

基于 DCT-Winograd 快速变换的半盲水印算法

郭宗良², 裴小根^{1,2}, 徐才云², 田靖², 常燕³

(1. 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250100;

2. 蚌埠坦克学院 信息指挥技术教研室, 安徽 蚌埠 233000;

3. 蚌埠市高新区公安分局, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 针对目前多数基于傅里叶变换域的方法, 其抗几何攻击性能虽很好, 嵌入的信息量也很大, 但存在抗剪切攻击能力较差的问题, 提出了一种基于离散余弦变换与 Winograd 快速傅里叶变换相结合的半盲水印算法, 将 Winograd 算法分解的对角矩阵与经过 DCT 变换的图像块相与, 产生一个新的对角矩阵, 再将数字水印嵌入到该对角矩阵中, 最后通过相关逆运算提取水印。实验结果表明, 该方法可获得较好的图像视觉效果, 对剪切、噪声等攻击皆具有较好的鲁棒性。

关键词: 离散余弦变换; Winograd 快速变换; 半盲水印算法

中图分类号: TP309

文献标志码: A

文章编号: 1674-7720(2011)10-0051-03

Semi-blind watermarking algorithm based on DCT-Winograd fast transform

Guo Zongliang², Pei Xiaogen^{1,2}, Xu Caiyun², Tian Jing², Chang Yan³

(1. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China;

2. Faculty of Information Command Technology Teaching and Research, Bengbu Tank Institute, Bengbu 233000, China;

3. High-tech Zone in Bengbu Public Security Bureau, Bengbu 233000, China)

Abstract: For the most current methods based on Fourier transform domain, although its very good performance against geometric attacks, the embedded information is also great, but there is less shear attack the problem, a discrete cosine transform and Winograd fast Fourier transform combining semi-blind watermarking algorithm, Winograd diagonal matrix decomposition algorithm and the image blocks after DCT transformation phase, resulting in a new diagonal matrix; then digital watermark embedded into the diagonal matrix, Finally through the relevant inverse watermark. Experimental results show that the method could achieve better visual effect on the shear, noise and other attacks are a good robustness.

Key words: discrete cosine transform; winograd fast transform; semi-blind watermarking algorithm

数字水印是一门新兴技术, 最早的“水印”术语诞生于 18 世纪末期^[1], 它的产生源于对音乐作品的版权保护。在 1954 年, 美国 Muzak 公司的 Emil Hembrooke 为带有水印的音乐作品首次申请了一项专利, 此后, 水印技术被广泛地应用于图像^[2]、音视频、文本^[3]以及三维网络模型的加密防范; 除此之外, 其还作为票据防伪、版权保护^[4]、篡改提示和隐藏标示的重要依据。现有的变换域^[5]数字水印技术大多有更好的不可感知性、安全性并对图像滤波以及各种噪声有更强的鲁棒性。这种算法往往可以嵌入大量比特数据而不会导致可察觉的缺陷。例如基于傅里叶变换域的方法, 其抗几何攻击性能好, 嵌入的信息量也很大, 但这种方法抗剪切攻击能力较差。本文针对

这一问题, 提出了一种基于离散余弦变换与 Winograd 快速傅里叶变换相结合的半盲水印算法, 并通过实验结果证明该方法不但可以获得良好的图像视觉效果, 同时对剪切、噪声等攻击皆具有很好的鲁棒性。

1 离散余弦变换与 Winograd 快速傅里叶变换技术的基本原理

1.1 相关定义

1965 年, 美国的 Cooley 和 Tukey 提出了一种新的算法, 即 Winograd 快速傅里叶变换^[6]。该算法利用抽象代数和初等数论等数学工具而建立, 表 1 列出了几种傅里叶变换算法计算量的比较, 此算法的优越性是显而易见的。

Winograd 快速傅里叶变换算法(小数组)是指针对信

表1 几种二维傅里叶变换算法的相对性能比较

算法	直接计算离散傅里叶变换	Cooley-Tukey FFT	混合 Cooley-Tukey Winograd FFT	Winograd FFT
	1 000×1 000	1 024×1 024	1 000×1 000	1 008×1 008
乘法次数	8 000	40	40	6.2
加法次数	4 000	60	72.8	91.6

号长度 $N=2,3,4,5,6,7,8,9$ 这 8 种 DFT。Winograd 所提出的独特算法,其应用域的理论证明了这些算法的乘法次数接近于 N 。这些 Winograd 算法之所以重要还在于所有信号长度 N 很大的 Winograd 算法都可以由几个互素的 Winograd 算法经过矩阵嵌套来得到,使其乘法次数仅为 Cooley-Tukey FFT 的 1/3。

