

文章编号:1004-4213(2011)01-0142-7

离散余弦变换域抗二次打印-扫描鲁棒零水印算法

叶天语

(浙江工商大学 信息与工程学院, 杭州 310018)

摘 要:由于现有的抵抗打印-扫描攻击的鲁棒数字水印算法缺乏抵抗二次打印-扫描的能力, 本文利用子块的离散余弦变换域直流系数与所有子块直流系数的均值之间的大小关系稳定性, 提出一种抗二次打印-扫描鲁棒零水印算法. 通过对图像进行分块离散余弦变换, 计算所有子块直流系数的均值; 通过比较各个子块的直流系数与所有子块直流系数的均值之间的大小关系产生零水印. 算法分别对抵抗一次打印-扫描攻击的鲁棒性、抵抗一次打印-扫描和常规信号处理混合攻击的鲁棒性、抵抗二次打印-扫描攻击的鲁棒性、抵抗二次打印-扫描和常规信号处理混合攻击的鲁棒性进行了测试. 实验结果表明, 该算法在测试中表现出很强的鲁棒性.

关键词:离散余弦变换; 二次打印-扫描; 鲁棒性; 零水印

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114001.0142

0 引言

按照水印的功能进行分类, 数字水印技术可以分为鲁棒数字水印技术、脆弱数字水印技术和半脆弱数字水印技术. 其中, 鲁棒数字水印技术的功能在于对作品进行版权保护. 一些实际应用场合中, 印刷品往往需要经历打印-扫描处理. 抵抗打印-扫描处理的强鲁棒数字水印技术已被提出来用于对印刷品进行版权保护. 牛少彰等^[1]通过调整离散余弦变换 (Discrete Cosine Transformation, DCT) 域中频系数分类中的系数正负号数量嵌入水印. 葛云露等^[2]结合 Walsh 函数的严格正交性在离散小波变换 (Discrete Wavelet Transformation, DWT) 低频逼近子带自适应加性嵌入水印. 谭论正等^[3]通过调整 DWT 域细节子带系数的正负号数量嵌入水印. 牛少彰等^[4]通过调整 DCT 中频系数的次序嵌入水印. 然而, 目前已经提出的能抵抗打印-扫描攻击的鲁棒数字水印算法仍然比较少. 而且, 现有算法的共同缺陷是只对抵抗一次打印-扫描的能力进行研究, 却没有对抵抗二次打印-扫描的能力进行研究. 而抵抗二次打印-扫描的能力在多次印刷等实际应用场合显得很重要.

本文对图像 DCT 域的直流 (Direct Coefficient, DC) 系数进行实验, 发现打印-扫描前、后绝大多数子块的 DC 系数与所有子块 DC 系数均值之间的大小关

系保持稳定不变, 从而利用这种稳定性并结合温泉等提出的“零水印”概念^[5]提出一种抗二次打印-扫描鲁棒零水印算法. 算法的具体步骤为: 对原始图像进行分块 DCT, 计算所有子块 DC 系数的均值, 通过比较各个子块的 DC 系数与所有子块 DC 系数的均值之间的大小关系产生零水印. 实验结果表明该算法具有很强的抵抗二次打印-扫描攻击的能力.

1 打印-扫描对图像 DC 系数的影响

Peppers 图像是大小为 256 灰度级图像. 图 1 (a) 和 (b) 分别是原始 Peppers 图像和打印-扫描与后处理后的 Peppers 图像. 首先将图像划分为不重叠的 8×8 子块, 然后对每个子块进行 DCT.

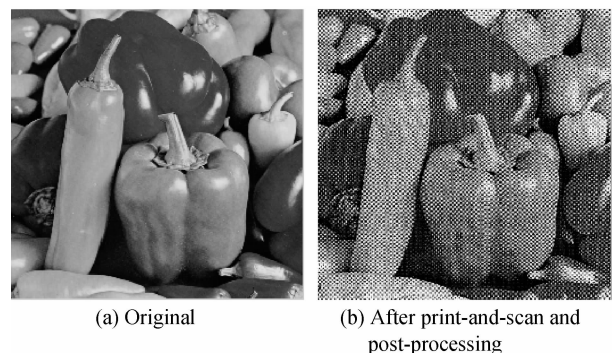


图 1 原始及打印-扫描与后处理的 Peppers
Fig. 1 Original and after print-and-scan and post-processing Peppers

