

基于 Contourlet 和 SVD 的鲁棒双水印算法

陈 宁, 马会杰

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 提出了一种 Contourlet 域的基于奇异值分解的鲁棒水印算法。综合 Contourlet 变换和奇异值的优点, 选择宿主图像 Contourlet 变换后的低频子带和能量最大的高频子带作为水印嵌入子带, 分别嵌入水印信息。水印提取时, 从两个子带水印中选择 NC 值较大的作为最终提取的水印。实验结果表明, 该算法在保证不可见性的同时, 对常规攻击和几何攻击均具有较强鲁棒性。

关键词: 双水印; 轮廓波变换; 奇异值分解; 猫脸变换

中图分类号: TP309 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)07-2700-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.082

Robust dual-watermarking algorithm based on Contourlet and SVD

CHEN Ning, MA Hui-jie

(Dept. of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: This paper presented a robust watermarking algorithm based on Contourlet transform and SVD. By the advantages of Contourlet transform and SVD, it selected the low frequency subband and the high frequency subband which has the maximum energy as the embedding positions to embed the watermarking information respectively. By comparing the two extracted watermarking images, it chose the one which had larger NC value as the final watermarking. The experimental results show that the algorithm has strong robustness to conventional attacks, as well as geometric-attacks.

Key words: dual-watermarking; Contourlet transform; SVD; Arnold transform

随着互联网的飞速发展, 人们可以方便地从互联网上获取数字信息, 但这也使得数字产品的版权保护成为亟待解决的问题。数字水印技术作为实现多媒体信息认证、版权保护的一个有效手段, 如今已成为多媒体信息安全领域的研究热点^[1]。

目前已经提出了许多种空域和变换域的数字水印算法, 其中变换域算法是水印算法的研究热点, 而其大多数算法聚焦于利用小波变换的多分辨率和时频局部特性来分析。2002年, Do 等人^[2]提出了一种新的多尺度几何变换——Contourlet 变换。在继承小波变换的多分辨率和时频局部特性的同时, Contourlet 变换提供了高水平的方向性和各向异性, 这些特性使得它能够更加有效地捕获图像的奇异几何特性, 获得比小波变换更有效的图像表示。同时由于其与小波变换的结构相似性, 许多应用小波变换实现的图像处理算法可以利用 Contourlet 变换更好地实现。近几年来, Contourlet 变换开始被广泛应用于数字图像技术中。目前, 已经存在一些 Contourlet 域结合奇异值分解的水印算法, 如文献[3]对宿主图像进行 Contourlet 变换, 选取低频子带系数进行分块奇异值分解, 然后根据每个子块的第一个奇异值的大小进行水印信息的嵌入和提取, 该算法能够有效抵抗 JPEG 压缩、椒盐噪声等攻击, 但对于几何攻击的鲁棒性较差; 文献[4]对宿主图像 Contourlet 变换后的中频子带进行分块奇异值分解, 通过修改每个子块的第一个奇异值实现水印信息的嵌入, 可对常规攻击有较好的鲁棒性; 文献[5]对宿主图像 Contourlet 变换得到的各子带分别进行奇异值分解, 选取较大的非零奇异值作为二值水印信息的嵌入位置, 该算法

可以抵抗常规攻击和几何攻击, 鲁棒性较强, 但是水印容量较小; 文献[6]对 Contourlet 变换的低频子带进行非负矩阵变换, 然后将水印信息嵌入到非负基向量组的奇异值中, 水印容量大, 对于加噪、滤波等攻击有较好的鲁棒性, 但对于剪切、旋转等几何攻击的鲁棒性不高。

1 水印算法原理

1.1 Contourlet 变换

2002年, Do 等人在 Curvelet (曲线波) 基础上构造出一种真正的图像二维表示法——Contourlet 变换, 也叫做塔形方向滤波器组 (pyramidal directional filter bank, PDFB)。Contourlet 变换是一种以离散形式定义的变换, 可以捕捉所有方向的信息。这种特征使得它具有有效处理二维奇异点的潜力。与 Wavelet 相比, Contourlet 具有两种性质: a) 灵活的方向性, Contourlet 在很多方向具有基本函数, 而小波只有三个方向; b) 各向异性, Contourlet 各向比率取决于尺度, 而小波是可分离的, 纵横比是 1。因此 Contourlet 提供了一种灵活的图像多分辨率表示方法。图 1 为对一幅大小为 512 × 512 的灰度图像 Lena 进行 4, 8 方向分解得到的方向子图。

1.2 奇异值分解

奇异值分解 (SVD) 是一种将矩阵对角化的数值算法。图像矩阵的奇异值表征了图像的内在特性, 而不是视觉特性, 它具有非常好的稳定性, 即当图像被施加微小的扰动 (如加噪、

