**分类号**  **TN911.7 密级** **公开**

**UDC 621.39 学位论文编号** **D-10617-30852-(2022)-01163**

**重庆邮电大学硕士学位论文**

**中文题目** **基于变换域的数字图像鲁棒水印** **算法研究**

**英文题目** **Research on Strong Robust**

|  |
| --- |
| **Watermarking Algorithm for Digital** |
| **Based on Transform Domain** |

**学** **号**  **S190131163 姓** **名** **叶绍鹏** **学位类别** **工程硕士** **学科专业** **电子与通信工程** **指导教师** **张天骐** **教授** **完成日期** **2022 年** **3 月** **20 日**

中国知网 https:iiwww.cnki . net

重庆邮电大学硕士学位论文 摘要

摘要

数字技术的进步使得用户可以在互联网上进行上传和下载海量的多媒体数据， 由此引发的盗取伪造、非法滥用的问题比比皆是，严重损害了版权所有者的知识 产权。为了采取有效措施打击这种滥用数据的行为，数字水印技术应运而生。 目 前，大部分数字水印对旋转、缩放、平移等几何攻击以及组合攻击的鲁棒性不强， 因此寻求一种鲁棒性高的数字水印算法来进行版权保护成为一个亟待解决的问题。 本文针对以上问题，以变换域图像水印为研究对象，主要在轮廓波变换(Contourlet Transform, CT)、非下采样轮廓波变换(NonSubsampled Contourlet Transform, NSCT)、 Tetrolet 变换域进行图像水印算法的研究。主要研究内容如下：

(1)针对彩色水印图像的盲提取算法抗几何攻击鲁棒性不强的问题，提出一种 基于 Baker 映射与时空混沌相结合的 CT-QR 盲水印算法。首先将彩色水印分离成 RGB 分量，对三个分量分别进行 Baker 映射与时空混沌相结合的预处理操作，然 后对载体图像的 RGB 分量分别进行 CT ，分块 QR 分解得到酉矩阵，最后根据嵌 入规则将加密后的水印分通道地嵌入到酉矩阵中。水印提取时利用Radon 变换对 图像进行几何校正可提高其几何攻击的鲁棒性。仿真结果表明，该算法能有效抵 抗加噪、滤波、JPEG 压缩、剪切、平移、旋转、马赛克、篡改等攻击，还能很好 地实现不可感知性和鲁棒性的平衡。

(2)针对传统数字水印算法的透明性随嵌入强度的增加而下降，鲁棒性和稳定 性差的问题，提出一种基于极化码与二维交织算法相结合的 NSCT 域频数质心零 水印算法。该算法对水印信息依次进行极化码编码，二维交织构造出交织矩阵， 然后对载体图像进行 NSCT 变换获得其低频系数，再通过分块非负矩阵分解得到 一维基矩阵；根据频数分布特征计算局部频数质心以此构造出特征矩阵，最后将 含有水印信息的交织方阵和特征矩阵进行异或操作生成零水印。该算法具有较强 的鲁棒性，既能不修改载体图像数据信息，又能在较为复杂的攻击条件下稳定提 取图像特征恢复水印信息，因此可以广泛地应用在数字产品的版权保护中。

(3)针对大多数零水印算法是基于灰度图像设计的，且鲁棒性和稳定性较差的 问题，为进一步提高零水印系统的鲁棒性，提出一种基于彩色图像 Tetrolet变换的

I

中国知网 https:iiwww.cnki . net

频数质心零水印算法。该算法先提取彩色载体图像 YCbCr 空间的亮度分量，再对 亮度分量进行 Tetrolet变换获得其低频系数，再通过分块非负矩阵分解得到一维基 矩阵，根据频数分布特征计算局部频数质心以此构造出特征矩阵；对水印信息依 次进行极化码编码，二维交织构造出交织矩阵；最后将含有水印信息的交织方阵 和特征矩阵进行异或操作生成零水印。大量实验表明，该零水印算法可以有效地 抵抗常规的图像处理攻击、几何攻击以及组合攻击，具有较强的鲁棒性和稳定性， 且具有良好的实用价值。

**关键词**：数字水印，变换域，轮廓波变换，Tetrolet 变换，鲁棒性

II

中国知网 https:iiwww.cnki . net

**Abstract**

The progress of digital technology enables users to upload and download huge amounts of multimedia data on the Internet, which leads to the problems of theft, forgery and illegal abuse, which seriously damage the intellectual property rights of copyright owners. To take effective measures to combat this abuse of data, digital watermarking technology came into being. At present, most digital watermarks are not robust to geometric attacks such as rotation, scaling, translation and combination attacks, so finding a robust digital watermarking algorithm for copyright protection has become an urgent problem to be solved.In order to solve the above problems, this thesis takes the image watermarking in the transform domain as the research object, and mainly studies the image watermarking algorithms in the Contourlet Transform (CT), Non-Subsampled Contourlet Transform (NSCT) and Tetrolet transform domain. The main research contents are as follows:

(1) In order to solve the problem that the blind extraction algorithm of color watermark image is not robust to geometric attacks, a dual-color robust blind watermarking algorithm based on Baker map and spatio-temporal chaos is proposed. Firstly, the color watermark was separated into RGB components, and the three components were preprocessed by the combination of Baker mapping and spatio-temporal chaos, then the RGB components of the carrier image were CT respectively, and the block QR decomposition was used to get the unitary matrix. Finally, according to the embedding rules, the encrypted watermark was embedded into the unitary matrix. When the watermark was extracted, the geometric correction of the image using Radon transform can improve the robustness of geometric attacks. Simulation results show that the algorithm can effectively resist noise, filtering, JPEG compression, shearing, translation, rotation, mosaic, tampering and other attacks, but also can achieve a good balance between imperceptibility and robustness.

(2) In order to solve the problem that the transparency of traditional digital watermarking algorithms decreases with the increase of embedding strength, and the robustness and stability are poor, a frequency centroid zero watermarking algorithm in NSCT domain based on polarization code and two-dimensional interleaving algorithm is proposed. In this algorithm, the watermark information was encoded by polarization

III

中国知网 https:iiwww.cnki . net

code in turn, and the interleaving matrix was constructed by two-dimensional interleaving. Then the low-frequency coefficients of the carrier image were obtained by NSCT transform, and then the one-dimensional matrix was obtained by block non-negative matrix decomposition. According to the characteristics of frequency distribution, the local frequency centroid was calculated to construct the feature matrix. Finally, the XOR operation of the interlaced matrix and feature matrix containing watermark information was carried out to generate zero watermark. The algorithm has strong robustness, not only can not modify the carrier image data information, but also can stably extract image features to restore watermark information under complex attack conditions, so it can be widely used in the copyright protection of digital products.

(3) In view of the poor robustness and stability of most zero-watermarking algorithms, or based on grayscale images, in order to further improve the robustness of zero-watermarking system, a frequency centroid zero-watermarking algorithm based on color image Tetrolet transform was proposed. The algorithm first extracts the luminance component of the color carrier image in YCbCr space, then carries on the Tetrolet transform to get its low-frequency coefficients, and then obtains one-dimensional matrix through block non-negative matrix decomposition. According to the characteristics of frequency distribution, the local frequency centroid was calculated to construct the characteristic matrix. The watermark information was encoded by polarization code in turn, and the interleaving matrix was constructed by two-dimensional interleaving. Finally, the zero watermark was generated by XOR operation between the interleaved square matrix and the feature matrix containing watermark information. A large number of experiments show that the zero-watermarking algorithm can effectively resist conventional image processing attacks, geometric attacks and combinatorial attacks, has strong robustness and stability, and has good practical value.

**Keywords**: digital watermarking, transform domain, Contourlet transform, Tetrolet transform, robustness

IV

中国知网 https:iiwww.cnki . net

目 录

[第 1 章 绪论 1](#bookmark2)

[1.1 数字水印背景及意义 1](#bookmark3)

[1.2 国内外研究现状 2](#bookmark4)

[1.2.1 数字图像水印技术研究现状 2](#bookmark5)

[1.2.2 数字水印算法存在的主要问题 5](#bookmark6)

[1.3 论文组织结构及章节安排 6](#bookmark7)

[1.3.1 论文组织结构 6](#bookmark8)

[1.3.2 章节安排 7](#bookmark9)

[第 2 章 数字水印系统及常见的变换域 9](#bookmark10)

[2.1 引言 9](#bookmark11)

[2.2 数字水印系统 9](#bookmark12)

[2.2.1 数字水印系统的基本模型 9](#bookmark13)

[2.2.2 数字水印特性 10](#bookmark14)

[2.2.3 数字水印的客观评价指标 11](#bookmark15)

[2.2.4 传统水印与零水印 13](#bookmark16)

[2.2.5 变换域数字水印的特点 13](#bookmark17)

[2.3 常见的变换域原理 14](#bookmark18)

[2.3.1 DFT 原理 14](#bookmark19)

[2.3.2 DCT 原理 14](#bookmark20)

[2.3.3 DWT 原理 15](#bookmark21)

[2.4 本章小结 16](#bookmark22)

[第 3 章 基于 Baker 映射与时空混沌相结合的 CT-QR 盲水印算法](#bookmark23)

[17](#bookmark23)

[3.1 引言 17](#bookmark24)

[3.2 Contourlet 变换理论 17](#bookmark25)

[3.3 Baker 映射和耦合映像格子模型 19](#bookmark26)

[3.3.1 Baker 映射 20](#bookmark27)

[3.3.2 CML 模型 20](#bookmark28)

[3.4 Radon 变换与 QR 分解 22](#bookmark29)

[3.4.1 Radon 变换 22](#bookmark30)

[3.4.2 QR 分解 22](#bookmark31)

[3.5 CT-QR 域嵌入和提取算法 23](#bookmark32)

[3.5.1 水印嵌入步骤 23](#bookmark33)

[3.5.2 水印提取步骤 24](#bookmark34)

中国知网 https:iiwww.cnki . net

[3.6 仿真实验与结果分析 25](#bookmark35)

[3.6.1 不可见性测试 25](#bookmark36)

[3.6.2 鲁棒性测试 27](#bookmark37)

[3.7 本章小结 32](#bookmark38)

[第 4 章 基于 NSCT-NMF 域与编码交织的频数质心零水印算法 33](#bookmark39)

[4.1 引言 33](#bookmark40)

[4.2 非下采样轮廓波变换 33](#bookmark41)

[4.3 极化码理论基础与二维交织算法 36](#bookmark42)

[4.3.1 极化码理论基础 36](#bookmark43)

[4.3.2 二维交织算法 38](#bookmark44)

[4.4 NMF 分解 39](#bookmark45)

[4.5 零水印的构造和提取算法 40](#bookmark46)

[4.5.1 构造零水印 40](#bookmark47)

[4.5.2 水印的提取算法 41](#bookmark48)

[4.6 实验结果与分析 42](#bookmark49)

[4.6.1 唯一性检测 43](#bookmark50)

[4.6.2 鲁棒性检测 43](#bookmark51)

[4.6.3 对比实验 47](#bookmark52)

[4.7 本章小结 48](#bookmark53)

[第 5 章 基于彩色图像 Tetrolet 变换的频数质心零水印算法 51](#bookmark54)

[5.1 引言 51](#bookmark55)

[5.2 Tetrolet 变换 51](#bookmark56)

[5.3 YCbCr 空间变换 54](#bookmark57)

[5.4 零水印的生成与提取 55](#bookmark58)

[5.4.1 载体图像的处理 55](#bookmark59)

[5.4.2 零水印的生成 56](#bookmark60)

[5.4.3 零水印提取 56](#bookmark61)

[5.5 实验结果与分析 57](#bookmark62)

[5.5.1 唯一性检测 57](#bookmark63)

[5.5.2 鲁棒性检测 58](#bookmark64)

[5.5.3 对比实验 62](#bookmark65)

[5.6 本章小结 64](#bookmark66)

[第 6 章 结束语 65](#bookmark67)

[6.1 论文主要工作及总结 65](#bookmark68)

[6.2 后续研究工作 66](#bookmark69)

[参考文献 67](#bookmark70)

中国知网 https:iiwww.cnki . net

图录

[图 1. 1 内容结构框架 7](#bookmark71)

[图 2. 1 水印系统的基本模型 9](#bookmark72)

[图 2.2 不可感知性、鲁棒性、嵌入容量关系图 11](#bookmark73)

[图 2.3 零水印注册与提取流程图 13](#bookmark74)

[图 2.4 三级小波分解示意图 15](#bookmark75)

[图 3. 1 Contourlet 变换 18](#bookmark76)

[图 3.2 小波变换和轮廓变换的基本结构对比图 19](#bookmark77)

[图 3.3 Lena 图像的 Contoulet 变换与重构 19](#bookmark78)

[图 3.4 加密算法示意图 20](#bookmark79)

[图 3.5 时空混沌图像 21](#bookmark80)

[图 3.6 水印加密对比图 21](#bookmark81)

[图 3.7 水印嵌入与提取流程框图 24](#bookmark82)

[图 3.8 载体图像与嵌入水印载体图像 26](#bookmark83)

[图 3.9 载体图像与嵌入水印后图像各分量直方图 27](#bookmark84)

[图 3. 10 原始水印与提取的水印 27](#bookmark85)

[图 3. 11 受到攻击的图像 30](#bookmark86)

[图 3.12 不同攻击下水印的提取效果 30](#bookmark87)

[图 4. 1 三级非下采样金字塔分解 34](#bookmark88)

[图 4.2 非下采样滤波器组 34](#bookmark89)

[图 4.3 非下采样方向滤波器组 35](#bookmark90)

[图 4.4 非下采样 Contourlet 变换 36](#bookmark91)

[图 4.5 信道合并拆分示意图 37](#bookmark92)

[图 4.6 交织技术分散错误 39](#bookmark93)

[图 4.7 水印的生成与提取流程图 41](#bookmark94)

IX

中国知网 https:iiwww.cnki . net

[图 4.8 载体图像与版权水印 42](#bookmark95)

[图 4.9 与表 4.1 中等于 0.7163 的 NC 值相关联的水印图像 43](#bookmark96)

[图 4. 10 不同攻击下的载体图像 46](#bookmark97)

[图 4.11 从不同载体图像中所提取的水印 46](#bookmark98)

[图 5. 1 5 种基本四格拼版 52](#bookmark99)

[图 5.2 22 种填充方式 52](#bookmark100)

[图 5.3 Tetrolrt 变换结构图 53](#bookmark101)

[图 5.4 RGB 空间与 YCbCr 空间的关系 54](#bookmark102)

[图 5.5 生成特征矩阵 56](#bookmark103)

[图 5.6 生成零水印 56](#bookmark104)

[图 5.7 提取零水印 57](#bookmark105)

[图 5.8 载体图像与水印 57](#bookmark106)

[图 5.9 表 5. 1 中 NC=0.6854 的水印图像 58](#bookmark107)

[图 5.10 Lena 图像不同方式的剪切攻击 60](#bookmark108)

[图 5.11 未交织与交织提取水印对比 60](#bookmark109)

[图 5. 12 不同攻击下的载体图像 61](#bookmark110)

[图 5.13 不同攻击方式下提取的水印 62](#bookmark111)

[图 5. 14 不同算法对比结果 63](#bookmark112)

X

中国知网 https:iiwww.cnki . net

表录

[表 3. 1 非几何攻击实验(NC) 28](#bookmark114)

[表 3.2 不同攻击下水印提取 NC 值 29](#bookmark115)

[表 3.3 鲁棒性对比实验(NC) 31](#bookmark116)

[表 4. 1 唯一性检测(NC) 43](#bookmark117)

[表 4.2 非几何攻击实验(NC) 44](#bookmark118)

[表 4.3 非几何攻击实验(BER) 44](#bookmark119)

[表 4.4 几何攻击实验(NC) 45](#bookmark120)

[表 4.5 几何攻击实验(BER) 45](#bookmark121)

[表 4.6 不同算法对比结果(NC) 47](#bookmark122)

[表 5. 1 唯一性检测(NC) 58](#bookmark123)

[表 5.2 非几何攻击实验(NC) 59](#bookmark124)

[表 5.3 几何攻击实验(NC) 59](#bookmark125)

XI

中国知网 https:iiwww.cnki . net

注释表

BER Bit Error Rate ，误码率

CML Coupled Map Lattices ，耦合映像格子

CT Contourlet Transform ，轮廓波变换

DCT Discrete Cosine Transform ，离散余弦变换

DFT Discrete Fourier Transform ，离散傅里叶变换

DT-CWT Dual Tree Complet Wavelet Transform ，二叉树复数小波变换

DWT Discrete Wavlet Transform ，离散小波变换

FrFT Fractional Fourier Transform ，分数阶傅里叶变换

FWHT Fast Walsh-Hadamard Transform ，快速沃尔什-哈达玛变换

HVS Discrete Cosine Transform ，人类视觉系统

LBP Local Binary Pattern ，局部二进制模式

LMSE Laplace Mean Squared Error ，拉普拉斯均方误差

LP Laplacian Pyramid ，拉普拉斯金字塔

LSB Least Significant Bit ，最低有效位算法

MSE Mean Squared Error ，均方误差

NC Normalized Coefficient ，归一化相关系数

NMF Nonnegative Matrix Factorization ，非负矩阵分解

NSCT NonSubsampled Contourlet Transform ，非下采样轮廓波变换

NSDFB NonSubsampled Directional Filter Bank ，非下采样方向滤波器组

XIII

中国知网 https:iiwww.cnki . net

NSFB NonSubsampled Filter Bank ，非下采样滤波器组

NSP NonSubsampled Pyramid ，非下采样金字塔

PDFB Pyramid Directional Filter Bank ，塔型方向滤波器组

PSNR Peak Signal to Noise Ratio ，峰值信噪比

SSIM Structural Similarity ，结构相似度

SVD Singular Value Decomposition ，奇异值分解

XIV

中国知网 https:iiwww.cnki . net

第 1 章 绪论

1.1 数字水印背景及意义

随着物联网和各种人工智能设备的普及，大量的数字数据被存储在微博、脸 书、推特[1]等开放平台上共享。这些共享平台给我们生活带来便利的同时，也存在 许多的隐患。在这些平台上，图像、视频是最常用的数据共享方式。由于图像的 易复制性和一些图像处理工具的易操作性，通过这种共享方式会导致图像的恶意 传播、非法复制和数字数据的改变，还可能会带来隐私泄露、版权侵犯、身份盗 窃等一系列问题。对版权所有者来说，篡改和恶意传播图像侵害其知识产权和劳 动成果；若涉及一些国家机密的图像，一旦遭到非法传播，将会造成巨大的经济 和政治损失，甚至危害国家安全。因此关于数字产品的版权保护成为信息安全领 域的热点问题。

为了解决版权保护问题，研究人员提出了两种信息安全方法，可分为密码学 方法和信息隐藏方法。在密码学方法中，消息被转换为安全格式，只能由授权人 员解码和恢复。这种方案有一定的局限性，若消息被解码，它就不再安全了。此 外，与信息隐藏过程相比，密码学的过程更为复杂。隐写术和数字水印技术等信 息隐藏方法可以很容易地克服密码学技术中的复杂性和数据安全的局限性问题。

其中关于隐写术一词“Steganography[2] ”源于两个希腊语“steganos ”和“graphei ”。 在隐写术中，要求覆盖对象和水印信息不相关，只有在互相信任的两方之间才能 检测到隐藏信息的存在，且不具有鲁棒性，这使得该方法不适合应用于多媒体数 据的版权保护。数字水印是指在不干扰载体数据的感知质量的情况下，在载体数 据中插入一些数据(称为水印)的过程，水印与载体数据紧密结合并隐藏其中，构成 一个水印系统。所选的水印可以是随机生成的二进制序列、一些二进制标志、数 字签名、人的生物特征等，在嵌入过程中尽可能小地对载体数据进行修改(后续所 提的零水印方案并未修改载体数据)使水印具有强鲁棒性。数字水印的主要应用领 域包括：版权保护，真伪鉴别，数据监测与跟踪。通过分析上述不同信息安全方 法的优缺点，可以得出数字水印方法是信息安全方法中的最佳选择，非常适合于 版权保护或版权认证。

1

中国知网 https:iiwww.cnki . net

基于此，越来越多的国内外学者和科研机构投入大量的人力财力致力于发展 数字水印技术，并取得一定的进展，但多数还停留在实验室，与具体应用落地还 有一段距离。在信息爆炸的时代，如何保障数字产品的版权问题急需提上日程， 我们必须要研制一款稳定的，成熟的水印产品，以满足时代发展的需求。

数字水印技术在信息安全领域发挥着不可替代的作用，是一门横跨数理统计、 密码学、通信技术、信号处理、计算机科学等多门学科的新兴技术，对其进行研 究具有相当重要的学术意义与经济价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 数字图像水印技术研究现状