基金项目: 浙江省教育厅 (No. Y201017916) 项目资助

作者简介: 叶天语 (1982-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为图像处理、信息隐藏及数字水印. Email: flystu008@yahoo.com.cn

收稿日期: 2010-07-12; 修回日期: 2010-08-27

1) 每个子块 DC 系数大小分布

图 2(a)为原始 Peppers 图像每个子块 DC 系数大小分布,图 2(b)为打印-扫描与后处理后的 Peppers 图像每个子块 DC 系数大小分布. 根据图 2 可以发现:打印-扫描与后处理后 Peppers 图像有些子块的 DC 系数变小,有些子块的 DC 系数变大,极少数子块的 DC 系数保持不变. 统计结果显示,打印-扫描前、后共有 2 486 个子块的 DC 系数变小,1 606 个子块的 DC 系数变大,4 个子块的 DC 系数不变,且每个子块 DC 系数的大小变化幅度没有规律性.

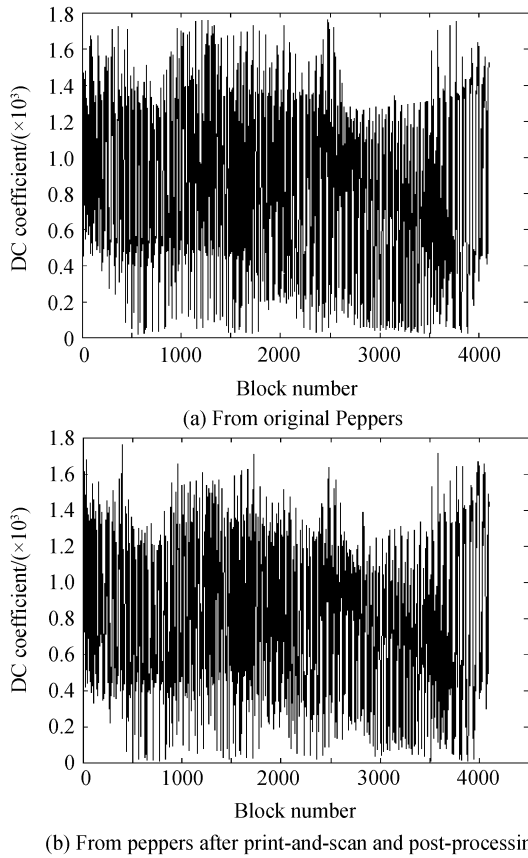


图 2 原始及打印-扫描与后处理后的 Peppers 图像每个子块 DC 系数大小分布
Fig. 2 Numerical distribution of each block's DC coefficient from original and after print-and-scan and post-processing peppers

2) 每个子块 DC 系数与所有子块 DC 系数均值的差值的正负号分布

图 3(a)为原始 Peppers 图像每个子块 DC 系数与所有子块 DC 系数均值的差值的正负号分布,图 3 (b)为打印-扫描与后处理后的 Peppers 图像每个子块 DC 系数与所有子块 DC 系数均值的差值的正负号分布. 正号用 1 表示,代表相应子块的 DC 系数大于所有子块 DC 系数的均值;负号用-1 表示,代表相应子块的 DC 系数小于等于所有子块 DC 系数的均值. 统计结果显示,打印-扫描前、后共有 3 815 个

子块的 DC 系数与所有子块 DC 系数均值的差值的正负号保持不变,共有 145 个子块由正号变为负号,共有 136 个子块由负号变为正号. 由此得出结论:打印-扫描前、后 Peppers 图像的绝对多数子块的 DC 系数与所有子块 DC 系数均值之间的大小关系保持稳定不变. 这是因为:虽然打印-扫描对每个子块的 DC 系数和所有子块 DC 系数的均值都有不小的影响,但两者之间的大小关系依然基本保持稳定.

