3 种频域数字水印算法的分析和比较

丁盈盈，刘 真
（南京林业大学，南京 210037）

摘要： 阐述了离散傅里叶算法（DFT）、离散余弦算法（DCT）、离散小波变换算法（DWT）这 3 种常用的频域数字水印算法的原理，并分别采用不同算法对数字图像进行了水印嵌入，检测其峰值信噪比（PSNR）和相关系数（NC）的值，分析并比较了这 3 种算法的优缺点，证明了离散小波变换在频域算法中能够得到最好的效果。

关键词： 数字水印；离散傅里叶；离散余弦；离散小波
中图分类号： TS853^{+}.6　**文献标识码：** A　**文章编号：** 1001-3563(2011)05-0103-05

Analysis and Comparison of Three Kinds of Frequency Domain Digital Watermarking Algorithm

DING Ying-ying，*LIU Zhen*
（Nanjing Forestry University，Nanjing 210037，China）

Abstract：The principles of three commonly frequency domain digital watermarking algorithms were introduced，of which were discrete Fourier transform algorithm（DFT），discrete cosine transform algorithm（DCT），and discrete wavelet transform（DWT）. Digital watermark information was embedded into the carrier image with the three algorithms. The values of peak signal-noise ratio（PSNR）and correlation coefficient（NC）were detected. The advantages and disadvantages of the three algorithms were analyzed and compared. It was proved that DWT algorithm can get the best effect.

Key words：digital watermark；discrete Fourier transform；discrete cosine transform；discrete wavelet transform

随着数字技术和计算机网络的迅速发展，印刷工业也越来越依赖于信息技术，而信息的安全性也成了研究热点之一。如今印刷所用的原稿有很大一部分是通过网络来进行传输，因此在传输过程中很容易受到外界的获取和破坏，从而影响原稿质量。传统的水印技术常常被用来作为一种印刷防伪的手段，但是传统水印制作工艺繁琐，成本高昂，不利于普及。因此，商家希望找到一种成本低廉、简单易行的方法来进行防伪。数字水印就是在这种情况下出现的。

最早提出数字水印概念的是 1993 年的 A. Z. Tirkel。数字水印，就是用于在数字媒体信息（如图像、声音、视频等）中添加的某些数字信息，一般包括版权所有者的标记或代码，以及能证实用户合法拥有数据的用户代码等基本信息。将这些信息内嵌到数字产品中可以帮助识别以及确定产品的内容、著作权、使用权以及完整性；同时还可以证明产品的真实可靠性，跟踪盗版或者提供产品的附加信息。数字水印对于知识产权保护，信息完整性监控、防复制等，具有十分重大的意义，已经成为了新的研究热点。

1　数字水印系统和频域算法

目前，对数字水印算法的研究主要集中在对频域算法的研究，这主要是因为频域算法具有空域算法没有的优点。第一，空域算法是通过直接修改图像的像素值来进行水印信息的加载，对图像的不可见性影响较大；而频域算法则是通过修改图像的频域系数来实现水印信息的加载，可以将水印信息扩散到整个图像中，对人眼视觉的影响较小。第二，为保证一定的不可见性，空域算法的水印容量较小，而频域算法的水

收稿日期： 2010-12-17
作者简介： 丁盈盈（1986－），女，浙江人，南京林业大学硕士生，主攻数字水印防伪印刷。

印容量相对较大。因此,频域数字水印算法是被研究的较多的一种数字水印算法。黄伟[1]提出了一种结合了人眼视觉特性和小波变换的彩色图像数字水印算法,实现了一个基于版权保护的数字水印系统。王国明等人[2]提出了一种基于离散余弦变换的水印算法,很好地解决了不可见性和鲁棒性之间的矛盾。胡国仁[3]提出了在小波系数的中频域加载水印信息的方法,并对水印强度进行自适应调整,对压缩、剪切、噪声等攻击具有较好的鲁棒性。

常用的数字水印频域转换的方法有离散傅里叶算法(DFT)、离散余弦算法(DCT)和离散小波变换算法(DWT)3 种。采用较好的频域转换方法来进行数字水印算法的研究,对数字水印算法具有较大的影响。下面分别采用这 3 种频域转换方法对同一幅图像来进行水印信息的加载,检测这 3 种方法的不可见性和鲁棒性,比较这 3 种频域转换方法的优劣。