最早开始将数字水印技术以学术论文的形式发表出来的是 Schyndel 与 Tirkl 等 人于 1994 年发表的“ADigital Watermark[3] ”一文。文中阐明了数字水印技术发展 前景与应用领域，并提出了一种经典的数字水印算法—最低有效位(Least Signifiant Bit, LSB)水印算法。1995 年，Cox[4]等人将扩频通信的方法应用于水印算法，提高 了水印系统的鲁棒性。1996 年至 2004 年一共召开了六次信息隐藏学术研讨会，数 字水印技术都是最热议的课题。随后国内外学者对数字水印技术的研究不断地深 入，每年与其相关的文章迅速增加，其中不乏 IEEE Trans. on Image Processing，IEEE Journal of Select Areas on Communication，IEEE Trans. Signal Processing 等权威刊物。

数字水印技术有许多不同的分类方式，根据应用场景的不同，大致可以分为 图像水印[5-7] ，语音水印[8] ，视频水印[9-10]。视频的本质是图像，而语音处理较为繁 琐，所以图像水印成为研究的重点；水印算法可分为空间域算法与变换域算法， 空间域算法是直接修改载体图像的像素值，而变换域算法是利用各种变换原理(如 离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT) ，离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT) ，离散小波变换(Discrete Wavlet Transform, DWT) ，分数阶傅里叶 变换(Fractional Fourier Transform，FrFT))去修改变换域的系数。在阅读大量参考文 献的基础上，分别从空间域与变换域介绍研究现状。

在空间域水印算法中，直接修改图像中某些选定像素的强度值，以达到隐藏 水印数据[11-12]的目的。嵌入水印最简单的方法是用水印位信息去修改载体图像像素

2

中国知网 https:iiwww.cnki . net

值的最低有效位。空间域水印方法简单，嵌入数据容量高。另一个优点是，在水 印嵌入过程中，可以重复嵌入一个水印，只要有一个水印能够抵御攻击，水印的 目标就得以实现，但是无法克服 JPEG 压缩和噪声添加等图像处理攻击[13] 。在继 LSB(Least Significant Byte, LSB)方案之后，局部二进制模式(Local Binary Battern, LBP)法[14]是另一个被广泛采取的方案，先将载体图像分块，然后在每块中根据中 间像素与其相邻像素之间的空间关系进行水印的嵌入和提取，该方法对滤波攻击 非常脆弱，多用于半脆弱性数字水印。随后，又有 Patchwaork[15]方法，纹理块映 射编码[16]等空间域算法相继产生。近几年来，马玲[17]等将图像进行分块处理，根 据每一个子块的奇偶性来设置嵌入规则，从而将水印信息嵌入其中。若水印信息 密集，则提取效果不佳。尚福华等[18]给出了一种量子水印的方案，将彩色图像量 子化再修改图像的灰度值嵌入水印，获得了良好不可见性。岳桢等[19-20]提出广义 直方图 2Bin 三进制和多 Bin 多进制空域图像数字水印算法，进一步平衡了不可见 性和鲁棒性。Wan Wenbo[21]利用颜色复杂度[22]的差异模型在空间域嵌入水印，获 得良好的不可见性。熊祥光[23]将零水印[24]方案与空间域水印相结合，在没有修改 载体图像的基础上实现水印的嵌入提取，所构成的水印系统在信号处理攻击上具 有较强的鲁棒性，但对几何攻击效果不佳。

综上所述，空间域水印算法虽然简单，但是总体上视觉效果不佳，鲁棒性较 差。变换域算法能结合人类视觉系统(Human Visual System, HVS)将水印信息均匀 地嵌入在载体数据中，更能体现整体特性，使水印系统更加具有较强的鲁棒性与 良好的不可见性，变换域水印算法具有独特的优势，因此本文将变换域作为研究 的重点。

首先，Cox 等[4]提出一种 DCT 域的非盲数字水印算法，将水印嵌入到 DCT 系 数的高频系数中，在一定程度上提高了鲁棒性，但是算法是非盲的，应用具有局 限性。Jiang 等[25]提出一种针对彩色图像的零水印算法，把载体图像分成 R、G、B 和灰度 4 个分量，然后构造出 2 个三维张量，对张量进行奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)和 DCT 可以生成包含宿主图像主要信息的特征图像，该方式 比较新颖，但仍缺乏鲁棒性。Jimson N[26] 、Ying Qichao[27]所提的修改 DFT 系数的 方案，都只对部分攻击具有良好的鲁棒性。而 Li Mianjie[28]提出的基于四元数傅里 叶变换的彩色图像水印方法，利用QR 分解四元数进行量化索引调制嵌入水印，大

3

中国知网 https:iiwww.cnki . net

幅度提高了抗几何攻击能力，该方法相比于 DFT ，DWT 具有良好的时频域特性， 弥补了 DFT 的许多不足。Singh[29]等提出了一种基于多重变换(DWT、DCT 和 SVD) 的鲁棒水印方案，对载体图像应用i 级 DWT ，在高频分量中进行 DCT 和 SVD 得 到水印图像。然而，由于应用了多重变换，该算法比较复杂，并且嵌入在高频分 量，使该算法容易受到外部攻击。Rahman 和 Rabbi[30]介绍了一种基于 DWT 和 SVD 的彩色图像水印方案，对载体图像的 R、G 、B 分量进行分解，利用4 级 DWT 对 R 分量进行分解，然后利用DWT 分解得到的 HL 子波段的 SVD 进行分解。然而， 该算法对高频抖动和旋转等攻击没有表现出鲁棒性，虚警问题也没有得到处理。 SU[31]利用LU 分解将水印嵌入到下三角矩阵的系数中，嵌入水印后图像的不可感 知性差。Khanam T [32]提出了一种基于快速沃尔什-哈达玛变换(Fast Wash-Hadamard Transform, FWHT)、SVD、密钥映射和系数排序的盲水印算法，其不可感知性和对 旋转剪切等几何攻击效果较差。

小波域的广泛应用是因为其对空间—频率多尺度的分析能力以及具有 Mallet 的快速算法。然而小波变换只具有有限方向，不能表示线奇异和面奇异的高维函 数，实际上许多图像表现为光滑曲线上的奇异性。认识到小波变换的不足，研究 人员开始寻找比小波更加“稀疏 ”表示的工具，相应地出现了后小波变换的研究。 在后小波域中，脊波(Ridgelet)理论[33]是较为经典的理论，随之出现了曲波域[34] (Curvelet)、轮廓波(Contourlet)域[35]、非下采样轮廓波[36](NonSubsampled Contourlet) 域、Tetrolet[37]域等变换域水印算法。

吴德阳等[38]人在 Curvelet 变换域，提出一种基于改进奇异值和子块映射的图 像零水印算法，该算法能有效抵抗信号处理攻击，但对旋转攻击效果不佳，算法 又局限于灰度图像。陈祥等[39]在 Contourlet 域，结合 Arnold 置乱、QR 分解提出了 一种彩色图像水印算法，既能有效抵抗几何攻击，又具有良好实用价值。Chen[40] 在 NSCT 域利用BSVD 分解嵌入水印，结合 Radon 变换校正攻击后的图像，该算 法能有效抵抗旋转攻击，但并未能实现盲提取。而 Tetrolet 变换由 Krommweh[41] 在 2009 年提出，兼顾小波变换与轮廓波变换的优势。吴捷[37]利用传统的水印算法 修改 Tetrolet 系数，所获得效果并不佳，不可见性差，而且抗噪性能不高。但是 Tetrolet 在零水印系统中的应用几乎还是一片空白，还有很大的研究空间。

此外，近几年来，将数字水印技术与神经网络[42-44]、蜂群算法[45-46]、遗传算法

4

中国知网 https:iiwww.cnki . net

[47-49] 、视觉密码[50]等技术相结合，使得水印算法丰富多彩，设计新颖，性能也得 到较大幅度地提升。与各种新理论相结合的数字水印算法也层出不穷，算法设计 新颖，在鲁棒性方面也有较大的提升，但这些新颖的方案普遍复杂度高，实现困 难，缺乏普适性。

1.2.2 数字水印算法存在的主要问题

数字水印技术是一门涉及多学科思想和理论的应用技术，随着互联网媒体的 迅猛发展，人们对它的需求也越为迫切，虽然近二十年来数字水印领域取得了较 为丰硕的成果，然而数字水印技术的理论并未成熟，依然存在诸多待解决的问题。 在充分调研考证后，将主要问题归纳为以下几个方面：

(1)如何平衡数字水印算法中鲁棒性与不可见性的矛盾。在数字水印嵌入算法 中，增加水印的嵌入强度，能大幅度地提升水印系统的鲁棒性。然而，若嵌入强 度过大，会使嵌入水印后的图像质量迅速下降，不能满足不可见性。若嵌入强度 过小，满足了不可见性，水印系统的鲁棒性又变得不尽如人意。大多时候研究人 员大多都是凭借经验，或者不断试值去选取一个较为合适的嵌入强度。这种方案 并不能使鲁棒性和不可见性达到最优，而且比较费时，属于偏主观的判断。因此， 如何去选择嵌入强度平衡鲁棒性和不可见性一直是数字水印领域的重要研究课题 之一。

(2)大多数水印算法抗几何攻击能力不强。对于常规的信号处理攻击， 目前的 研究已经达到一个不错的水平，可对于几何攻击，大多数水印算法表现得不尽人 意。剪切、旋转、平移等几何攻击不仅改变图像的像素值，还改变像素的位置信 息，这加大了对水印信息的提取难度。水印系统的鲁棒性是相当关键的一个因素， 故提高水印系统抗几何攻击的鲁棒性具有重要意义。

(3)现有的算法各有局限性，缺乏普适性。人们研究的各种水印算法有的是针 对二值图像，或者是灰度图像，但现在绝大多数的图像都是彩色的；有的不能实 现水印盲提取，需要原始图像的信息才能提取水印；有的算法复杂度高，生成与 提取水印过程慢；有的只能抵抗某种或某几种攻击等。

(4)缺乏一套对数字水印的客观评价标准。在评价水印系统的不可感知性时， 大部分是凭借研究人员的直观视觉判断，主观性太强，缺乏准确性；对不同水印

5

中国知网 https:iiwww.cnki . net

系统的评判标准不同，如脆弱水印与鲁棒水印、非盲水印与盲水印系统，有时候 我们只需要知道水印是否被篡改即可，有时候我们需要完整地将水印信息提取出 来进行比对。

(5)在数字水印领域没有形成一套完整的理论体系，缺乏基本理论和方法的支 撑。如后小波理论应用于数字水印系统有其独特的优势， 目前对后小波理论的研 究涉足较浅。

以上问题为目前制约数字水印技术发展的主要问题，该工作任重而道远。但 是以发展的眼光看待问题，这些问题都是暂时的，在我们科研人员的共同努力下， 这些问题都会慢慢得到解决。

1.3 论文组织结构及章节安排

1.3.1 论文组织结构

根据对国内外鲁棒数字水印技术的调研，以及当前制约水印技术发展的问题， 旨在进一步提高数字水印在变换域的鲁棒性，本论文提出了基于变换域的数字图 像鲁棒水印算法。在 Contourle 变换域，选择合适的频域子带，结合 QR 分解将水 印嵌入，利用Radon 变换提高抗几何攻击性能，实现双彩色图像强鲁棒水印的盲 提取；在非下采样轮廓波变换(NonSubsampled Contourlet Transform, NSCT)—非负 矩阵分解(Nonnegative Matrix Factorizatio, NMF)变换域，结合交织编码技术，利用 频数质心构造零水印，提高了灰度图像零水印算法的鲁棒性。为进一步提高零水 印系统的鲁棒性和普适性，提出了一种彩色图像 Tetrolet变换的频数质心零水印算 法。本文用峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)来评价嵌入水印后图像的 质量与不可感知性，对嵌入水印后的图像进行非几何攻击，几何攻击，组合攻击 等方式，用归一化相关系数(Normalized Coefficient, NC)比较提取的水印与原始水 印的相似度，进而评价水印系统的鲁棒性。对于零水印系统，由于并未改变载体 图像的数据，利用唯一性检测测试其有效性，用 NC 与误码率(Bit Error Rate, BER) 对水印系统的鲁棒性进行评价。

论文的内容结构框架如图 1.1 所示。

6

中国知网 https:iiwww.cnki . net

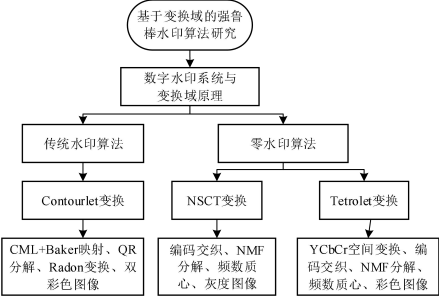


图 1. 1 内容结构框架

由图 1.1 可知，研究内容从以下三个方面展开：

(1) 对彩色载体图像与水印图像分离 R 、G 、B 分量。对载体图像的三个分量 进行 Contourlet 变换，QR 分解；对水印的三个分量进行 Baker 与时空混沌的预处 理置乱，再根据嵌入规则将水印嵌入到三个分量中，最后从受到攻击的图像中提 取水印信息，验证算法的不可见性与鲁棒性。

(2) 为提高水印的鲁棒性，在零水印算法中引入纠错编码技术。利用NSCT 和 NMF 构造频数质心生成特征矩阵，对水印进行编码交织预处理，再将二者异或生 成零水印，最后从受到攻击后的图像中提取水印，验证算法的有效性与鲁棒性。

(3) 为进一步提高零水印系统的鲁棒性与适用性，将构造频数质心的方案推广 到 Tetrolet 变换域。提取彩色载体图像 YCbCr 空间的亮度分量，对亮度分量进行 Tetrolet 变换，用构造频数质心的方式生成零水印，在算法中加入 Radon 变换提高 抗几何攻击的鲁棒性。最后对算法进行唯一性检测、非几何攻击、几何攻击、组 合攻击和对比实验验证其鲁棒性。

1.3.2 章节安排

以下是本文的各章节内容叙述：

第 1 章 绪论。首先简述数字水印的研究背景及意义，然后对国内外研究现状 进行了总结。先介绍了空间域鲁棒水印算法和频域鲁棒水印算法，然后着重介绍

7

中国知网 https:iiwww.cnki . net

了频域水印算法和后小波域变换的优势，将重心过渡到后小波域的研究中，接着 总结了目前制约数字水印发展的几个问题，本文的研究目的是改善或解决其中的 部分问题。最后是对本文的各章节内容进行合理的安排。

第 2 章 数字水印系统及常见的变换域。首先介绍了数字水印的基本模型、特 性、评价指标、传统水印与零水印的关系，以及变换域数字水印的特点，然后介 绍数字水印算法中常用的 DFT、DCT、DWT 等变换，最后引出后小波域中对数字 水印的研究。

第 3 章 基于 Baker 映射与时空混沌相结合的 CT-QR 盲水印算法。首先介绍了 Baker 映射、时空混沌系统、QR 分解、Radon 变换的基本原理，接着从算法目的、 算法流程、嵌入规则、提取步骤进行详细阐述，最后对算法进行多种攻击测试实 验得出水印检测结果。

第 4 章 基于 NSCT-NMF 域与编码交织的频数质心零水印算法。首先介绍了 编码交织技术、NMF 分解、构造频数质心的原理，然后细致描述了通过构造频数 质心生成特征矩阵、对水印信息进行编码交织、零水印的生成与提取的过程，最 后，利用仿真实验测试了在多种攻击下的算法鲁棒性。

第 5 章 基于彩色图像 Tetrolet 变换的频数质心零水印算法。在 Tetrolet 域，在 第 4 章的基础上，将频数质心零水印算法推广到彩色图像，同时阐述了YCbCr 空 间变换理论，最后对算法进行仿真实验与结果分析。

第 6 章 结束语。总结论文的主体工作内容，整理论文优势与不足之处，为后 续研究工作内容埋下伏笔。

8

中国知网 https:iiwww.cnki . net

第 2 章 数字水印系统及常见的变换域

2.1 引言

数字图像水印是一种将水印嵌入到多媒体中，并在多媒体实体中检索或识别 水印图像的机制，是数字图像和多媒体文档等知识产权保护的有效手段。本章介 绍数字水印系统相关的理论知识，并对常见的变换域水印算法进行了分析。

2.2 数字水印系统

2.2.1 数字水印系统的基本模型

数字水印是指在不干扰载体图像感知质量的情况下，在载体图像中插入一些 数据(称为水印)的过程。所选的水印可以是随机生成的二进制序列、一些二进制标 志、数字签名、人的生物特征等。水印系统的开发可以通过两个主要步骤来完成： 水印的嵌入过程与提取过程。水印嵌入过程必然需要两种类型的输入，即载体图 像和水印信息。提取过程是从嵌入水印后的图像或者受到攻击的图像中将水印信 息提取出来，以达到识别目标用户版权的目的。

图 2.1 给出一个广义的水印系统模型，下面对每个单元做简要的解释：

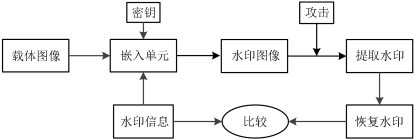


图 2. 1 水印系统的基本模型

嵌入单元：载体图像和水印信息是水印系统嵌入单元的两个基本输入。此外， 还可以提供一个密钥作为该装置的输入，这将进一步提高水印系统的安全性。嵌 入单元的内部是整个水印系统的核心，嵌入方式的选取直接决定水印系统的好坏。 根据所使用的水印算法，生成水印图像作为该单元的输出。

攻击：攻击是降低数字水印强度的因素。水印图像在网络传播的过程中可能

9

中国知网 https:iiwww.cnki . net

会被有意或无意地修改，无意修改大多数是由于传播信道的不理想，有意修改是 黑客不断开发出许多新的攻击影响了水印系统，这些攻击可以大致分类为图像处 理攻击和几何攻击[51][52] ，图像处理攻击包括 JPEG 压缩、噪声添加、抖动、扫描、 平均等，而几何攻击则包括修改、旋转、缩放、裁剪、平移等，因此一个稳定的 成功的水印系统必须要有坚固的能力来抵抗这些攻击[53]。

提取单元：从水印图像或被攻击的水印图像中提取隐藏的数据，在大多数情 况下，提取过程是嵌入过程的逆过程，提取过程可以是非盲的、半盲或是盲的。 在非盲提取过程中，当从被攻击的水印图像中提取水印时，需要原始的载体图像 信息；在半盲过程中，在提取过程中需要原始的水印信息；盲提取是指在不需要 先验知识的情况下提取出水印信息。

最后是将提取的水印与原始水印进行比较，两者之间的相似度决定了系统的 鲁棒性。

2.2.2 数字水印特性

针对不同的领域，不同的应用要求，我们对数字水印技术的需求也不同。不 过，数字水印都具备以下几个基本特征：

(a)不可感知性

不可感知性是指嵌入水印的图像与载体图像在视觉上几乎无法辨别，对于视 觉系统是无法察觉的，也可称为不可觉察性，透明性等。我们在多媒体数据嵌入 水印的前提条件就是，嵌入水印后一定不能影响原始数据的感官效果，一旦影响 原始数据的感官效果，在某些领域后果是相当危险的，比如在医学影像[53]，遥感[54] 等领域，会给研究者带来误判。再者，若嵌入水印后与原始图像区别过于明显， 攻击者就会有针对性地对水印图像进行攻击破坏水印系统，那么就达不到版权保 护的意义了。

(b)鲁棒性

鲁棒性是指水印算法应该对任何图像处理和几何攻击敏感，如空间变换、裁 剪、缩放、平移、压缩和旋转，能从这些攻击中以一定的概率将水印检测出来并 且恢复水印。现在可以用许多流行的技术来获得高水平的鲁棒性，包括冗余掺入、 频谱扩展和水印。一个高鲁棒性的数字图像水印系统能够抵御许多攻击，以防止

10

中国知网 https:iiwww.cnki . net

未经授权的人删除或排除水印数据。

(c)嵌入容量

嵌入容量(也称为有效载荷)是评估嵌入到载体图像中的信息的总和[55] 。然而， 嵌入容量、鲁棒性、不可感知性三者是相互制约的，如图 2.2 所示。某一方面增强， 势必会引起某一方面的削弱，我们一般会根据具体的要求去平衡三者的关系，以