收稿日期: 2011-11-21; 修回日期: 2011-12-25

作者简介: 陈宁 (1970-), 女, 湖南长沙人, 教授, 硕士, 主要研究方向为数字信号处理及应用、混沌电路; 马会杰 (1987-), 女, 河北石家庄人, 硕士, 主要研究方向为图像数字水印 (mahuijie2012@126.com)。

滤波、压缩、缩放等)时,其奇异值不会有较大的变化^[7],而且奇异值具有转置、旋转、位移、镜像变换不变性等,这些特性使得它在数字水印方面应用广泛。

对一个 $N \times N$ 的矩阵 A 进行奇异值分解

$$A = U \times S \times V^T \quad (1)$$

其中: U 和 V 为正交阵; $S = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ 为对角矩阵,由矩阵 A 唯一确定,满足

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_r \geq \lambda_{r+1} = \dots = \lambda_N = 0 \quad (2)$$

由于奇异值分解后得到的奇异值个数最大为 N , 相比于直接嵌入水印图像的灰度值需要 $N \times N$ 个嵌入位置, 选择水印图像的奇异值作为水印信息很大程度地减少了信息量, 从而可以嵌入更多的水印信息。

2 水印算法

水印信息采用水印信号经过奇异值分解后得到的奇异值^[8], 可以很大程度地降低水印信息量, 大幅提高算法的水印容量。而奇异值的稳定性也使得该算法能够有效抵抗各种攻击。图像进行 Contourlet 变换后, 大部分能量集中在了低频子带, 常规处理对于低频子带系数影响较小, 但同时低频系数的变化也容易导致图像失真较大。高频子带携带的是图像的细节信息, 能量较大的子带纹理边缘信息较丰富, 且人眼对这部分信息的变化不敏感, 在这部分嵌入水印可以有效地避免图像的失真, 但对图像处理时这部分信息也容易遭到破坏。因此针对不同的子带在抵抗各种攻击时性能不同, 在两个子带嵌入相同的水印, 可以取长补短, 使得其中一个子带水印信息遭受严重破坏时, 另一个子带仍能正确提取水印, 从而提高了算法的鲁棒性。

2.1 水印嵌入

假设宿主图像为 $R \times R$ 的灰度图像 H , 水印信号是大小为 $L \times L$ 图像 W 。算法嵌入步骤如下:

a) 对水印图像 W 进行 k 次 Arnold 置乱(置乱周期为 P), 得到置乱后的水印图像 W_1 。

b) 对 W_1 进行奇异值分解, 得到三个矩阵分量 U_1, S_1, V_1 , $W_1 = U_1 \times S_1 \times V_1^T$ 。将 S_1 中的奇异值降序排列, 组成一维数组 A_1 , 作为水印信息, 数目为 N_1 。

c) 对宿主图像 H 进行 Contourlet 变换, 提取低频子带的 Contourlet 系数 AC 。

d) 对 AC 进行奇异值分解, 得到 U_2, S_2, V_2 , 其中 $AC = U_2 \times S_2 \times V_2^T$, 选取 S_2 中最大的 N_1 个奇异值组成一维数组 A_2 , 作为水印嵌入位置。

e) 按照式(3)嵌入水印信息, 得到一维数组 A_e 。

$$A_e(i) = A_2(i) + a \times A_1(i) \quad (3)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N_1$, a 为嵌入强度。

f) 将 A_e 中各数恢复到 S_2 中原来的位置, 得到嵌入水印后的低频子带的奇异值矩阵 S_2' , 利用 $AC' = U_2 \times S_2' \times V_2^T$, 得到嵌入水印后的低频子带系数 AC' 。

g) 根据式(4), 选出 H 的各高频子带中能量最大的子带 C_k 。

$$E = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N C(i, j)^2 \quad (4)$$

h) 对步骤 g) 中选出的子带进行步骤 d) ~ f) 的操作, 得到嵌入水印后的能量最大的高频子带 C_k' 。

i) 将 AC' 和 C_k' 与其他子带系数一起进行 Contourlet 重构,

得到嵌入水印后的宿主图像 H' 。

2.2 水印提取

水印的提取是嵌入过程的逆过程。具体步骤如下:

a) 对嵌入水印信息的宿主图像 H' 进行与嵌入算法中相同的 Contourlet 变换, 提取低频子带系数 AC'' 。

b) 对 AC'' 进行奇异值分解, 找出其中最大的 N_1 个奇异值组成一维数组 A_e' , 这是嵌入了水印的位置。

c) 按照式(5)进行水印信息的提取, 得到的 A_1' 即是水印信息。

$$A_1' = (A_e'(i) - A_2(i)) / a \quad (5)$$

d) 利用 $W_1' = U_1 \times A_1' \times V_1^T$ 得到水印图像信息 W_1' 。

e) 对 W_1' 进行 $(P - k)$ 次 Arnold 变换就得到从低频系数恢复出的水印图像 W_L 。

f) 根据式(4)从 H' 中找出能量最大的高频子带, 对其进行步骤 b) ~ e) 的操作, 得到从高频系数恢复出的水印图像 W_H 。

g) 将 W_L 与 W_H 的 NC 值作比较, 较大的一个即为恢复出的水印图像。

3 仿真结果与分析

3.1 算法仿真

仿真过程中对宿主图像进行 2 层 Contourlet 变换, 各尺度方向子带数分别为 4, 8。LP 滤波器采用“9-7”滤波器, DFB 采用 pkva^[3,9]。采用大小为 512×512 的 Lena 标准图像作为宿主图像, 水印图像采用 128×128 的灰度图像 man。采用 PSNR 来评价图像的视觉质量, PSNR 值越大, 表示嵌入水印对宿主图像影响越小, 图像的不可见性越好。利用 NC(归一化相关系数)来评价提取出的水印与原水印的相似度, NC 值越大, 则两者越相似, 表明算法的鲁棒性越高。灰度图像的 PSNR 定义如式(6)所示:

$$\text{PSNR} = 10 \times \lg(255^2 / \text{MSE}) \quad (6)$$

其中:

$$\text{MSE} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I'(i, j) - I(i, j))^2 \quad (7)$$

$I(i, j)$ 为宿主图像灰度值, $I'(i, j)$ 为嵌入水印后的图像灰度值。

NC 定义如式(8), 其中, $w(i, j)$ 为原水印的像素值, $w'(i, j)$ 为提取出的水印像素值。

$$\text{NC} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w(i, j) \times w'(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w(i, j)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w'(i, j)^2}} \quad (8)$$

图 2(a) 是大小为 128×128 的灰度水印图像 man, (b) 是大小为 512×512 的原始宿主图像 Lena, (c) 是将水印图像(a)嵌入宿主图像(b)后的图像。两个子带的嵌入强度均是 0.2, 计算得到 $\text{PSNR} = 33.4122$ 。从视觉上看, 嵌入水印后的图像与原始宿主图像无明显差别, 满足不可见性要求。图 2(d) 为无攻击情况下恢复出的水印图像, 左为低频子带恢复出的水印, 其 NC 值为 1, 右为能量最大的高频子带恢复出的水印, 其 NC 值为 0.9987, 证明该算法可以有效恢复水印。

3.2 鲁棒性测试

表 1 列出了图 2(c) 在遭受各种攻击时的鲁棒性测试结果。图 3~6 中的三个图像分别为攻击后的图像、从低频子带提取出的水印图像和从高频子带提取出的水印图像。通过对

实验数据的分析,可以得到以下结论:a)对于噪声攻击,当幅度较小时,低频子带水印鲁棒性较好,但当噪声幅度增大时,低频水印的鲁棒性迅速下降,高频子带水印的鲁棒性更好;b)对于滤波、JPEG压缩、循环平移等攻击,低频子带水印抗攻击性更好;c)对于亮度和对比度变化、剪切、旋转等攻击,高频子带水印鲁棒性较强。基于上述分析,在两个子带中嵌入相同的水印,可以保证某一子带的水印遭到严重破坏时,另一子带水印仍能够有效地恢复。这也就提高了算法的鲁棒性。

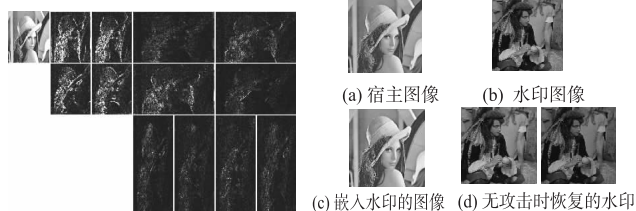


图1 Lena的Contourlet分解子图

图2 水印嵌入图像

表1 各种攻击下鲁棒性测试数据

攻击方式	PSNR	低频水印 NC 值	高频水印 NC 值
椒盐	0.01	24.8031	0.99164
噪声	0.1	15.4315	0.62115
高斯	0.01	19.8978	0.96812
噪声	0.1	11.4048	0.43913
中值滤波(3×3)	32.0373	0.99180	0.91731
高斯滤波(3×3,1)	31.6115	0.97309	0.81519
均值滤波(3×3)	30.7119	0.95872	0.67856
图像增亮	31.1389	0.95260	0.99909
图像变暗	36.9707	0.89686	0.99906
对比度增大	31.6519	0.96594	0.99675
对比度减小	34.5395	0.92795	0.99925
JPEG 压缩 10%	28.6376	0.99815	0.99011
剪切 1/4	11.9397	0.52902	0.96319
循环平移 100 行	12.0194	1.00000	0.99870
缩小一半再还原	26.9491	0.99428	0.96253
旋转 1°	20.6668	0.93658	0.96463
旋转 20°	11.0630	0.15189	0.90509