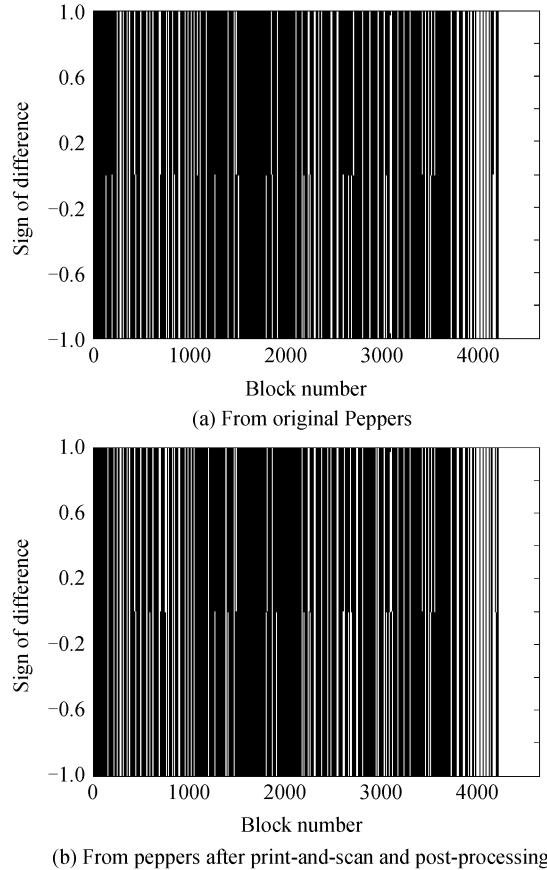


图 3 原始及打印-扫描与后处理后的 Peppers 图像每个子块 DC 系数与所有子块 DC 系数均值的差值的正负号分布
Fig. 3 Sign distributions of difference between each block's DC coefficient and average of all blocks' DC coefficients from original and after print-and-scan and post-processing peppers

2 零水印产生算法

从大小为 $N \times N$ 的原始图像产生原始零水印序列的过程为:

- Step1: 将原始图像分割成互不重叠的 $n \times n$ 子块;
- Step2: 对每个子块进行 DCT, 将每个子块的 DC 系数记为 D_j , 其中 $j=1, 2, \dots, (N/n)^2$;
- Step3: 计算所有子块 DC 系数的均值, 将其记为 $D_{average}$;
- Step4: 比较各个子块的 DC 系数与所有子块 DC 系数的均值之间的大小产生原始零水印序列

W. 即

if $D_j > D_{\text{average}}$

$W_j = 1;$

else

$W_j = 0$

其中 W_j 为 W 的第 j 比特水印.

3 零水印提取算法

从经打印-扫描的数字图像提取零水印序列的过程为:

Step1: 对经打印-扫描的数字图像进行一系列后处理使其大小调整为 $N \times N$;

Step2: 将经过后处理的图像分割成互不重叠的 $n \times n$ 子块;

Step3: 对每个子块进行 DCT, 将每个子块的 DC 系数记为 D'_j , 其中 $j = 1, 2, \dots, (N/n)^2$;

Step4: 计算所有子块 DC 系数的均值, 将其记为 D'_{average} ;

Step5: 比较各个子块的 DC 系数与所有子块 DC 系数的均值之间的大小提取零水印序列 W' . 即

if $D'_j > D'_{\text{average}}$

$W'_j = 1;$

else

$W'_j = 0$

其中 W'_j 为 W' 的第 j 比特水印.

Step6: 计算原始零水印序列 W 和打印-扫描与后处理后提取的零水印序列 W' 之间的相似度以判断版权. 相似度定义为

$$s = 1 - \left[\sum_{j=1}^{(N/n)^2} W_j \oplus W'_j \right] / (N/n)^2$$

其中 \oplus 为异或运算. 如果 s 大于阈值 th , 则认为拥有合法版权; 反之, 则认为不拥有合法版权.

4 实验结果

4.1 原始零水印序列与随机均匀分布 $\{0,1\}$ 序列之间的相似度

将原始 Peppers 图像分割成大小为 8×8 的子块进行 DCT, 通过第 2 部分的零水印产生算法产生原始零水印序列. 原始零水印序列的长度为 4 096 比特. 原始零水印序列与 299 个随机均匀分布 $\{0,1\}$ 序列之间的相似度见图 4. 图中的第 150 个序列为原始零水印序列. 根据图 4, 两者之间的相似度基本上在 0.5 附近波动. 因此, 可以选择 0.80 作为阈值 th .

