第32卷 第18期 计 算 机 工 程 2006年9月
Vol.32 № 18 Computer Engineering September 2006

·安全技术· 文章编号：1000—3428(2006)18—0120—02 文献标识码：A 中图分类号：TP391

基于 DFT-SVD 域抗几何攻击图像水印算法

张宪海，杨永田

（哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院，哈尔滨 150001）

摘 要：抗几何攻击水印算法是版权保护领域的一个重要的研究方向。根据离散傅立叶变换幅度谱矩阵的性质，以及矩阵奇异值分解对旋转、缩放和平移等几何攻击具有稳定性的特点，提出了一种基于离散傅立叶变换和奇异值分解的抗几何攻击图像水印算法。实验结果表明该算法有较大的嵌入容量，对常规攻击和几何攻击都具有较强的鲁棒性。

关键词：水印；离散傅立叶变换；奇异值分解；几何攻击

A Geometric Distortion Resilient Image Watermark Algorithm Based on DFT-SVD

ZHANG Xianhai, YANG Yongtian

(School of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

【**Abstract**】The algorithm resilient geometric distortion is an important research direction in copyright protection. This paper proposes an image watermark algorithm based on discrete Fourier transform (DFT) and singular value decomposition (SVD) because of the good property of DFT amplitude matrix and the characteristic of SVD that it is stabilization to geometric distortion such as rotation, scale and translation. Experimental results show that the algorithm has more embedding capacity and robust to common attacks and geometric distortion.

【**Key words**】Watermark; Discrete Fourier transform (DFT); Singular value decomposition (SVD); Geometric distortion

1 概述

作为数字认证和版权保护的一种重要手段，数字水印技术受到了广泛关注。不同的应用对数字水印要求不尽相同。一般认为，数字水印应具备以下特征：(1)不可感知性，即添加水印之后的载体在感官上应该是没有变化的，要保证载体的质量；(2)安全性，即所添加的水印难以被篡改和伪造；(3)鲁棒性，即能够从经受各种攻击(不降低载体感知质量和使用功能)的载体中提取水印。对于版权保护应用来说，鲁棒性是最重要的一个指标。过去的水印算法对一般的信号处理都具有较强的鲁棒性，但大都不能很好地抵抗几何攻击，因为几何攻击破坏了水印系统的同步性，使得检测器无法定位信号检测的参考点，无法正确提取水印。近年来，人们开始研究抗几何攻击水印技术(主要针对几何攻击中的旋转、缩放和平移，简称 RST)，提出了很多算法。

抗几何攻击水印技术最早出现在 1998 年，O'Ruanaidh等人尝试将水印嵌入到Fourier-Mellin变换域的幅值空间中，该空间具有RST不变性，从而可以抵抗这些几何攻击。Lin等人[1]对图像离散傅立叶变换后的幅度谱重采样后作对数极坐标映射(Log Polar Map, LPM)，将笛卡尔坐标中的缩放和旋转变为对数极坐标中ρ坐标和θ坐标的平移操作，从而实现了RST不变性。随后，很多人围绕着DFT和LPM做了大量的改进和试验。如Bum-Soo Kim等人[2]提出，进行对数极坐标映射(LPM)时，极点(x_0 , y_0)的选择要慎重。他们通过迭代法找到一个对几何攻击和波形攻击都不变的质心，并以此点作为LPM的极点，从而改善了算法的性能。上述算法的主要缺点是在进行LPM和逆LPM时需要进行插值，会导致图像质量急剧下降，而且嵌入的数据量也偏少。后来，有人发现对图像矩阵进行奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)，其奇异值具有相当好的稳定性，Zhou等人[3]还从理论上证明，图像的奇异值对几何失真(转置、镜像、旋转、放大、平移)具有不变性，可以用来嵌入水印。Emir等人将离散小波变换(DWT)和SVD相结合，对小波变换系数进行奇异值分解，在4 个子带中分别嵌入水印，取得了较好的效果；Alexander等人对图像进行离散余弦变换(DCT)后，将所有系数重采样后，平均分成 4 块进行奇异值分解，从而嵌入水印。Clifford等人[4]提出了一种在SVD的U矩阵中嵌入水印的方法，为水印技术开辟了新的思路。

本文提出了一种基于傅立叶变换和奇异值分解的抗几何攻击水印算法，实验表明，该算法在保证不可感知性的前提下，有较大的嵌入容量，同时，该算法在对常规攻击，如 JPEG压缩、噪声等鲁棒的同时，对几何攻击，如旋转、缩放、平移、剪切等具有很好的鲁棒性。

