

# Chirp-Fourier 变换域的水印算法

朱春华<sup>1</sup>, 穆晓敏<sup>2</sup>

(1. 河南工业大学信息科学与工程学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学信息工程学院, 郑州 450052)

**摘要:** 提出一种新的修正离散 Chirp-Fourier 变换(MDCFT)域盲水印方案, 其包括水印嵌入和水印检测 2 部分。该方案把 Chirp 水印信息嵌入图像经二维修正离散 Chirp-Fourier 变换后的系数上, 对其进行反变换, 得到含水印图像, 利用二维 MDCFT 对水印信息进行盲检测。由于 DCFT 可通过 FFT 实现, 与其他时/频域水印算法相比, 其实现更为方便。仿真试验表明, 该算法透明性好, 检测速度快, 植入的数字水印对高斯噪声、剪裁、旋转和 JPEG 有损压缩等图像处理具有较强的鲁棒性。

**关键词:** 修正离散 Chirp-Fourier 变换; Chirp 水印; 二维修正离散 Chirp-Fourier 变换

## Watermark Algorithm in Chirp-Fourier Transform Domain

ZHU Chun-hua<sup>1</sup>, MU Xiao-min<sup>2</sup>

(1. Information Science and Engineering School, Industry University of Henan, Zhengzhou 450001;

2. Information Engineering School, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052)

**【Abstract】** A novel blind watermark algorithm in Modified Discrete Chirp-Fourier Transform(MDCFT) domain is proposed, which includes watermark embedding and watermark detecting. The two-dimensional chirp signal is embedded in MDCFT domain by inverting MDCFT to obtain the watermarked image. The watermark is detected by MDCFT. DCFT can be implemented by FFT, so the algorithm is simple in computation and easy in implementation comparing with other watermark algorithms in time-frequency domain. The experimental results show that the algorithms can make the watermark invisible perpetually, and are also robust to some common image processing, such as adding Gauss noise, cropping, rotating and JPEG compressing, etc.

**【Key words】** Modified Discrete Chirp-Fourier Transform(MDCFT); Chirp watermark; 2D-MDCFT

### 1 概述

数字水印(digital watermarking)技术利用各种信号处理方法对声像数据进行隐藏加密, 该秘密信息——水印对宿主媒体的影响不足以引起人们的注意且具有特定的恢复方法, 而且对于非法接收者是不可见的。目前数字水印的研究热点集中在水印的透明性和鲁棒性 2 个方面, 而水印结构和水印嵌入方案的确定直接影响到水印系统的透明性和鲁棒性。

按照数字水印的隐藏位置, 可将其划分为空域数字水印、频域数字水印、时/频域数字水印。空域数字水印算法直接在信号空间上叠加水印信息, 即把水印嵌入到图像每个像素的最低有效位中, 但这些数据可能在常见的信号处理过程(如数据压缩和低通滤波)中丢失, 因此稳健性较差。频域数字水印、时/频域数字水印则分别在 DCT 变换域、时频变换域(如小波变换)上隐藏水印, 在该变换域嵌入的水印信号能量可以分布到空域的所有像素上, 有利于保证水印的不可见性; 在变换域, 视觉系统(HVS)的某些特性可以更方便地结合到水印编码过程中; 而且变换域的方法可与国际数据压缩标准兼容。时/频域数字水印较 DCT 域数字水印更有优势。DCT 变换纯粹将空域变换到频率域, 没有利用图像的空间-频率特性, 而这种特性正好与人眼的某些视觉特性一致, 另外, 小波变换、分数阶傅里叶变换等时频变换可采用图像融合技术将水印分散到载体图像的多个尺度或参数中, 使水印的鲁棒性更强。近几年提出了将 Chirp 信号作为水印信息。Chirp 信号具有较大的时间带宽积, 对于所有的平稳滤波和仿射变换呈现出较好的稳定性, 非常适合作为水印信号, 此外基于时频分析的