1.1 数字水印系统

数字水印系统包括嵌入部分和检测部分。嵌入部分包括 2 个信息:一个是原始的水印图像 w,作为待嵌入的水印信号;另一个是作为载体信息的载体图像 X。水印信息 w 和载体信息 X 经水印嵌入算法后输出为含水印的图像 X',可以用于传输和转录。而在水印检测部分,这个含水印的图像 X'经过攻击后,被水印提取算法提取出水印信号,并将其转换为水印图像 w',见图 1。将这个水印图像 w'与原始的水印图像

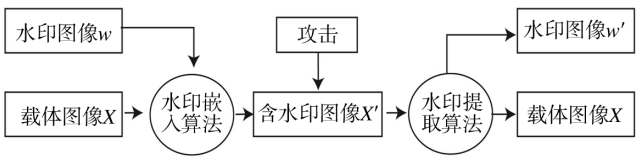

图 1 数字水印系统

Fig. 1 Digital watermarking system

w 比较后,就可以看出这种水印算法的优劣[4-5]。

1.2 频域数字水印算法和理论分析

频域数字水印算法是利用各种变换方式,先将数字图像从空域变换到频域,然后通过修改频域系数来进行水印信息嵌入的算法。相对于空域算法,频域算法能够嵌入的水印容量更大,不可见性更好。目前常用的频域数字水印算法有离散傅里叶算法(DFT)、离散余弦算法(DCT)和离散小波变换算法(DWT)。

1.2.1 离散傅里叶变换[6-7]

图像在计算机中是以数字形式存储的,因此进行图像的空域-频域转换时需要用到离散傅里叶变换,设 $f(x,y)$为一幅大小为 $M\times N$ 的图像,其中 $x=0,1,2,\cdots,M-1$;$y=0,1,2,\cdots,N-1$。式(1)和式(2)为二维离散傅里叶的正反变换公式。

DFT 正变换:

$$F(u,v)=\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}f(x,y)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(ux/M+vy/N)} \tag{1}$$

DFT 逆变换:

$$f(x,y)=\frac{1}{MN}\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1}F(u,v)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(ux/M+vy/N)} \tag{2}$$

其中,变量 u,v 为频率变量。所形成的坐标系表示频域系统,表示空间域。当 $u,v=0$ 时,其值 $F(0,0)$表示傅里叶变换的直流分量(频率为 0)的值,当 u,v 由小变大时,$F(u,v)$表示由低变高的交流分量的值。然后筛选出中频系数,在其中加入水印信号。

1.2.2 离散余弦变换[8]

离散余弦变换是一种实数域变换,其变换核为实数的余弦函数。它能够很好地描述图像信号的相关特征。对于 $N\times N$ 的图像,离散余弦变换的基本思想是将图像分解成 8×8 的子块,对每一个子块进行单独的 DCT 正变换(如式 3),得到 1 个直流系数和 63 个交流系数,并将交流系数按低频、中频、高频的顺序依次排列,来完成图像的空-频域变换。将水印信息嵌入到中频系数后,再根据式(4)进行图像重构,将图像从频域转换回空域。

DCT 正变换:

$$Y(u,v)=\frac{2}{N}\sum_{x=0}^{N-1}\sum_{y=0}^{N-1}f(x,y)\cos\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\cdot\cos\frac{(2y+1)v\pi}{2N}$$

$$Y(0,0)=\frac{1}{N}\sum_{x=0}^{N-1}\sum_{y=0}^{N-1}f(x,y) \tag{3}$$

DCT 逆变换:

$$f(x,y)=\frac{1}{N}Y(0,0)+\frac{2}{\sqrt{N}}\sum_{x=1}^{N-1}Y(u,0)\cdot\cos\frac{(2x+1)u\pi}{2N}+\frac{2}{\sqrt{N}}\sum_{y=1}^{N-1}Y(0,v)\cos\frac{(2y+1)v\pi}{2N}+\frac{2}{N}\sum_{x=1}^{N-1}\sum_{y=1}^{N-1}Y(u,v)\cos\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\cos\frac{(2y+1)v\pi}{2N} \tag{4}$$

1.2.3 离散小波变换[9-10]

小波变换是在傅里叶变换的基础上发展而来的,它将图像分层次的按小波基展开,并根据要求确定展开到哪一级为止。按式(5)进行小波正变换后,可以得到一个集中了图像大部分能量的低频图像和多个

包含图像细节的高频图像。由于人眼视觉对图像平滑部分的细节较为敏感，而对图像边缘或纹理部分的微笑变换不太敏感。在图像经过小波分解后，图像的边缘或纹理信息主要集中到中高频细节子图像的较大的小波系数上。因此，可以有选择地取出这些小波系数，将水印信号加入到小波系数上，最后通过式(7)完成图像的小波重构过程。