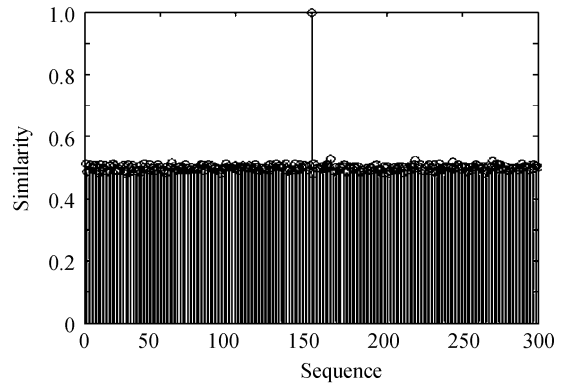


图 4 原始零水印序列与随机均匀分布 $\{0,1\}$ 序列之间的相似度

Fig. 4 Similarities between the original zero-watermark sequence and random uniform $\{0,1\}$ sequences

4.2 抗一次打印-扫描攻击的鲁棒性

相似度的物理意义在于衡量原始零水印序列与从攻击后图像提取的零水印序列之间的相似程度. 这可以从第 3 部分的相似度定义式看出来, 即相似度等于攻击前后保持不变的水印比特数占水印序列长度的比率. 抗攻击鲁棒性的物理意义在于衡量施加在原始图像的攻击对原始零水印序列的破坏程度, 即从攻击后图像提取的零水印序列在多大程度上与原始零水印序列保持一致. 因此, 可以用相似度来衡量算法抵抗各种攻击的鲁棒性. 相似度的值越大表明攻击对原始零水印序列的破坏程度越小, 因而抗攻击鲁棒性也就越强.

一次打印-扫描攻击实验用到的设备和材料有: 一台型号为 Canon L11121E 的激光打印机、一台型号为 CanoScan LiDE 100 的扫描仪、一台电脑和一张 A4 打印纸. 一次打印-扫描及后处理的过程为:

- 1) 在 A4 打印纸上将原始 Peppers 图像用 Canon L11121E 激光打印机打印出来;
- 2) 设置 CanoScan LiDE 100 扫描仪的分辨率为 400 dpi, 将打印出来的 Peppers 图像扫描输入电脑;
- 3) 使用 Photoshop 对扫描输入的 Peppers 图像进行裁剪和旋转校正, 将采样分辨率调整成 72 dpi, 使用 nearest 插值法将大小调整为 512×512 等.

图 1(b) 为经历一次打印-扫描与后处理后的 Peppers 图像, 与原始 Peppers 图像之间的 PSNR 为 9.496 8. 由此可知, 一次打印-扫描攻击给图像的视觉效果带来严重影响. 将经一次打印-扫描与后处理的 Peppers 图像分割成大小为 8×8 的子块进行 DCT, 通过第 3 部分的零水印提取算法提取零水印序列. 提取的零水印序列的长度为 4 096 比特. 经计算, 此时提取的零水印序列与原始零水印序列之间

的相似度为 0.931 4。相似度超过阈值,而且大于 0.9。因此,算法抵抗一次打印-扫描攻击的鲁棒性很强。

4.3 抗一次打印-扫描和常规信号处理混合攻击的鲁棒性

1) 高斯低通滤波攻击

对经一次打印-扫描的 Peppers 图像进行高斯低通滤波攻击,经处理后提取零水印序列。高斯低通滤波的窗口大小为 3×3 ,标准差为 0.5。高斯低通滤波攻击与后处理后的图像见图 5(a),与原始 Peppers 图像之间的 PSNR 为 12.796 4。此时提取的零水印序列与原始零水印序列之间的相似度为 0.933 6。

2) 中值滤波攻击

对经一次打印-扫描的 Peppers 图像进行中值滤波攻击,经处理后提取零水印序列。中值滤波的窗口大小为 3×3 。中值滤波攻击与后处理后的图像见图 5(b),与原始 Peppers 图像之间的 PSNR 为 14.868 4。此时提取的零水印序列与原始零水印序列之间的相似度为 0.936 5。

3) 剪切攻击

对经一次打印-扫描与后处理的 Peppers 图像进行剪切攻击,得到的图像见图 5(c)。它与原始 Peppers 图像之间的 PSNR 为 9.282 6 dB,此时提取的零水印序列与原始零水印序列之间的相似度为 0.926 3。

4) JPEG 压缩攻击

对经一次打印-扫描的 Peppers 图像进行 JPEG 压缩攻击,经处理后提取零水印序列。实验时采用的 JPEG 压缩质量因子以及实验得到的 PSNR 和相似度见表 1。

表 1 JPEG 压缩实验参量和实验结果

Table 1 Experimental parameters and results of JPEG compression

Quality factor	PSNR/dB	Similarity
10	9.748 6	0.928 2
20	9.758 8	0.929 0
30	9.732 9	0.931 9
40	9.694 4	0.929 4
50	9.653 7	0.929 9