Chirp 类信号的检测技术为水印的提取奠定了理论基础。

文献[1]提出一种基于 Radon-Wigner 变换(RWD)的空域数字图像水印算法, 该算法中嵌入的水印是二维 Chirp 信号, 通过求解图像的 RWD 来检测水印的存在。在非线性的时频分布中, RWD 被认为是在噪声中提取单分量 Chirp 信号的最佳手段, 但其缺点是多分量 Chirp 信号在变换过程中的非线性会导致交叉项的干扰; 文献[2]提出一种基于分数阶 Fourier 变换(FRFT)的 Chirp 类水印盲检测算法, FRFT 对多分量 Chirp 信号不存在交叉项干扰, 但 FRFT 在离散化过程中存在量化误差, 在处理数字信号时只能采用某种近似算法。近年来, 一种新的时频分析工具——离散 Chirp-Fourier 变换(Discrete Chirp-Fourier Transform, DCFT)受到越来越多的关注。文献[3]提出了基于修正离散 Chirp-Fourier 变换(Modified DCFT, MDCFT)的空域数字水印算法, 该算法在空域嵌入二维 Chirp 水印, 利用离散 Chirp-Fourier 变换对 Chirp 信号的高能量聚集性进行水印检测, 不仅检测速度快, 而且实现简单。本文以二维 Chirp 信号为水印, 提出了一种新的 DCFT 域水印方案。该算法通过修改图像 DCFT 域的全局系数嵌入二维 Chirp 水印信息, 变换参数和 Chirp 信号调频率参数为水印密钥。利用 MDCFT 对 Chirp 信号的能量高度聚集性特点, 在变换

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60472044); 河南工业大学科技攻关基金资助项目(06XGG016)

**作者简介:** 朱春华(1976 - ), 女, 讲师, 主研方向: 图像信号处理; 穆晓敏, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2008-05-30 **E-mail:** zchdc@sohu.com

域进行水印检测和提取。

## 2 二维修正离散 Chirp-Fourier 变换(2D-MDCFT)

### 2.1 2D-MDCFT 定义

假设  $x(n)$  是长度为  $N$  的离散信号, 则其  $N$  点 MDCFT<sup>[4]</sup> 为

$$X(k, l) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn + \frac{l}{N}n^2}, \quad 0 \leq k, l \leq N-1 \quad (1)$$

根据式(1), 二维信号  $x(m, n)$  的 2D-MDCFT 可定义为

$$X(k_1, k_2, l_1, l_2) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} x(m, n) W_M^{k_1 m + \frac{l_1}{M}m^2} W_N^{k_2 n + \frac{l_2}{N}n^2} \quad (2)$$

其中,  $0 \leq k_1 \leq M-1, 0 \leq k_2 \leq N-1$ 。

从式(2)可以看出, 对每一个固定的  $l_1$  和  $l_2$ ,  $\{X(k_1, k_2, l_1, l_2)\}_{0 \leq k_1 \leq M-1, 0 \leq k_2 \leq N-1}$  是信号  $x(m, n) W_M^{\frac{l_1}{M}m^2} W_N^{\frac{l_2}{N}n^2}$  的二维 DFT, 当  $l_1=l_2=0$  时, 2D-MDCFT 退化为 2D-DFT。因此, 二维 MDCFT 的逆变换(2D-IMDCFT)定义为

$$x(m, n) = W_M^{\frac{l_1}{M}m^2} W_N^{\frac{l_2}{N}n^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{k_1=0}^{M-1} \sum_{k_2=0}^{N-1} X(k_1, k_2, l_1, l_2) W_M^{k_1 m} W_N^{k_2 n} \quad (3)$$

其中,  $0 \leq m \leq M-1, 0 \leq n \leq N-1$ 。

这样就可以借助 FFT 来计算 2D-MDCFT。

### 2.2 2D-MDCFT 对 Chirp 信号的能量聚积性

假设二维 Chirp 信号为

$$x(m, n) = A W_M^{-(k_{01}m + \frac{l_{01}}{M}m^2)} W_N^{-(k_{02}n + \frac{l_{02}}{N}n^2)} \quad (4)$$

其中  $k_{01}, k_{02}$  与  $l_{01}, l_{02}$  分别是二维 Chirp 信号的初始频率和调频率。

根据式(2), 当  $k_1=k_{01}, l_1=l_{01}, k_2=k_{02}, l_2=l_{02}$  时, 式(4)给定的二维 Chirp 信号的二维 MDCFT 幅值为

$$|X(k_1, k_2, l_1, l_2)| = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} x(m, n) W_M^{k_1 m + \frac{l_1}{M}m^2} W_N^{k_2 n + \frac{l_2}{N}n^2} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \cdot AMN = A\sqrt{MN} \quad (5)$$

而其他点的幅值不超过  $\sqrt{M}$  或  $\sqrt{N}$ , 即在调频率匹配的条件下, 二维 Chirp 信号的 MDCFT 谱在点  $(k_{01}, k_{02})$  呈现高度的能量聚积。利用这一特性可实现 Chirp 信号的检测和参数估计。