实现最佳的水印方案。

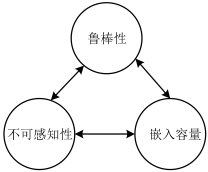


图 2.2 不可感知性、鲁棒性、嵌入容量关系图

(d)安全性

水印的安全性是未经授权方授权无法检测到水印，或者即使检测出来图像中 含有水印，也无法获知水印信息具体内容。

2.2.3 数字水印的客观评价指标

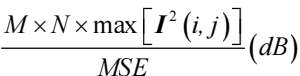
数字水印的评价方式分为主观评价与客观评价，由于主观评价因人而异，所 描述的结果也不准确，接下来介绍几个关于数字水印系统的客观评价指标。

峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 、均方误差(Mean Squared Error, MSE) 、拉普拉斯均方误差(Laplace Mean Squared Error, LMSE) 和结构相似度 (Structural Similarity, SSIM)是评价不可感知性的指标，通过归一化相关系数(NC) 和误码率(BER)[56]来衡量鲁棒性。

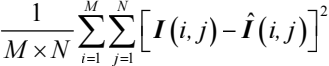
PSNR：易于计算，效率高，是应用最广泛地衡量不可见性的指标之一。一般 来说，通过计算嵌入水印后图像与载体图像所得的 PSNR 越大，说明不可感知性 越好。通常情况下，PSNR 值大于 35dB，人眼视觉系统就难以分辨水印是否嵌入。 它的公式表示如下：

11

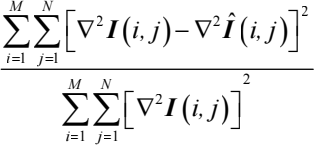
中国知网 https:iiwww.cnki . net

PSNR = 10lg  (2. 1)

其中，MSE 的定义为：

MSE =  (2.2)

其中，***I*** (*i,j* ) 与(*i,j* ) 分别表示未嵌入水印与嵌入水印后的图像像素值。*M* ，*N* 代 表图像的长和宽。另外 LMSE 的定义式如下：

LMSE =  (2.3)

其中， ▽2 (.) 为图像的拉普拉斯算子。

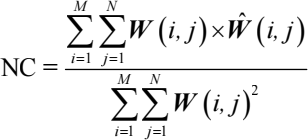
SSIM：SSIM 表示原始图像和水印图像之间的结构相似性。两幅图像***I*** 和 的 SSIM 表示为：

SSIM =  (2.4)

其中，*l* (***I***, ) ，*c* (***I***, )，*s* (***I***, ) 分别为亮度比较、对比度比较、结构信息比较。*α* ,

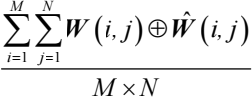
*β* , *Y* 均为大于 0 的可调参数。

NC：两个信号之间的相似性可以通过式(2.5)中归一化相关性来表示：

 (2.5)

其中，***W*** (*i,j* )和(*i,j* ) 分别表示原始水印信息和提取的水印信息。

BER：误码率是衡量提取的水印中错误比特的多少。定义式如下：

BER =  (2.6)

其中，田 表示异或运算。

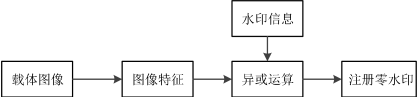
12

中国知网 https:iiwww.cnki . net

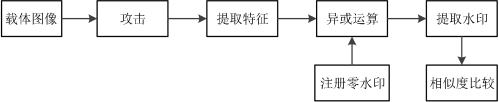
2.2.4 传统水印与零水印

传统的水印算法都是在空间域或者频率域去修改载体图像的数据以达到嵌入 水印信息的目的，这样的做法或多或少都对原始载体图像的数据进行了修改，而 且由于嵌入强度的不好掌控，很有可能使得载体图像失真。为了弥补这一不足， “零水印 ”的方案就被提了出来，在“零水印 ”方案中，水印的生成过程中并未 修改载体图像的数据，使得载体图像达到无损的要求。该方案的提取解决了传统 水印系统中鲁棒性与不可见性的矛盾，水印系统不再受到不可见性的制约，下面 简要介绍一下零水印的方案的过程。

零水印算法主要包含零水印的注册和零水印的提取。如图 2.3(a)所示，零水印 注册是通过提取载体图像中的图像特征信息与水印信息进行异或运算生成零水印， 将零水印上传到第三方版权认证机构，一旦出现版权纠纷的问题，可由认证机构 出示零水印与提取的图像特征信息进行运算操作得到水印信息，证明版权所有者 的合法权益。



(a) 零水印注册流程图



(b) 水印提取流程图

图 2.3 零水印注册与提取流程图

水印提取的核心过程如图 2.3(b)所示，对受到攻击后的载体图像提取特征，将 所提特征与注册的零水印进行异或操作即可提取水印信息，最后将所提取的水印 与原始水印进行相似度检测。

2.2.5 变换域数字水印的特点

变换域算法克服空间域算法的不足，成为目前数字水印算法的主流，变换域水印 13

中国知网 https:iiwww.cnki . net

算法具有如下优势：

(1) 不直接修改像素值，在变换域中的修改，会使修改均匀地分布到空间域去， 会提高水印的不可见性。

(2) 变换域中的低频部分，系数较大，能力集中，进行轻微的修改对图像整体影 响并不大，能获得较大的嵌入容量和鲁棒性。

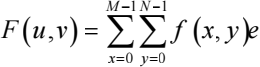
(3) 能与现有的图像压缩算法兼容，在图像压缩的过程中也能实现水印的嵌入。

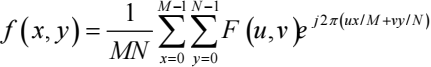
(4) 符合人类视觉系统对低频敏感，高频不敏感的特性，易于实现水印的掩蔽。

2.3 常见的变换域原理

2.3.1 DFT 原理

令*f* (*x*, *y*)表示一幅尺寸为*M*× *N* 的数字图像，则该图像的二维 DFT 与反变换 IDFT 的公式如下：

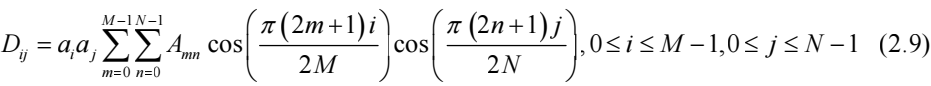
-*j* 2*π*(2.7)

 (2.8)

其中，*x* = 1, 2, … , *M* -1 和*y* = 0, 1, 2, … , *N* -1 。*F* (*u* , *v* )是*f* (*x*, *y*)频域表达式，给定 *F* (*u* , *v* )就可以借助 IDFT 得到*f* (*x*, *y*) 。DFT 变换后信号分为幅值和频率，可以将 水印嵌入到幅度谱或频率谱中，利用相位调制更能增加水印的鲁棒性，攻击者去 除水印的难度较大。

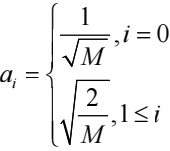
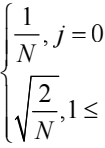
2.3.2 DCT 原理

二维 DCT 变换是数字水印算法中常用的变换之一，图像经过二维 DCT 后降 低了图像的冗余度，信号的主要能量集中在左上角的低频系数中。将水印信息嵌 入在低频系数中，即使图像受到攻击，但是主要信息还存在，使得嵌入的水印仍 然能够提取。一个*M*× *N* 矩阵 A 的二维 DCT 定义如下：

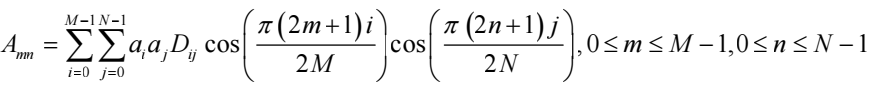


14

中国知网 https:iiwww.cnki . net

其中， ≤ *M* - 1 ，*aj* = *j* ≤ *N* - 1 。

逆变换定义为：

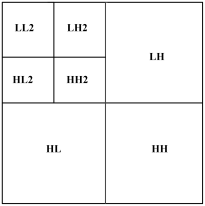


(2. 10)

其中，*Dij* 为矩阵 A 的 DCT 系数，*Amn* 为图像对应的像素值。

2.3.3 DWT 原理

小波变换的核心思想是对图像进行多尺度的频率分离，即多分辨率变换，能 自适应地满足时域信号分析的要求，弥补了二维离散傅里叶变换的不足。对图像 进行小波变换可以将图像分为能量集中低频区域 LL 和代表图像细节的高频部分。 高频部分可以分为水平分量 HL 、垂直分量 LH 以及对角分量 HH 三个部分。每一 级小波变换的低频分量可进行下一级分解，依次迭代形成小波变换的塔式分解。 图 2.4 为三级小波分解示意图。



(a) Lena 图像的二级小波分解示意图 (b) Lena 图像的二级小波分解

图 2.4 三级小波分解示意图

通常将水印嵌入在 LL 区域会获得更高的鲁棒性，但是会影响不可见性。若嵌 入在高频区域会获得良好的不可见性，但是会牺牲鲁棒性。我们视具体情况选择 合适的嵌入区域。小波变换结合有 DFT 和 DCT 的优势，也有其不足，小波分解的 方向性有限，不能最优地表示具有线奇异或面奇异的高维函数，为克服小波变换

15

中国知网 https:iiwww.cnki . net

的缺点，由此开始研究 CT ，NSCT ，Tetrolet 等后小波域的算法。

2.4 本章小结

第二章首先介绍了数字水印系统的基础知识，其中包含数字水印系统的基本 模型、水印的基本特性、水印系统的评价指标、传统水印与零水印的区别，并分 析了变换域水印算法的优势所在。然后简要介绍了数字水印领域常用变换域的基 本原理，分析了几种变换域与水印系统相结合的特点，由此引出了后小波域的研 究。

16

中国知网 https:iiwww.cnki . net

第 3 章 基于 Baker 映射与时空混沌相结合的 CT-QR 盲水印算 法

3.1 引言

目前大多数水印算法在压缩、滤波、加噪等基本的图像处理攻击方面表现不 错，然而对几何攻击效果不佳，尤其是旋转攻击。 目前解决方案有傅立叶——梅 林变换、极谐波变换等通过对数极坐标的变化减小了几何攻击对于图像的去同步 效果。Zernike 矩、切比雪夫(Chebichev)矩、雅克比——傅里叶矩运用于整幅图像 时进行归一化处理构造不变矩，使其具有旋转、平移、尺度变换不变性，但是由 于不变域引起的内插和由矩引起的离散化增加了同步误差。奇异值分解能提取图 像的主成分信息，也能很大程度上提高水印的鲁棒性，但是会造成虚警率过高的 问题。针对水印系统的适用性， 目前大多数算法采用的是灰度图像或二值水印图 像，针对灰度水印或者彩色水印的算法较少，因为彩色水印需要处理的数据量更 大，即使是采用彩色图像作为水印，大部分算法都未实现盲提取，造成水印系统 的局限性较大，应用性不广。就安全性而言，大多数算法采用 Arnold[57]或 Logistics 映射[58]对水印信息进行置乱，置乱周期有限，置乱效果一般。因此，为解决抗几 何攻击不强、水印系统的适用性不高以及安全性差的问题，下文提供了一种方案。

针对以上问题，基于 Baker 映射与时空混沌相结合的 CT-QR 盲水印算法。先 结合 Baker 映射与时空混沌将水印加密，再将载体图像 CT 域的低频系数进行 QR 分解，根据盲提取的嵌入规则将水印信息嵌入到酉矩阵中，可以使算法在获得较 好的不可感知性同时达到强鲁棒性的效果。对于旋转攻击，采用Radon 变换进行 几何校正，最后对提取出的 R 、G 、B 分量中的水印信息进行自适应中值滤波增强 处理，显著提升水印系统抗旋转、剪切等几何攻击。

3.2 Contourlet 变换理论

2002 年，Do 和 Vetterli[59]提出了基于塔式方向滤波器组(Pyramidal Directional Filter Bank，PDFB)的 Contourlet 变换。Contourlet 变换是小波变换的新的扩展方式，

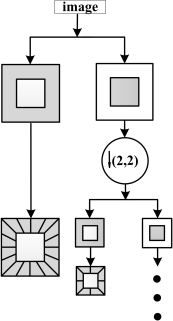
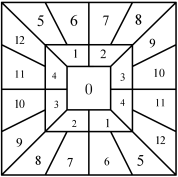
17

中国知网 https:iiwww.cnki . net

它可以多分辨率、局部、多方向性的表示图像，已被用于表示能真实捕捉几何结 构的二维信号。它继承各向异性的尺度特性，克服曲波变换的块效应和冗余性[60]。

在轮廓波变换中，首先利用拉普拉斯金字塔(Laplacian Pyramid ，LP)对图像进 行多尺度分解以捕捉奇异点。然后为了捕捉高频分量[61]，方向滤波器组(Directional Filter Bank ，DFB)将沿相同方向分布的奇异点聚集起来合成一个系数。LP 用于多 尺度的分解图像，产生低通原始图像的采样近似图像和原始图像的差值图像。将 DFB 应用于 LP 分解的不同图像中，以获得在任何尺度上具有两倍的方向子带图像。 但 DFB 本身不适合处理低频部分的图像，所以 LP 的另一个作用是避免低频部分 的“泄漏 ”。由于 DFB 和 LP 具有完美的重建特性，因此它们的组合 PDFB 必将

实现图像重建。图 3. 1(a)是轮廓波变换的分解示意图，由 LP 和 DFB 实现。图 3. 1(b) 是 DFB 在轮廓变换中的高频多方向分解子带示意图。



(a) 轮廓波分解图 (b) 高频多方向分解图

图 3. 1 Contourlet 变换

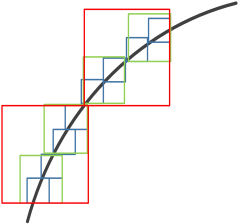
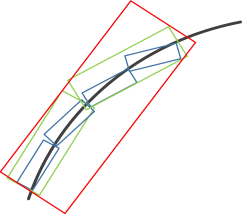
总的来说，Contourlet 变换提供了一种具有多分辨率和方向的灵活图像分解方 法，因为它允许在每个尺度上有不同数量的分解方向。最终结果近似于使用轮廓 片段的基本结构来近似原始图像，这也是它被称为轮廓波变换的原因。图 3.2 显示 了二维可分离小波基和使用 Contourlet 基逼近曲线奇异性的过程。图 3.2(a)表示出 了支持小波变换的基本间隔的“正方形 ”。图 3.2(b)显示了“拉长的 ”支撑基本间 隔，可以充分利用原始几何规律。因此，近似曲线所需的系数会更少，并且可以

18

中国知网 https:iiwww.cnki . net

更好地稀疏表示。实际上，“拉长的 ”基本结构是方向的反映，即“各向异性 ”，

具有更好的性能。

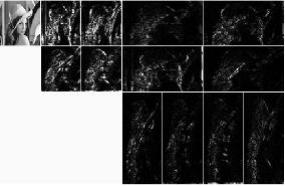


(a) 小波变换的基本结构 (b) Contourlet 的基本结构

图 3.2 小波变换和轮廓变换的基本结构对比图

令*I*0 为输入图像，*IJ* 和*Bj* (*j* = 1, 2, … , *J* )分别表示 LP 变换的低通子图像和第*j* 个带通子图像。第*j* 阶 LP 分解将子图*Ij* -1 分解成低通子图*Ij* 和带通子图*Bj* 。然后 将每一个*Bj* 通过第*lj* 阶 LP 进一步分解为2*lk* 带通子图*Ij*(*l*,) ，(*k* = 0, 1, … , 2*lj* -1 )。图 3.3

为 Lena 图像的轮廓波变换与重构的图像，其中图 3.3(a)为 2 级 LP 分解，一阶子带 的分解方向数为 8 ，二阶子带的分解方向数为 4。



(a) Lena 图像的两级分解 (b) Lena 图像的重构

图 3.3 Lena 图像的 Contoulet 变换与重构

3.3 Baker 映射和耦合映像格子模型

采用 Baker 映射和耦合映像格子(Coupled Map Lattices, CML)双重置乱的方式 对水印进行置乱。Baker 映射可以大大消除水印相邻像素之间的相关性，再通过

19

中国知网 https:iiwww.cnki . net

CML 产生的混沌序列来对水印异或加密，加大了水印信息的混乱程度，也增强了 水印系统的安全性。置乱加密过程如图 3.4 所示。

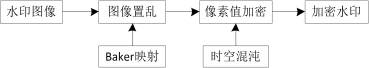
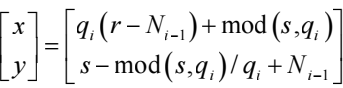


图 3. 4 加密算法示意图

3.3.1 Baker 映射

Baker 映射类似于 Arnold 置乱，是一种图像置乱的方法。相比 Aronld 置乱， Baker 周期更长，只需要较少的置乱次数就可以达到很好的置乱效果，而且算法简 单，保密性好。根据 Pichler 和 Scharinger[62]的理论，将*N*× *N* 的图像切分为*t* 个小 的长方形，高分别为{*n*1, *n*2, … , *nt* } ，要保证*n*1 + *n*2 + …+ *nt* = *N* 。使*N*0 = 0 ，将原始 图像的每一个像素点(*r*, *s* ) (*Ni* -1 ≤ *r* ≤ *Ni*, 0 ≤ *s* ≤ *N*) 映射为(*x*, *y*)：

 (3. 1)

其中*qi* = *N* / *ni* ，1 ≤ *i* ≤ *t* 。

3.3.2 CML 模型

耦合映像格子(CML)模型[63]是一种时空混沌模型，在时间和空间上具有双重混 沌行为，较低维的混沌系统具有更加复杂的行为和丰富的特征。CML 模型既对初 始条件敏感，又对边界条件敏感。其数学模型如下：



其中耦合常数*ε* ∈ (0，1)，*n* = 1, 2, 3, …为时间索引，*i* = 1, 2, 3, …为网格位置索引，*f* (.) 为局部更新函数，此处选取 Logistics 映射*f* (*y* ) = 1- *λy* 2 ，其中*λ*∈ (0, 2) ，*y* ∈(0, 1) 。 规定其周期边界条件为*xn* (*τ* ) = *xn* (*τ* + *L*) ，L 为 CML 的长度。下图 3.5 为*L* = 200 ， *n* = 1.2. … , 1000 ，*ε* = 0.121374625344378 ，*λ*= 1.840723627263491 的时空混沌图像。

20

中国知网 https:iiwww.cnki . net

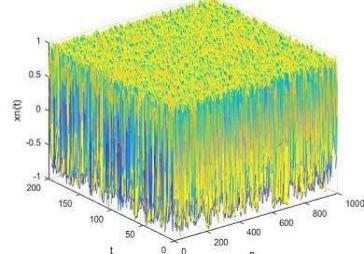
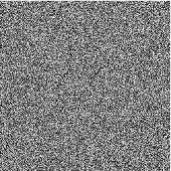
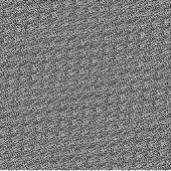
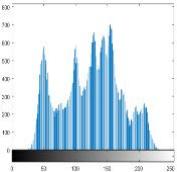


图 3.5 时空混沌图像

下图分别是256× 256 的 Lena 图像采用 Arnold 置乱 35 次、Baker 映射置乱 5 次与 CML 加密相结合选取*ε*0 ，*λ*0 ，*x*0 (1) ，*x*0 (2) ，*x*0 (3)作为密钥所产生置乱的 效果图与灰度直方图。

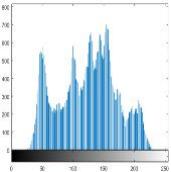


(a) Lena 原图



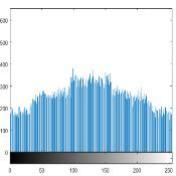
(d) 图直方图

(b) Arnold 置乱



(e) b 图直方图

(c) Baker 映射置乱+CML 加密



(f) c 图直方图

图 3.6 水印加密对比图

由图 3.6 可知，图 3.6(c)比图 3.6(b)的置乱效果要好一些，直观上看图 3.6(b)

有一定的规律性，而图 3.6(c)像素排列更为混乱。对比图 3.6(d)和(e)灰度直方图没

21

中国知网 https:iiwww.cnki . net

有发生改变，图 3.6(f)灰度值较(d)和(e)分布更加均匀，灰度值大小也相对均衡，具 有良好的加密特性，所以本章算法用Baker 映射置乱+CML 加密方式对水印信息进 行加密。

3.4 Radon 变换与 QR 分解

3.4.1 Radon 变换

本章在水印信息提取之前采用Radon 变换预处理的方法，先对受到几何攻击 的图像校正处理。由 Radon 变换的性质，它是捕捉图像方向信息的有力工具。给 定一组角度，对图像*f* (*x*, *y*)进行 Radon 变换就是计算图像沿着给定角度的投影， 得到的投影是每个方向上像素强度的总和，即线积分。像素矩阵*f* (*x*, *y*) Radon 变 换的定义为：

