG-2 ,MPEG-4 ,MPEG-2audio ,MPEG-4audio ,G723 等
局部或全局仿射变换	平移、旋转、剪切、缩放、翻转、尺度变换、行或列删除
滤波	低通滤波、高通滤波、中值滤波、同态滤波、高斯滤波、均值滤波等
统计平均和共谋攻击	将一幅图像进行多次拷贝 ,对每个拷贝嵌入水印 ,再通过将这些图像进行平均或挑选每幅图像的一小部分进行重组来得到新图像来清除水印
D/A 和 A/D 变换	打印—扫描
StirMark 攻击	是一种水印测试软件 ,它能对图像随机进行几何变形 ,造成无法察觉的图 像扭曲 ,目的并不是从本质上删除水印 ,仅是破坏水印间同步模式 ,阻止检测器找到水印
Oracle 攻击	利用公开的水印解码器 ,对加水印图像反复进行细微修改 ,直到水印解码器无法检测到水印
马赛克攻击	将图像拆分成足够小的图像块 ,将这些图像块逐个嵌入到网页 ,浏览时由浏览器把这些图像块排列在一起 ,以此来蒙蔽水印检测器
多重水印	在已嵌入水印的图像中嵌入多个不同水印 ,使水印检测器无法检测原始水印

随着水印技术的不断发展，会出现更多、更新的攻击方式，只有根据攻击方式的改变不断深入研究，才能进一步改善算法，进而提高数字水印系统的鲁棒性，使数字水印系统更好的发挥作用。

## 2.5 数字水印评价体系

由于对数字水印的特性要求根据应用场合不同而不一，很难设定评估其性能参数，

所以目前没有一个统一的标准能评价数字水印系统的性能优劣。对数字水印的评估主要包括水印的不可感知性（嵌入水印后图像的失真情况）和鲁棒性两方面。

对水印评估测试的主要步骤是在保证作品质量的前提下，最大强度的嵌入水印，然后对含有水印的作品进行各种攻击，再针对每一种攻击提取水印，判断水印提取是否成功。目前，存在的一些重要的水印评价指标如下：

2.5.1 不可感知性

要求嵌入的水印不影响人类视觉、听觉感官对数字作品的正常欣赏，而且用统计的方法不能提取水印或是确定水印的存在。一般使用主观测试和失真定量量测两种方法：

(1) 主观测试是最直接的评价作品质量的方法，一般是先把失真数据分出等级标准，再按照标准给每一失真数据给进行测评并对结果进行记录。测评等级可按 ITU-R Rec.500 质量等级级别表划分，如图 2.2 所示：

表 2.2 ITU-R Rec.500 质量等级级别表

等级级别	可感知性表现	评价
5	不可见	优
4	可见，让人不讨厌	良
3	可见，轻微让人讨厌	中
2	让人讨厌	差
1	非常让人讨厌	极差

主观测试比较直观，但在评测过程中容易受一些主、客观因素的影响。

(2) 失真定量量测可以非常客观的对不同方法得到结果做出比较，通常用峰值信噪比（PSNR）、相关系数（NC）等图像的统计误差来对图像的不可感知性进行评价。

用峰值信噪比测量嵌入水印的能力，值越大，不可感知性越好。若用  $I$  表示原始图像， $I'$  表示含水印图像，则 PSNR 公式如（2.1）所示，单位为 dB。

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{MN \max[\max(I^2)]}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i, j) - I'(i, j)]^2} \tag{2.1}$$

相关系数（Normalized Correlation，NC）通常用来衡量提取水印图像与原始图像



之间的相似性，公式如（2-2）所示：

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^{i=M} \sum_{j=1}^{j=M} W(i, j) W'(i, j)}{\sum_{i=1}^{i=M} \sum_{j=1}^{j=M} W(i, j)^2} \quad (2.2)$$

式中  $W$  代表原始水印图像， $W'$  为提取出的水印图像。

### 2.5.2 鲁棒性

鲁棒性是水印的一个重要特性。水印的不可感知性影响了水印鲁棒性的提高。另外，水印的鲁棒性还与嵌入长度、嵌入强度、图像尺寸和特征有关。因此，要公平地评价一个数字水印系统，必须使用不同的测试图像库，以嵌入信息量和嵌入强度为参数来测试数字水印系统的性能，并以这样的测试结果作为比较不同数字水印系统性能的依据。

水印的鲁棒性表现在系统抵抗攻击的能力。对于某一操作，水印的鲁棒性较高，但对其他处理可能比较差甚至不具有鲁棒性，也就是说，水印的鲁棒性不是一成不变的。不同的应用领域对水印的鲁棒性要求不一，但一般认为只要能够经受在嵌入和检测之间可能的处理，便认为该水印算法或水印系统具有较好的鲁棒性。

## 2.6 编程仿真平台——MATLAB 介绍

### 2.6.1 MATLAB 优点介绍

MATLAB (Matrix Laboratory) 是由美国 mathworks 公司发布的主要面对科学计算、可视化以及交互式程序设计的高科技计算环境。最初由 70 年代末的 Linkpack 与 Eispack 组成，1982 年推向应用市场，被原来越多的人应用，目前在数值计算方面已成为高效的数学类科技应用软件，代表了当今国际科学计算软件的先进水平。很多研究者在进行图像处理时使用 MATLAB 软件，其强大的功能应用在数字水印技术研究中也是非常方便的。

本文中 choice MATLAB 作为编程工具，并对算法进行仿真，原因如下：

(1) MATLAB 具有友好的用户界面及接近数学表达式的自然化语言，易于学习者学习和掌握；

(2) MATLAB 具有高效的数值计算功能，其强大的矩阵计算功能满足图像、视频等数字作品中嵌入、提取水印过程中需要大量矩阵运算的需要。

(3) MATLAB 函数库中集成了大量常用函数，函数所使用的算法都是科研和工

程计算中的最新研究成果，并且经过了各种优化和容错处理。在同样的计算要求下，用 MATLAB 编程的工作量会比其他软件大大减少。

(4) MATLAB 的众多工具箱满足跨越多学科领域的数字水印技术研究中信号处理、图像处理、统计等要求。

(5) MATLAB 具有开放性，研究者能使用 MATLAB 与其他编程工具混合编程。

2.6.2 MATLAB 函数介绍

表 2.2 对 MATLAB 中数字水印技术研究的主要函数进行简单介绍。需要注意的是对于不同维数的文本、图像信号，MATLAB 中要用到不同维数的频域算法。

表 2.2 MATLAB 中常用函数

数据输入输出函数		imread()	读入、输出各种格式（如
		imwrite()	bmp, jpg/jpeg, tif/tiff, png, pcx, wx, hdf）
		auread(), wavread()	读入、输出 au、wav 文件，可控制其中的位
		auwrite(), wav write()	和频率
显示图像与 播放声音		imshow()	显示各种图像
		imfinfo（）	读入图像信息，如文件大小、格式、图像的 宽度、高度、颜色类型等
		wavplay()	播放 wav 文件
		wavrecord()	对处理后的 wav 文件录音
变换域 函数	离散余弦 变换	dct(), dct2()	一维信号、二维信号的离散余弦变换
		idct(), idct2()	一维信号、二维信号的逆向离散余弦变换
	离散傅里 叶变换	fft(), fft2()	一维信号、二维信号的离散傅里叶变换
		ifft(), ifft2()	一维信号、二维信号的逆向离散傅里叶变换
	离散小波 变换	dwt(), dwt2()	一维信号、二维信号的离散小波变换
		idwt(), idwt2()	一维信号、二维信号的逆向离散小波变换
		wavedec2()	多级二维小波分解
		waveinfo()	获取小波包中所有小波信息
攻击 函数	旋转	rotate()	旋转图像
	裁剪	imcrop()	按精确定位的各点坐标裁剪

表 2.2 MATLAB 中常用函数

续表

攻击 函数	滤波	<code>filter()</code> , <code>filter2()</code>	对一维信号、二维信号滤波
	抖动	<code>dither()</code>	对图像进行抖动攻击
	jpeg 压缩	<code>imwrite()</code> 中 jpeg 与 quality 参数	对图像进行可控 jpeg 压缩
	加各噪声	<code>imnoise()</code>	对图像加入各种噪声攻击
	放大/缩小	<code>imresize()</code>	用指定的插值方法对图像放大或缩小

## 2.7 本章小结

本章论述了数字水印的定义和分类，按不同标准对数字水印进行分类，介绍了数字水印的应用领域；并主要对数字水印技术的基本原理、经典算法、攻击方式加以阐述，另外还对常用编程软件 MATLAB 进行了介绍，为在现有基础上改进算法提供参考。