DWT 正变换：

$$\psi_{j,k}(t)=a_0^{-j/2}\psi(a_0^{-j}t-kb_0) \tag{5}$$

小波系数：

$$C_{j,k}=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\psi_{j,k}(t)\mathrm{d}t \tag{6}$$

DWT 逆变换：

$$f(t)=C\sum_{j=-\infty}^{\infty}\sum_{k=-\infty}^{\infty}C_{j,k}\psi_{j,k}(t) \tag{7}$$

在这 3 种频域算法中，离散傅里叶算法较为适合处理相对平稳的信号，而在处理频率时常变化的图像时会产生较大的误差。但是，在印刷图像中，图像的纹理变化频繁，并不平稳；其次，离散余弦算法和离散傅里叶算法变换都属于全局变换，主要是反映图像的全局信息，而不能反映图像的局部信息，对于图像的局部修改会对全局产生影响，即对局部修改的鲁棒性差。只有小波变换是在傅里叶变换的基础上提出的一种局部变换，既可以反映图像的全局，又可以反映图像的局部信息，进行局部修改时不会影响全局系数，鲁棒性较好。同时，小波变换的本质是对信号进行频率分离，即多分辨率分析，它可以根据不同的频率将图像分为不同的级次。由于人眼视觉系统对于不同频率的分辨能力也是不相同的，因此小波变换的这种特性正好与视觉系统相符合。可以根据这种视觉系统的不同分辨能力，在人眼不敏感的图像区域加入水印信息，使嵌入水印信号以后的载体图像受到的影响较小。离散余弦变换和离散傅里叶变换都不具有这个特性。因此，从理论分析的角度来说，在 3 种算法中，采用离散小波变换所处理得到的图像才能使鲁棒性和不可见性达到最好的平衡。

2　数字水印实验

2.1　过程与步骤

实验过程主要是通过采用离散傅里叶变换、离散余弦变换、离散小波变换这 3 种变换方法，将载体图像从空域转换到频域，然后修改相应的频域系数，嵌入水印信息，从而得到含水印的数字图像 A，B，C。其次，攻击这个含水印的数字图像，并提取水印信号。再次，对未受攻击的含水印的图像进行水印信号的提取。最后，将攻击后检测到的水印信号与未受攻击时提取的水印信号相比较，来分析这 3 种变换的优点。具体实验步骤如下：

1）制作水印图像(见图 2)。

图 2　水印图像

Fig. 2 Watermark image

2）采用 lena 图像(见图 3)作为载体图像，分别用

图 3　lena 图像

Fig. 3 lena image

离散傅里叶算法、离散余弦算法、离散小波变换算法对其嵌入水印信号，得到含有水印的数字图像 A，B，C。

3）在未受攻击的情况下，提取各自的水印图像。

4）分别对 A，B，C 3 张图像做剪切、噪声、污染、旋转攻击。

5）对攻击后的图像进行水印提取，与未受攻击所提取到的水印信号箱比较，检测其 PSNR 值和 NC 值，并综合分析 3 种算法的优劣。

2.2　结果与分析

PSNR 值和 NC 值是用来评价数字水印不可见性和鲁棒性的 2 种常用数值。PSNR 值称为峰值性噪比，用来度量水印的不可见性，用来衡量原始图像和重构图像的相似程度。其中，原始图像是指嵌入水

印信息的载体图像，而重构图像是指经过空-频域转换嵌入水印信号以后又转回空域的图像。当 PSNR >30 时，人眼视觉系统就很难分辨出 2 张图像的差异，而 PSNR 越大，说明被检测的图像与原始图像越相似，水印的不可见性越好。NC 值称为归一化相关系数，常用来评价原始水印和提取出的水印的相似程度。NC 值越接近于 1，说明提取出的水印质量越好。一般来说，当 NC 值小于 0.6 时，所提取出的水印叫做无效水印信息。

$$\mathrm{PSNR}=10\lg\frac{\max[X^2(i,j)]}{\frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}[X'(i,j)-X(i,j)]^2} \tag{3}$$

$$\mathrm{NC}=\frac{\sum_{i=1}^{M}w'_i w_i}{\sum_{i=1}^{N}w_i^2} \tag{4}$$

采用 3 种算法嵌入水印信息并进行攻击后，提取出的水印信息与原水印信息相比较，得到的 PSNR 值和 NC 值见表 1 和图 4。在实验中所采用的攻击方法

表 1 3 种算法所测得的 PSNR 值和 NC 值

Tab. 1 PSNR and NC values of the three algorithms

实验数据	PSNR	NC 值				
算法	值	无攻击	剪切	旋转	污染	噪声
DCT	34.617 0	0.966 3	0.714 5	0.672 2	0.878 5	0.503 1
DFT	39.939 4	0.989 4	0.620 0	0.385 7	0.660 1	0.787 1
DWT	38.319 2	0.998 3	0.958 2	0.607 2	0.841 6	0.849 8