 = *f* *dxdy* 

其中 ，*Y* 为原点到直线的距离 ， *θ* 为直线与坐标轴的夹角 ， *δ* 为 *f* (*x*, *y*) 对

*Y* - *x* cos*θ*-*y* sin*θ* 的线积分。由此可以得到*R*(*Y*,*θ*)处*f* (*x*, *y*)沿着该直线的投影。 旋转校正步骤如下：

(1)提取载体图像 R 通道，计算参考向量***R***(0) ：对原始图像进行 Radon 变换。

(2) 获 取 检 测 向 量  对 载 体 图 像 分 别 进 行

1o -180o Radon 变换，获得 180 个检测向量，构成“角度-检测向量对 ”。

(3)计算旋转角度：对比***R***(0) 和***R***(*θ*) 的相关系数，相关系数最大者为其对应 的角度。

(4)图像校正：将所求角度进行逆旋转，即可得到校正后图像。

3.4.2 QR 分解

QR[64]分解是一种常用的矩阵分解方式，其时间复杂度为*O*(*N*2 ) ，而 SVD 分 解和 Schur 分解的复杂度分别为*O*(11*N*3 ) 、*O* (8*N*3 / 3) ，QR 能提高算法的效率。 大小为*m* × *m* 的矩阵***C*** 的 QR 分解定义如下：

22

中国知网 https:iiwww.cnki . net

[***Q***, ***R***] = *qr* (***C*** ) (3.4) 其中，***Q*** 代表大小为*m* × *m* 的酉矩阵，***R*** 为*m* × *m* 的上三角矩阵，使得***C*** = ***Q*** ×***R*** 。

3.5 CT-QR 域嵌入和提取算法

3.5.1 水印嵌入步骤

(a) 水印预处理。把彩色水印图像分离成 R、G、B 三个分量，按照图 3.4 方式 对三个分量进行加密得到*W* 。根据公式(3.5)将置乱后各灰度分量归一化矩阵*W* ， 再按公式(3.6)将各分量进行二值化，得到二值矩阵*Lg* 。

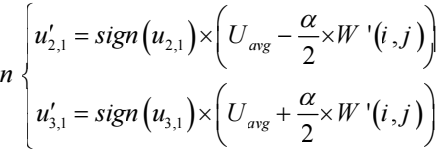
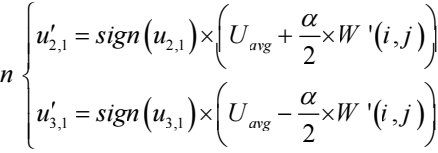
*W*, (*i*, *j* ) = *W* (*i*, *j* )/ 255 (3.5)

{l〔((,,) ,, ,,((,,))  .. (3.6)

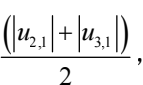
(b) 为了增加旋转攻击的鲁棒性，先提取载体图像 R 、G 、B 分量，对 R 分量 进行 Radon 变换，记录参考向量***R***(0) 。

(c) 载体图像预处理。分离载体图像 R 、G 、B 三个分量，分别对三个分量进 行 3 级 CT ，再对 CT 后的低频系数进行4× 4 分块，对每一子块进行 QR 分解得到 每块的酉矩阵***U*** 。

(d) 按式(3.7a) 、(3.7b)嵌入方式将水印信息*W*' 嵌入到矩阵*U* 中。

*if Lg* (*i*, *j* ) = 1 *the*(3.7a) *if Lg* (*i*, *j* ) = 0 *the*(3.7b)

其中，*α* 为嵌入强度，*u*2 ,1 、*u*3,1 分别表示***U*** 中第 2 行第 1 列和第 3 行第 1 列的值。

*sign* (*u*2,1 ) 表示***U*** 中第 2 行第 1 列元素的符号，*Uavg* =  *u*2,1  为*u*2,1 的绝

23

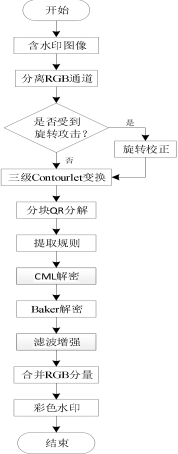
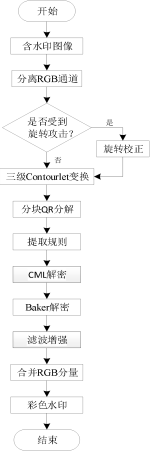
中国知网 https:iiwww.cnki . net

对值，

*u*3,1

为*u*3,1 的绝对值。

(e)重构恢复得到含水印的图像。分通道分别进行 QR 逆变换和 Contourlet 逆变 换，最后合并 R 、G 、B 分量得到嵌有彩色水印的彩色载体图像。水印的嵌入流程 如图 3.7 (a)所示。



(a) 水印嵌入流程图 (b) 水印提取流程图

图 3.7 水印嵌入与提取流程框图

3.5.2 水印提取步骤

水印的提取流程图如 3.7 (b)所示：

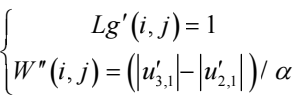
(a) 在水印提取之前先检测载体图像中R 分量的旋转角度。计算出待测向量 ***R*** (*θ*) 与参考向量***R***(0) 进行比对，检测的角度即为旋转攻击的角度，利用 Radon 变换对图像进行校正。

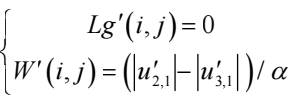
(b) 对载体图像的 R 、G 、B 分量分别进行 3 级 Contourlet 变换，再取出低通 子带进行4× 4 分块，对子块进行 QR 分解得到每块的酉矩阵***U***, 。

24

中国知网 https:iiwww.cnki . net

(c) 根据公式(3.8)可得到加密的水印信息*W*,, 。

 *then* (3.8a)

 *then* (3.8b)

其中，*u*3,,1 ，*u*2,,1 分别为***U***' 中第 2 行第 1 列和第 3 行第 1 列的元素，*Lg* , 为提取出来 的二值矩阵。

(d) 对 R 、G 、B 分量依次进行与CML 产生的混沌序列异或解密、Baker 映射 解密，再对各分量应用自适应中值滤波增强处理，即可得到水印信息。

3.6 仿真实验与结果分析

使用MATLAB2017a 进行仿真实验。电脑操作系统为 64 位 Window10 ，处理 器 Intel(R)Core(TM)i7-10700 CPU @ 2.90GHz ，RAM 为 8.00GB ，载体图像选取 CVG-UGR 图像库中2048× 2048 的 24 位真彩色图像，若图像大小为512× 512 可用 imresize 设置尺寸。水印图像选取64× 64 彩色东风标志汽车 logo。在对比实验中与 具有代表性的文献[31][32]中的算法进行比较。

3.6.1 不可见性测试

取嵌入强度*α* = 0.03 ，选取 Lena 、Peppers 、Baboon 图像进行仿真实验，载体 图像与嵌入水印载体图像如图 3.8 所示；图 3.9 为 Lena 图像与嵌入水印后的 RGB 分量直方图对比图；图 3. 10 是没有进行攻击的条件下提取出来的水印信息。



(a) Lena 载体图像 (b) Peppers 载体图像 (c) Baboon 载体图像

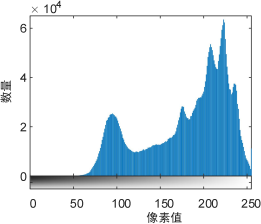
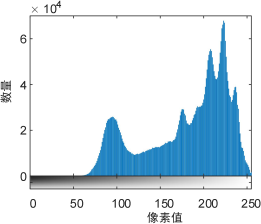
25

中国知网 https:iiwww.cnki . net

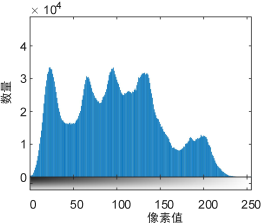
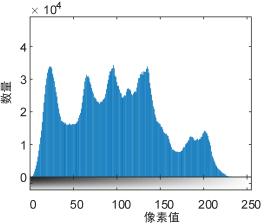


(d) Lena 已嵌水印 (e) Peppers 已嵌水印 (f) Baboon 已嵌水印

图 3.8 载体图像与嵌入水印载体图像



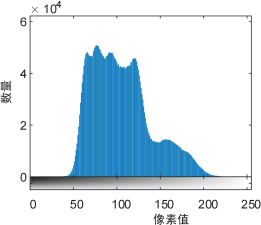
(a) 原图 R 分量直方图 (d) 嵌入水印图像 R 分量

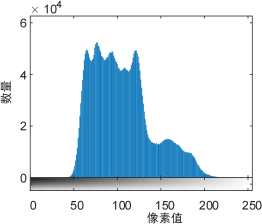


(b) 原图G 分量直方图 (e) 嵌入水印图像 G 分量

26

中国知网 https:iiwww.cnki . net





(c) 原图B 分量直方图 (f) 嵌入水印图像 B 分量

图 3.9 载体图像与嵌入水印后图像各分量直方图



(a) 原始水印 (b) Lena 中水印 (c) Peppers 中水印 (d) Baboon 中水印

图 3.10 原始水印与提取的水印

图 3.8 中(a)(b)(c)为原始载体图像，(d)(e)(f)为嵌入水印后的图像，PSNR 分别 为 40.4954 、40.2618 、39.6842 。人眼在直观上并不能区分二者，分析各个分量的 直方图，可以发现载体图像与嵌入水印后图像的各个分量直方图仅有轻微的变化， 这些变化的原因是修改了变换域的系数，不可避免地修改了原始载体图像的数据。 在后文的水印算法中，我们在不修改载体数据的情况下嵌入水印。本章算法将水 印嵌入到 CT 后的低频系数中，取得良好的不可见性，数据修改的变化几乎可以忽 略，从而达到一个良好的信息隐藏的目的。同时，由图 3. 10 可以看出，在未加攻 击时，水印信息都可以完整的恢复出来，说明算法是有效的。接着我们讨论此水 印系统的鲁棒性。

3.6.2 鲁棒性测试

(a) 非几何攻击

非几何攻击大多是利用加噪、滤波、压缩等图像处理方式对图像进行修改， 只修改对应位置的像素值，并未修改位置信息。为测试本章算法在非几何攻击下 的鲁棒性，取，分别对 Lena 、Peppers 、Baboon 图像进行均值为 0 、方差为 0.005，

27

中国知网 https:iiwww.cnki . net

0.01 的高斯噪声、椒盐噪声、斑纹噪声攻击；均值滤波、中值滤波、高斯低通滤 波模板大小为3× 3 、5 × 5 攻击；JPEG 压缩因子为 50，30 攻击；对比度调整[0.2,0.8]、 对比度增强 0.2 攻击。实验结果见表 3.1。

表 3. 1 非几何攻击实验(NC)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 攻击类型 | 攻击参数 | Lena | Peppers | Baboon |
| 高斯噪声 | 0.005 | 0.9400 | 0.9368 | 0.9378 |
| 0.01 | 0.9123 | 0.9122 | 0.9023 |
| 椒盐噪声 | 0.005 | 0.9822 | 0.9768 | 0.9822 |
| 0.01 | 0.9664 | 0.9603 | 0.9666 |
| 斑纹噪声 | 0.005 | 0.9777 | 0.9736 | 0.9766 |
| 0.01 | 0.9656 | 0.9589 | 0.9632 |
| 均值滤波 | 3 × 3 | 0.9836 | 0.9771 | 0.9514 |
| 5 × 5 | 0.9703 | 0.9597 | 0.9088 |
| 中值滤波 | 3 × 3 | 0.9892 | 0.9857 | 0.9745 |
| 5 × 5 | 0.9805 | 0.9743 | 0.9313 |
| 高斯低通滤波 | 3 × 3 | 0.9914 | 0.9883 | 0.9871 |
| 5 × 5 | 0.9912 | 0.9882 | 0.9870 |
| JPEG 压缩 | 50 | 0.9603 | 0.9491 | 0.9440 |
| 30 | 0.9265 | 0.9139 | 0.91410 |
| 对比度调整 | [0.2,0.8] | 0.9244 | 0.8852 | 0.9472 |
| 对比度增强 | 0.2 | 0.9526 | 0.9409 | 0.8741 |

由表 3.1 可知，三幅载体图像对于不同类型噪声攻击 NC 都达到 0.9 以上，对 于滤波攻击，NC 值均在 0.95 以上，表明本章算法能有效地抵抗滤波攻击。对于 JPEG 压缩，在压缩因子为 30 时，最低 NC 仍在 0.91 以上。在调整图像对比度情 况下，会使图像像素值大面积改变，提取水印的 NC 也在 0.87 以上。本章算法在 常见的信号处理攻击下，水印信息有不错的提取效果，是因为 Contourlet变换具有 良好的方向性，选择稳定的低频子带嵌入水印的同时采用QR 分解，其中 U 矩阵 第 2 行第 1 列元素与第 3 行第 1 列元素的差值具有很强的稳定性。即便在图像遭 受常见的攻击时，对各子块***U*** 矩阵中两元素差值影响较小，在合并通道前进行滤 波处理，使得算法具有良好的抗噪性能，故本章算法对噪声攻击和其他非几何攻 击具有强鲁棒性。

(b) 几何攻击和其他攻击

为了进一步验证本章算法的鲁棒性，选取 Lena 、Butterfly 、Peppers 图像，对 嵌入水印后的载体图像采用旋转、剪切等几何攻击，其中旋转攻击既改变图像的 像素值又改变像素的位置，是大部分水印算法的短板。另再采用组合攻击、马赛 克攻击、篡改攻击测试其性能，其中具体组合攻击参数如下：(a)均值为 0，方差为

28

中国知网 https:iiwww.cnki . net

0.01 的椒盐噪声+旋转 10 ° ;(b)压缩因子为 50 的 JPEG 压缩+右上剪切 1/16；(c) 均 值为 0，方差为 0.005 的高斯噪声+左上 1/4 剪切；(d)左上剪切 1/16+旋转 10 °。对 图像分别做左上篡改 1/16 和中心篡改 1/4 攻击、8 × 8 和16× 16 马赛克攻击。测试结 果见表 3.2 ，选取部分攻击和提取效果图见图 3.11、图 3.12。

表 3.2 不同攻击下水印提取 NC 值

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 攻击类型 | 参数 | Lena | Butterfly | Peppers |
| 旋转攻击 | 10 ° | 0.9798 | 0.9685 | 0.9696 |
| 35 ° | 0.9442 | 0.9258 | 0.9290 |
| 68 ° | 0.9641 | 0.9507 | 0.9519 |
| 90 ° | 0.9989 | 0.9943 | 0.9976 |
| 145 ° | 0.9501 | 0.9221 | 0.9350 |
| 剪切攻击 | 左上剪切 1/16 | 0.9908 | 0.9896 | 0.9901 |
| 中心剪切 1/16 | 0.9954 | 0.9902 | 0.9941 |
| 中心剪切 1/4 | 0.9424 | 0.9338 | 0.9406 |
| 右下剪切 1/4 | 0.9384 | 0.9248 | 0.9257 |
| 上剪切 1/2 | 0.7058 | 0.6744 | 0.6917 |
| 右剪切 1/2 | 0.7124 | 0.6685 | 0.6731 |
| 椒盐噪声+旋转 | 0.01 ，10 ° | 0.9408 | 0.9346 | 0.9400 |
| JPEG 压缩+剪切 | 50 ，右上 1/16 | 0.9472 | 0.9321 | 0.9405 |
| 高斯噪声+剪切 | 0.005，中心 1/4 | 0.9107 | 0.8962 | 0.9013 |
| 剪切+旋转 | 左上 1/16+10 ° | 0.9427 | 0.9388 | 0.9416 |
| 篡改攻击 | 左上篡改 1/16 | 0.9885 | 0.9836 | 0.9839 |
| 中心篡改 1/4 | 0.9857 | 0.9796 | 0.9849 |
| 马赛克攻击 | 8 × 8 | 0.9619 | 0.9588 | 0.9611 |
| 16 × 16 | 0.8214 | 0.7958 | 0.8014 |



(a) 未攻击 (b) 旋转 35 °(未校正) (c) 旋转 35 °(radon 校正)

29

中国知网 https:iiwww.cnki . net



(c) 左上剪切 1/16 (e) 中心剪切 1/16 (f) 中心剪切 1/4



(g) 右下剪切 1/4 (h) 右剪切 1/2 (i) 高斯噪声+剪切



(j) 剪切+旋转 (k) 中心篡改 1/4 (l) 8×8 马赛克攻击

图 3. 11 受到攻击的图像



(a)



(g)

(b)



(h)

(c)



(i)

(d)



(j)

(e)



(k)

(f)



(l)

图 3. 12 不同攻击下水印的提取效果

图 3. 12 中(a)~(l)的水印分别对应图 3.11 中(a)~(l)受到攻击的载体图像所提取的

30

中国知网 https:iiwww.cnki . net

水印信息。对于旋转攻击，由于本章算法应用Radon 变换进行旋转校正，所提取 的水印 NC 值均大于 0.9258 ，图 3. 11(b)未进行旋转校正所提取的水印如图 3. 12(b) 所示，已经完全失真。图 3. 11(c)进行旋转校正所提取的水印如图 3. 12 (c)所示，水 印信息可以较好的恢复，所以本章算法可以有效地抵抗旋转攻击。对于剪切攻击， 在剪切 1/16 和 1/4 的情况下，提取效果稳定，在剪切 1/2 时，如图 3. 11(h)所示， 由于图像信息损失过多，效果不佳，这也符合客观情况。对于组合攻击，对图像 改变很大，但本算法所提取的 NC 依旧在 0.9 左右，表现出良好的鲁棒性。从表 3.2 和图 3. 11(k)看出，即使篡改 1/4 也能很好地恢复水印。马赛克攻击是用块像素的均 值代替原始像素值，在8× 8 马赛克攻击时，提取效果良好，NC 大于 0.95，而在16× 16 马赛克攻击时，由于像素值改变太多导致 NC 值下降至 0.8 左右。本章算法能有效 抵抗几何攻击，是因为采用Baker 映射+CML 的方式将水印均匀地置乱，使得错误 分散开来，补偿剪切攻击带来的大面积 0 像素值；采用Radon 变换获取图像的角 度信息以此校正旋转攻击导致的图像大幅度改变；采用CT-QR 双变换域能够有效 地提取图像特征。综上所述，本章算法对大部分攻击在一定范围内具有较强的鲁 棒性。

(c) 对比实验

为验证本章算法的优越性，将本章算法和具有代表性的水印算法文献[31][32] 中没有设密钥的算法相比较，选取 Lena 图像，测试其鲁棒性，实验结果如下表。

31

中国知网 https:iiwww.cnki . net

表 3.3 鲁棒性对比实验(NC)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 攻击类型 | 文献[31]算法 | 文献[32]算法 | 本章算法 |
| 高斯噪声(0.005) | 0.9721 | 0.9524 | 0.9388 |
| 高斯噪声(0.01) | 0.9625 | 0.9351 | 0.9123 |
| 乘性噪声(0.005) | 0.9765 | 0.9528 | 0.9780 |
| 乘性噪声(0.01) | 0.9663 | 0.9349 | 0.9687 |
| 椒盐噪声(0.005) | 0.9673 | 0.9991 | 0.9868 |
| 椒盐噪声(0.01) | 0.9478 | 0.9944 | 0.9664 |
| 中值滤波(3\*3) | 0.9419 | 0.9459 | 0.9892 |
| 中值滤波(5\*5) | 0.9202 | 0.9385 | 0.9805 |
| 均值滤波(3\*3) | 0.9433 | 0.9423 | 0.9836 |
| 均值滤波(5\*5) | 0.9288 | 0.9357 | 0.9703 |
| JPEG 压缩(30%) | 0.9176 | 0.5897 | 0.9265 |
| JPEG 压缩(50%) | 0.9613 | 0.7244 | 0.9603 |
| JPEG 压缩(90%) | 0.9998 | 0.7876 | 0.9982 |
| 剪切(1/16) | 0.8246 | 0.9097 | 0.9908 |
| 剪切(1/8) | 0.7995 | 0.8786 | 0.9647 |
| 剪切(1/4) | 0.6482 | 0.8352 | 0.9424 |
| 旋转(45 °) | 0.9361 | 0.5193 | 0.9464 |
| 旋转(90 °) | 0.9478 | 0.5875 | 1.0000 |
| 旋转(145 °) | 0.9356 | 0.5288 | 0.9501 |

从表 3.3 中可以看出，本章算法仅在高斯噪声攻击下，NC 值略低于文献[31]、 文献[32]，在其他攻击下均有强鲁棒性，尤其在旋转、剪切攻击上具有明显的优势， 水印提取 NC 值达 0.94 以上。相比文献[31] [32]算法，本章算法在几何攻击与非几 何攻击，更加具有强鲁棒性。