## 第3章 基于DCT的数字图像水印方案

### 3.1 系统功能模块

所有基于离散余弦变换（DCT）的数字图像水印系统会包含如图 3.1 所示的各功能模块。

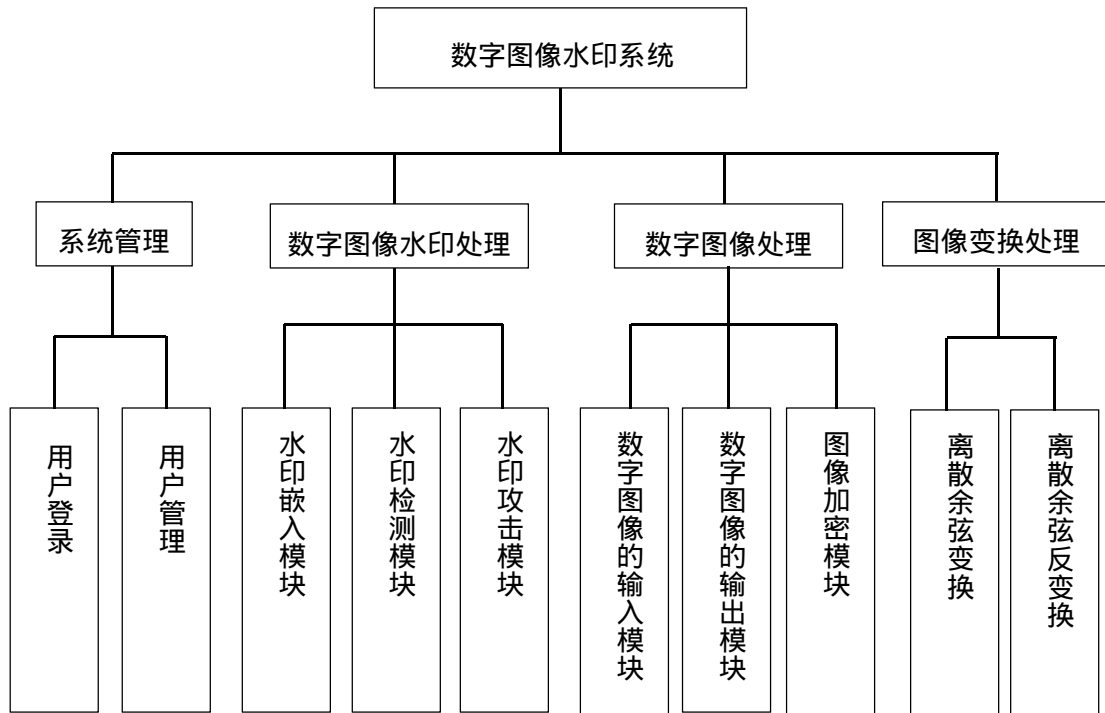


图 3.1 数字图像水印系统组成

数字图像水印系统分为系统管理、数字图像水印处理、数字图像处理、图像变换处理四部分。数字图像水印处理模块完成水印的嵌入、提取和检测。数字图像的处理模块主要完成数字图像的输入、输出、加密及预处理。本文主要研究数字图像水印处理模块。

在实际应用中，一个完整的水印系统包括水印的生成、嵌入、提取检测几部分。在水印的生成部分，在嵌入部分，需要输入原始数字内容和水印信息，嵌入后生成含水印的作品，在网络传输过程中，含水印作品可能会遭到无意的操作或有意的攻击，这就需要检测部分对水印提取信息或对它的存在与否进行检测。

### 3.2 数字水印系统基础框架

数字水印系统主要分成三步：水印的生成、嵌入、提取和检测。根据系统需求不同，在系统设计时三方面会有不同的偏重，以下进行具体分析。

3.2.1 水印的生成

数字水印系统的第一个重要因素就是水印的生成 水印的生成过程如图 3.2 所示，此过程中通常和密钥有关。

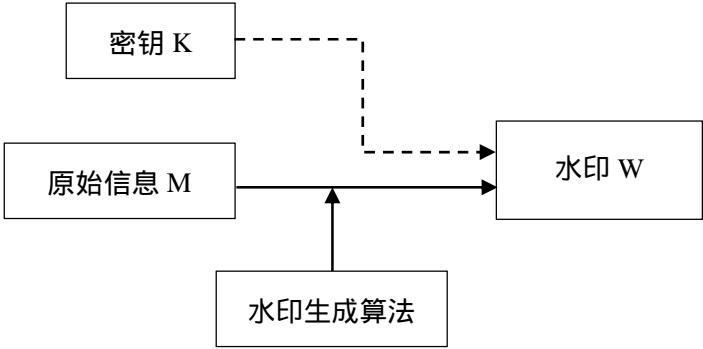


图 3.2 水印信号的生成过程

可以把不同形式的水印统一表达为：

$$W=\{w(i) \mid w(i) \in M, i \in W_d\}$$

其中，W 表示嵌入的水印信息集合，M 表示水印信号的取值范围，可以是二值，也可以是均匀分布或如高斯分布的实数。W<sub>d</sub>表示维数为 d 的水印域，当 d=1,2,3 时，分别表示音频水印、静态图像水印和视频水印。

根据水印信息的内容不同，水印的生成也分为无意义水印生成和有意义水印两种。无意义水印是基于伪随机发生器、加密系统或混沌系统生成，这些水印不会被直观感知，确定水印是否存在的方法是对提取出的水印与已知水印进行相关检测。有意义水印是有具体特定含义的信息，如字符，声音，图像，视频信号等，提取出的水印可以直接被感知，并且嵌入的信息量较大。

3.2.2 水印的嵌入

图 3.3 已经表明了水印的嵌入过程，此过程中，水印 W、数字内容 X、密钥 K 作为输入。水印可以为数字图像、随机序列、文本等。

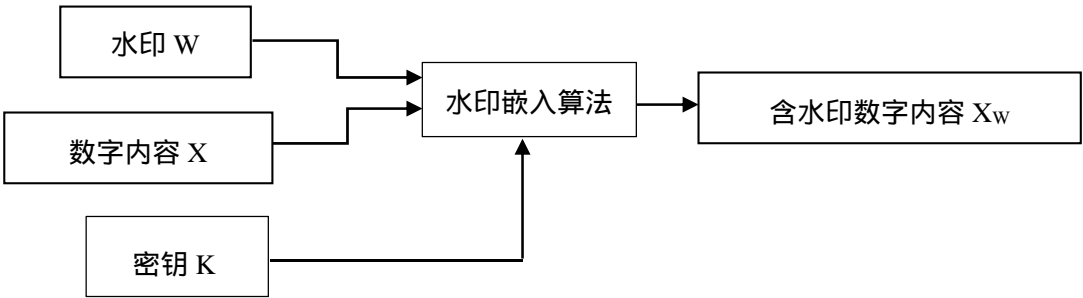


图 3.3 水印嵌入过程

在水印嵌入过程中一般嵌入准则为：

$$x_w(i) = x_0(i) \oplus h(i) \oplus W(i)$$

最常用的是加法准则和乘法准则，表示如下：

加法准则： $x_w(i) = x_0(i) + h(i)W(i)$

乘法准则： $x_w(i) = x_0(i) * (1 + h(i)W(i))$

其中  $x$  是一个变量，不同的系统中含义不同，它既可以是采样强度，也可以是变换系数， $h(i)$  为水印加权，决定水印的强度，也决定能被修改的范围。过大，水印的嵌入会影响图像质量；过小，水印缺乏较强的鲁棒性。综合考虑，取得  $h(i)$  水印加权的最大值，一般做法是把它和人类的视觉系统 HVS<sup>[34]</sup>、人类听觉系统 HAS<sup>[35]</sup> 相结合。

在变换域的水印嵌入模块，通过改变变换域系数来实现水印嵌入。比较上述的加法准则和乘法准则可以发现，频率系数与修改幅度的同步性上，乘法准则优于加法准则，所以在嵌入过程中多使用乘法准则。本文应用的频域水印系统的嵌入过程如图 3.4 所示：

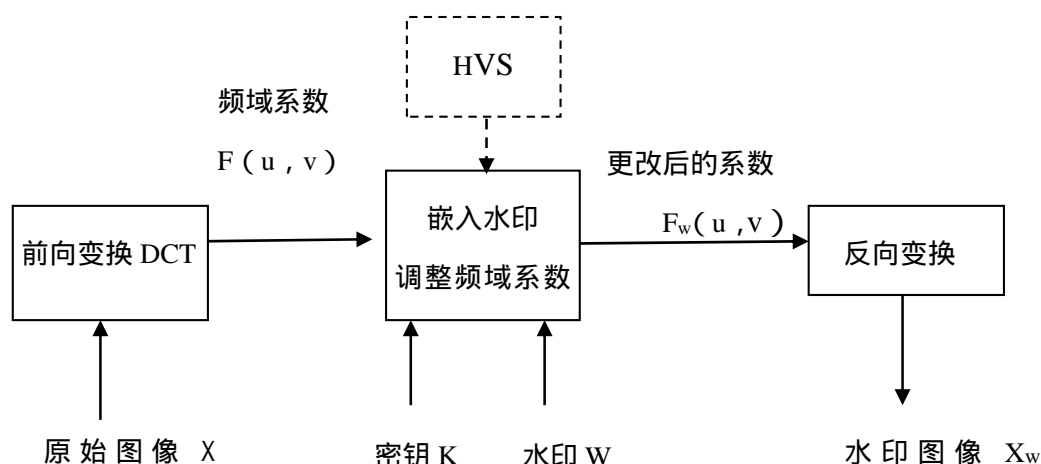


图 3.4 频域水印嵌入过程

### 3.2.3 水印的提取检测

对于图像、文本等有意义水印，通过判断提取出的水印是否完整，可以判断数字作品的完整性，甚至可以判定那一部分遭到了修改。对于无意义水印，水印为随机序列时，是通过进行原始水印与检测的水印相对比来确认水印是否存在，在相关度大于设定的阈值  $T$  时，有且仅有一个峰值输出时，可以判定水印的存在。对于有意义水印和无意义水印提取检测过程如图 3.5、图 3.6 所示。