由表 1 可见,虽然攻击时所采用的质量因子比较小,但是实验得到的相似度仍然比较高。

5) 旋转攻击

对经一次打印-扫描的 Peppers 图像进行逆时针旋转 2 度攻击,经处理后提取零水印序列。旋转攻击与后处理后的图像见图 5(d),与原始 Peppers 图像之间的 PSNR 为 11.624 9 dB。此时提取的零水

印序列与原始零水印序列之间的相似度为 0.891 8。

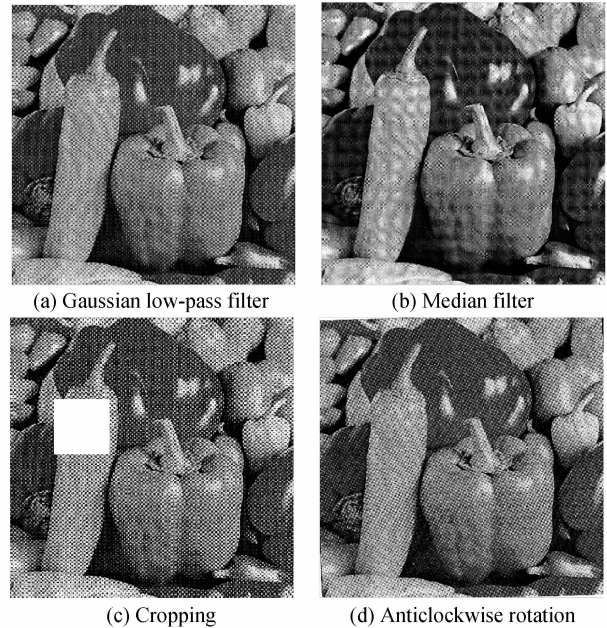


图 5 经一次打印-扫描和常规信号处理混合攻击后处理后的图像

Fig. 5 Peppers after one print-and-scan & conventional signal processing attacks and post-processing

6) 尺寸缩放攻击

对经一次打印-扫描与后处理的 Peppers 图像进行尺寸缩放攻击。实验参量以及实验结果见表 2。尺寸缩放都是使用 nearest 插值法。

表 2 尺寸缩放实验参量和实验结果

Table 2 Experimental parameters and results of scaling

Proportion	PSNR/dB	Similarity
First lessen to 80%, then magnify to 125%	10.931 8	0.928 7
First lessen to 50%, then magnify to 200%	10.862 8	0.920 9

以上六种攻击实验所得的相似度都超过阈值,而且比较大。因此,算法抵抗一次打印-扫描和常规信号处理混合攻击的鲁棒性很强。

4.4 抗二次打印-扫描攻击的鲁棒性

二次打印-扫描攻击实验用到的设备和材料有:一台型号为 HP LaserJet 1012 的激光打印机、一台型号为 Uniscan A3 的紫光扫描仪、一台电脑和一张 A4 打印纸。二次打印-扫描及后处理的过程为:

1) 在 A4 打印纸上将经一次打印-扫描的 Peppers 图像用 HP LaserJet 1012 激光打印机打印出来;

2) 设置 Uniscan A3 紫光扫描仪的分辨率为 400 dpi,将打印出来的 Peppers 图像扫描输入电脑;

3) 使用 Photoshop 对扫描输入的 Peppers 图像进行裁剪和旋转校正,将采样分辨率调整成 72 dpi,使用 nearest 插值法将大小调整为 512×512 。

图 6 为经二次打印-扫描与后处理后的 Peppers 图像,与原始 Peppers 图像之间的 PSNR 为 13.182 4 dB.由此可知,二次打印-扫描攻击给图像的视觉效果带来严重影响.将经二次打印-扫描与后处理的 Peppers 图像分割成大小为 8×8 的子块进行 DCT,通过第 3 部分的零水印提取算法提取零水印序列.提取的零水印序列的长度为 4 096 比特.经计算,此时提取的零水印序列与原始零水印序列之间的相似度为 0.904 8.相似度超过阈值,而且大于 0.9.因此,算法抵抗二次打印-扫描攻击的鲁棒性也很强.