2 基于傅立叶变换和奇异值分解的数字水印算法

2.1 图像的傅立叶变换及其性质

一幅大小为$M\times N$的灰度图像$f(x,y)$可以看作是定义在笛卡尔网格上的实值函数，其中，$0\le x<M$, $0\le y<N$，则该图像的二维傅立叶变换和反变换定义如式(1)和式(2)。设

$$A(u,v)=|F(u,v)|$$

$$F(u,v)=A(u,v)e^{i\phi(u,v)}$$

则$A(u,v)$称为该二维 DFT 的幅度谱，$\phi(u,v)$称为相位谱。图像$f(x,y)$的二维 DFT 变换具有周期性、共轭对称性、平移性、旋转性和缩放互反性，而且具有幅度谱的平移不变性。

作者简介：张宪海(1971—)，男，博士生，主研方向：数字水印，图像压缩；杨永田，教授、博导

收稿日期：2005-10-08 **E-mail**：xianhaizh@sina.com

本文算法正是利用了这些性质，对幅度谱矩阵进行环形采样从而嵌入水印。

$$F(u,v)=\frac{1}{M\cdot N}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}f(x,y)e^{-i2\pi(\frac{u\cdot x}{M}+\frac{v\cdot y}{N})} \tag{1}$$

$u=0,1,...,M-1$，$v=0,1,...,N-1$

$$f(x,y)=\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1}F(u,v)e^{i2\pi(\frac{u\cdot x}{M}+\frac{v\cdot y}{N})} \tag{2}$$

$x=0,1,...,M-1$，$y=0,1,...,N-1$

2.2 图像的奇异值分解及其性质

从线性代数的角度来看，图像 $f(x,y)$可以看成是由许多非负标量组成的矩阵。设 $A\in R^{M\times N}$ 表示这样一个图像矩阵，其中，R 表示实数域，矩阵 A 的大小为 $M\times N$，则矩阵 A 的奇异值分解可表示为

$$A=U\sum V^{T} \tag{3}$$

$U\in R^{M\times N}$，$V\in R^{M\times N}$ 是正交矩阵，$\sum\in R^{M\times N}$ 是一个非对角线上的元素都是 0 的矩阵，其对角线上的元素满足：

$$\sigma_1\geq\sigma_2\geq...\geq\sigma_r>\sigma_{r+1}=...=\sigma_M=0$$

其中，r 是 A 的秩，它等于非负奇异值的个数。$\sigma_i(i=1,2,\ldots,M)$ 就叫做矩阵 A 的奇异值，它是 AA^{T} 特征值的平方根。式(3)就称为矩阵 A 的奇异值分解。

从图像处理的角度看，奇异值对应于图像的亮度特性，奇异向量对表征了图像的几何特性。图像奇异值的稳定性非常好，在图像被施加小的扰动时奇异值不会有大的变化；第 1 个奇异值比其他奇异值要大得多。周波在文献[4]中证明，图像的奇异值对几何失真(转置、镜像、旋转、放大、平移)具有不变性。因此，在图像的奇异值中嵌入水印对几何失真具有很好的鲁棒性。

2.3 水印嵌入算法

从 2.1 节的讨论中可知，傅立叶变换的幅度谱具有平移不变性，对于旋转和缩放，其频谱的相对位置和幅度谱的相对大小也保持不变。因此，对图像的幅度谱系数进行环形采样，按照一定的采样半径，组成 $M\times N$ 大小的矩阵，进行奇异值分解并嵌入水印。设原始图像 $f(x,y)$大小为 $M\times N$，具体算法如下：

Step1 对 $f(x,y)$进行离散傅立叶变换，计算幅度谱，并进行象限移位，得到中心化幅度谱矩阵 A。

Step2 设水印图像$W(x,y)$大小为 $M\times N$，读出水印数据到矩阵M_w($M_w\in R^{M\times M}$)中，对矩阵M_w 进行奇异值分解，得到分解矩阵U_w、Σ_w和V_w。

Step3 确定最小和最大嵌入半径$R_{\min}$和$R_{\max}$，保证将水印信息嵌入到傅立叶变换的中频带中，从而在感知性和鲁棒性之间得到较好的平衡。$R_{\min}$和$R_{\max}$根据水印大小和实验得到，一般情况下，令$R_{\min}\geq N/4$，$R_{\min}<R_{\max}<N/2$。

Step4 确定采样圆环的内外半径 R_1 和 R_2，令 $R_{\min}\leq R_1<R_2\leq R_{\max}$，采样幅度谱系数，组成采样矩阵 M_1($M_1\in R^{M\times M}$)。对M_1进行奇异值分解，得到该矩阵的奇异值矩阵Σ_1。