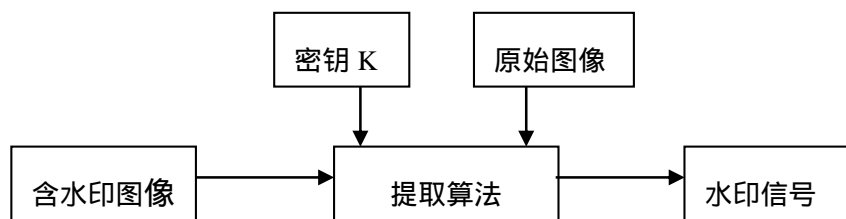


图 3.4 水印提取过程

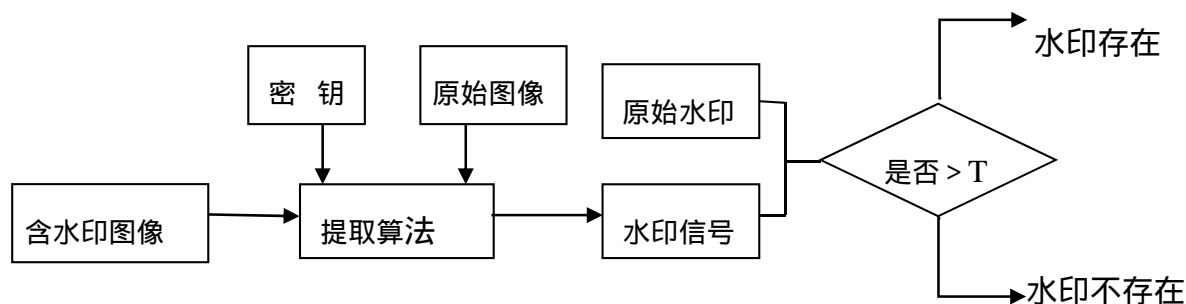


图 3.5 水印检测过程

### 3.3 水印算法

通过查阅文献，对经典数字水印算法进行研究，分析其优缺点，发现变换域算法具有嵌入水印具有鲁棒性强、便于与人类感知系统结合从而平衡鲁棒性和隐蔽性之间的关系，兼容国际上流行的数据压缩标准等优势，所以选择变换域为水印算法工作域。离散余弦变换（DCT）是经常应用于数字信号处理技术中的线性变换技术之一，也是图像压缩中常用的变换编码方法之一。由于任何连续的实对称函数的傅立叶变换中只含有余弦项，所以离散余弦变换与傅立叶变换一样有明确的物理意义。离散余弦变换是基于实数的正交变换，避免了傅立叶变换中的复数运算，与之相比，算法相对简单。DCT 算法的性能很好，它有快速算法，因此它在硬件和软件中都容易实现；而且 DCT 算法是对称的，所以利用逆 DCT 算法可以用来解压缩图像。另外 DCT 算法可以和大多视觉模型相结合，从而更好的提高图像质量。基于以上原因，本文选择离散余弦变换（DCT）作为水印方案算法。

### 3.4 人类视觉系统及 Watson 模型

#### 3.4.1 人类视觉系统

人类视觉系统，即 Human visual system，简称 HVS。人类通过人类视觉系统（HVS）来获取外界图像信息，当光辐射刺激人眼时，将会引起复杂的生理和心理变化，这种

感觉就是视觉。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。

人类视觉系统具有的背景亮度掩蔽、纹理掩蔽、频率掩蔽效应<sup>[37]</sup>经常应用到数字水印技术上，并与水印嵌入强度、可见阈值值有很大的关系。在视觉系统中，亮度和频率对于图像或视频的作用要强于颜色、方向。背景亮度越高，人眼对于图像变化的感知越不敏感，即背景亮度可以很好的掩蔽图像的变化。在变换域算法中，人眼观察通过高频系数或对角线系数修改得到的图像，对其变化不会有太大的反映，也就是说频率系数可以掩蔽图像的变化。图像背景纹理越复杂，人眼对图像变化的判断难度就越大，图像纹理可以掩蔽图像的改变，所以在背景相对复杂的图像中，水印的嵌入强度可适度增大。

### 3.4.2 Watson 模型

文献[38]中提出的 Watson 模型是人类视觉模型的一种，背景亮度掩蔽效应、纹理掩蔽效应和频率掩蔽效应也适用于 Watson 模型，本文利用了该模型中的公式对潜入强度进行计算。

对于背景亮度掩蔽特性，根据 Weber-Fechner 定律，视觉亮度掩蔽特性可用图 3.5 表示如下：

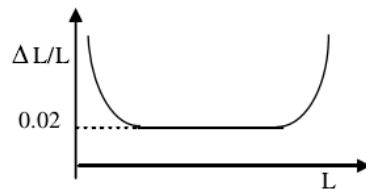


图 3.5 视觉亮度隐蔽特性

图中  $L$  表示背景亮度， $L + \Delta L$  是人眼能够观察的物体亮度， $\Delta L$  是亮度改变时，人类视觉器官能察觉的门限。近年来的研究表明， $\Delta L$  与  $L$  间映射方程<sup>[39]</sup>为：

$$\Delta L = 0.0594 \times (1.219 + L^{0.4})^{2.5}$$

关于频率掩蔽特性，将图像分为  $8 \times 8$  子块，通过对  $8 \times 8$  频率敏感度进行研究表明人眼的敏感度随频率的升高而降低<sup>[39]</sup>。

纹理隐蔽特性，也叫对比度掩蔽特性，对于对比度的鉴定目前无具体模型，只能靠眼睛做定性判断。通常采用边缘检测的方法，在纹理复杂度高的地方，即使加大水印强度，人眼对图像修改痕迹依然不敏感。



### 3.5 本章小结

本章介绍了基于 DCT 变换的图像数字水印系统基功能组成，从水印算法的选择，嵌入策略的研究，相结合的人类视觉系统模型，几方面论证此方案的可行性。

## 第 4 章 基于 DCT 的数字水印算法的改进

### 4.1 现有 DCT 算法描述

离散余弦变换 (DCT) 的变换核心是实数的余弦函数, 是一种常用的数据压缩的变换编码方法, 计算速度相对较快, 适合图像压缩与处理随机信号。在第 2 章中介绍了图像的维数为二维, 所以其对应的二维 DCT 是基于  $N \times N$  子块, 也就是先把图像分为  $N \times N$  像素块, 然后对每一子块进行 DCT 变换。设图像  $f(x, y)$  的大小为  $N \times N$ , 其二维 DCT 变换公式可以表示为<sup>[24]</sup>:

$$F(u, v) = C(u)C(v) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cos \left[ \frac{(2x+1)u\pi}{2N} \right] \cos \left[ \frac{(2y+1)v\pi}{2N} \right] \quad (4.1)$$
$$0 \leq x \leq N-1, 0 \leq y \leq N-1$$

反变换为:

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} C(u)C(v)F(u, v) \cos \left[ \frac{(2x+1)v\pi}{2N} \right] \cos \left[ \frac{(2y+1)v\pi}{2N} \right] \quad (4.2)$$
$$0 \leq u \leq N-1, 0 \leq v \leq N-1$$

其中,

$$C(u) = C(v) = \begin{cases} \sqrt{1/N} & u=v=0 \\ \sqrt{2/N} & u=v=1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (4.3)$$

直流系数 DC 为:

$$F(0,0) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N f(x, y) \quad (4.4)$$

二维 DCT 变换是具有可分离性的线性变换, 可以转化为一维 DCT 变换相乘。所以二维 DCT 变换用矩阵表示为:

$$f(x, y) = [DCT]^T F(u, v) [DCT] \quad (4.5)$$

$$F(u, v) = [DCT] f(x, y) [DCT]^T \quad (4.6)$$

式中， $[DCT]$ 是标准正交矩阵， $[DCT]^T$ 是 $[DCT]$ 的转置矩阵。

$$[DCT] = \sqrt{\frac{2}{N}} \cos \frac{2n+1}{2N} k\pi \quad n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (4.7)$$