图 6 二次打印-扫描与后处理后的 Peppers 图像
Fig. 6 Peppers after dual print-and-scan and post-processing

4.5 抗二次打印-扫描和常规信号处理混合攻击的鲁棒性

1) 高斯低通滤波攻击

对经二次打印-扫描的 Peppers 图像进行高斯低通滤波攻击,经后处理后提取零水印序列.高斯低通滤波的窗口大小为 3×3 ,标准差为 0.5.高斯低通滤波攻击与后处理后的图像见图 7(a),与原始 Peppers 图像之间的 PSNR 为 13.471 0 dB.此时提取的零水印序列与原始零水印序列之间的相似度为 0.906 0.

2) 中值滤波攻击

对经二次打印-扫描的 Peppers 图像进行中值滤波攻击,经后处理后提取零水印序列.中值滤波的窗口大小为 3×3 .中值滤波攻击与后处理后的图像见图 7(b),与原始 Peppers 图像之间的 PSNR 为 13.832 3 dB.此时提取的零水印序列与原始零水印序列之间的相似度为 0.903 6.

3) 剪切攻击

对经二次打印-扫描与后处理的 Peppers 图像进行剪切攻击,得到的图像见图 7(c).它与原始 Peppers 图像之间的 PSNR 为 12.425 9 dB,此时提取的零水印序列与原始零水印序列之间的相似度为 0.869 4.

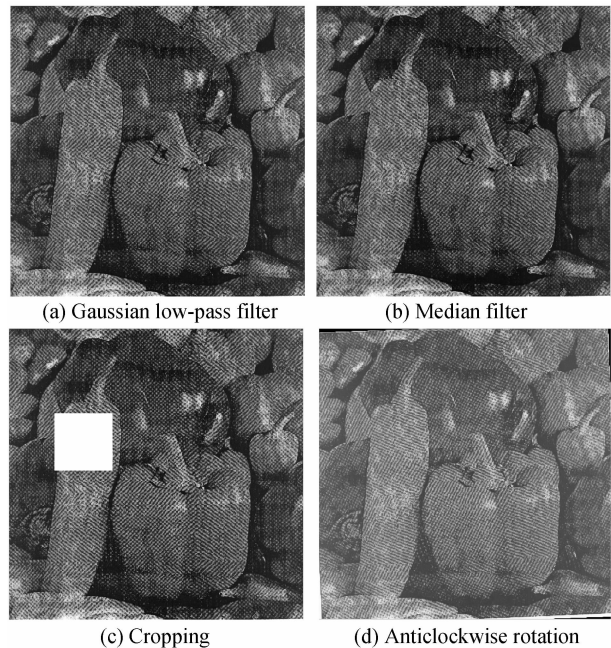


图 7 经二次打印-扫描和常规信号处理混合攻击与后处理后的图像

Fig. 7 Peppers after dual print-and-scan & conventional signal processing attacks and post-processing

4) JPEG 压缩攻击

对经二次打印-扫描的 Peppers 图像进行 JPEG 压缩攻击,经后处理后提取零水印序列.实验时采用的 JPEG 压缩质量因子以及实验得到的 PSNR 和相似度见表 3.

表 3 JPEG 压缩实验参量和实验结果

Table 3 Experimental parameters and results of JPEG compression

Quality factor	PSNR/dB	Similarity
10	13.076 5	0.902 1
20	13.144 7	0.903 3
30	13.204 9	0.904 8
40	13.109 7	0.903 6
50	13.102 4	0.903 3

由表 3 可见,虽然攻击时所采用的质量因子比较小,但是实验得到的相似度仍然比较高.

5) 旋转攻击

对经二次打印-扫描的 Peppers 图像进行逆时针旋转 2 度攻击,经后处理后提取零水印序列.旋转攻击与后处理后的图像见图 7(d),与原始 Peppers 图像之间的 PSNR 为 12.652 2 dB.此时提取的零水印序列与原始零水印序列之间的相似度为 0.854 0.

6) 尺寸缩放攻击

对经二次打印-扫描与后处理的 Peppers 图像进行尺寸缩放攻击.实验参量以及实验结果见表 4.尺寸缩放都是使用 nearest 插值法.

表 4 尺寸缩放实验参量和实验结果

Table 4 Experimental parameters and results of scaling

Proportion	PSNR/dB	Similarity
First lessen to 80%, then magnify to 125%	18.757 4	0.893 3
First lessen to 50%, then magnify to 200%	19.154 4	0.891 6

以上六种攻击实验所得的相似度都超过阈值,而且比较大.因此,算法抵抗二次打印-扫描和常规信号处理混合攻击的鲁棒性比较强.