Step5 设$\sigma_1(k)$和$\sigma_w(k)$分别是奇异值矩阵Σ_1和Σ_w的对角线上的值，$k=1,2,\cdots,M$，水印嵌入算法如式(4)所示，得到新的奇异值矩阵Σ'_1。

$$\sigma'_1(k)=\sigma_1(k)+\alpha\cdot\sigma_w(k),\quad k=1,2,\cdots,M \tag{4}$$

Step6 进行逆奇异值分解$M'_1=U_1*\Sigma'_1*V^{T}_1$，得到新矩阵$M'_1$，根据采样准则，将这些系数还原到环形幅度谱矩阵中。

Step7 根据相位和新的幅度谱，进行逆离散傅立叶变换，得到嵌入水印后的图像 $f'(x,y)$。

2.4 水印提取及检测算法

水印提取基本上是上述算法的逆过程，在检测端需要使用原始图像和原始水印奇异值分解矩阵U_w和V_w以及嵌入强度参数α和采样圆环半径R_1和R_2。设待检测图像为$f'(x,y)$，其大小也为 $M\times N$，具体提取过程如下：

Step1 对 $f(x,y)$和$f'(x,y)$分别进行离散傅立叶变换，计算幅度谱，并进行象限移位，得到中心化幅度谱矩阵 A 和 A'。根据采样圆环的内外半径R_1和R_2，采样幅度谱系数，组成采样矩阵M_1和M'_1，对两个采样矩阵分别进行奇异值分解，得到奇异值矩阵Σ_1和Σ'_1。

Step2 设$\sigma_1(k)$和$\sigma'_1(k)$分别是奇异值矩阵Σ_1和Σ'_1的对角线上的值，$\sigma'_w(k)$为所求水印图像矩阵的奇异值，$k=1,2,\cdots,M$，则根据公式(5)可以得到一个奇异值矩阵Σ'_w：

$$\sigma'_w(k)=(\sigma'_1(k)-\sigma_1(k))/\alpha,\quad k=1,2,\cdots,M \tag{5}$$

Step3 进行逆奇异值分解，计算矩阵M'_w，提取出水印图像$W'(x,y)$：

$$M'_w=U_w\cdot\Sigma'_w\cdot V^{T}_w \tag{6}$$

Step4 计算参考水印$W(x,y)$与提取水印$W'(x,y)$之间的标准相关系数：

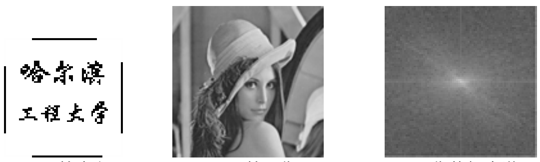
$$corr(W,W')=\frac{\sum_{i=1}^{M}(w_i-\overline{w})(w'_i-\overline{w'})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M}(w_i-\overline{w})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{M}(w'_i-\overline{w'})^2}} \tag{7}$$

$\overline{w}=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}w_i$，$\overline{w'}=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}w'_i$

使用相关系数可以考察参考水印$W(x,y)$与提取水印$W'(x,y)$之间的相关性，如果相关系数大于给定门限 T，表明图像中包含水印，否则表明不包含水印。

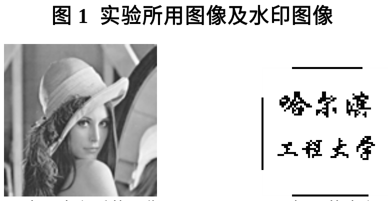
3 实验结果及分析

仿真实验以一幅 64×64 的灰度图像 boat 为水印，以 256×256 灰度图像 Lena 为原始图像进行水印嵌入。试验中，取$R_1=64$，$R_2=100$分别作为采样的内外半径，$\alpha_1=0.05$，$\alpha_2=0.2$分别对应奇异值分解的第一个系数和其他系数，门限$T=0.5$。图 1 给出了水印图像、原始图像以及图像傅立叶变换的幅度谱图像。图 2 给出了嵌入水印后的图像以及提取的水印图像，在不受攻击的情况下，其峰值信噪比可以达到 37.8db，在可感知性上没有明显变化。



(a)原始水印 (b)原始图像 (c)图像的幅度谱

图 1 实验所用图像及水印图像



(a)嵌入水印后的图像 (b)提取的水印

图 2 实验所用图像及水印图像

表 1 给出了嵌入水印图像在常规攻击(JPEG 压缩、噪声、(下转第 132 页)