当  $N=8$  时，上式为：

$$[DCT]_{8 \times 8} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos \frac{\pi}{16} & \cos \frac{3\pi}{16} & \cos \frac{5\pi}{16} & \cos \frac{7\pi}{16} & \cos \frac{9\pi}{16} & \cos \frac{11\pi}{16} & \cos \frac{13\pi}{16} & \cos \frac{15\pi}{16} \\ \cos \frac{2\pi}{16} & \cos \frac{6\pi}{16} & \cos \frac{10\pi}{16} & \cos \frac{14\pi}{16} & \cos \frac{18\pi}{16} & \cos \frac{22\pi}{16} & \cos \frac{26\pi}{16} & \cos \frac{30\pi}{16} \\ \cos \frac{3\pi}{16} & \cos \frac{9\pi}{16} & \cos \frac{15\pi}{16} & \cos \frac{21\pi}{16} & \cos \frac{27\pi}{16} & \cos \frac{33\pi}{16} & \cos \frac{39\pi}{16} & \cos \frac{45\pi}{16} \\ \cos \frac{4\pi}{16} & \cos \frac{12\pi}{16} & \cos \frac{20\pi}{16} & \cos \frac{28\pi}{16} & \cos \frac{36\pi}{16} & \cos \frac{44\pi}{16} & \cos \frac{52\pi}{16} & \cos \frac{60\pi}{16} \\ \cos \frac{5\pi}{16} & \cos \frac{15\pi}{16} & \cos \frac{25\pi}{16} & \cos \frac{35\pi}{16} & \cos \frac{45\pi}{16} & \cos \frac{55\pi}{16} & \cos \frac{65\pi}{16} & \cos \frac{75\pi}{16} \\ \cos \frac{6\pi}{16} & \cos \frac{18\pi}{16} & \cos \frac{30\pi}{16} & \cos \frac{42\pi}{16} & \cos \frac{54\pi}{16} & \cos \frac{66\pi}{16} & \cos \frac{78\pi}{16} & \cos \frac{90\pi}{16} \\ \cos \frac{7\pi}{16} & \cos \frac{21\pi}{16} & \cos \frac{35\pi}{16} & \cos \frac{49\pi}{16} & \cos \frac{63\pi}{16} & \cos \frac{77\pi}{16} & \cos \frac{91\pi}{16} & \cos \frac{105\pi}{16} \end{bmatrix}$$

随着数字水印技术的发展，在以上传统 DCT 算法的基础上不断改进，提出了较多的基于 DCT 变换的数字水印算法，如文献[40]中通过利用 Voronoi 图将原始数字图像分为几部分，对每部分应用分块 DCT 嵌入算法；文献[41]中应用了 DCT 域融合原始数字图像和经过置乱处理的秘密图像的系数矩阵的信息隐藏法，等。这些方法保留了 DCT 算法的优点，但在一定程度上存在着不足：未充分考虑嵌入水印的数字图像的质量，会产生一些可感知的痕迹。

## 4.2 基于 DCT 水印算法的改进

### 4.2.1 改进思路

本文中保留了 DCT 算法的优点，在此基础上在以下方面进行改进：

(1) 嵌入水印之前，先进行置乱处理，置乱处理的目的在于破坏作为水印的图像的相关性，即使有人非法提取出水印，不清楚所用的置乱算法，也不能得到原始的水印信号，从而增强算法的安全性。

(2) DCT 域的高频系数的改变并不能引起人类视觉系统的注意，能较好的保证水印的不可感知性，但低频系数具有良好的抗攻击性，能保证有较好的鲁棒性，综合考虑，本文将水印信号嵌入到 DCT 域的中频系数中。

(3) 结合人类视觉系统 Watson 感知模型给出嵌入强度公式，根据公式在 DCT 子块中嵌入不同强度的水印，从而实现不可感知性和鲁棒性的平衡。

#### 4.2.2 对水印进行置乱处理

本文中在嵌入水印前,为破坏水印的相关性,首先对水印进行置乱处理。水印置乱<sup>[42]</sup>技术指利用某种算法将图像各像素次序打乱,破坏图像的组成。目前常用的置乱变换技术有 Arnold 变换<sup>[43]</sup>、Hilbert 曲线、幻方、logistic 映射、Conway 游戏、IFS 模型、Gray 码变换、广义 Gray 码变换等方法<sup>[44]</sup>。这些置乱算法只改变图像中点的位置,而像素点的灰度值保持不变。由于 Arnold 变换具有一定的周期性,算法相对简单,所以在数字水印技术中得到广泛应用。文中选择了 Arnold 变换对图像做置乱处理。在图像中应用置乱技术就是移动各像素的位置,从而破坏图像组成。经过 Arnold 变换处理过的水印图像受到攻击时,嵌入的水印也可能被破坏,但进行反置乱处理后,因遭到攻击产生的损失会分布到整个文件,从而降低对人类视觉的影响。

Arnold 变换可表示为:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

针对图像的二维 Arnold 变换为:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} (mod N) \quad (4.9)$$

上式中  $N$  为图像矩阵的阶数,  $(x, y) \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$

公式(4.7)就是将图像 A 中元素通过置乱法则  $T$  映射到图像 B, B 可以继续变换生成图像 C, 对置乱次数是没有限制的, 可以一直变换下去。研究表明, Arnold 变换具有一定的周期性, 如果不断的进行 Arnold 变换, 经过若干次数后会出现原始图像。其周期和图像矩阵阶数  $N$  间的关系见表 4.1。从表中可以看出 Arnold 置乱周期和图像矩阵阶数相关。在应用中, 希望其变换周期较小, 减少计算量, 提高计算效率, 所以通常选择 Arnold 变换周期相对较小的阶数  $N$  来设计载体图像与水印图像大小。利用此特性可以确定一个相对的最佳置乱度, 同时还可以把最佳置乱度作为提取水印时的密钥。

表 4.1 Arnold 变换周期

阶数 N	周期(T)	阶数 N	周期(T)
2	3	40	30
3	4	48	12
4	3	56	24
5	10	60	60
6	12	64	48
7	8	100	150
8	6	120	60
9	12	125	250
10	30	128	96
12	12	256	192
16	12	480	120
24	12	512	384
32	24	712	192

### 4.2.3 水印嵌入算法

数字水印生成后，就可以利用合适的算法把水印嵌入到数字内容中。数字水印的嵌入技术关系到数字水印系统的性能。嵌入水印过程中，要综合考虑水印的鲁棒性和不可感知性，因此本文选择在中频区域将水印嵌入。

#### 4.2.3.1 嵌入位置选择

图像完成 DCT 变换后，已经被打乱并分散为不同的空间频域。通过  $C(u)$  与  $C(v)$  可以得知余弦函数的频率会随  $u, v$  值的增大而增大，其系数认为是原始图像在余弦函数上的投影，系数会随频率变化而发生变化，所以频域可以划分为低频，中频和高频系数区域。对 64 个 DCT 系数进行量化并进行 zig-zag 扫描，如图 4.1 所示。

在图 4.1 中 0 号对应 DC 直流系数，1—63 号对应交流系数，表示 DCT 变换后，图像被打乱且分散为高频、中频和低频三个不同的空间频域。根据人类视觉模型，人眼对于高频部分的变化不敏感，若把水印嵌入该区域，能很好的保证水印的不可感知性，但是由 JPEG 压缩理论得知，高频系数在图像处理过程中先被舍弃，而图像的低频系数对 JPEG 压缩攻击具有较好的抵抗性，所以为达到不可感知性和鲁棒性的平衡，选择水印的中频系数嵌入。

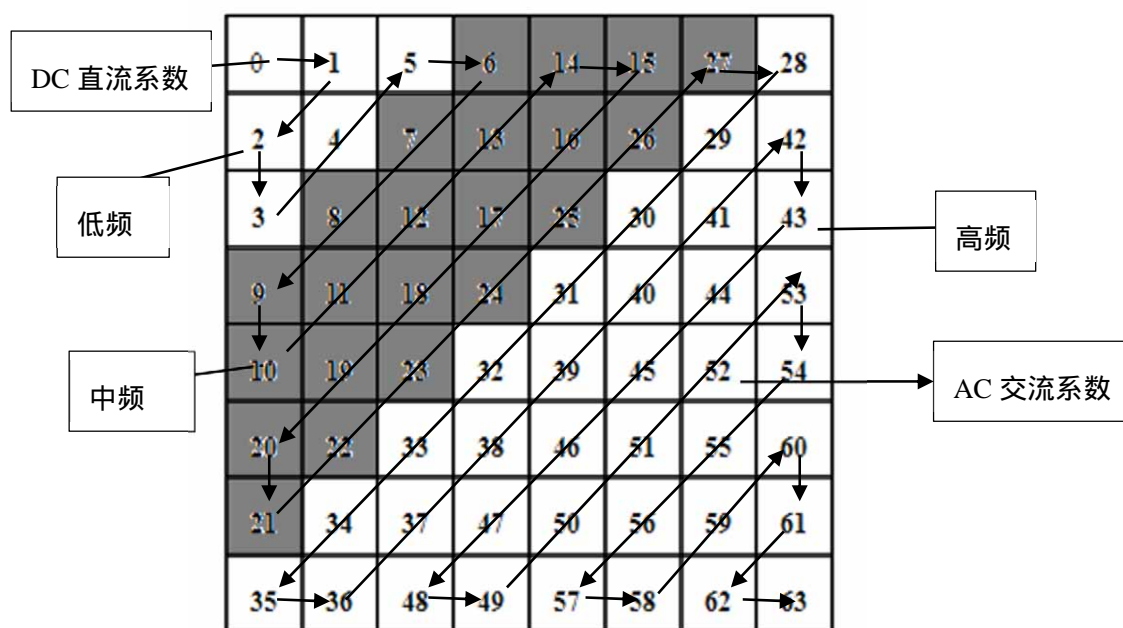


图 4.1 DCT 系数扫描图

#### 4.2.3.2 对子块进行 DCT 变换

对  $N \times N$  的图像，有二种进行 DCT 变换方式：一种是对整幅图像进行 DCT 变换，得到  $N \times N$  系数矩阵。另一种是先把图像进行  $n \times n$  分块，得到  $\frac{N \times N}{n \times n}$  个子块，然后对各子块分别进行 DCT 变换。分块数目和 JPEG 压缩的标准有直接的关系，但实质要求是图像经过压缩后和原图像的误差最小。图像分块数目和图像平方根误差之间的关系见表 4.2<sup>45</sup>。由表中数据可以发现，在分块为  $8 \times 8$ 、 $16 \times 16$ 、 $32 \times 32$  时，误差较小并且误差值较为接近，为尽可能减少 DCT 变换的计算量，选择  $8 \times 8$  分块最合适，因此本文也采用和 JPEG 一样的标准首先对图像进行  $8 \times 8$  分块。