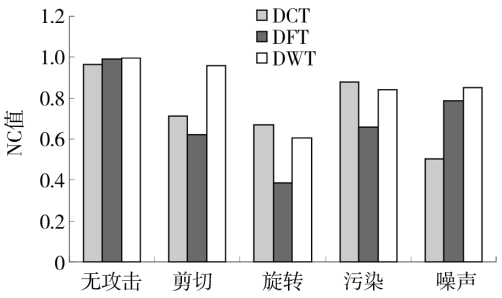

图 4 3 种算法的 NC 值比较

Fig. 4 NC values of the three algorithms

为剪切、旋转、污染、噪声。由图 4 是可以非常明显地观察出这 3 种算法的优劣性。

根据表 1 中的 PSNR 值部分，可以看出，嵌入水印信息后，采用 DFT 法的图像不可见性最好，PSNR 值达到了近 40，而 DWT 的图像其次，DCT 的图像相对较差，仅为 34 左右。但是，这 3 种算法所得到的含水印图像与原载体图像的 PSNR 值都大于 30，原载体图像和含水印图像的差别较小，人眼几乎不能分辨。因此，这 3 种算法在水印的不可见性上性能影响虽然有一定的差别，但对人眼视觉的影响差不多。

根据表 1 的 NC 值部分，可以明显地看出攻击对水印提取的影响。在没有攻击的情况下，3 种方法所能够提取出的水印图像与原水印图像相比较，NC 值都在 0.96 以上，接近于 1，可以说是相当接近原水印图像。而受到攻击后，NC 值降低较多。根据攻击方式的不同，NC 值的变化量大小也不同。从图 4 可以看出，在这 4 种攻击方式中，当受到旋转攻击后，3 种方法的 NC 值普遍较小，一般在 0.6 左右，而 DFT 算法所提取的水印 NC 值只有 0.4 左右，属于无效水印。这说明这 3 种算法对于旋转攻击的鲁棒性是这 4 种攻击方式中最弱的。而受到污染攻击后，这 3 种算法的鲁棒性要较好，说明这 3 种算法对污染攻击的抵抗性在 4 种攻击方式中是最强的。而针对剪切攻击和噪声攻击，这 3 种算法都具有较好的鲁棒性，能够提取出质量较好的水印图像。其中，DWT 算法对这 2 种攻击的鲁棒性在 3 种算法中是最好的，尤其是剪切攻击，NC 值大于 0.9。

综合来看，在这 3 种算法中，离散小波算法的鲁棒性是 3 者中相对较好的，针对所有攻击方式，它的 NC 值都在 0.6 以上，都能够提取出有效水印。这是由于离散小波变换算法在空-频域转换时，不仅仅是简单地将图像转换到频域上，是转换成了不同频率的子图像，在不同的频域中，分别嵌入了水印信息，使水印信息具有了一定的重复性，增加了水印的鲁棒性。

3 结论

分别采用离散傅里叶算法、离散余弦算法、离散小波变换这 3 种常用的频域变换算法，对同一载体图像进行水印嵌入、攻击、水印提取，并检测了这 3 种算法各自的 PSNR 值和 NC 值。由此得出，这 3 种算法都是在频域中添加水印信息，因此生成的数字水印不可见性都较好，人眼几乎分辨不出含水印图像和原载体图像的区别。而离散小波算法相对于其他 2 种算法，具有多分辨率分析的特性，可以将图像分成不同频率的子图像，根据人眼对不同频率敏感度不同的特性，在这些子图像中添加水印信息，可以在满足水印

不可见性的条件下使水印信息具有一定的重复性，增加其对各种攻击手段的鲁棒性，因此提取水印信号时能够得到较高的正确率。

在频域数字水印算法的研究中，选择一种好的空-频域的转换方式，对于水印的不可见性和鲁棒性这两者间的平衡具有一定的意义，因此，要不断加深对各种空-频域转换方式的研究，总结和分析各自的特点，才能得到最符合研究目的的水印算法。