3.7 本章小结

本章利用轮廓波变换的多分辨率和方向的灵活图像分解方法，对载体图像和 水印图像 R、G 、B 分量分别处理，根据酉矩阵第 2 行第 1 列和第 2 行第 1 列的关 系嵌入水印酉矩阵，实现了双彩色图像的盲提取。利用Radon 变换在水印提取之 前对载体图像进行旋转校正，校正后所提水印 NC 最高为 1 ，最低也在 0.92 以上， 水印系统抗几何攻击性能大幅提高，在图像处理攻击、组合攻击下也具有强鲁棒 性。另外，还提供了一种新型的水印加密方式 Baker 映射+CML ，大大提升水印系 统的安全性，即使水印被提取出来，也是被置乱加密的水印信息，在不知道密钥 的情况下也无法获取有用信息。

32

中国知网 https:iiwww.cnki . net

第4 章 基于NSCT-NMF 域与编码交织的频数质心零水印算法

4.1 引言

上一章的水印算法满足了双彩色图像的盲提取，并且获得了较强的鲁棒性， 能抵抗大部分攻击，但是该算法属于传统的水印算法，修改了载体图像变换域的 系数。重构后的图像与原始载体图像有所区分，若嵌入强度过大，甚至会导致载 体图像失真。为了不修改载体图像，使载体图像达到无损的要求，零水印方案就 被提了出来。

目前大多数零水印算法缺乏鲁棒性，主要原因是载体图像的图像特征在受到 攻击后变化较大，所提取的图像特征不稳定。零水印算法的关键是找到一种能稳 定代表图像特征的算法，在受到攻击后依然能提取出代表图像特征的特征矩阵。 为解决传统数字水印算法的透明性随嵌入强度的增加而下降，且鲁棒性和稳定性 差的问题，本章提出一种基于极化(Polar)码与二维交织算法相结合的 NSCT-NMF 域频数质心零水印算法。

4.2 非下采样轮廓波变换

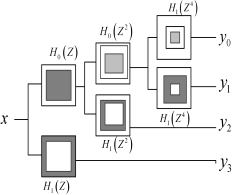
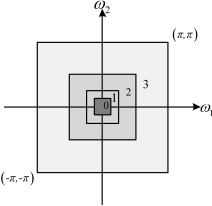
在 Contourlet变换中，每次对图像进行 LP 和 DFB 操作都会使图像降维，大大 减少了在载体图像中嵌入水印的容量。NSCT 克服了 CT 的缺点，通过非下采样金 字塔分解(Nonsubsample Pyramid, NSP)和非下采样方向滤波器组(Nonsubsample Directional Filter Bank, NSDFB)实现的，在提供多方向性与多尺度分解的同时，并 没有使得各频率子带降维，利用其冗余特性可嵌入更多的水印信息。

NSCT 多尺度特性的实现是从类似于 LP 的子带分解的平移不变滤波结构中获 得的，是通过使用双通道非下采样 2-D 滤波器组来实现的，图 4.1 为三级 NSP。通 过对第一级的滤波器进行上采样来获得后续级的滤波器。通过去除 LP 中的下采样 器和上采样器，然后相应地对滤波器进行上采样，可以得到 NSP 。因此，NSP 不 同于轮廓波变换的 LP 分解，其多尺度分解不是几何多尺度分解，而是频率层次的 多尺度分解。如图 4. 1(b)所示，频率平面被分解成不同尺度的频率子带。图 4. 1(a)

33

中国知网 https:iiwww.cnki . net

显示了可逆的非下采样金字塔分解过程。如果图像*x* 在频率平面上被分解成不同尺 度的频率子带，则可以使用如图 4.2 所示的过程重建图像*x* 。H 和G 分别是分解滤 波器和合成滤波器。



(a) 非下采样金字塔分解过程 (b) 二维频率平面的不同子带

图 4. 1 三级非下采样金字塔分解

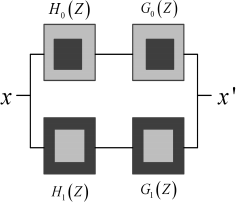
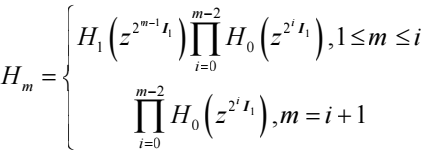


图 4.2 非下采样滤波器组

NSP 在进行第*i* 次分解时，低频子带的理想支持频率为- (π 2 *i* ), (π 2 *i* ) 2 ，高

频子带的理想支持频率为 2 。*i* 级联 NSP 的

相应滤波器满足式(4. 1)：

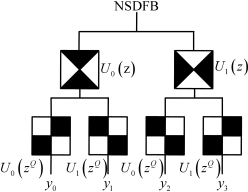
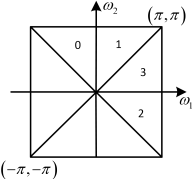
 (4. 1)

其中，***I***1 表示单位矩阵。

34

中国知网 https:iiwww.cnki . net

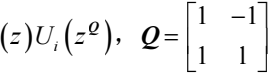
NSDFB 是通过去掉 DFB 中的下采样器和上采样器来构建的。这是通过关闭 DFB 树结构中每个双通道滤波器组中的下采样器/上采样器并相应地对滤波器进行 上采样来实现的，形成了由双通道 NSFB 组成的树。NSDFB 将 2-D 频率平面分割 成定向楔形。这一过程如图 4.3 所示。



(a) 四通道 NSDFB (b) NSDFB 频率分布

图 4.3 非下采样方向滤波器组

其中，*U*0 (*z* )、*U*1 (*z* )为两个非下采样滤波器(NonSubsampled Filter Bank, NSFB) ， 上采样的滤波器为*Ui* (*z****Q*** )(*i* = 0, 1) ，当滤波器*Ui* (*z****Q*** ) 与风扇滤波器*Ui* (*z* )(*i* = 0, 1) 在 第一级组合时，获得了四通道定向分解*y*0, *y*1 , *y*2, *y*3 。等效滤波器*yk* (*k* = 0, 1, 2, 3)可 表示为：

*yk* = *Uj* (4.2)

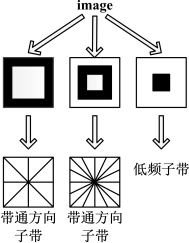
NSDFB 可以将非下采样金字塔产生的频率子带分割成包含任意数字和任意方

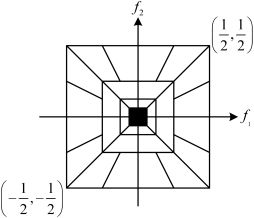
向的定向楔形。图 4.3(a)表示出了将频率子带分成四个方向的结构，图 4.3(b)是子 带频率平面上的对应方向分解。NSDFB 不同于 Conourlet 变换的 DFB，NSDFB 只 实现了子带频率平面上的方向分解，且 NSDFB 只在频域上工作。

NSCT 是通过将 NSP 与 NSDFB 相结合来构造的。通过 NSP 对图像进行处理， 生成多尺度频率子带。然后对这些多尺度频带进行 NSDFB 处理，生成多尺度、多 方向的频率子带，实现多尺度、多方向的分解。整个过程如图 4.4 所示。

35

中国知网 https:iiwww.cnki . net





(a) NSCT 结构示意图 (b) NSCT 频率分布

图 4.4 非下采样 Contourlet 变换

NSP 和NSDFB 中的 2 通道 NSFB 是可逆的，显然 NSCT 是可逆的。由于 NSCT 由两个移位不变部分组成，因此 NSCT 也是移位不变的。NSCT 非常灵活，每个标 尺允许任意数量的 21 个方向。此外，NSCT 可以满足各向异性，这是建立扩展非 线性逼近行为的关键性质。通过以每隔一个比例将 NSDFB 扩展中的方向数增加一 倍来确保这一特性。因此，NSCT 具有比 Conourlet 变换更大的冗余度。

4.3 极化码理论基础与二维交织算法

4.3.1 极化码理论基础

极化(Polar)码是由 Arikan[65]根据信道的极化现象提出来的，其核心是信道极化 理论。在二进制输入的离散无记忆信道(Binary-Input Discrete Memoryless Symmetric Channel, BI-DMC)中，通过信道极化后，信道被划分为纯噪信道和无噪信道。在 Polar 码的设计中，使信息位在接近无噪的信道中传输，在纯噪的信道上发送冗余 比特，提高编码性能，使得信息率达到信道容量。

信道 的极化过程是 由信道合并(Channel Combinimg) 和信道分裂(Channel Splitting)构成的。信道合并采用递归的方法将N 个独立同分布的BI-DMC 信道*W* 合 并成一个整体的矢量信道*WN* ，其转移概率表示为：

*WN* : *XN* → *yN* , *WN* (y | *X*) = *W N* (*uGN* ) (4.3)

这里的 *GN* 是生成矩阵，*GN* = *BNF* ②*n* ,*BN* 是一个*N*× *N* 的比特转置矩阵，*F* 是矩阵

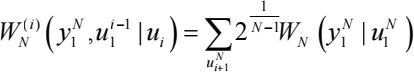
36

中国知网 https:iiwww.cnki . net

 , ② 是 Kronecker 张量积。对于(*x*1, … , *xn* ) 和(*y*1, … , *yn* )分别记为*x*1*N* 和*y*1*N* ，

*u*1*N* 为输入变量的集合，*u* ∈ *x* 服从等概率分布。

信道分裂则是将合并的信道*WN* 拆分成 N 个 BI-DMC 信道*W* ，其中第*i* 个信道 的转移概率*WN*(*i*) : *x* → y*N* × *xi* -1 (1 ≤ *i* ≤ *N*)定义为：

 (4.4)

其中，*WN*(*i*) (*y* ,*u*-1 | *ui* ) 表示在已知*u*-1 的条件下输入*u*输出*y*1*N* 的概率。信道合并

拆分示意图如图 4.5。

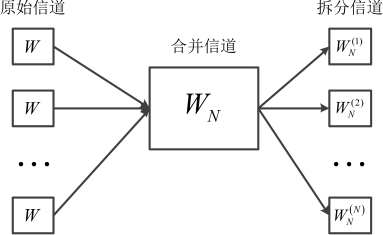


图 4.5 信道合并拆分示意图

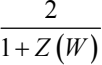
由文献[65]定理可知，在 BI-DMC 信道中，对任意的*δ*∈ (0，1) ，当编码长度 *N* (*N* = 2*n* , *n* ≥ 0) 趋 于 无 穷 大 时 ， 通 过 信 道 极 化 后 的 信 道 *WN*(*i*) 的 对 称 容 量 *I*(*WN*(*i*)) ∈ [1 - *δ*, 1] 的概率接近于信道对称容量*I*(*W*) ，对称容量*I*(*WN*(*i*)) ∈ [0, *δ*]的概率 趋近于1- *I*(*W* ) 。极化码的设计就是利用对称容量趋近 1 的信道传输信息，此时信 道的巴氏参数*Z*(*W* )近于 0 。其中巴氏参数*Z*(*W* )为：

 (4.5)

其中，*W* (*y* | *x* ) 表示在 BI-DMC 信道中发*x* 收到*y* 的概率，和对称容量*I*(*W*) 存在 如下关系：

37

中国知网 https:iiwww.cnki . net

 ≥ log (4.6)

 (4.7)

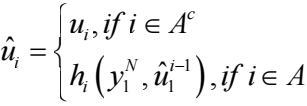
极化码是一种线性分组码，主要是通过信息位的选取和生成矩阵的构造进行 编码的。编码过程如下：

 (4.8)

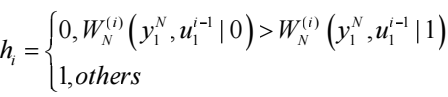
对任意的子集*A* ，*A* C {1, 2, … , *N* } ，上式可表示为

*x*1*N* = *uAGN* (*A* )田 *uAc GN* (*Ac*) (4.9) 其中，*GN* (*A*) 代表*GN* 中*A* 集对应的行构成的生成矩阵，*Ac*为*A* 的补集。极化码的 编码可以由如下参数确定，码长*N* ，信息位的个数*K* ，*K* / *N* 为码率，冻结位(frozen bit) *uAc* ，通常置为“0 ”符号，故表示为*P*(*N*, *K* , *A*, *u Ac* )。

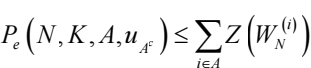
极化码的译码方式有 SC 算法和 BP 译码算法。本文采用 SC 译码算法。SC 算 法根据*A* ，*uAc* 和*y*1*N* 算出估计值1*N* ，由于冻结位置“0 ”符号，所以译码就是生成 估计值*A* 。SC 译码估计方法为：

 (4. 10)

其中，*hi* 定义为：

 (4. 11)

理论上可以得出，在 BI-DMC 信道中，Polar 码的误码率为：

 (4. 12)

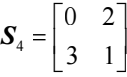
4.3.2 二维交织算法

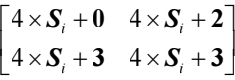
二维交织技术[66]是把2*n* ×2*n* 的矩阵作为交织的单元，再把这个单元等分为四个 象限，每个象限再分四个象限，以此类推，直至分为2× 2 的最小单元为止。具体 构造步骤如下：

38

中国知网 https:iiwww.cnki . net

先将2× 2 最小单元里的 4 个元素排列成交织方阵，在根据算法进行升维得到 高阶的交织方阵。

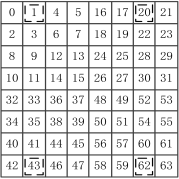
 (4. 13)

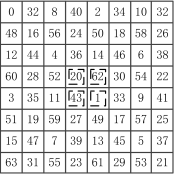
***S***4*i* =  (4. 14)

其中，**0, 1, 2, 3** 均为2× 2 的矩阵。

将二维交织与 Polar 码结合应用于水印中，根据上式构造出***S***64 的交织方阵，

图 4.6(a)为经过 Polar 编码后交织矩阵发生2× 2 的突发错误，分别位于20, 62, 43, 1 位。 去交织后如 4.6(b)图所示，突发错误被分散到 4 个象限中去，再通过译码即可纠正 这 4bit错误。由此看出，该算法可以有效地抵抗裁剪攻击。





(a) 交织后的突发错误 (b) 解交织后误码分散

图 4.6 交织技术分散错误

因此，将 Polar 码的纠错能力与水印算法相结合，可以抗突发错误和剪切攻击， 会使水印系统有更强的鲁棒性。

4.4 NMF 分解

非负矩阵(NMF)分解最早是由 Lee 和 Seung 于 1999 年在《Nature》上提出的， 并用于人脸识别[67] 。NMF 应用于数字水印系统具有以下特点：(1)分解结果非负， 恰好满足灰度值非负的条件，具有明确的物理意义，同时对高维数据的降维处理 提高了运算速度。(2)能挖掘数据本身的特征结构而不改变数据结构[68]。NMF 可以 描述为，对任意给定一个非负矩阵***V*** ，总能有非负矩阵***W*** 、***H*** 使得：

39

中国知网 https:iiwww.cnki . net

***V****n*×*m* = ***W****n*×*r****H****r*×*n* + *ε* (4. 15)

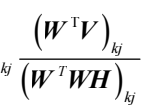
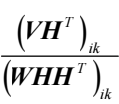
其中，***W*** 为基矩阵，***H*** 为系数矩阵，*r* 为预设参数，满足：

*r* ≤ min (*m*, *n* )且(*n* + *m*) < *nm* (4. 16)

非负矩阵分解的过程是一个求最优解的过程，不断的迭代使得***V*** 与***W*** 的差值 缩小， 目标函数为：最小化***W*** 。迭代过程如下：

Step1:对基矩阵***W*** 和系数矩阵***H***随机的赋初值。

Step2:根据(4. 17)式对基矩阵***W*** 和系数矩阵***H*** 进行更新：

 ← ***H***,***W****ik* ← ***W****ik* (4. 17)

其中，***H****kj* 是第***W****ik* 次循环结果，***W****ik* 是第***W*** 次循环结果。

Step3：重复 Step2 至收敛，即可得到最优的基矩阵***W*** 和系数矩阵***H*** 。

4.5 零水印的构造和提取算法

4.5.1 构造零水印

将大小为*M*× *M* 的载体图像用***w*** 表示，***w*** 代表*m* × *m* 的二值版权水印图像，零 水印的生成过程见流程图 4.7(a) ，具体步骤如下所述：

Step1：采用reshape 的方式将*m* × *m* 的二值版权水印图像降维成一维序列，对 该序列用 Polar 的编码规则，以*N* = 2*m*× 2*m* 、*K* = *m* × *m* 、码率*r* =1/ 4 的参数进行 编码得到***w****b* 。再根据公式(4. 13)(4. 14)进行二维交织形成带有水印信息的交织方阵 ***S*** 。

Step2：对载体图像进行*J* ( *J* = 4 )级 NSCT 变换，获得其低频子带系数。再对 低频子带系数进行8× 8 分块，最后依次对各分块进行非负矩阵分解，得到各子块 的一维基向量。

Step3：依次根据一维基向量构造频数质心，计算出每个子块的质心。

Step4：采用局部阈值生成的方法，计算出每相邻的8× 8 子块质心值的平均值 作为阈值 ，将这 8 × 8 子块质心值中大于阈值设置为 1 ，小于阈值置 0 ，得到 *M* / 8× *M* / 8 特征矩阵***T*** 。

40

中国知网 https:iiwww.cnki . net

Step5：将交织方阵***S*** 与特征矩阵***T*** 进行异或操作生成零水印信息***Z*** 注册到版 权保护中心。运算方式为：

***Z*** = *XOR*(***S,T*** ) (4. 18)

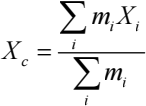
频数质心能够稳定表示图像特征。这里对 Step3 中构造质心频数的过程详细介 绍。一维基向量中数据***D*** = {*x*1, *x*2, … , *xn* } 映射到*x* 轴上，取最大值为 max ，最小值 为 min ，将数据分为 *k* 组，组距为 *t* ，设定子区间[min, min+ *t*), …, [min+(*i* -1)*t* ，

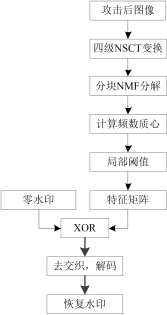
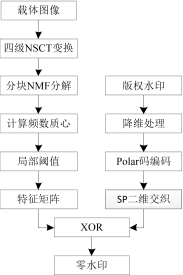
min+ *it*), …, [min+ (*k*-1)*t*, max]

统 计 ***D*** 中 数 据 在 各 个 区 间 的 次 数

,

***C*** = [*m*1, *m*2, … , *mi* , …*mk* ] ， *m*1 + … + *mi* + … + *mk* = *n* ，根据公式 *Xi* = min+ *it* - *t* / 2 ， 依次求出各个子区间的中位数，得到对应的中位数序列***X*** = [*X*1 , … , *Xi* , …，*Xk* ] 。根 据公式(4. 19)求其质心：

 (4. 19)



(a) 零水印生成流程图 (b) 提取水印流程图

图 4.7 水印的生成与提取流程图

4.5.2 水印的提取算法

版权水印的提取与嵌入过程相似，见流程图 4.7(b) ，具体步骤如下：

41

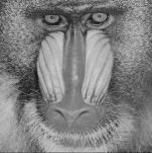
中国知网 https:iiwww.cnki . net

Step1：将受到攻击的载体图像按 4.5.1 中 Step2~Step4 的操作，提取出特征矩 阵***T'*** 。

Step2：把特征矩阵与零水印***Z*** 进行异或操作得到含水印信息的交织矩阵***S***’。 ***S***’= *XOR* (***T***’***, Z*** ) (4.20)

Step3：对***S'*** 进行解交织，Polar 码解码，重构为*m* × *m* 的图像即可得到版权水 印***w***’。

4.6 实验结果与分析

使用MATLAB2017a 进行仿真实验。电脑操作系统为 64 位 Window10 ，处理 器 Intel(R)Core(TM)i7-10700 CPU @ 2.90GHz ，RAM 为 8.00GB 。如图 4.8 所示， 实验中使用的载体图像是512× 512 像素的灰度图像，其中包括 Lena 、Barbara 、 Baboon 、Man 、Girl 。版权水印信息为32× 32 像素的汉字“ 印 ”的二值图像。由于 本章算法是零水印算法，并未修改载体图像数据，无须检测不可感知性，故采用 归一化相关系数(NC)来评估该算法的唯一性，采用误码率(BER)和 NC 共同测试其 鲁棒性。