表 4.2 图像分块数目和图像平方根误差的关系

图像分块数目	$2 \times 2$	$4 \times 4$	$8 \times 8$	$16 \times 16$	$32 \times 32$
图像平方根误差	3.0-3.2	2.1-2.3	1.3-1.4	1.2-1.3	约 1.2

对于图像一般进行  $8 \times 8$  分块，子块的频率系数规律变化同样符合 DCT 分布规律。两种不同的变换模式对应的算法过程不同，如下图所示：

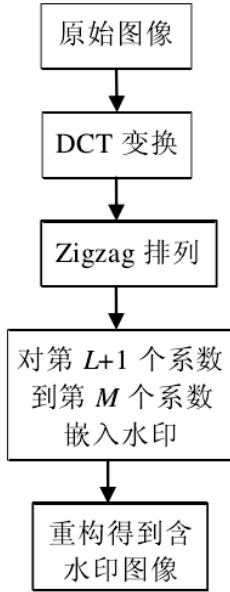


图 4.2 整幅图像 DCT 变换水印嵌入过程

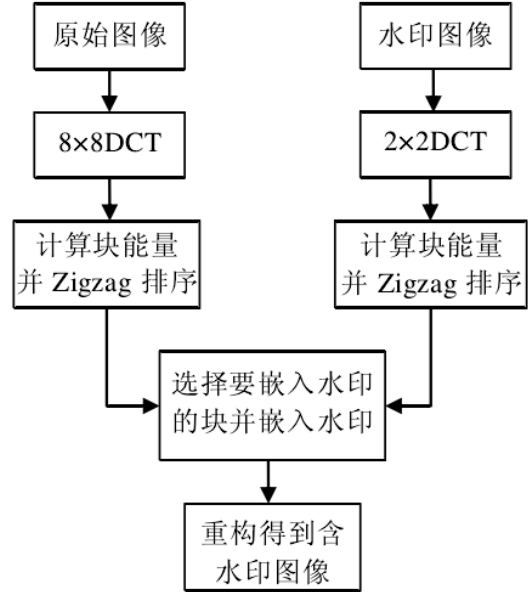


图 4.3 图像分块 DCT 变换嵌入过程

#### 4.2.2.3 水印嵌入强度门限值

把原始图像  $A (M \times N)$  划分成互不重叠的  $8 \times 8$  子块，则原始图像被分为  $J = M \times N / 8 \times 8$  子块，把子块用  $f_j(x, y)$  表示， $j=0, 1, 2, \dots, J-1$ ， $0 \leq x \leq 7$ ， $0 \leq y \leq 7$ ，把子块 DCT 变换后的频域系数表示为  $F_j(u, v)$ ，代入信噪比公式，整理得到：

$$SNR = 20 \lg \frac{\sqrt{\sum_{u,v} F_j(u, v)^2}}{\sqrt{\sum_{u,v} (F'_j(u, v) - F_j(u, v))^2}} \quad (4.10)$$

由乘法嵌入准则得到： $F'_j(u, v) = F_j(u, v)(1 + \alpha_j w_i)$

代入公式 (4.10) 中，得到子块  $j$  的嵌入强度因子<sup>[46]</sup>：

$$SNR = 20 \lg \frac{\sqrt{\sum_{u,v} F_j(u, v)^2}}{\sqrt{\sum_{u,v} (F_j(u, v) \alpha_j w_i)^2}} = 20 \lg \frac{\sqrt{\sum_{u,v} F_j(u, v)^2}}{\alpha_j \sqrt{\sum_{u,v} (F_j(u, v) w_i)^2}} \quad (4.11)$$

则得到子块  $j$  的嵌入强度因子为：

$$\alpha_j = \frac{\sqrt{\sum_{u,v} F_j(u, v)^2}}{\sqrt{\sum_{u,v} (F_j(u, v) w_i)^2}} 10^{\frac{SNR}{20}} \quad (4.12)$$

研究上式，可以发现在 SNR 的取值大于 20 时，强度因子  $\alpha_j$  在减小，因为当人类感知系统能容忍的峰值信噪比高于 20 时，才能保证图像质量，所以把 SNR=20 代入强度因子公式得到：

$$\alpha_j = \frac{\sqrt{\sum_{u,v} F_j(u,v)^2}}{10 \sqrt{\sum_{u,v} (F_j(u,v) w_j)^2}} \quad (4.13)$$

为了达到较好的鲁棒性，根据人类感知系统的纹理掩蔽特性，应该尽可能的在较为复杂的纹理区域嵌入水印，可以通过求子块的方差  $\sigma^2$  来衡量子块的纹理特征。第 j 子块的方差  $\sigma^2$  可以表示为：

$$\sigma^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{x,y} [f_j(x,y) - h]^2 \quad (4.14)$$

式中  $h = \frac{1}{n^2} \sum_{x,y} f_j(x,y)$  表示灰度， $f_j(x,y)$  是 j 子块中第 (x,y) 像素系数。

根据人类感知系统的亮度掩蔽特性，得知背景亮度影响人眼对图像观察的敏感度，背景亮度可以与图像变换域的 DC 系数相联系，用  $L_{DC}$  表示 DCT 域的直流分量。为使得图像子块的亮度特性和纹理信息两个因素都得到体现，定义 L 为：

$$L = L_{DC} + \sigma^2 \quad (4.15)$$

子块嵌入强度因子与上式中的变量值有关，如下式：

$$\alpha_1 = \frac{\sigma^2 - \min \sigma^2}{\max \sigma^2 - \min \sigma^2} \quad (4.16)$$

$$\alpha_2 = \frac{L_{DC} - \min L_{DC}}{\max L_{DC} - \min L_{DC}} \quad (4.17)$$

根据公式 (4.14) 得到水印嵌入强度因子：

$$\alpha_r = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (4.18)$$

上式中， $r=0,1,2,\dots,K-1$



## 4.3 算法实现

### 4.3.1 水印的嵌入

Step1: 设原始图像  $X$  大小为  $m_1 \times m_2$ , 对原始图像进行分块, 求得各子块的平均灰度 ( $h$ ) 和方差  $\sigma^2$  的值, 在数目为  $(m_1 \times m_2) / 64$  子块中, 由公式 (4.14) 可以得到:

$$h = \frac{1}{64} \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 f_j(x, y), \quad \sigma^2 = \frac{1}{64} \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 [f_j(x, y) - h]^2,$$

$$\text{式中 } 0 \leq j \leq \frac{m_1 \times m_2}{64} - 1,$$

Step2: 对每一子块进行 DCT 变换, 把第  $j$  子块 DCT 后的频率系数表示为  $F_j(u, v)$ ,  $0 \leq u \leq 7, 0 \leq v \leq 7$ 。根据每一子块的 DC 分量  $L_{DC}$ , 利用公式 (4.15) 即可算出  $L$  值。

Step3: 为表述方便, 算法流程中使用有意义的二值图像作为水印。对水印图像进行 Arnold 变换, 对  $p \times q$  大小的水印做  $t$  次迭代的 Arnold 变换, 对生成的二维矩阵, 进行降维处理得到水印  $W_i, i=0, 1, \dots, p \times q - 1$ , 得到的一维序列存在两种值: 0 和 1。

Step4: 将 Step2 中得到的子块  $L$  值由大到小排序, 取前  $l$  块  $L$  值较大的子块, 对选出的子块的中频系数由大到小排序, 选取每子块中频系数从高到低排序的前  $n$  个值, 即是嵌入水印的系数。而  $l = \frac{p \times q}{n}$ ,  $n$  可以由研究者决定。

Step5: 根据公式 (4-12) 和 (4-17) 计算出 Step4 中选取出的  $l$  个子块中每一子块的  $\alpha_j$  及  $\alpha_r$ , 进行比较, 从而得出嵌入准则  $F_j'(u, v) = F_j(u, v)(1 + w_i)$  中  $w_i$  值, 继而实现嵌入强度的动态调整。取值如下:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_j, & \alpha_j < \alpha_r \\ \alpha_r, & \alpha_j > \alpha_r \end{cases}$$

Step6: 对每一子块进行反 DCT 变换, 得到添加水印的图像  $X_w$ 。把该图像与原始图像进行峰值信噪比 (PSNR) 计算并进行保存。

### 4.3.2 水印的提取

此次提取中需要用到原图像, 具体过程为:

Step1: 计算  $X_w$  方差, 之后再对图像  $X_w$  进行分块并转换为频域系数, 参照水印嵌入过程 Step 2 类似得到各子块的 DC 系数, 最后通过公式 (4.15) 计算出每个子块  $L$  值记用  $L'$  表示。

Step2:设置  $t$  与  $n$  的值。

Step3:通过 Step2 中输入的  $n$  的值,利用公式  $l = \frac{p \times q}{n}$  计算得出  $l$  值,把每一子块的  $L'$  值进行由大到小的排序,取  $L'$  值中较大的前  $l$  块,从而确定含有水印信息的子块。

Step4:与嵌入过程第三步类似,通过 Step 3 中得到的含水印的  $l$  个子块,每个子块中取出已经从大到小排序过的中频系数中较大的  $n$  个系数,再通过水印嵌入公式的逆过程:

$$w_i = \frac{F'_k(u, v) - F_k(u, v)}{\alpha_r F_k(u, v)}$$

得到水印序列为:

$$W'_i = \begin{cases} 1, & |W_i - [W_i]| > 0.5 \\ 0, & |W_i - [W_i]| \leq 0.5 \end{cases}$$

Step5:将得到一维水印序列  $w_i'$ ,进行升维得到二维矩阵。

Step6:利用 Arnold 反变换公式对上面得到的矩阵逆置乱,达到恢复还原水印图像的目的。

### 4.3.3 水印的检测

为客观、科学的检测水印,本文中利用了归一化相关值(Normalized Correlation Value, NC)来评价提取出的水印和原始水印的相似度,具体公式为:

$$NC = \frac{\sum_{x,y} I(x, y) I_w(x, y)}{\sum_{x,y} I^2(x, y)} \quad (4.18)$$

如果 NC 值为 1,则表示提取出的水印和原始的水印完全一样,这是一种理想化状态,在实际情况下希望 NC 值非常接近于 1.