## 3 MDCFT 域水印算法

与变换域水印算法的基本原理相同, 本文的算法包括水印嵌入和水印检测两部分。MDCFT 域水印嵌入也是通过修改某些变换域系数实现的。本文采用单分量 Chirp 信号作为水印信息, 水印信息嵌入到不同变换参数  $l_1, l_2$  的 2D-MDCFT 域系数上。水印密钥包括 2D-MDCFT 变换参数  $l_1, l_2$  以及 Chirp 水印信号调频率参数  $l_{01}, l_{02}$ 。水印的检测利用 MDCFT 对 Chirp 信号的高度聚集性, 通过峰值搜索判断水印是否存在。

由于 MDCFT 对 Chirp 信号的能量聚集峰值为  $A\sqrt{MN}$ , 而没有嵌入水印的原图像(假设为灰度图像)的灰度值最大为 255, 因此其在空域内的最大幅值为  $\max |I| \approx 2^8$ 。因为水印信号的检测在 MDCFT 域进行, 所以有必要要求出图像信号 MDCFT 后的最大幅值, 根据 MDCFT 的定义<sup>[5]</sup>, 图像信号的 MDCFT 不会呈现明显的峰值, 是一个幅值较为平坦的谱。根据能量守恒法则, 该谱的平均幅值等于图像信号的平均幅值  $\bar{I}$ 。其能量远小于水印信号 MDCFT 峰值的能量, 不会影响 MDCFT 对水印信号的匹配性能。此时可采用简单的决策检验法, 即对 MDCFT 结果规定一个阈值  $T$  ( $T$  的大小由检测标准来定, 一般远大于  $\bar{I}$ , 小于  $A\sqrt{MN}$ ), 如果出现高过此阈值的峰值, 说明存在 Chirp 水印信号, 否则不存在, 而峰值的坐标

对应水印信号参数的估计值。

### 3.1 水印嵌入算法

设图像信号为  $I(m, n)$ , 水印信号  $S(m, n)$  为二维离散 Chirp 信号。即

$$S(m, n) = A \exp(j \cdot (am^2 + bn^2)) \quad (6)$$

水印嵌入方案如图 1 所示。

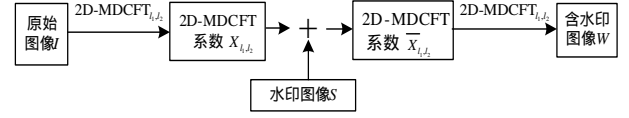


图 1 水印嵌入方案

水印嵌入步骤如下:

(1) 对原始图像进行参数为  $l_1, l_2$  的 2D-MDCFT;

$$X_{l_1, l_2} = 2D-MDCFT_{l_1, l_2}(I) \quad (7)$$

(2) 修改参数为  $l_1, l_2$  的 2D-MDCFT 域的系数:

$$\bar{X}_{l_1, l_2} = X_{l_1, l_2} + S \quad (8)$$

其中,  $S$  为一个或多个离散的二维 Chirp 信号。水印  $S$  直接修改 2D-MDCFT 域的全局系数。

(3) 对修改系数后的  $\bar{X}_{l_1, l_2}$  做参数为  $l_1, l_2$  的 2D-IMDCFT:

$$W = 2D-IMDCFT(\bar{X}_{l_1, l_2}) \quad (9)$$

即可得到嵌入水印后的图像  $W$ 。

### 3.2 水印检测算法

水印检测的基本思想是对含水印图像进行参数为  $l_1, l_2$  的 2D-MDCFT, 然后以调频率为变量, 对其进行参数为  $l_{01}, l_{02}$  的 2D-MDCFT, 形成  $l_1, l_2, l_{01}, l_{02}$  四维平面, 在此平面上搜索 MDCFT 的最大值, 将其与一个预设的阈值  $T$  比较, 由此可以判断水印是否存在。水印检测方案如图 2 所示。

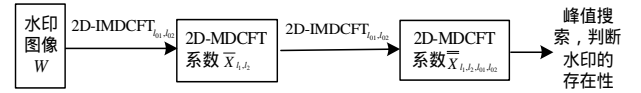


图 2 水印检测方案

水印检测步骤如下:

(1) 对含水印图像  $W$  进行参数为  $l_1, l_2$  的 2D-MDCFT:

$$\bar{X}_{l_1, l_2} = 2D-MDCFT_{l_1, l_2}(W) \quad (10)$$

(2) 对  $\bar{X}_{l_1, l_2}$  做参数为  $l_{01}, l_{02}$  的 2D-MDCFT:

$$\bar{\bar{X}}_{l_1, l_2, l_{01}, l_{02}} = 2D-MDCFT_{l_{01}, l_{02}}(\bar{X}_{l_1, l_2}) \quad (11)$$

考虑 MDCFT 对 Chirp 信号的能量聚集性, 可取  $\bar{\bar{X}}_{l_1, l_2, l_{01}, l_{02}}$  的模, 按下式搜索其最大值

$$|M(k_{01}, k_{02}, l_{01}, l_{02}, l_1, l_2)| = \max_{k_{01}, k_{02}, l_{01}, l_{02}} |\bar{\bar{X}}_{l_1, l_2, l_{01}, l_{02}}| \quad (12)$$

如果  $M$  明显大于  $T$ , 意味着在该图像中检测到了水印的存在。显然对参数  $l_1, l_2, k_{01}, k_{02}, l_{01}$  和  $l_{02}$  的搜索会十分耗时, 因为水印密钥  $l_{01}, l_{02}$  和  $l_1, l_2$  对于嵌入者和授权使用者来说是已知的, 所以式(12)的四维搜索可简化为二维搜索:

$$|M(k_{01}, k_{02})| = \max_{k_{01}, k_{02}} |\bar{\bar{X}}_{l_1, l_2}| \quad (13)$$

特定的 Chirp 水印信号仅在调频率匹配条件下的 MDCFT 谱中呈现能量的高度聚集性, 图像信号的 MDCFT 则在任何平面上均不会呈现出能量的聚集。而水印信号的能量完全聚集在  $(k_1, k_2)$  平面的一个点上。在这一坐标点上, 即使是微弱的水印信号, 其聚集的能量也将远远超过图像信号的能量。利用这个特性就能够实现微弱水印的检测。

在整个水印检测过程中，由于水印的结构是已知的，即一个或多个Chirp信号，因此检测时完全不需要原始图像。另一方面，与基于MDCFT的空域水印算法<sup>[3]</sup>相比，本文所提算法的密钥不仅包括水印参数 $l_{01}$ 和 $l_{02}$ ，还包括变换参数 $l_1$ 和 $l_2$ ，在水印检测与提取过程中，版权认证机构必须知道水印的密钥。对于攻击者来说，如果不知道水印的密钥，即使知道水印的结构，依照调频率进行搜索也是十分困难的。

#### 4 实验结果

仿真实验采用  $256 \times 256$  的Cameraman图像作为原始图像，如图 3(a)所示，其平均幅值 $\bar{I}=118.7245$ ；水印图像为二维Chirp信号，其参数为 $l_{01}=l_{02}=10$ ， $k_1=k_2=140$ ，幅度 $A=4$ 。水印嵌入到参数为(3,3)的2D-MDCFT域系数上。图像的峰值信噪比 $PSNR=39.016$  dB，信噪比 $SNR=33.5176$  dB。嵌入水印后的图像如图 3(b)所示。由图 3 可见，嵌入水印后的图像与原始图像相比在视觉上几乎没有差别，可以很好地满足水印的不可见性。图 4 是对图 3(b)所示的含水印图像进行参数为(3,3)与(10,10)的2D-MDCFT后的能量分布图，从图 4 可以看出，含水印图像的MDCFT谱中出现明显的峰值，峰值点在 $k_1=k_2=140$ 处。水印检测的阈值可选 $m\bar{I} \sim A\sqrt{MN}$ （即 $118m \sim 1024, m \geq 2$ ）；当峰值大于预设阈值时，可断定存在水印，且能够据此估计水印信号参数。



图 3 原始图像和含水印图像

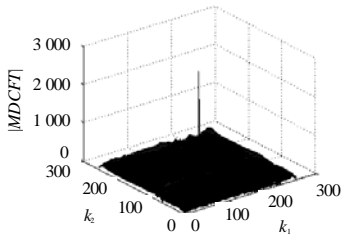


图 4 在调频率 / 匹配下含水印图像的 MDCFT 能量分布

为检验 MDCFT 域水印算法的鲁棒性，对图 3(b)进行各种图像处理 and 攻击，然后从这些被破坏的图像中提取水印。图 5~图 8 分别给出了算法在加高斯白噪声干扰(均值为 0、方差为 0.05)、剪裁(128×128，剩余原图的 50%)、旋转 90° 以及品质因子为 50 的 JPEG 压缩等常见图像处理下含水印图像和水印检测器的响应。