(a) Lena (b) Barbara (c) Baboon



(d) Man (e) Girl (f) 版权水印

图 4.8 载体图像与版权水印

42

中国知网 https:iiwww.cnki . net

4.6.1 唯一性检测

由于载体图像的不同，从载体图像中提取的图像特征也就不同，所以产生的 特征矩阵也有所差异，因此不同图像产生的零水印之间的相关性应该相对较小。 从理论上分析，如果使用非原始载体图像提取水印信息，则相关系数较小。只有 原始载体图像才能产生正确的特征矩阵，进而正确地提取版权信息。因此，为证 明本算法的有效性，首先进行唯一性测试，在不同载体图像中提取版权水印信息。 唯一性检测的结果如表 4.1 所示。

表 4. 1 唯一性检测(NC)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Lena | Barbara | Baboon | Man | Girl |
| Lena | 1 | 0.6467 | 0.5892 | 0.5643 | 0.7163 |
| Barbara | 0.6467 | 1 | 0.5681 | 0.5214 | 0.6241 |
| Baboon | 0.5892 | 0.5681 | 1 | 0.5229 | 0.5792 |
| Man | 0.5643 | 0.5214 | 0.5229 | 1 | 0.5597 |
| Girl | 0.7163 | 0.6241 | 0.5792 | 0.5597 | 1 |



图 4.9 与表 4. 1 中等于 0.7163 的 NC 值相关联的水印图像

由表 4.1 的数据，在载体图像一致时，如表 4.1 中主对角线所示，水印信息均 能完整地提取出来，NC 值为 1 。若载体图像不一致时，NC 的最大值为 0.7163 ， 其对应的提取水印图像如图 4.9 所示。即使 NC 为 0.7163，也很难从提取的标识图 像中获取有用信息，因此该算法具有很好的唯一性，也证明了算法的有效性。

4.6.2 鲁棒性检测

(a) 非几何攻击

为测试本章算法在非几何攻击下的鲁棒性，分别对 5 幅载体图像添加椒盐噪 声、高斯噪声、乘性噪声攻击，攻击的参数均值为 0 ，方差为 0.1 和 0.3 ；采用模

43

中国知网 https:iiwww.cnki . net

板大小为 3\*3 和 9\*9 的中值滤波、维纳滤波、低通滤波分别进行攻击；JPEG 压缩 因子为 10 和 50。

表 4.2 非几何攻击实验(NC)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 攻击类型 | 参数 | Lena | Barbara | Baboon | Man | Girl |
| 椒盐 噪声 | 0. 1 | 0.9989 | 0.9991 | 0.9978 | 0.9994 | 0.9996 |
| 0.3 | 0.9814 | 0.9883 | 0.9827 | 0.9886 | 0.9891 |
| 高斯 噪声 | 0. 1 | 0.9736 | 0.9639 | 0.9739 | 0.9711 | 0.9748 |
| 0.3 | 0.9553 | 0.9521 | 0.9441 | 0.9549 | 0.9586 |
| 乘性 噪声 | 0. 1 | 0.9870 | 0.9819 | 0.9818 | 0.9843 | 0.9817 |
| 0.3 | 0.9601 | 0.9559 | 0.9589 | 0.9624 | 0.9597 |
| 中值 滤波 | 3\*3 | 1.0000 | 1.0000 | 0.9998 | 1.0000 | 1.0000 |
| 9\*9 | 0.9987 | 0.9974 | 0.9952 | 0.9969 | 0.9977 |
| 维纳 滤波 | 3\*3 | 1.0000 | 1.0000 | 0.9997 | 1.0000 | 1.0000 |
| 9\*9 | 0.9981 | 0.9943 | 0.9958 | 0.9966 | 0.9983 |
| 低通 滤波 | 3\*3 | 0.9978 | 1.0000 | 0.9998 | 1.0000 | 1.0000 |
| 9\*9 | 0.9945 | 0.9953 | 0.9971 | 0.9955 | 0.9967 |
| JPEG 压缩 | 10 | 0.9983 | 0.9913 | 0.9904 | 0.9976 | 0.9975 |
| 50 | 1.0000 | 0.9984 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |

表 4.3 非几何攻击实验(BER)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 攻击类型 | 参数 | Lena | Barbara | Baboon | Man | Girl |
| 椒盐 噪声 | 0. 1 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0001 | 0.0001 |
| 0.3 | 0.0042 | 0.0027 | 0.0038 | 0.0023 | 0.0019 |
| 高斯 噪声 | 0. 1 | 0.0086 | 0.0094 | 0.9781 | 0.0096 | 0.0077 |
| 0.3 | 0.0105 | 0.0126 | 0.0145 | 0.0133 | 0.0101 |
| 乘性 噪声 | 0. 1 | 0.0018 | 0.0034 | 0.0034 | 0.0024 | 0.0030 |
| 0.3 | 0.0094 | 0.0101 | 0.0099 | 0.0088 | 0.0099 |
| 中值 滤波 | 3\*3 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00001 | 0.0000 | 0.0000 |
| 9\*9 | 0.0003 | 0.0008 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0002 |
| 维纳 滤波 | 3\*3 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0000 |
| 9\*9 | 0.0011 | 0.0015 | 0.0011 | 0.0018 | 0.0014 |
| 低通 滤波 | 3\*3 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0000 |
| 9\*9 | 0.0004 | 0.0011 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0007 |
| JPEG 压缩 | 10 | 0.0001 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0002 | 0.0001 |
| 50 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

由表 4.2 、表 4.3 可以看出，随着加噪强度的增加，所提取的 NC 值会降低， 误码率会增加。在噪声攻击下，NC 最大值高达 0.9996 ，最低为 0.9441 ，产生最大 误码率的是在方差为 0.03 高斯噪声的攻击下，从 Baboon 图像中提取的水印信息， 是因为 Baboon 图像的纹理较为丰富，相比略低于其他 4 幅图像，但在本算法中所 提效果也相当不错。在滤波攻击方面，对于 3\*3 模板的攻击，大部分 NC 值几乎为 1 ，说明算法能有效地抵抗滤波攻击。在 JPEG 压缩攻击因子为 10 时，NC 最低为 0.9904 ，BER 最高 0.0004 ，JPEG 压缩攻击对本算法影响不大。由于 NSCT-NMF

44

中国知网 https:iiwww.cnki . net

变换可以抵御噪声，频数质心是个较为稳定的图像特征，故本算法在非几何攻击 下具有良好的鲁棒性。

(b) 几何攻击

几何攻击比非几何攻击对图像的影响大，往往在改变图像像素值的同时，又 改变其位置，使得水印提取的难度加大。常见的几何攻击有旋转攻击、剪切攻击、 行列偏移攻击。为验证本章算法对几何攻击的鲁棒性，对这 5 幅图像采用旋转攻 击、剪切攻击、行列偏移攻击，测试所得的 NC 与 BER 见下表 4.4 ，4.5。

表 4.4 几何攻击实验(NC)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 攻击类型 | 参数 | Lena | Barbara | Baboon | Man | Girl |
| 旋转( °) | 1 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 2 | 0.9968 | 0.9897 | 0.9864 | 0.9921 | 0.9908 |
| 5 | 0.9113 | 0.9176 | 0.9156 | 0.9098 | 0.9115 |
| 剪切 | 左上 1/16 | 0.9423 | 0.9386 | 0.9404 | 0.9401 | 0.9392 |
| 中心 1/8 | 0.9013 | 0.9063 | 0.9101 | 0.9077 | 0.9075 |
| 右下 1/4 | 0.8543 | 0.8546 | 0.8601 | 0.8497 | 0.8544 |
| 行列偏移 | 1 行 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 5 行 | 0.9824 | 0.9767 | 0.9865 | 0.9849 | 0.9817 |
| 10 列 | 0.9690 | 0.9607 | 0.9587 | 0.9542 | 0.9619 |

表 4.5 几何攻击实验(BER)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 攻击类型 | 参数 | Lena | Barbara | Baboon | Man | Girl |
| 旋转( °) | 1 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 2 | 0.0001 | 0.0012 | 0.0014 | 0.0007 | 0.0010 |
| 5 | 0.0325 | 0.0307 | 0.0319 | 0.0395 | 0.0321 |
| 剪切 | 左上 1/16 | 0.0265 | 0.0294 | 0.0268 | 0.0271 | 0.0288 |
| 中心 1/8 | 0.0398 | 0.0378 | 0.0331 | 0.0384 | 0.0386 |
| 右下 1/4 | 0.1443 | 0.1436 | 0.1326 | 0.1487 | 0.1440 |
| 行列偏移 | 1 行 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 5 行 | 0.0033 | 0.0051 | 0.0037 | 0.0028 | 0.0042 |
| 10 列 | 0.0082 | 0.0094 | 0.0103 | 0.0126 | 0.0087 |

由表 4.4、4.5 可得，随着几何攻击强度的增加，NC 会减小，BER 会增加。在 几何攻击中，旋转攻击使图像改变最大。在没有采用旋转校正的方法下，旋转 1 ° 时，提取水印的 NC 均为 1，BER 为 0 ，即使旋转 5 ° , NC 值仍在 0.9 以上，BER 在 0.04 以下，是因为采用Polar 编码交织技术，对错误译码进行纠正。对于行列偏 移攻击会使图像整体位置发生改变，由于本章算法利用统计局部频数质心的方法，

45

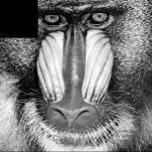
中国知网 https:iiwww.cnki . net

在偏移 10 列时，依然能有效地提取图像特征，NC 值均在 0.95 以上，BER 在 0.013 以下。对于剪切攻击，在剪切 1/8 以内具有不错的鲁棒性，若剪切面积过大，所提 取水印 NC 下降，BER 变大，造成图像特征损失，提取效果不佳。所以能有效地 抵抗一定范围内的剪切攻击。故本章算法在几何攻击下也具有不错的鲁棒性。

为进一步验证本章算法的鲁棒性与稳定性，采用大量的组合攻击与其他攻击 方式进行测试。其中攻击的参数为：(a) 高斯噪声(均值为 0 ，方差 0. 1)+旋转(顺时 针旋转 3 °)；(b) 均值滤波(模板大小为 9\*9)+剪切攻击(左上剪切 1/16)；(c) JPEG 压缩(压缩因子为 20)+行列偏移攻击(向右移 5 行)；(d) 直方图均衡化+剪切攻击(左 上剪切 1/16)；(e)8\*8 马赛克攻击；64\*64 篡改攻击。



(a) 高斯噪声+旋转 (b) 均值滤波+剪切 (c) JPEG 压缩+行列偏移



(d) 直方图均衡化+剪切 (e) 马赛克攻击 (f) 篡改攻击

图 4.10 不同攻击下的载体图像



(a) (b) (c) (d) (e) (f)

图 4. 11 从不同载体图像中所提取的水印

图 4.11 中(a)~(f)所提取的水印分别对应图 4. 10(a)~(f)中受攻击的图像所隐藏的 信息。由图 4. 10 可以看出，在不同组合攻击下的图像质量效果差，细节信息不清 晰，相比于原始载体图像有明显区别。但由图 4.11 看出，在各个载体图像中所提

46

中国知网 https:iiwww.cnki . net

取的水印信息虽有少量噪点，但仍清晰可辨。对于马赛克攻击和 64\*64 篡改攻击 下，所提取的水印效果也不错。本文采用 NSCT 变换和 NMF 分解统计频数质心能 稳定的提取特征矩阵，另加上 Polar 的纠错能力，因此能很好地恢复水印信息。

4.6.3 对比实验

为验证本算法的优越性，选取 Lena 载体图像，将本章算法与近年来具有代表 性的文献[23]中所提空域强鲁棒零水印算法和文献[25]中所提基于变换域的零水印 算法进行对比。分别采用均值为 0 的高斯噪声攻击、均值滤波攻击、JPEG 压缩、 旋转攻击、行列偏移攻击、剪切 1/8 攻击，实验结果如表 4.6 所示。

表 4.6 不同算法对比结果(NC)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 攻击 类型 | 攻击 参数 | 文献[25] 算法 | 文献[23] 算法 | 本章 算法 | 攻击 类型 | 攻击 参数 | 文献[25] 算法 | 文献[23] 算法 | 本章 算法 |
| 高斯 噪声 | 0. 1 | 0.9628 | 0.9791 | 0.9989 | 旋转 攻击 | 1 | 0.9528 | 0.9634 | 1.0000 |
| 0.2 | 0.9224 | 0.9752 | 0.9814 | 2 | 0.9244 | 0.9356 | 0.9968 |
| 0.3 | 0.9044 | 0.9643 | 0.9743 | 3 | 0.8824 | 0.9208 | 0.9624 |
| 0.4 | 0.8742 | 0.9452 | 0.9586 | 4 | 0.8359 | 0.8708 | 0.9367 |
| 0.5 | 0.8533 | 0.9000 | 0.8842 | 5 | 0.8251 | 0.8422 | 0.9113 |
| 均值 滤波 | 3\*3 | 0.9944 | 0.9975 | 1.0000 | 行列 偏移 | 1 | 0.9956 | 0.9995 | 1.0000 |
| 5\*5 | 0.9886 | 0.9956 | 1.0000 | 2 | 0.9745 | 0.9943 | 1.0000 |
| 7\*7 | 0.9824 | 0.9889 | 0.9994 | 3 | 0.9587 | 0.9863 | 0.9956 |
| 9\*9 | 0.9796 | 0.9792 | 0.9987 | 4 | 0.9256 | 0.9800 | 0.9943 |
| 11\*11 | 0.9686 | 0.9768 | 0.9901 | 5 | 0.9085 | 0.9500 | 0.9824 |
| JPEG 压缩 | 10 | 0.9884 | 0.9900 | 0.9983 | 剪切 攻击 | 右上 剪切 | 0.9771 | 0.9400 | 0.9113 |
| 20 | 0.9976 | 0.9924 | 1.0000 | 左上 剪切 | 0.9342 | 0.9500 | 0.9134 |
| 30 | 0.9993 | 0.9989 | 1.0000 | 中心 剪切 | 0.9617 | 0.9414 | 0.9117 |
| 40 | 0.9991 | 0.9999 | 1.0000 | 左下 剪切 | 0.9426 | 0.9433 | 0.9284 |
| 50 | 0.9994 | 1.0000 | 1.0000 | 右下 剪切 | 0.9689 | 0.9442 | 0.9112 |

在图像处理攻击方面，选取常见的加噪、滤波、压缩攻击。三种算法随着噪 声强度的增加，所提取水印 NC 值均呈下降趋势，在强度小于 0.5 时，本章算法所 提取 NC 值都高于其他两种算法。对于滤波与 JPEG 压缩攻击，如表 4.6 所示，三 种算法均有良好的鲁棒性，NC 都在 0.98 以上，即使在 11\*11 模板滤波下或压缩因 子为 10 的 JPEG 压缩下，本章算法所提取水印 NC 依然更接近 1 。对于几何攻击， 选取具有代表性的 RST 攻击方式。对于旋转攻击，随着旋转角度的增大，文献[25]

47

中国知网 https:iiwww.cnki . net

与文献[23]算法的 NC 下降较快，而本章算法最低 NC 也在 0.9 以上。在平移攻击 对比中，本章算法 NC 值均高于其他二者，文献[25]算法稳定性较差。对不同区域 剪切攻击方面，本章算法所提取水印 NC 值略低于其他两种算法，但 NC 值也在 0.9 以上。综上所述，就整体而言本章算法鲁棒性优于其他二者。

本章算法与文献[23] 、文献[25]算法相比，在抵抗非几何攻击的性能上有较大 地提升，尤其在滤波攻击上，所提取 NC 值几乎为 1，主要因为本章结合 NCST 变 换的多尺度与多方向特性，同时在滤波和去噪都具有良好的性能，加上纠错编码 技术能更准确地提取水印信息。文献[25]算法要提取不同分量的 DCT，SVD 系数， 当受到攻击后各分量的误差容易累计；噪声攻击和滤波攻击强度不大时有较好的 鲁棒性，而强度增大时，DCT 变化较快，使得构造的特征矩阵稳定性较差，提取 效果不佳。文献[23]采用图像子块的空间关系构造零水印，是在空间域上进行处理， 所以对于非几何攻击表现出良好的鲁棒性。然而，对于几何攻击稳定性容易被破 坏，使得抗几何攻击效果不佳；在抗几何攻击上，文献[23]采用传统的 SVD 分解， 在受到旋转攻击时，最大奇异值的最高位容易被破坏。本章算法利用 NMF 分解， 再根据局部统计特性算出频数质心，提取特征矩阵，避免了最大奇异值改变的问 题。因此，本章算法的鲁棒性优于文献[25]和文献[23]算法。

4.7 本章小结

本章算法根据图像的特征，提出了基于 NSCT-NMF 域的频数质心算法，能根 据图像的统计与局部特征，稳定地提取图像特征；并首次将 Polar 码和交织算法与 零水印系统结合，在水印提取时能避免突发错误并具有纠错能力，能更好地提取 水印。与传统水印算法相比，载体图像达到了无损的要求。大量实验结果表明， 本章算法有效地抵抗较大强度的加噪、滤波、JPEG 压缩、旋转、剪切、行列偏移、 直方图均衡化、马赛克、篡改等攻击。本算法具有较强的鲁棒性，既能不修改载 体图像数据信息，又能在较为复杂的攻击条件下稳定提取图像特征恢复水印信息， 因此可以广泛地应用在数字产品的版权保护中。

在实际应用中，图像可能会面临大面积的剪切攻击，导致载体图像失真严重， 提取水印信息困难。或是需要对彩色水印图像实现盲提取，这便对数据的处理提

48

中国知网 https:iiwww.cnki . net

出更高的要求。在未来的研究中，将进一步优化算法抗大面积剪切攻击性能，并 对高性能的彩色载体图像彩色水印的盲提取算法进行探索。

49

中国知网 https:iiwww.cnki . net

50

中国知网 https:iiwww.cnki . net

第 5 章 基于彩色图像 Tetrolet 变换的频数质心零水印算法

5.1 引言

在过去的几十年里，研究人员引入了许多技术来分析图像的纹理结构。许多 研究人员使用离散小波变换从垂直、水平和对角三个不同方向分析纹理图案。三 个方向的纹理分析不足以表示图像的整体几何结构，图像分解后的纹理分析很难 达到最优的图像表示。为了获得更好的图像几何表示，利用2D 二叉树复数小波变 换(Dual Tree Complet Wavelet Transform, DT-CWT)[69]技术，该技术在六个不同方向 上分析图像，角度分别为±15 ° 、 ±45 °和±75 ° , 随后，还有 Curvelet 、CT 、 NSCT 等变换的相继引入。2009 年，Jens Krommweh[41]引入了使用 Haar 小波的一 种特殊情况的图像表示方法，称为 Tetrolet 。Jens Krommweh 在 Tetrolet 变换中使 用的四格拼版，是 Golomb[70]提出的使用单位正方形的变换。Tetrolet 变换在零水 印系统中的应用几乎还是一片空白，在本章中，我们将 Tetrolet变换应用于零水印 系统。

为进一步提高零水印系统的鲁棒性与普适性，本章在上一章的基础上，提出 一种基于彩色图像 Tetrolet变换的频数质心零水印算法。

5.2 Tetrolet 变换

Tetrolet 变换是基于对 Haar 小波的改进，Haar 小波通过固定大小的块来产生 低通和高通系数，因此不可能用这些系数来有效地描述图像的局部几何形状。 Tetrolet 变换的工作方式是自适应的，使用该方法可以很容易地实现方向敏感性。 Tetrolet 变换的自适应特性使其能够完美地表示图像的局部几何形状，采用类似于 “俄罗斯方块 ”自适应的方式填充四格拼板。该变换兼顾了轮廓波变换等多尺度 多分辨率分析的特点，能充分地考虑图像的几何特征，能稀疏的表示图像，使得 能量系数更加集中，在图像压缩、噪声抑制、特征提取等方面均有不错的效果。 若不考虑旋转和翻转有 5 种基本形式，如图 5.1 所示，将这 5 种基本形式的四个拼 版填充在4× 4 的区域中，一共有 117 种方案，若不考虑旋转和镜像，共有如图 5.2

51

中国知网 https:iiwww.cnki . net

所示 22 中组合方式。



图 5. 1 5 种基本四格拼版

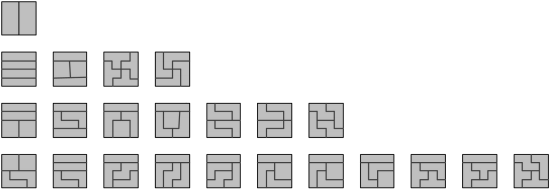
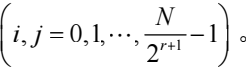