## 4.4 本章小结

本章对传统的离散余弦变换进行了介绍,结合人类视觉系统的亮度掩蔽特性和纹理掩蔽特性,利用 Arnold 变换对算法进行了改进,提出水印嵌入阈值和动态调整水印嵌入强度因子的思想,并进行公式推导。在此基础上对此算法实现的嵌入、提取、

检测过程进行了介绍。

## 第 5 章 改进算法的仿真及检测结果

### 5.1 测试要求

本章中对改进的算法应用 MATLAB 7.0 软件进行编程及仿真测试，实验中选择灰度图作为原数字内容，要求如下：

- (1) 根据数字水印的性能评估体系要求，对水印的不可感知性和失真程度进行评估；
- (2) 利用 MATLAB 对嵌入水印的图像模拟剪切、滤波等各种攻击操作，以此测试水印系统的鲁棒性。
- (3) 分析 Arnold 置乱变换次数  $t$ 、中频系数嵌入个数  $n$  等变量取值的改变对水印系统不可见性与鲁棒性的影响；
- (4) 把结果与传统算法 结果进行对比，分析改进算法的优、缺点。
- (5) 对以上测试结果进行总结。

### 5.2 实验测试及结果分析

#### 5.2.1 二值图像作为水印进行测试分析

在实验中把二值图像作为水印信息分别进行测试，结果如下：

实验采用  $512 \times 512$  灰度图 cameraman 作为原始图像，采用显示汉字的  $32 \times 32$  的二值图像作为水印信息。



图 5.1 原始图像、水印图像与嵌入水印后的图像、提取出的水印

在此次实验中，取  $t=9$ ， $n=10$ ，即把经过 Arnold 置乱变换 9 次得到的水印嵌入到

变换域上选出的图像子块 10 个中频系数，仿真测试结果如图 5.1 所示。

5.2.1.1 对嵌入水印图像进行评估

对比原始图像和嵌入水印后的图像，视觉感知不出明显差别，观察不到修改痕迹，水印的不可感知性得到保证。经计算得到  $PSNR=36.182$ ， $NC=0.9998$ 。由此嵌入水印后图像质量和水印的不可感知性

5.2.1.2 测试鲁棒性进行的各种攻击

图 5.2 表明了利用部分攻击方法对嵌入水印的图像进行攻击及提取出的水印图像。



图 5.2 攻击后的嵌入水印图像及提取水印

嵌入水印后图像受攻击后峰值信噪比及水印相似度见表 5.1：

表 5.1 嵌入水印后图像受攻击后峰值信噪比及水印相似度

攻击方式	无攻击	添加噪音	剪切	滤波
PSNR	36.182	25.1867	28.3402	33.6141
NC	0.9998	0.8557	0.8911	0.9611

### 5.2.1.3 图像质量与参数变量间的关系

算法中的参数变量  $t$  和  $n$  是人为设定的，分别代表置乱变换次数和子块中的修改的中频系数个数的参数变量。当  $n$  取值不同时，图像质量不同。实验中分别取  $n$  值为 2, 10, 20，把实验结果进行对比，由嵌入过程的 Step4 中  $n$  与  $l$  成反比关系，当  $n$  增大， $l$  减小。也就是说嵌入水印的子块个数会随着  $n$  的变化而变化。 $n$  增大，不可感知性降低； $n$  减小，鲁棒性降低。实验结果证实了这一分析：

表 5.2  $n$  取不同值时嵌入水印图像受攻击后 PSNR 和 NC 值

	$n=2$	$n=10$	$n=25$
添加噪声	PSNR=27.0015 NC=0.8069	PSNR=25.1867 NC=0.8557	PSNR=26.9613 NC=0.9082
剪切	PSNR=28.8927 NC=0.8034	PSNR=28.3402 NC=0.8911	PSNR=24.8416 NC=0.9547
滤波	PSNR=29.8732 NC=0.9032	PSNR=33.6141 NC=0.9611	PSNR=20.0642 NC=0.8042

通过对上述结果进行分析，本文算法在系统安全性得到保证的情况下，实现了水印的嵌入和提取，并且也在鲁棒性和不可感知性的特性要求达到了一定程度的平衡。

### 5.2.1.4 与其他算法得到结果进行对比

本文算法主要思想是把人类感知系统中的图像亮度特性和纹理特性相结合确定水印嵌入强度。在不同算法结果对比过程中，选择与水印强度由图像亮度特性确定、水印强度由图像纹理特性确定两类算法结果进行对比。在此对比过程中，设定仅有一个变量，其他条件均保持一致，结果见表 5.3 所示。

表 5.3 与其他算法结果进行比较

	本文算法	嵌入强度由图像亮度特性确定	嵌入强度由图像纹理特性决定
添加噪声	PSNR=25.1867 NC=0.8557	PSNR=17.9517 NC=0.7142	PSNR=20.0496 NC=0.7684
剪切	PSNR=28.3402 NC=0.8911	PSNR=21.3421 NC=0.7825	PSNR=20.7769 NC=0.6815
滤波	PSNR=33.6141 NC=0.9611	PSNR=29.8873 NC=0.9003	PSNR=22.8862 NC=0.6852

表 5.3 中实验对比结果明显显示出本文算法的优点。

#### 5.2.1.5 小结

从以上各测试结果可以看出本文算法能实现水印的嵌入、提取，并保证了数字水印系统的不可感知性和鲁棒性。

#### 5.2.2 随机序列为水印进行测试分析

实验中把随机序列作为水印信息，测试结果如下：

在实验中实验采用  $512 \times 512$  灰度图 pepper 作为原始图像，把长度为 1024 位，均值为 0，方差为 1 随机正态分布序列作为水印信息。