参考文献：

[1] 黄伟. 基于人眼视觉系统的图像数字水印研究[D]. 南京：南京信息工程大学，2008.
[2] 王国明，侯整风. 基于离散余弦变换的数字水印算法[M]. 计算机工程与设计，29(21)：5635－5637.
[3] 胡国仁. 基于小波变换域的数字图像水印算法研究[D]. 天津：天津科技大学，2007.
[4] 邹玉蓉. 数字图像水印技术及应用研究[D]. 上海：同济大学，2007.
[5] 陈芳. 数字水印在印刷品防伪中的应用研究[D]. 西安：西北大学，2006.
[6] 田瑞卿，何泉. 一种傅里叶域图像数字水印方案的研究[J]. 北京石油化工学院学报，2006(3)：1－4.
[7] 何泉，田瑞卿. 分数傅里叶域图像数字水印方案[J]. 计算机工程与设计，27(24)：4642－4643.
[8] 许春东，易建兵. 基于离散余弦变换的数字水印算法研究[J]. 电子元器件应用，2009(8)：87－88.
[9] 杨陈. 小波分析在数字水印印刷防伪领域的研究[D]. 北京：电子科技大学，2007.
[10] 胡婧. 基于人眼视觉的小波变换数字水印算法[D]. 北京：北方工业大学，2008.

（上接第 98 页）

表 3　热转移印花纸及织物的印刷相对反差

Tab.3 *K* of heat transfer printing papers and fabrics

指标	黄	品	青	黑
100%密度	0.572，0.869	0.889，1.492	0.827，1.351	1.168，1.74
75%密度	0.442，0.785	0.672，1.228	0.656，1.134	0.882，1.389
反差值	0.227，0.202	0.245，0.177	0.207，0.161	0.245，0.202

制在 0.4～0.6 之间。在热转移印花转移印刷中，印刷相对反差略小也可以满足转移织物颜色要求。

3　结论

1）在印刷工业生产中，对热转移印花纸的白度要求不高，但是必须要有较高的平滑度、耐高温高压且油墨升华易于分离的性质。

2）热转移印花纸张的实地密度要求低于传统纸张的印刷实地密度，基本控制在：Y 为 0.5～0.7；M 为 0.8～0.95；C 为 0.8～0.9；K 为 1.15～1.25 范围内，织物成品印刷实地密度即可达到：Y 为 0.8～1.0；M 为 1.4～1.55；C 为 1.3～1.5；K 为 1.5～1.75。

3）热转移印花纸及织物上印刷网点扩大大于传统的印刷网点扩大，控制在 25%～35%能满足热转移印花的需要。

4）热转移印花纸印刷相对反差控制：Y 为 0.2～0.25；M 为 0.25～0.3；C 为 0.2～0.25；K 为 0.2～0.25。织物的印刷相对反差控制：Y 为 0.1～0.15；M 为0.15～0.25；C 为 0.15～0.2；K 为 0.15～0.2 范围内，小于传统的印刷相对反差即可。

参考文献：

[1] 王玉珑. 转移印花纸及其发展前景[J]. 中国造纸，2005(12)：49－51.
[2] BLANCHE Graciela，ROGERST John. Printing Techniques for Plastic Electronics[J]. Journal of Imaging Science and Technology，2003(4)：296－303.
[3] 郭凌华，张美云. 热转移印花纸现状及发展趋势[J]. 包装工程，2010，31(17)：28－31.
[4] 朱嵬，唐正宁. 织物材料印刷的色彩模型构造[J]. 包装工程，2006，27(12)：142－145.
[5] 张逸新. 分色制版新技术[M]. 北京：中国轻工业出版社，2000.
[6] 张正修，王利婕. 色度检测在包装印刷中的应用[J]. 包装工程，2005，26(1)：87－88.
[7] 周浩. 谈谈织物升华转印技术[J]. 网印工业，2009(1)：20－22.
[8] 周世生，郑元林，曹从军. 印刷色彩学[M]. 北京：印刷工业出版社，2009.
[9] 韩小贺，成刚虎，向志爱. 色空间转换在印刷品质量检测中的应用研究[J]. 包装工程，2009，30(1)：101－102.
[10] CHERYL D. Walters，Thermal-Transfer Printing：a Better Way to Print Library Labels[J]. Information Technology and Libraries，2004(3)：30－36.