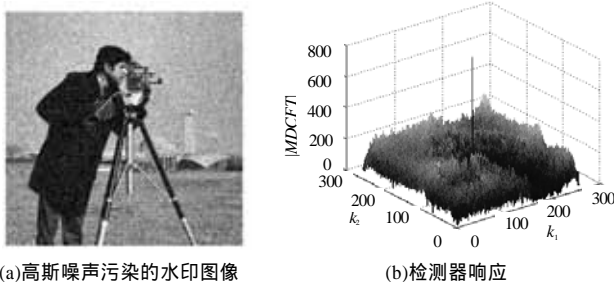


图 5 受到高斯噪声污染的图像和检测器的响应

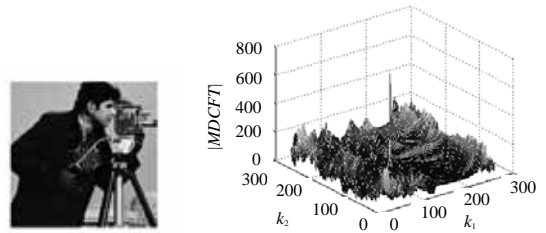


图 6 受到剪裁的图像和检测器的响应

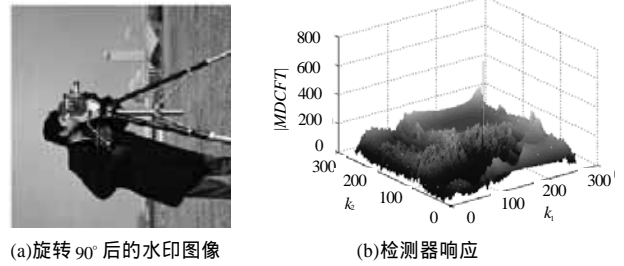


图 7 受到旋转的图像和检测器的响应

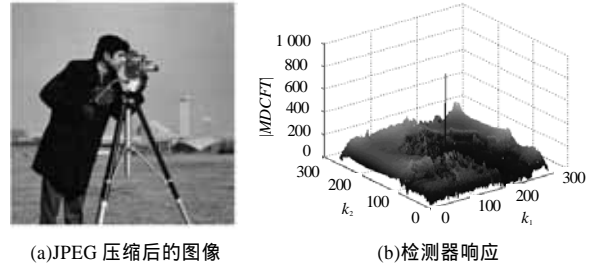


图 8 受到 JPEG 压缩后的图像和检测器的响应

由实验结果可以看出，经过高斯白噪声污染、裁减、旋转以及 JPEG 压缩等图像处理 and 攻击后，水印检测器出现了较明显的峰值，不会影响水印的检测，此时水印由于受到攻击，MDCFT 峰值会略小于 $A\sqrt{MN}$ ，但仍远大于图像信号的平均幅值。这表明本文的水印算法具有较好的鲁棒性。

#### 5 结束语

本文提出离散 Chirp-Fourier 变换域数字水印算法，由于 DCFT 是一种线性变换，可通过 FFT 实现，因此与其他时频变换相比，其离散化过程中不存在量化误差和近似算法，具有计算简单、可实时实现的优点。仿真试验表明，本算法对于常见的图像处理操作具有较好的鲁棒性。由于 Chirp-Fourier 变换对多分量 Chirp 水印不存在交叉项干扰，因此本文的算法适用于在 Chirp-Fourier 变换域嵌入多分量 Chirp 水印的情况，可进一步增强水印算法的鲁棒性。

#### 参考文献

- [1] Stankovic S, Djurovic I, Pitas I. Watermarking in the Space/Spatial-Frequency Domain Using Two-Dimensional Radon-Wigner Distribution[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2001, 10(4): 650-658.
- [2] Zhang Feng, Mu Xiaomin, Yang Shouyi. Multiple-Chirp Typed Blind Watermarking Algorithm Based on Fractional Fourier Transform[C]//Proc. of ISPACS'05. [S. l.]: IEEE Press, 2005.
- [3] 朱春华, 穆晓敏, 张峰. 基于修正 Chirp-Fourier 变换的数字水印算法[J]. 计算机工程, 2006, 32(17): 213-215.

(下转第 146 页)