需要说明的是，当水印信息为随机序列时，水印信息不需要进行 Arnold 变换，其余步骤相似，仿真测试结果如图 5.3 所示：

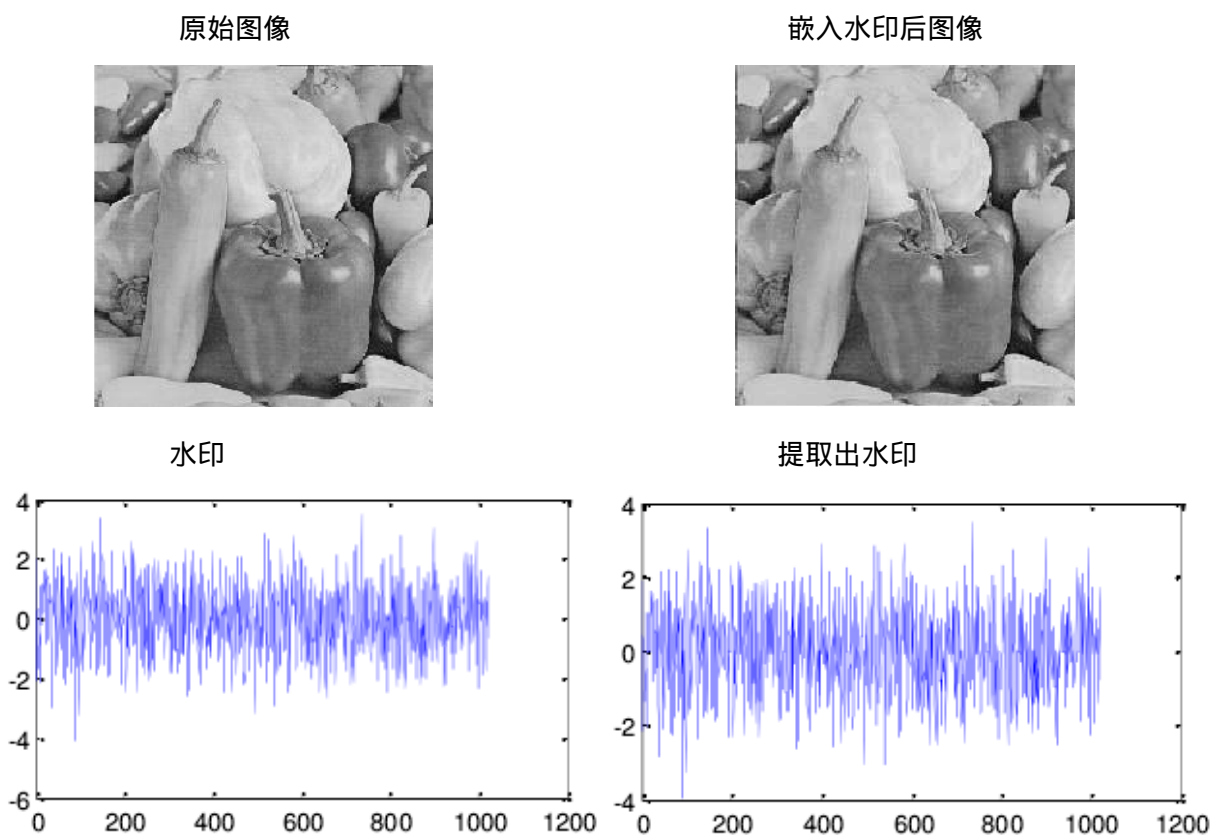


图 5.3 原始图像、水印序列、嵌入水印后的图像、提取出的水印序列

##### 5.2.2.1 对嵌入水印图像进行评估

首先对嵌入水印图像进行主观评测，观察原始图像与嵌入水印图像并进行对比，在视觉感知上，看不出明显差别，图像相对平滑的区域无明显修改痕迹，数字水印的不可感知性得到了保证。为更加客观的进行算法评估，利用峰值信噪比 PSNR 进行

图像嵌入水印前后失真度测量,计算得到  $PSNR=36.8221$ 。再利用归一化相关系数  $NC$  计算水印图像前后的相似度,计算得到  $NC=0.9709$ 。以上结果表明,嵌入水印后图像质量及水印不可感知性得到了保证。

#### 5.2.2.2 测试鲁棒性进行的各种攻击

对嵌入水印图像进行攻击以此测试算法的鲁棒性。图 5.4 为被攻击的图像中提取水印与测试水印间的相关输出,测试水印中实验中含有嵌入的水印。

此检测过程是把 1000 个不同种子控制器产生的高斯分布随机序列作为测试用的水印,其中包含嵌入的水印,将提取的水印与 1000 个测试水印进行相似性对比,检测器输出如图 5.4 所示:

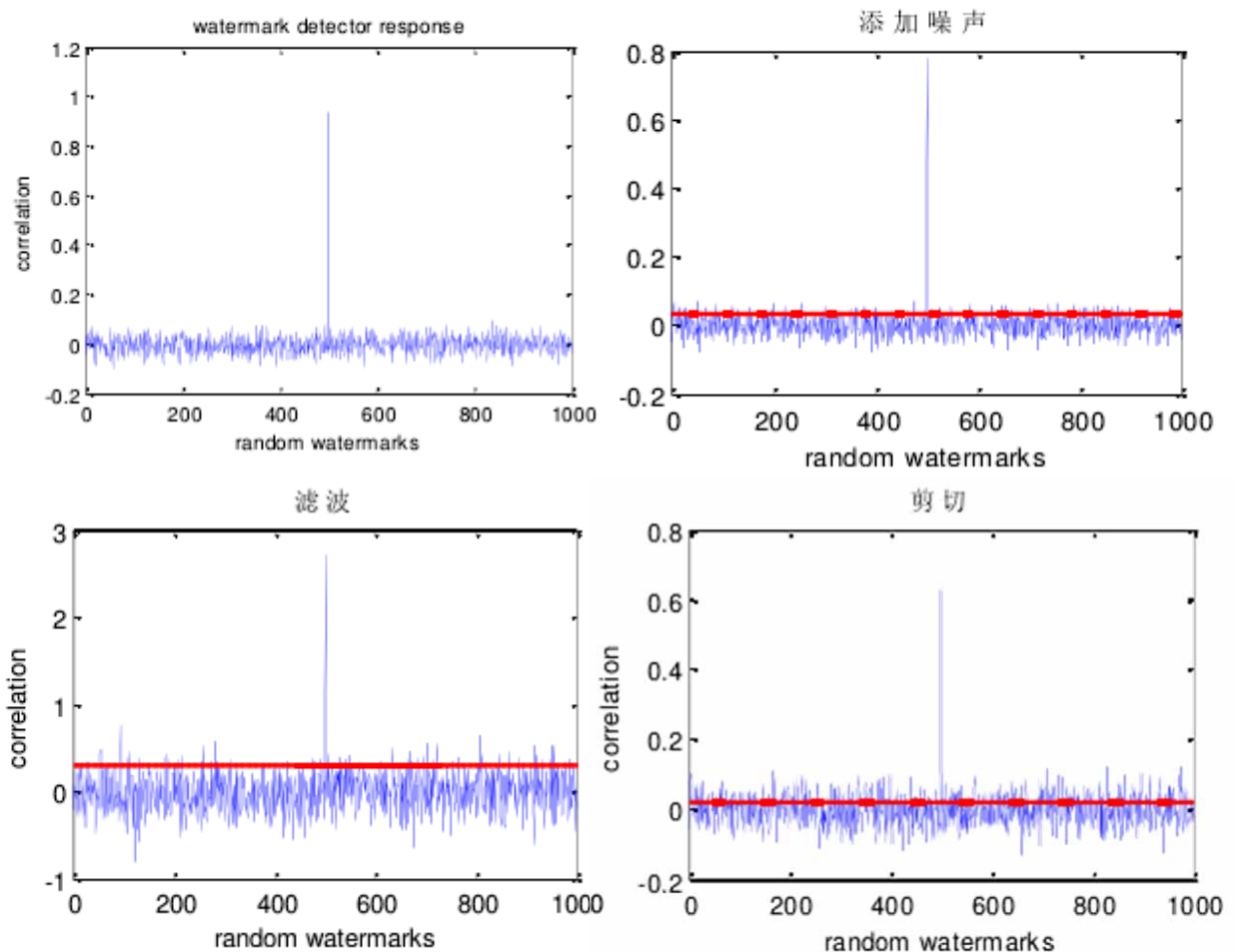


图 5.4 检测器输出结果

整个检测器只有在第 500 个序列时有一个峰值输出,提取出的水印与其他随机序列相似比较时都低于门限,只有在与嵌入水印比较时,相似度高于预定门限,也就论证了算法具有较好的鲁棒性。



#### 5.2.2.3 小结

通过上述测试，当随机序列作为水印信息时，算法测试结果表明了数字水印系统在具备了良好的不可感知性的同时拥有较好的鲁棒性。

### 5.3 本章小结

本章主要利用 MATLAB 7.0 平台对第四章中提出的基于 DCT 的改进算法进行仿真测试，把二值图像和随机序列作为水印信息分别嵌入到灰度图像中，对嵌入水印的图像及提取出的水印进行各项评估和测试，并对结果进行分析。通过总结以上测试分析结果，可以发现此数字水印系统具有较好的安全性，结合人类视觉感知特性，具有较好的不可感知性，实验中能较好的提取水印信息，表明系统具有良好的鲁棒性，同时算法实现了嵌入强度的自适应性能，具有更加优良的性能。当然，此水印系统也存在一定的问题，需要改进和提升的方面还有很多，会在结论部分进行详细介绍。

## 结论

随着信息技术的高速发展，各种智能终端设备的不断升级，网络成为当下人们获取信息的主要媒介。通过网络，人们可以很便捷的获取各种数字媒体内容。数字出版和数字阅读的出现和发展在影响着人们的生活。一方面网络使得数字内容的传播成本降低、便捷性提高，人们突破了地域限制，可以很方便的通过互联网传递信息或者获取自己所需的多媒体内容；另一方面却为数字内容的安全性带来了隐患，数字版权保护成为社会关注的热点。数字版权保护作为的数字水印技术的重要应用，使得数字水印技术得到关注，成为研究的热点。虽然有一些成果进行了初步应用，但还没有很成熟的产品，值得进一步的深入研究。前面几章是本文的主要内容，在此进行总结：

（1）本文首先从数字水印技术的概念、研究现状、定义、分类及应用领域等几方面对数字水印技术进行了介绍，学习了数字水印技术的经典算法，对常见的攻击方式进行了总结归纳。

（2）把数字水印技术的基本理论进行了学习与分析，在此基础上对提出的算法实现的嵌入规则、水印的生成嵌入提取检测过程、人类感知系统特性对水印嵌入的影响，数字水印系统的性能评估及编程仿真平台做了介绍，为算法的可行性提供保证。

（3）在理论学习研究的基础上，确定了本文数字水印算法的嵌入思路，对水印图像进行 Arnold 变换置乱处理结合 DCT 变换提高水印系统的鲁棒性，另外根据人类视觉感知系统的特性计算出嵌入强度的公式，使得嵌入强度可以动态调整，实现水印系统的自适应，提高了水印的不可感知性。