图 5.2 22 种填充方式

Tetrolet 变换算法步骤如下：

假设载体为图像*a*0 = (*I* [*i* , *j* ]),*j*0 ，*N* = 2*J* ，*J* ∈ *N* 进行*r* (*r* = 1, 2, **…** , *J* -1)级 Tetrolet

变换。

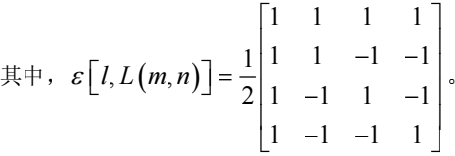
(1) 对低通图像*ar* -1 进行4× 4 分块，每块为*Qi* ,*j* 

(2) 寻找每个子块*Qi* ,*j* 中最稀疏的 Tetrolet 表示，即在 117 中填充方式中寻找最 佳填充方案。对于每一种填充方式*c* 中，在四个拼板的每个子板*Is*(c) 进行 Haar DWT，

其中*c* = 1, … , 117 ，*s* = 0, 1, 2, 3 。可以得到2 × 2 个低频系数=0 和12× 1 个高频系数 =0 ,*l* = 1, 2, 3 ，定义式如下：





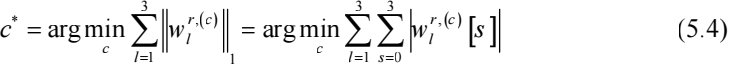


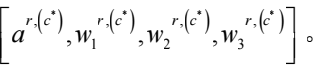
*L* 是从*Is*(c) 的四个坐标(*m*, *n* )按取值大小到{0, 1, 2, 3} 的双映射，即

52

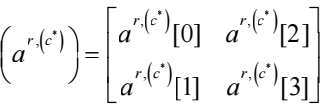
中国知网 https:iiwww.cnki . net

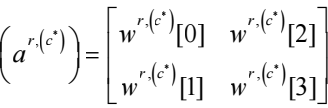
*L* : {(*m*0, *n*0 ), (*m*1, *n*0 )(*m*0, *n*1 )(*m*1, *n*1 )} → {0, 1, 2, 3 } (5.3) 其中，*L* (*m*, *n* ) = 2*n* + *m* ，*m*, *n* = 0, 1 。接着，选择使得 12 个高频系数*l*1 范数最小的 方案*c*\* ，即

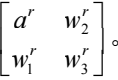


所以，每个子块都可以得到一个最优的分解方式

(3)为了进行多级 Tetrolet分解，使用重新排序函数*R* ，把子块中的*ar* ,(*c*\*) 和*wlr* ,(*c*\*) 进行重新排序，得到2 × 2 的低频系数和高频系数，其定义式如下：

*i* ,*j* = *R* (5.5)

*i* ,*j* = *R* (5.6)

(4) 将低频系数和高频系数存储起来，至此，低通图像*ar* -1 分解为

(5) 将低频系数重新进行排列，作为下一级的输入，重复上述步骤直至分解到 *r* 级结束，Tetrolet 变换结构图如图 5.3 所示。

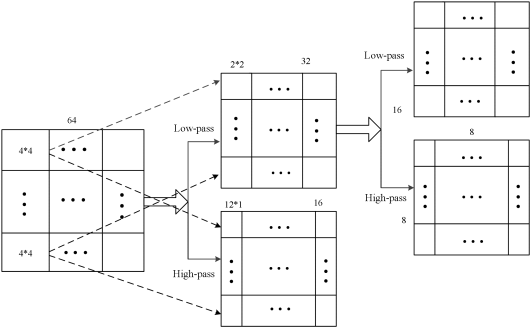


图 5.3 Tetrolet 变换结构图

53

中国知网 https:iiwww.cnki . net

Tetrolet 变换的详细过程可参考文献[41] 。Tetrolet 变换能稀疏的表示图像，使 图像得到的低频系数能量更加集中，将水印嵌入到其低频区域，能提高水印的鲁 棒性和抗噪能力。

5.3 YCbCr 空间变换

颜色空间是将颜色信息表示为三个或四个不同颜色分量的数学模型。不同的 颜色模型用于不同的应用，如计算机图形、图像处理、电视广播和计算机视觉[71-72]。 颜色空间有基于 RGB 的颜色空间，基于色调的颜色空间(HIS 、HSV 和 HSL) ，基 于亮度的颜色空间(YCbCr 、YIQ 和 YUV) ，以及感知均匀的颜色空间(CIEXYZ 、 CIELAB 和 CIELUV)。YCbCr 是最常见的变换，它能帮助人们提取强度(亮度)和色 度。YCbCr 颜色空间中存储 Y 作为图像的亮度，Cb 存储为蓝色差，Cr 存储为红 色差。各个颜色空间之间是可以相互转换的，图 5.4 显示了RGB 和 YCbCr 颜色模 型之间的关系。

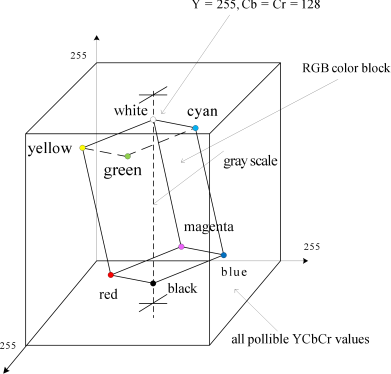
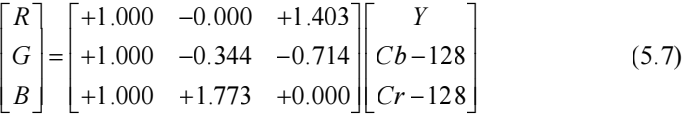


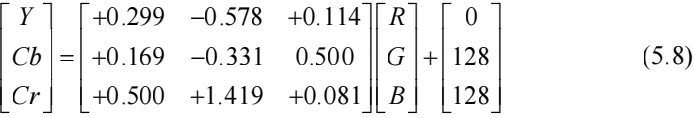
图 5.4 RGB 空间与 YCbCr 空间的关系

RGB 颜色模型与 YCbCr 颜色模型的相互转换公式如下：

54

中国知网 https:iiwww.cnki . net





选择 YCbCr 颜色空间应用于水印系统有如下几个原因：

(1) 使用亮度分量(Y)来解决亮度变化问题，并且由于颜色是独立的，因此容 易编程，操作简单，不用分 R、G、B 三个通道去分别处理，对 Y 分量的处理与处 理灰度图像类似，不过处理后的结果是可以通过补偿彩色信息恢复成彩色图像。

(2) YCbCr 模型符合人眼视觉特性，适用于计算机显示器。

(3) 非常适用于图像和视频的压缩程序，如 JPEG 和 MPEG ，与 ITU-RBT.601 使用的标准兼容[73] ，能更好地提高数字水印系统的普适性。

5.4 零水印的生成与提取

5.4.1 载体图像的处理

如流程图 5.5 所示，以下为对载体图像处理的具体步骤：

(1) 将输入的彩色载体图像(大小为*wlm* )转化到 YCbCr 空间，提取 Y 分量，并 对 Y 分量进行 Tetrolet 变换，得到其低频系数*wlm* 与高频系数*whm* 。

(2) 取低频系数*wlm* 进行8× 8 分块，对每一子块进行 NMF 分解，得到各子块的 一维基向量。

(3) 依次根据一维基向量构造频数质心，计算出每个子块的质心。

(4) 采用局部阈值生成的方法，计算出每相邻的8× 8 子块质心值的平均值作为 阈值，在这8× 8 子块质心值中大于阈值设置为 1，小于阈值置 0，得到*M* / 8× *M* / 8 特 征矩阵***T*** 。

频数质心能够稳定表示图像特征。步骤(3)中构造质心频数的过程如下。一维 基向量中数据***D*** = {*x*1, *x*2, … , *xn* } 映射到*x* 轴上，取最大值为 max ，最小值为 min ， 将 数 据 分 为 *k* 组 ， 组 距 为 *t* ， 设 定 子 区 间 [min, min+ *t*), …, [min+(*i* -1)*t* ，

55

中国知网 https:iiwww.cnki . net

min+ *it*), …, [min+ (*k*-1)*t*, max]

统 计 ***D*** 中 数 据 在 各 个 区 间 的 次 数

,

***C*** = [*m*1, *m*2, … , *mi* , …*mk* ] ， *m*1 + … + *mi* + … + *mk* = *n* ，根据公式 *Xi* = min+ *it* - *t* / 2 ， 依次求出各个子区间的中位数，得到对应的中位数序列***X*** = [*X*1, … , *Xi* , … , *Xk* ] 。根 据公式(5.9)求其质心。

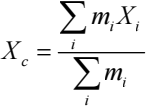
 (5.9)



图 5.5 生成特征矩阵

5.4.2 零水印的生成

零水印生成的过程如图 5.6 ，具体步骤如下：

(1) 采用reshape 的方式将*m* × *m* 的二值水印图像降维成一维序列，对该序列用 Polar 的编码规则*N* = 2*m*× 2*m* ，*K* = *m* × *m* ，码率*r* =1/ 4 的参数进行编码得到***w****b* 。 再根据式(4. 13)(4. 14)进行二维交织形成带有水印信息的交织方阵***S*** 。

(2) 将交织方阵***S*** 与特征矩阵***Τ***进行异或操作生成零水印信息***Z*** 注册到版权 保护中心。运算方式为

***Z*** = *XOR*(***S*** , ***Τ***) (5. 10)

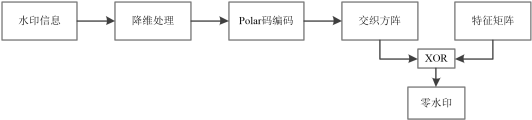


图 5.6 生成零水印

5.4.3 零水印提取

水印的提取与嵌入过程相似，见流程图 5.7 ，具体步骤如下：

(1) 将受到攻击的载体图像按 5.4.1 中步骤(2)-(4)的操作，提取出特征矩阵***Τ*** ' 。

(2) 把特征矩阵与零水印***Z*** 进行异或操作得到含水印信息的交织矩阵***S*** ' 。

56

中国知网 https:iiwww.cnki . net

***S*** ' = *XOR*(***Τ*** ', ***Z***) (5. 11)

(3) 对***S '*** 进行去交织，Polar 码解码，重构为*m* × *m* 的图像即可得到版权水印***w '*** 。

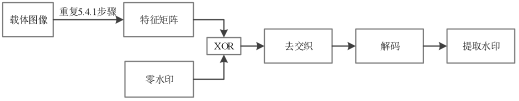


图 5.7 提取零水印

5.5 实验结果与分析

如图 5.8 所示，载体图像选取 CVG-UGR 图像库中1024× 1024 的部分 24 位真 彩色图像，若图像大小为 512× 512 可用 imresize 函数设置尺寸。水印图像选取 32× 32 像素的汉字“ 印 ”的二值图像。



(a) Lena (b) Baboon (c) Pepper



(d) Sailboat (e) yin

图 5.8 载体图像与水印

5.5.1 唯一性检测

为了验证本章零水印算法的有效性，对算法进行唯一性测试。对 CVG-UGR 图像库中部分图像进行两两测试，在嵌入和提取载体图像不一致时，NC 值越高， 唯一性越差。

57

中国知网 https:iiwww.cnki . net

表 5. 1 唯一性检测(NC)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Lena | Baboon | Pepper | Sailboat | Tree |
| Lena | 1.0000 | 0.6128 | 0.5746 | 0.6643 | 0.5867 |
| Baboon | 0.6128 | 1.0000 | 0.6244 | 0.5926 | 0.5634 |
| Pepper | 0.5746 | 0.6244 | 1.0000 | 0.6129 | 0.5746 |
| Sailboat | 0.6643 | 0.5926 | 0.6129 | 1.0000 | 0.6854 |
| Tree | 0.5867 | 0.5634 | 0.5746 | 0.6854 | 1.0000 |



图 5.9 表 5. 1 中 NC=0.6854 的水印图像

实验结果如表 5.1 所示，当提取水印的图像与原始载体图像一致时，表 5.1 主 对角线上 NC 值均为 1，算法都能将水印完整地提取出来；当提取水印的图像与原 始载体图像不一致时，所提取水印最高 NC 值为 0.6854 ，如图 5.9 所示，从此图片 中也难获取与原始水印的信息。因此，本算法具有较好的唯一性与良好的安全性。

5.5.2 鲁棒性检测

(1) 非几何攻击

为测试本章算法在非几何攻击下的鲁棒性，分别对 4 幅载体图像添加高斯噪 声、椒盐噪声、泊松噪声攻击，攻击的参数均值为 0 ，方差为 0.1 和 0.5 ；采用模 板大小为 3\*3 、9\*9 的均值滤波、维纳滤波和高斯低通滤波分别进行攻击；JPEG 压缩因子为 10 、30 、50 进行攻击。

58

中国知网 https:iiwww.cnki . net

表 5.2 非几何攻击实验(NC)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 攻击类型 | 参数 | Lena | Baboon | Pepper | Sailboat |
| 椒盐 噪声 | 0. 1 | 0.9956 | 0.9978 | 1.0000 | 0.9974 |
| 0.5 | 0.9814 | 0.9813 | 0.9861 | 0.9891 |
| 高斯 噪声 | 0. 1 | 0.9930 | 0.9861 | 0.9887 | 0.99904 |
| 0.5 | 0.9353 | 0.9441 | 0.9349 | 0.9486 |
| 泊松 噪声 | 0. 1 | 0.9970 | 0.9918 | 0.9883 | 0.9867 |
| 0.5 | 0.9701 | 0.9789 | 0.9724 | 0.9797 |
| 均值 滤波 | 3\*3 | 1.0000 | 0.9996 | 0.9998 | 1.0000 |
| 9\*9 | 0.9986 | 0.9948 | 0.9971 | 0.9972 |
| 维纳 滤波 | 3\*3 | 1.0000 | 0.9997 | 0.9999 | 0.9999 |
| 9\*9 | 0.9983 | 0.9968 | 0.9956 | 0.9973 |
| 低通 滤波 | 3\*3 | 0.9995 | 0.9997 | 1.0000 | 0.9999 |
| 9\*9 | 0.9904 | 0.9875 | 0.9863 | 0.9866 |
| JPEG 压缩 | 10 | 0.9977 | 0.9902 | 0.9976 | 0.9975 |
| 30 | 0.9989 | 0.9994 | 0.9986 | 0.9994 |
| 50 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |

由表 5.2 可以看出，这 4 幅载体图像在不同类型不同强度噪声攻击下，NC 值 最高可达 1.0000 ，最小也在 0.93 以上。在滤波攻击方面，对于 3\*3 模板的攻击， 大部分 NC 值几乎为 1 ，在 9\*9 模板的攻击下，NC 值接近 1 ，说明算法能有效地 抵抗滤波攻击。在 JPEG 压缩攻击因子为 10 时，NC 最低也为 0.9902 。以上实验说 明 Tetrolet-NMF 域的频数质心零水印算法对常见的图像处理攻击有良好的鲁棒性。

(2) 几何攻击

为验证本章算法对几何攻击的鲁棒性，对这 4 幅图像采用旋转攻击、剪切攻 击、行列偏移攻击，实验结果见下表 5.3。为验证 Polar 码编码+二维交织算法能抵 抗突发错误，优化水印系统性能，对 Lena 图像进行不同方式的剪切攻击，如图 5.10 所示。采用加入交织算法与未加入交织算法的方式进行对比，提取效果如图 5.11。

表 5.3 几何攻击实验(NC)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 攻击类型 | 参数 | Lena | Baboon | Pepper | Sailboat |
| 旋转( °) | 1 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 5 | 0.9517 | 0.9597 | 0.9507 | 0.9513 |
| 10 | 0.9374 | 0.9298 | 0.9402 | 0.9358 |
| 剪切 | 左上 1/4 | 0.9223 | 0.9274 | 0.9214 | 0.9301 |
| 中心 1/4 | 0.9214 | 0.9314 | 0.9329 | 0.9318 |
| 右下 1/4 | 0.9208 | 0.9297 | 0.9288 | 0.9292 |
| 行列偏移 | 1 行 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 10 行 | 0.9624 | 0.9796 | 0.9874 | 0.9785 |
| 20 列 | 0.9202 | 0.9199 | 0.9235 | 0.9141 |

59

中国知网 https:iiwww.cnki . net



(a) 1/4 方剪 (b) 1/4 横剪 (c) 1/4 纵剪

图 5.10 Lena 图像不同方式的剪切攻击



(a) NC=0.8676 (b) NC=0.8846 (c) NC=0.8749



(d) NC=0.9233 (e) NC=0.9418 (f) NC=0.9297

图 5. 11 未交织与交织提取水印对比

由表 5.3 可得，旋转攻击对图像影响较大，但在旋转 5 ° 的条件下，由于采用 Polar 编码交织技术，算法具有良好的纠错特性，NC 值仍在 0.9 以上。对于行列偏 移攻击会使图像整体位置发生改变，由于本算法利用统计局部频数质心的方法， 在偏移 20 列时，依然能有效地提取图像特征，NC 值均在 0.95 以上。对于剪切攻 击，在剪切 1/4 以内具有不错的鲁棒性，若剪切面积过大，造成图像特征损失，则 提取效果不佳，因此能有效地抵抗一定范围内的剪切攻击，故算法在几何攻击下 也具有不错的鲁棒性。如图 5.11 所示，图 5.11 中(a)~(c)是在采用 Polar 编码在图

5.10 中(a)~(c)中所提取的水印，图 5. 11(d)~(f)采用 Polar 编码+二维交织算法在图 5. 10(a)~(c)中所提取的水印。由图 5.11 可以明显看出，未用交织算法所提取的水印 容易出现突发错误，加入交织技术后所提取的水印信息明显清晰，NC 值提高，故

60

中国知网 https:iiwww.cnki . net

Polar 编码+二维交织算法能够对水印信息进行纠错，防止突发错误，达到增强抗几 何攻击的能力的目的。

(3) 组合攻击与其他攻击

为进一步验证本章算法的鲁棒性与稳定性，采用大量的组合攻击与其他攻击 方式进行测试，列出其中的 5 组实验结果如下图。其中攻击的参数为：(a)高斯噪 声(均值为 0 ，方差 0. 1)+剪切攻击(中心剪切 1/4)；(b)均值滤波(模板大小为 9\*9)+ 旋转攻击(10 °)；(c)直方图均衡化+旋转攻击(5 °)+行列偏移(向下 10 行，向右 10 列)；(d)篡改攻击(中心剪切 1/4)；(e) 8\*8 马赛克攻击；



(a) 高斯噪声+剪切 (b) 旋转+滤波 (c) 直方图+旋转+平移



(d) 篡改攻击 (e) 马赛克攻击

图 5.12 不同攻击下的载体图像



(a) (b) (c)

61

中国知网 https:iiwww.cnki . net



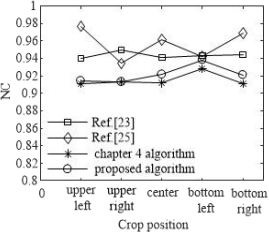
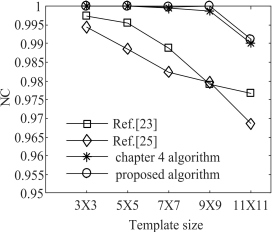
(d) (e)

图 5.13 不同攻击方式下提取的水印

图 5.13 中(a)~(e)所提取的水印分别对应图 5. 12(a)~(e)中受攻击的图像所隐藏的 信息。由图 5. 12(a)~(e)可以看出，组合攻击对图像质量严重扭曲，但水印提取较为 清晰。对于篡改攻击和马赛克攻击，所提取的水印效果也不错。

5.5.3 对比实验

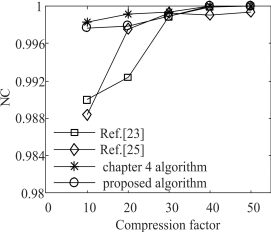
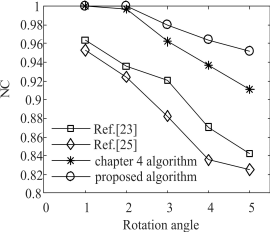
为验证本章算法的优越性，选取 Lena 载体图像，将本章所提算法与具有代表 性的文献[23]中所提基于空域强鲁棒的零水印算法、文献[25]中所提变换域零水印 算法、第四章中 NSCT-NMF 域的频数质心零水印算法进行对比。分别采用均值为 0 的高斯噪声攻击、均值滤波攻击、JPEG 压缩、旋转攻击、行偏移攻击、剪切 1/4 攻击，实验结果如下图 5.14。