1.2 离散余弦变换与 Winograd 快速傅里叶变换技术的基本原理

DCT 变换是线性正交变换,其变换核各矢量间单位正交,它与目前流行的国际压缩标准兼容^[7]。通过 DCT 变换将数据块中的能量压缩到少部分低频系数中。DCT 变换是常用的一种对原始图像进行处理的方法,具有很强的“能量集中”特性:大多数的自然信号(包括声音和图像)在 DCT 变换后能量都集中在低频部分。

DCT 变换与 Winograd 快速傅里叶变换技术的基本原理:

设长度为 N 的信号为 $x=\{x(n),n=0,1,\dots,n-1\}$, x 的傅里叶变换是另一个长度为 N 的向量 $X=\{x(k),k=0,1,\dots,n-1\}$,它由式(1)给出:

$$X(k)=\sum_{i=0}^{N-1}\omega^k x(i) \quad k=0,1,\dots,n-1 \quad (1)$$

其中 $\omega=e^{-\frac{\sqrt{2}}{N}}$,也可以将其写成矩阵乘积形式, $X=Wx$

$$W=\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \omega & \cdots & \omega^{N-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega^{N-1} & \cdots & \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

Winograd 算法最主要的是对矩阵 W 作了分解,使其变成了 3 个矩阵的乘积: $W=CYZ$ 。其中, Y 和 Z 的元素仅包含 0 和 ± 1 , C 只有对角线上的元素非零,这样只有在数据与 C 作计算时才包含乘法计算,可以使计算中的乘法运算大大减少。 W 的分解是一个比较复杂的过程,应用时可直接查阅手册或参考书。这里以 $N=3$ 为基准,可分解 W 得:

$$Y=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad Z=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad C=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -3\sqrt{2}j \end{bmatrix}$$

2 数字水印的嵌入及提取

该算法对数字水印嵌入和提取的基本思想是:在 Cox 等人^[8-9]提出的应将水印放在视觉系统感觉最重要的分量上,在图像有一定失真的情况下仍能保留主要成

分,因此可将水印信息嵌入到 DCT 低频和中频系数中以获得较好的鲁棒性的基础上,提出将基于快速傅里叶变换的 Winograd 算法与之相结合,将 Winograd 算法分解的对角矩阵与经过 DCT 变换的图像块相与(相当于在水印嵌入之前添加了一个密钥),然后再嵌入水印到新对角矩阵中,在提取水印时,密钥也要考虑加入其中。图像信号经过 DCT 变换后,主要能量将被压缩到低频系数和中频系数中去,与对角矩阵相与后即使进行高频编码也不易被破坏,仍能够保留主要能量信息,而右下角则包含图像更多的细节。

2.1 水印的嵌入

假设载体图像为 Mary 位图,大小为 512×512 ,水印图像为 64×64 的防伪标志图像。如果矩阵 P 和 W 分别表示原始图像矩阵和水印,则通过以下的 3 个步骤得到水印图 \hat{P} 。

(1) 将图像矩阵 P 进行 DCT 变换,在变换过程中,先将整体图像分成 w 个互不覆盖的 $N \times N$ 图像块,然后对 $N \times N$ 像素块逐一进行 DCT 变换,记为 $BLOCK(w)$, ($w=1,2,\dots,w$),并对每一个 $N \times N$ 小块图像进行 DCT 变换(实验中将 N 的值假设为 8),则每个块上的 DCT 的变换为:

$$S(u,v)=C(u)C(v)\sum_{x=0}^{N-1}\sum_{y=0}^{N-1}s(x,y)\cos\left[\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\right]\cos\left[\frac{(2y+1)v\pi}{2N}\right] \quad (3)$$

式中, $s(x,y)$ 表示在空域中坐标为 (x,y) 点的值, $s(u,v)$ 表示空域中的值经过变换后所得到的在频率域中坐标为 (u,v) 点的系数。

(2) 对图像进行 Winograd 快速傅里叶变换。对矩阵进行 Winograd 算法分解,分解为两个包含 0 和 ± 1 的矩阵 Y 和 Z 、一个对角阵 C ; 再将 Winograd 算法分解的对角阵 C 与经过 DCT 变换的每一小块图像相与,产生一新对角阵 C' :

$$C'=C \times s(u,v) \quad (4)$$

(3) 读取水印图像 W , 将其叠加到对角阵 C' 中,从而得到含水印的图像 \hat{P} 。这里 α 是调节水印的叠加强度,在实验过程中发现,其值并不是越大越好,如过大则会使含水印图像的隐蔽性变差。

$$\hat{P}=\alpha(C' \times W) \quad (5)$$

2.2 水印的提取

在水印的检测过程中,如果给出矩阵 P 和可能损坏的水印图像 P' (也可能无损坏,则为原先的含水印图像),则通过简单的逆过程就可以提取出可能已经失真(也可能无失真)的水印 W' ,具体过程如下:

(1) 对可能损坏(也可能无损坏)的水印图像 P' 进行反离散余弦变换:

$$S(x,y)=C(u)C(v) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} s(u,v) \cos \left[\frac{(2x+1)u\pi}{2N} \right] \cos \left[\frac{(2y+1)v\pi}{2N} \right] \quad (6)$$

(2) 恢复水印的叠加强度(在实验过程中发现,调节水印的叠加强度 α 的取值有一个适中的范围,一般以 $\alpha=0.09\sim 0.18$ 为宜):

$$W'' = \frac{W'}{\alpha} \quad (7)$$

(3) 通过逆运算,考虑 Winograd 算法的对角阵,最终获得水印图像:

$$W^* = \frac{W''}{C \times s(x,y)} \quad (8)$$

3 仿真实验

仿真实验选取的水印图像为 64×64 的防伪标志图像,宿主图像为 512×512 的 Mary 灰度图像。嵌入水印图像质量的客观评价采用 PSNR 来度量,水印检测结果的客观评价采用归一化相关系数 NC 来衡量。为验证该算法的鲁棒性,本文采取以下实验:

(1) 抗剪切实验。实验结果如图 1 所示。图 1(a) 表示剪切面积为 10% 时的含水印图像,这时的 $PSNR=6.8162$ dB。通过图 1(b) 可以看到尽管提取的水印正上方有一条细黑线,但提取的水印还是很清晰的,其 $NC=0.9598$ 。通过表 2 的具体实验数据可以发现,当剪切面积高达 30% 时,仍可检测出水印的存在。



图 1 对含水印的灰度图像抗剪切实验结果

表 2 对含水印的灰度图像抗剪切实验数据

剪切幅度/%	10	20	30
PSNR/dB	6.816 2	3.643 9	1.171 7
NC	0.959 8	0.914 8	0.852 9

(2) 抗椒盐噪声实验。实验结果如图 2 所示。使用 imnoise 函数在已加水印图像中叠加噪声密度为 0.02 的椒盐噪声,图像上有较多的颗粒。尽管提取水印的背景图周围有一些小黑点,但仍可以看出提取的水印,这时 $NC=0.9887$, $PSNR=15.4710$ dB; 通过表 3 实验数据可以看到,该算法有较强的抗椒盐噪声能力。

以上实验表明,该算法有较强的抗干扰能力,鲁棒性好。

本文提出了基于离散余弦变换与 Winograd 快速傅里叶变换相结合的半盲水印算法,将 Winograd 算法所分



图 2 对含水印的灰度图像抗椒盐噪声实验结果

表 3 对含水印的灰度图像抗椒盐噪声实验数据

噪声密度	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
PSNR/dB	18.477 1	15.471 0	13.819 3	12.584 5	11.556 7
NC	0.995 4	0.988 7	0.983 9	0.974 5	0.971 7

解的对角矩阵与已提前进行离散余弦变换的图像进行相与后再嵌入水印,从而提出了一种数字水印嵌入的新算法。实验验证了其理想的鲁棒性和安全性,并且水印的提取不需要原始图像,故有较高的实用价值。该水印算法还能用于数字音频和数字视频等其他数字媒体的版权保护,为数字水印的研究开辟了一条新的思路。

参考文献

- [1] MILLER M L. 数字水印[M]. 王颖, 黄志蓓, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [2] RUANAIDH J J K, DOWLING W J, BOLAND F M. Phase watermarking of digital images[C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, 1999: 239-242.
- [3] LOW S H, MAXEMCHUK N F, LAPONE A M. Document identification for copyright protection using centroid detection[J]. IEEE Trans. on Communications, 1998, 46(3): 372-383.
- [4] HUNTER D. Handmade paper and its watermarks: a bibliography. New York: B. Franklin, 1967.
- [5] 路亚峰, 张贤, 赵玉奎, 等. 数字水印技术研究[J]. 电子测量技术, 2009, 32(8): 95-98.
- [6] 蔡伟, 闫华光, 陈士修. Winograd 快速傅里叶变换及其在频谱分析仪中的应用[J]. 继电器, 2002, 30(4): 32-34.
- [7] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理(第 2 版)[M]. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [8] 李大力, 马燕. 一种基于 DCT 中频水印嵌入 BMP 图像的防伪方法[C]. 智能检测控制技术及仪表装置发展研讨会论文集, 2007(9): 148-153.
- [9] 黄继武, Shi Yunq, 程卫东. DCT 域图像水印: 嵌入对策与算法[J]. 电子学报, 2000, 28(4): 57-60.

(收稿日期: 2011-03-14)

作者简介:

郭宗良, 男, 1963 年生, 副教授, 主要研究方向: 军事通信。

裴小根, 男, 1976 年生, 硕士, 主要研究方向: 计算机图像处理、信息安全与隐藏、嵌入式技术。