（4）通过在 MATLAB 7.0 软件平台对水印的嵌入、提取进行编程仿真，对实验结果从不同角度进行分析。

对本文的亮点进行总结如下：

（1）在嵌入水印前对水印图像进行置乱处理，降低水印图像的相关性，增强了算法的。

（2）在 DCT 变换域中，选择中频系数嵌入水印，使得在保证水印系统安全性的同时嵌入水印的图像能达到较好的图像质量效果。

（3）结合人类视觉感知系统特性，计算嵌入强度，实现水印强度的动态嵌入，较好的平衡了不可感知性和鲁棒性。

需要进一步研究的地方：

本文提出的算法是基于 DCT 域的自适应水印算法，虽然存在一定的优点，但是

还有一些不足：

- (1) 该算法在水印检测过程中没有实现盲提取，限制了应用前景。
- (2) 水印嵌入信息容量还有待提高。
- (3) 算法相对来说较为复杂。

鉴于以上存在的不足，以后可以从多方面对课题进行研究：首先，如何实现水印的盲提取。其次如何在保证系统特性的前提下，增加水印嵌入容量。再次，对多种类型数字图像及水印对进行测试研究，使测试结果更具说服力，具有更广阔的应用前景。

数字水印技术虽然是研究的热点，但由于其横跨多学科的学术特点，其学科理论体系还要不断完善，研究的深度和广度还有待挖掘。不断加深数字水印技术的研究，能使其在广泛的应用领域中发挥更大的作用。所以结合数字作品的特点，研究数字水印技术，探讨合适有效的版权保护系统是十分有必要的，这对于有效地保护版权人和出版商的权益，有非常重要的意义。

## 参考文献

- [1]任骥远.论数字出版的版权保护[J].新闻世界,2014,(10).
- [2]关虎.基于备案的数字版权追踪关键技术研[D].中国科学院大学,2014.
- [3]王哲. 数字版权保护技术对行业的影响初探[J].中国版权,2014(5).
- [4]Kejariwal.Watermarking[J]. IEEE , 2003. 10: 37-40.
- [5]Jana Dittmann, Alexander Behr, Mark Stabenan, etal. Combing digital Watermarks and collusion secure Fingerprints for digital Images. [http://www.assuredigit.com/tech\\_doc/more/](http://www.assuredigit.com/tech_doc/more/), 2008,3.
- [6] Trikel A. Z, et al. Electronic watermark[C]. In Digital image computing, Technology and Applications (DICTA' 93), Macquarie University 1993: 666-673.
- [7] Van Schyndel R. G., Tirkel A. Z., Osborne C. F. A digital watermark[A]. In: International Conference on Image Processing[C]. Austin, Texas, 1994, 2: 86-90.
- [8]聂雪莲.面向图像版权和内容保护的数字水印技术研究[D].解放军信息工程大学,2012.
- [9]孙新凤.基于 DCT 图像特征向量的小波包数字水印研究[D].燕山大学,2007(3): 13.
- [10]丁镠. DCT 域水印和文本水印算法的研究[D].江苏大学,2010: 5-7.
- [11] 聂烜;黄登山;郭达伟等. 数字图像水印技术综述[J]. 电脑知识与技术, 2015(1).
- [12]蔡吉人.信息安全密码学[M].北京:北京邮电大学出版社,2003:14-16.
- [13] Trikel A, Van Schyndel R, Osborne C. A digital watermark [A]. In: IEEE Proceeding on International Conference on Image Processing[C]. Austin, Tex: IEEE press, 1994: 86-90.
- [14] Bender W, Gruhl D,Morimoto N. Techniques for data hiding. IBM Systems Journal, 1996, 9(4): 313-318.
- [15] Voyatzis G, Pitas I. Embedding robust watermarks by chaotic mixing. 13th, International Conference on Digital Signal Processing, 1997 (1): 213-216.
- [16] Wang C. M, Wang P. C. Steganography on point-sampled geometry. Elsevier Computers &Graphics, 2006, 30(2): 244-254.
- [17]Cox L J, Kihan J, Leighton F. T, Shamoon T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, Vol.6(12): 1673-1686.
- [18] Ruanaidh J, Pun T. Rotation scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarks[J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 303-317.

- [19]HayesM H.The reconstruction of a multidimensional sequence from the phase or magnitude of the FFT[J]. IEEE Trans, on ASSP, No.1, 1992:140-154.
- [20] Christine I, Podilchuk. Image-Adaptive watermarking using visual models.IEEE Journal on Selected Areas in Communications. May1998, Vol.16(4): 525-539.
- [21]Fangjun Huang and Zhi-Hong Guan. A hybrid SVD-DCT watermarking method based on LPSNR. Pattern Recognition Letters, Nov. 2004, Vol.25(15): 1769-1775.
- [22] Dawei Zhao, Guanrong Chen, Wenbo Liu. A chaos-based robust wavelet-domain watermarking. Chaos, Solitons & Fractals, Oct. 2004, Vol.22: 47-54.
- [23] Santa Agreste, Guido Andaloro, Daniela Prestipino, Luigia Puceio. An image adaptive, wavelet-based watermarking of digital images.Journal of Computational and Applied Mathematics, In Press, Corrected Proof, Available online 1 Feb. 2007.
- [24]肖芸.DRM 技术在数字出版中的应用研究[D].杭州电子科技大学,2013.
- [25]吴倪.基于 DCT 域的数字水印算法及其在版权保护中的应用[D].中南大学,2013.
- [26]Ingemar J.Cox, Matthew L.Miller, Jeffrey A. Bloom, Digital Watermarking [M], San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers,2001, 1~105(王颖 ,黄志蓓译 .数字水印 .北京 :电子工业出版社 , 2003 , 1~105)
- [27]孟芳慧. 基于改进的水印算法版权保护系统研究与设计[D]. 曲阜师范大学, 2013.
- [28]王炳锡, 彭天强. 信息隐藏技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [29] 冯柳平. 数字版权保护技术及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [30] IngemarJ.Cox,J.P.Linnartz.Some general methods for tampering with water marks.IEEE Journal on Selected Areas in Communication,1998,16(4):587—593.
- [31] 王文娟.图像数字水印技术研究综述[J].电脑知识与技术. 2008(36):2742-2744.  
<http://www.docin.com/p-440003237.html>
- [32] 付春平.一种基于 HVS 和 DCT 的数字水印算法的研究 [D] .苏州大学,2008.
- [33] Ingemar J, Cox. Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia[R]. Technical Report 95-10, NEC Research Institute, Princeton, NJ, 1995.
- [34] Nikolaidis,S.Tsekeridou,A.Tefasand V.Solaehidis· A survey on Watermarking application scenarios and related attacks.International conference on image Processing, 2001, 3(10): 991-994.

- [35]曹永刚, 王克, 王道顺, 等. 数字图像水印攻击方法新分类[J]. 计算机应用研究. 2007, 24(4).
- [36]钟桦, 张小华, 焦李成. 数字水印与图像认证—算法应用[M].西安: 西安电子科技大学出版社, 2006:29-33.
- [37]于涛. 基于离散余弦变换的矢量地图水印算法研究[D].哈尔滨工程大学. 2009: 21-23.
- [38]常晔. 基于 DCT 域的图像数字盲水印算法设计及硬件实现[D].天津大学, 2010: 29-30.
- [39]叶新友. 用于图像与视频数字水印技术的视觉模型[J].微计算机信息, 2010(26): 190-191.
- [40]何冰. 基于分块 DCT 变换的抗旋转,缩放攻击零水印算法[J]. 微计算机应用. 2010.31(7): 1-10.
- [41]秦国亮, 张治国. 一种基于置乱和融合的图像 DCT 域信息隐藏算法[J]. 计算机安全. 2009(5): 49-50.
- [42]魏作华. 置乱技术在数字水印中的应用[J]. 软件导刊. 2008, 7(1).
- [43]丁玮,肖伟齐,齐东旭. 基于 Arnold 变换的数字图像置乱技术[J].计算机辅助设计与图形学学报,2001, 13(4): 338-341.
- [44]赵俊玲.基于 DCT 的数字水印研究[D].山东大学,2009: 37-39.
- [45] Rafael C.Gonzalez , Richard E.Woods 著.数字图像处理[M].北京:电子工业出版社,2007(8).
- [46] Huang J W, Shi Y Q. Embedding gray level images [J]. The 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2001(5): 239-242.

## 致谢

本文是在老师和同学的帮助与鼓励下完成的，在此衷心地感谢我的导师钟宏老师。在论文的选题和写作过程中，钟老师渊博的专业知识、深厚扎实的理论基础、一丝不苟的研究精神以及严谨细致的态度，给我很深的印象，并将在我工作学习中给以启迪和帮助。

两年半的时间里，在北京理工大学老师的认真教导下，使我深刻掌握了计算机应用技术的理论与实践。毕业论文的最终完成倾注了钟老师的心血，在此，谨向钟老师表达我最诚挚的敬意！

在北京理工大学进行研究生学习期间和课题的研究过程中得到了很多同学的帮助鼓励，在我困惑、迷茫的时候，是他们的鼓励帮助让我一直前行，在此一并表示感谢！特别感谢北京理工大学继续教育学院的王镇老师，不厌其烦的发放各种通知、解答我们存在的问题；感谢计算机应用技术组组长赵书静帮助上传各种材料；感谢杨海虹同学在学习期间和论文完成过程中的帮助、启发！

另外感谢我的家人，感谢他们对我学习和生活上的支持和鼓励。是他们无微不至的关怀和无怨无悔的支持给了我无穷的动力，是我求学路上的坚强后盾，同时也给了我强大的精神力量！

最后，衷心地感谢参加评审答辩的各位老师，祝愿你们身体健康，工作顺利！