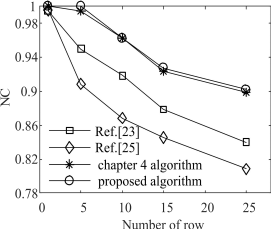
(a) 高斯噪声攻击 (b) 均值滤波攻击

62

中国知网 https:iiwww.cnki . net

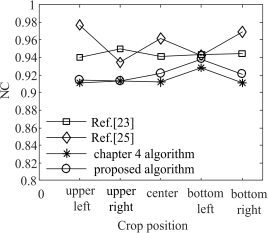


(c) JPEG 压缩攻击



(e) 行偏移攻击

(d) 旋转攻击



(f) 剪切攻击

图 5. 14 不同算法对比结果

在图像处理攻击方面，选取常见的加噪、滤波、压缩攻击。如图 5. 14(a) ，三 种算法随着噪声强度的增加，所提取水印 NC 值均呈下降趋势，本章算法与第四章 算法所提取 NC 值下降趋势相比较为缓慢，且都高于其他两种算法。对于滤波与 JPEG 压缩攻击，如图 5. 14(b) 、5. 14(c)三种算法均有良好的鲁棒性，NC 都在 0.96 以上，但就变化趋势而言，更加能凸显本章算法的稳定性；即使在 11\*11 模板滤 波下或压缩因子为 10 的 JPEG 压缩下，本章算法与第四章算法所提取水印 NC 依 然更接近 1。对于几何攻击，选取具有代表性的旋转、行偏移、剪切攻击方式。如 图 5. 14(d) ，对于旋转攻击，随着旋转角度的增大，本章算法下降趋势较为稳定， 且 NC 值均高于三者。在行偏移攻击下，本章算法与第四章算法表现相近，效果明 显优于文献[23][25]算法。在对不同区域剪切攻击方面，本章算法所提取水印 NC 值略低于其他两种算法，但 NC 值也在 0.9 以上。从实验结果来看，就整体而言本

63

中国知网 https:iiwww.cnki . net

章算法与第四章算法鲁棒性优于文献[23][25]算法，且本章算法在第四章算法的基 础上鲁棒性有所提高。

5.6 本章小结

本章算法在第四章算法的基础上，进一步提高了零水印系统的鲁棒性，根据 图像的特征提出了基于彩色图像 Tetrolet 的频数质心算法，能根据图像的统计与局 部特征，稳定地提取图像特征；将 Polar 码和交织算法与零水印系统结合，在水印 提取时能避免突发错误，具有纠错能力，能更好地提取水印。与传统水印算法相 比，载体图像达到了无损的要求。

64

中国知网 https:iiwww.cnki . net

第 6 章 结束语

6.1 论文主要工作及总结

本文研究了基于变换域的数字图像鲁棒水印算法，首先对数字图像水印的背 景、研究现状、存在的问题以及水印系统的基本特性等方面进行了阐述。然后针 对彩色图像盲提取抗几何攻击不强的问题，在 Contourlet变换域进行 QR 分解，根 据酉矩阵第 2 行第 1 列和第 3 行第 1 列的关系嵌入水印，并利用Radon 对图像进 行几何校正，大幅度地提高了传统水印算法的鲁棒性。紧接着为提高零水印系统 的鲁棒性，在 NSCT 变换域利用 NMF 和编码交织技术，构造了一种频数质心零水 印算法。该算法新颖，与传统水印算法相比，载体图像达到了无损的要求，且具 有不错的鲁棒性。最后为进一步提高零水印方案的鲁棒性和普适性，在第四章的 基础上，提出了一种基于彩色图像 Tetrolet变换的频数质心零水印算法，该算法首 次将 Tetrolet变换应用于零水印系统，适用于彩色图像并具有良好的鲁棒性。本论 文的主要工作和创新点如下：

(1) 基于 Baker 映射与时空混沌相结合的 CT-QR 盲水印算法。利用轮廓波变 换的多分辨率和方向灵活性分解图像，对载体图像和水印图像 R 、G 、B 分量分别 处理，根据酉矩阵第 2 行第 1 列和第 3 行第 1 列的关系嵌入水印酉矩阵，实现了 双彩色图像的盲提取。利用Radon 变换在水印提取之前对载体图像进行旋转校正， 使得几何攻击性能大幅提高。在图像处理攻击、组合攻击下也具有强鲁棒性。另 外，还提供了一种新型的水印加密方式，即 Baker 映射+CML ，大大提升水印系统 的安全性，即使水印被提取出来，也是被置乱加密的水印信息，在不知道密钥的 情况下也无法获取有用信息。

(2) 基于 NSCT-NMF 域与编码交织的频数质心零水印算法。为了不修改载体 图像和提高零水印算法的鲁棒性，利用NSCT 在提供多方向性与多尺度分解的同 时，并没有使得各个频率子带降维，利用其冗余特性可嵌入更多的水印信息的特 点，对载体图像进行 NSCT 变换获得其低频系数，再通过分块 NMF 得到一维基矩 阵，对水印信息进行 Polar 码编码，二维交织构造出交织矩阵，最后将含有水印信 息的交织方阵和特征矩阵进行异或操作生成零水印。该算法根据图像的特征，新

65

中国知网 https:iiwww.cnki . net

颖地提出了频数质心的概念，能根据图像的统计与局部特征，稳定地提取图像特 征；并首次将 Polar 码和交织算法与零水印系统结合，在水印提取时能避免突发错 误并具有纠错能力，能更好地提取水印。与传统水印算法相比，载体图像达到了 无损的要求。

(3) 基于彩色图像 Tetrolet变换的频数质心零水印算法。为进一步提高零水印 系统鲁棒性，利用 Tetrolet 变换能充分的考虑图像的几何特征，更加稀疏的表示图 像，使得能量系数更加集中，结合 YCbCr 空间将彩色图像的 Y 分量进行 Tetrolet 变换，运用频数质心的方式构造零水印。最后，对算法进行了唯一性检测，非几 何攻击，几何攻击，对比实验，证明算法具有良好的鲁棒性。将 Tetrolet变换应用 于零水印系统，也为后来者对零水印的研究提供了一种新的思路。

6.2 后续研究工作

本文通过研究不同变换域的水印算法这条主线，结合 QR 分解、Radon 变换， NMF 分解、二维交织技术、纠错编码、YCbCr 空间转换等技术提出了三种水印算 法，并进行了实验仿真，证明了本文算法相比于传统水印算法和零水印算法，在 鲁棒性和普适性方面都具有比较显著的成效。但是算法仍有许多不足之处，作者 还需进一步研究与改进的方向列出如下，望对后续研究数字水印的学者有所启发。

(1)对于大面积剪切攻击，本文算法还有较大提升空间。因为大面积剪切会使 图像丢失大量信息，并产生大量的0 像素值，这给提取图像的特征或者提取水印 信息带来相当大的困难。在后续的研究中，将进一步优化算法抗大面积剪切攻击 性能。

(2)对本文所提数字水印技术进行进一步的推广，应用于连续动态图像的水印 或者是视频水印技术。

(3)本文算法主要关注于提升水印系统的鲁棒性，对嵌入容量的讨论有所忽视， 并没有对本文所提各个算法进行嵌入容量测试，以及对比实验。

(4)对于零水印系统，本文采用的是构造一维频数质心的方式，对构造二维质 心或者三维质心的方法并未研究，可为后续研究者提供一种思路。

(5)将数学水印算法与其他理论进行结合，如人工智能网络，线性规划、神经 网络模型、布谷鸟算法、遗传算法理论，使其在抗几何攻击方面有新的突破。

66

中国知网 https:iiwww.cnki . net

参考文献

[1] Weiwei Sun, Jiantao Zhou, Yuanman Li, et al. Robust high-capacity watermarking over online social network shared images[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2021, 3(31): 1208-1221.

[2] Poonam Kadian, Shiafali M. Arora, et al. Robust digital watermarking techniques for copyright protection of digital data: A survey[J]. Wireless Personal Communications, 2021, 118(12): 1-25.

[3] Schyndel V. R. G., Tirkel A. Z., Osborne C.F. A digital watermarking[C]//1994 1st International Conference on Image Processing, Austin(ICIP, 1994), USA: IEEE Press, 1994: 86-90.

[4] Cox I. J., Killian J. Secure spread spectrum watermarking for multimedia[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1673-1687.

[5] Veni M., Meyyappan T.. Digital image watermark embedding and extraction using oppositional fruit Fly algorithm[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(19): 17491-27510.

[6] 肖红, 李盼池, 李滨旭. 改进的量子图像水印算法[J]. 信号处理, 2017, 33(02):

135-143.

[7] Abdelhakim A. M., Saad M. H., Sayed M., et al. Optimized SVD-based robust watermarking in the fractional Fourier domain[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(21): 3731-3749.

[8] 刘思玮, 杜庆治, 龙华. 一种基于 DWT-DCT-SVD 的鲁棒性音频水印算法[J]. 光电子 ·激光, 2021, 32(09): 1015-1022.

[9] Xue Chengsun, Lu Zheming, Zhe wang, et al. A geometrically robust multi-bit video watermarking algorithm based on 2-D DFT[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(5): 13491-13511.

[10]Dhevanandhini G., Yamuna G. . An effective and secure video watermarking using hybrid technique[J]. Multimedia Systems, 2021,27(5):953-967.

[11] 秦莉文. 鲁棒数字水印性能优化方法研究[D]. 北京: 北京交通大学,2021.

67

中国知网 https:iiwww.cnki . net

[12]Poonam Kadian, Shiafali M. Arora, ea al. Robust digital watermarking techniques for copyright protection of digital data: A survey[J]. Wireless Personal Communications, 2021, 118(12): 1-25.

[13]Zhang Wenyin, Frank Y. Shih. Semi-fragile spatial watermarking based on local binary pattern operators[J]. Optics Communications, 2011,284(16): 3904-3912.

[14]Jun Dongchang, Chen Bohung, Chwei Shyong Tsai. LBP-based fragile watermarking scheme for image tamper detection and recovery [C]. // 2013 International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE, 2013), Kaohsiung, Taiwan, 2013: 25-26.

[15]Bender, W. R., D. Grubl, Morimoto N. Techniques for data hiding[J]. IBM System Journal, 1996, 35(3&4): 313-336.

[16]Bander F., Hassehrook L. Perfurmance meagures for correladon fifiers[J]. Applied Optics, 1990, 29(20): 2997-3006.

[17]马玲, 张晓辉. 基于内积空间非空子空间变换关系的含水印彩色图像特征分 析[J]. 计算机学报, 2017, 40(5): 1203-1217.

[18]尚福华, 李盼池. 彩色图像的量子水印算法[J]. 信号处理, 2017, 33(11):

1424-1435.

[19]岳桢, 李子臣, 杨义先. 广义直方图多 Bin 多进制水印算法[J].北京邮电大学 学报, 2021, 44(1): 1-6.

[20]岳桢, 李子臣, 杨义先, 等. 直方图 2Bin 多进制图像数字水印算法的研究 [J]. 电子学报, 2020, 48(3): 531-537.

[21]Wan Wenbo, Zhou Kai, Zhang Kai, et al. JND-Guided perceptually color image watermarking in spatial domain[J]. IEEE Access, 2020(8): 164504-164520.

[22]Jun Wang, Wen Bowan, Xiao Xiaoli, et al. Color image watermarking based on orientation diversity and color complexity[J]. Expert Systems With Applications, 2020, 140(3): 1-16.

[23]熊祥光. 空域强鲁棒零水印方案[J]. 自动化学报, 2018, 44(1): 160-175.

[24]Wen Qing, Sun Tanfeng, Wang Shuxun. Concept and application of zero-watermark[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(2): 214-216.

[25]Jiang Feifeng, Gao Tiegang, De Li. A robust zero-watermarking algorithm for color image based on tensor mode expansion[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(1): 7599-7614.

68

中国知网 https:iiwww.cnki . net

[26]Jimson N., Hemachandran K. DFT based coefficient exchange digital image watermarking[C]//2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS, 2018), Madurai, India: IEEE Press, 2018: 567-571.

[27]Ying Qichao, Lin Jingzhi, Qian Zhenxing, et al. Robust digital watermarking for color images in combined DFT and DT-CWT domains[J]. Mathematical Bioences and Engineering, 2019, 16(5): 4788-4801.

[28]Li Mianjie, Yuan Xiaochen, Chen Hai, et al. Quaternion discrete fourier transform-based color image watermarking method using quaternion QR decomposition[J]. IEEE Access, 2020(8): 72308-72315.

[29]Amit Kumar Singh, Mayank Dave, Anand Mohan. Hybrid technique for robust and imperceptible dual watermarking using error correcting codes for application in telemedicine[J]. Inteernational Joural of Electronic Security and Digital Forensics, 2014, 6(4): 285-305.

[30]Rahman Md. Atiqur, Rabbi M. M. Fazle. DWT-SVD based new watermarking idea in RGB color space[J]. International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2015, 8(6): 193-198.

[31]Su Qingtang, Wang Gang, Zhang Xiaofeng, et al. A new algorithm of blind color image watermarking based on LU decomposition [ J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2018, 29(3): 1055-1074.

[32]Khanam T, Dhar P. K., Kowsar S., et al. SVD-based image watermarking using the fast Walsh-hadamard transform, key mapping, and cofficient ordering for own-ership protection[J]. Symmetry, 2019, 12(1): 52.

[33]Donoho D.L. Orthonormal ridgelets and linear singularities[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 2000, 31(5): 1062-1099.

[34]Sonal Kukreja, Geeta Kasana, Singara Singh Kasana. Curvelet transform based robust copyright protection scheme for color images using extended visual cryptography[J]. Multimedia Tools and Applications: An International Journal, 2020, 79(35-36): 26155-16179.

[35]周琳, 张天骐, 冯嘉欣,等. Blob-Haris 特征区域结合 CT-SVD 的鲁棒图像水 印算法[J]. 信号处理, 2020, 36(4): 520-530.

[36]张天骐, 周琳, 梁先明,等. 基于Blob-Harris 特征区域和NSCT-Zemike 的鲁棒 水印算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (7) : 2038-2045.

69

中国知网 https:iiwww.cnki . net

[37]吴捷, 马小虎. 基于 Tetrolet-Radon 变换与 Schur 分解的盲水印算法[J]. 现代 电子技术, 2021 , 44(05): 41-46.

[38]吴德阳, 赵静, 汪国平,等. 一种基于改进奇异值和子块映射的图像零水印技 术[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 85-97.

[39]陈祥, 陈青, 姚绍华. 基于 QR-SVD 的 Contourlet域彩色图像水印算法[J]. 数 据通信, 2017(01): 38-43.

[40]Chen Qing, Bu Ying, Li Wei. Robust watermarking algorithm in NSCT domain based on BSVD decomposition and radon transform[J]. Packaging Engineering. 2019 ,40(13): 233-238.

[41]Jens, Krommweh. Tetrolet transform: A new adaptive haar wavelet algorithm for sparse image representation[J]. Journal Visual Communication and Image Representation, 2010, 21(4): 364-374.

[42]Botta Marco, Cavagnino Davide, Esposito Roberto. NeuNAC: A novel fragile watermarking algorithm for integrity protection of neural networks[J]. Information Sciences, 2021, 576: 228-241.

[43]Wang Xiaochao, Ma Ding, Hu Kun, et al. Mapping based residual convolution neural network for Non-embedding and blind image watermarking[J]. Journal of Information Security and Applications, 2021, 59(1): 102820-102830.

[44]冯乐, 朱仁杰, 吴汉舟, 等. 神经网络水印综述[J]. 应用科学学报, 2021, 39(06): 881-892.

[45]Gao He, Chen Qing. A robust and secure image watermarking scheme using SURF and improved Artificial Bee Colony algorithm in DWT domain[J]. Optik, 2021, 242(10): 166954-166976.

[46]滕春燕, 杨德运. 基于离散余弦变换与最优嵌入强度预测的鲁棒图像水印算 法[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(1):50-58.

[47]Zhou Xiaoyi, Cao Chunjie, Ma Jixin. Adaptive Digital Watermarking Scheme Based on Support Vector Machines and Optimized Genetic Algorithm[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 45(3): 1-9.

[48]Rajesh Mehta, Keshav Gupta, Ashok Kumar Yadav. An adaptive framework to image watermarking based on the twin support vector regression and genetic algorithm in lifting wavelet transform domain[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(5): 18657-18678.

70

中国知网 https:iiwww.cnki . net

[49]Jun Zhang, Xiaoyi Zhou, Jilin Yang, et al. Adaptive robust blind watermarking scheme improved by entropy-based SVM and optimized quantum genetic algorithm[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019(11): 1-16.

[50]周新隆, 祝玉鹏, 杨栋宇,等. 基于视觉密码与 QR 码的光学脆弱水印[J]. 物 理学报, 2021, 70(24): 120-127.

[51]Mohammed Basna, Ameen Siddeeq, Omer Hassan. Image authentication based on watermarking approach: Review[J]. Asian Journal of Computer Science and Information Technology, 2021, 9(3): 34-51.

[52]Mahbuba Begum, Mohammad Shorif Uddin. Digital image watermarking techniques: A Review[J]. Information, 2020, 11(2): 140-156.

[53]Swaraja K., Meenakshi K., Kora Padmavathi. Hierarchical multilevel framework using RDWT-QR optimized watermarking in telemedicine[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2021, 68(7): 102688-102701.

[54]秦如贞, 张黎明, 伍庭晨,等. 结合 ASIFT 和归一化的抗仿射变换遥感影像盲 水印算法[J].地球信息科学学报, 2021, 23(10): 1882-1891.

[55]Gaurav Verma, Meihua Liao, Dajiang Lu, et al A novel optical two-factor face authentication scheme[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 12(123): 28-36.

[56]Poonam, Arora S. M.. A DWT-SVD based Robust Digital Watermarking for Digital Images[J]. Procedia Computer Science, 2018, 132: 1441-1448.

[57]赵培越, 张珍珍, 丁海洋,等. 基于 Arnold 置换的交换加密水印算法[J].计算 机系统应用, 2021, 30(11): 266-272.

[58]陈青, 王宁. 基于 Tchebichef 矩和 Logistic 混沌加密的数字水印算法[J]. 包装 工程, 2019, 40(21): 228-234.

[59]Do M. N. , Vetterli M.. The Contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation, IEEE Transactions on Image Processing 2005, 14(12): 2091–2106.

[60]Taiyue Wang, Xinxiang Zhang. A novel anti-geometrical attack digital watermark algorithm based on Contourlet transform and human visual system[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2018, 18(1): 269-281.

71

中国知网 https:iiwww.cnki . net

[61]Marzieh Amini, M. Omair Ahmad, M.N.S. Swamy. A new locally optimum watermark detection using vector-based hidden Markov model in wavelet domain[J]. Signal Processing, 2017, 137(2): 213-222.

[62]Franz Pichler, Josef Scharinger. Finite dimensional generalized baker dynamical systems for cryptographic applications[J]. Lecture Notes in Computer Science, 1996, 1030(1): 465-476.

[63]刘卓, 王永. 基于二维耦合映像格子模型的图像压缩加密方案[J]. 重庆邮电 大学学报(自然科学版), 2020, 32(06): 1048-1057.

[64]Guo Yong, Li Bingzhao. Blind image watermarking method based on linear canonical wavelet transform and QR decomposition[J]. IET Image Processing, 2016, 10(10): 773-786.

[65]Arikan E., Channel Polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3051-3073.

[66]易琛, 张天骐, 胡然, 等. BSP 二维块交织算法结合 RS 纠错码在水印中的应 用[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(08): 3029-3032.

[67]Lee D. D., Seung H. S.. Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization [J]. Nature, 1999, 401(6755): 788-791.

[68]宁秋莹. 基于 NMF 和增强奇异值分解的自适应零水印算法[D]. 阜新: 辽宁 工程技术大学, 2019.

[69]Varish N. , Pradhan J. , A.K. Pal, Image retrieval based on non-uniform bins of color histogram and dual tree complex wavelet transform[J]. Multimedia Tools and Applications. 2017, 76 (14):15885–1592.

[70]Golomb Solomon W.. Polyominoes: puzzles, patterns, problems, and packings-revised and expanded second edition[M]. State of New Jersey: Princeton University Press,2020.

[71]Prathap Soma, Ravi Kumar Jatoth. An efficient and contrast-enhanced video de-hazing based on transmission estimation using HSL color model[J]. The Visual Computer, 2021(prepublish): 1-12.doi: 10. 1007/s00371-021-02132-3.

[72]陈正, 赵晓丽, 张佳颖, 等. 基于跨模态特征融合的 RGB-D 显著性目标检测 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(11): 1688-1697.

72

中国知网 https:iiwww.cnki . net

[73]Alwan Zena, Ahmed, Farhan Hamid Mohammed, et al. Color image steganography in YCbCr space[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2020, 10(1): 202-209.

73

中国知网 https:iiwww.cnki . net