图3 0.01的高斯噪声攻击

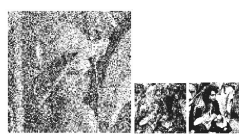


图4 0.1的高斯噪声攻击



图5 1/4剪切攻击



图6 旋转20°攻击

3.3 与其他算法比较

本文算法同样适用于二值水印图像。与文献[5]算法相比,本文采用水印图像的奇异值作为水印信息,水印容量较大,而文献[5]算法采用二值图像灰度值作为水印信息,只能嵌入很小的水印图像。为与文献[5]算法进行对比,采用如图7所示的大小为34×34的“中南大学”字样的二值图像作为水印图像。为满足同等条件下进行攻击测试,调节两种算法的嵌入强度,使得嵌入水印后的宿主图像的PSNR值近似,本文算法PSNR=37.2356,文献[5]算法PSNR=37.2322。文献[5]算法对抗几何攻击的鲁棒性较强,但是本文算法在有效抵抗几何攻击的同时,对于噪声攻击、滤波等常规攻击方面,都明显优于文献[5]。具体测试数据见表2。例如,文献[5]算法只能抵抗非常微弱的椒盐噪声(0.003),当选择方差为0.05的椒盐噪声

攻击时,文献[5]算法已无法正确提取水印(图8),而本文算法依然可以清晰恢复出来(图9)。



图7 二值水印图像



图8 文献[5]水印



图9 本文水印

表2 攻击测试对比

攻击方式		本文算法		文献[5]算法	
		PSNR	NC	PSNR	NC
椒盐	0.003	29.9494	0.99927	29.9637	0.79195
噪声	0.05	18.4468	0.80416	18.4305	0.13123
高斯	0.003	24.9577	0.99852	24.9783	0.23215
噪声	0.05	13.6694	0.64131	13.6610	0.10833
中值滤波		33.5978	0.99622	34.6478	0.87193
高斯滤波		32.5857	0.98334	33.8328	0.84679
均值滤波		31.3886	0.97440	32.2337	0.84642
图像增亮		33.5422	0.99939	35.4620	0.99450
图像变暗		41.6678	0.99940	35.9982	0.99634
对比度增大		34.4445	0.99847	34.7768	0.94726
对比度减小		38.2193	0.99862	37.5845	0.99331
JPEG 压缩		29.5070	0.99494	29.7998	0.99202
剪切 1/4		11.9542	0.95955	11.9545	0.94926
循环平移		12.1099	1.00000	12.1622	0.98708
缩小一半再还原		27.6218	0.99653	27.0577	0.99326
旋转 1°		20.9743	0.92488	20.8036	0.90064
旋转 10°		12.3095	0.88574	12.3388	0.92114

注:表2中未标明参数的攻击类型与表1参数相同,本文算法的NC值是提取出的两个水印的NC值中的较大值。

4 结束语

本文将Contourlet变换和奇异值分解相结合,对Contourlet变换的低频和高频系数的抗攻击性进行了分析,利用了奇异值的稳定性和双水印的互补性,提高了其抵抗各种攻击的鲁棒性。但是本文算法在水印提取时需要用到原始图像的一部分奇异值信息,这也是本文算法仍需进一步改进的地方。

参考文献:

- [1] 李雷达,郭宝龙,武晓娟.一种新的空域抗几何攻击图像水印算法[J].自动化学报,2008,34(10):1235-1242.
- [2] DO M N, VETTERLI M. The Contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [3] 曾凡娟,周安民.基于Contourlet变换和奇异值分解的图像零水印算法[J].计算机应用,2008,28(8):2033-2035.
- [4] 顾国生,何元烈.一种Contourlet域图像鲁棒水印算法[J].计算机工程与应用,2010,46(14):179-181.
- [5] 王建平,吕述望.应用Contourlet的具有抗几何攻击能力的水印算法[J].传感技术学报,2009,22(6):883-886.
- [6] 刘如京,杨蕴飏,王玲.基于NMF和SVD相结合的Contourlet域鲁棒水印算法[J].计算机应用研究,2010,27(9):3507-3509.
- [7] 刘瑞祯,谭铁牛.基于奇异值分解的数字图像水印方法[J].电子学报,2001,29(2):1-4.
- [8] BHATNAGAR G, RAMAN B. A new robust reference logo watermarking scheme[J]. Multimedia Tools and Applications, 2011, 52(2-3):621-640.
- [9] 李海峰,宋巍巍,王树勋.基于Contourlet变换的稳健性图像水印算法[J].通信学报,2006,27(4):87-94.