5 结论

抗打印-扫描的强鲁棒数字水印技术在印刷品防伪领域具有很大的实用价值.目前,几乎没有算法研究抗二次打印-扫描的鲁棒性问题.本文利用子块的 DC 系数与所有子块 DC 系数的均值之间的大小关系稳定性,提出一种抗二次打印-扫描鲁棒零水印算法.对图像进行分块 DCT,计算所有子块 DC 系数的均值,通过比较各个子块的 DC 系数与所有子块 DC 系数的均值之间的大小关系产生零水印.本文测试了算法抵抗一次打印-扫描攻击的鲁棒性、抵抗一次打印-扫描和常规信号处理混合攻击的鲁棒性、抵抗二次打印-扫描攻击的鲁棒性、抵抗二次打印-扫描和常规信号处理混合攻击的鲁棒性.实验结果表明该算法在所有这些攻击中均表现出很强的鲁棒性.

参考文献

- [1] NIU Shao-zhang, WU Hong-tao, XIE Zheng-cheng, *et al.* Robustness investigation of digital watermarking algorithm for print-and-scan process [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2004, **43**(Sup2): 1-4.
牛少彰,伍宏涛,谢正程,等.抗打印扫描数字水印算法的鲁棒性[J].中山大学学报(自然科学版),2004,**43**(Sup2):1-4.
- [2] GE Yun-lu, NIAN Gui-jun, WANG Shu-xun. Walsh modulating watermarking algorithm for image print-and-scan process[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2007, **37**(Sup 1): 197-200.
葛云露,年桂君,王树勋.基于 Walsh 编码调制的抗打印扫描数字水印算法[J].东南大学学报(自然科学版),2007,**37**(Sup 1):197-200.
- [3] TAN Lun-zheng, ZHU Ning-bo, SUN Xing-ming. Digital watermarking for print and scan process based on document image [J]. *Application Research of Computers*, 2007, **24**(12): 199-200, 265.

- 谭论正,朱宁波,孙星明.基于文档图像的抗打印-扫描数字水印技术[J].计算机应用研究,2007,**24**(12):199-200,265.
- [4] NIU Shao-zhang, NIU Xin-xin, YANG Yi-xian, *et al.* Data hiding algorithm for halftone images [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, **32**(7): 1180-1183.
牛少彰,钮心忻,杨义先,等.半色调图像中数据隐藏算法[J].电子学报,2004,**32**(7):1180-1183.
- [5] WEN Quan, SUN Tan-feng, WANG Shu-xun. Concept and application of zero-watermark [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, **31**(2): 214-216.
温泉,孙铁锋,王树勋.零水印的概念与应用[J].电子学报,2003,**31**(2):214-216.
- [6] GHOUTI L, BOURIDANE A, IBRAHIM M K, *et al.* Digital image watermarking using balanced multiwavelets [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, **54**(4): 1519-1536.
- [7] DENG Cheng, GAO Xin-bo. Geometrically robust image watermarking based on SIFT feature regions [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 1005-1010.
邓成,高新波.基于 SIFT 特征区域的抗几何攻击图像水印算法[J].光子学报,2009,**38**(4): 1005-1010.
- [8] XU Wen-li, LI Lei, WANG Yu-min. Robust digital watermarking scheme resistant to gaussian noise, geometric distortion and JPEG compression attacks [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, **30**(4): 933-936.
许文丽,李磊,王育民.抗噪音、几何失真和 JPEG 压缩攻击的鲁棒数字水印方案[J].电子与信息学报,2008,**30**(4):933-936.
- [9] YUAN Da-yang, XIAO Jun, WANG Ying. Study on the robustness of digital image watermarking algorithms to geometric attacks [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, **30**(5): 1251-1256.
袁大洋,肖俊,王颖.数字图像水印算法抗几何攻击鲁棒性研究[J].电子与信息学报,2008,**30**(5):1251-1256.
- [10] LI Lei-da, GUO Bao-long, BIAO Jin-feng. Spatial domain image watermarking scheme robust to geometric attacks based on odd-even quantization [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, **31**(1): 134-138.
李雷达,郭宝龙,表金峰.基于奇偶量化的空域抗几何攻击图像水印算法[J].电子与信息学报,2009,**31**(1): 134-138.
- [11] LI Xin-wei, GUO Bao-long, LI Lei-da. A statistic-quantization based image watermarking algorithm resisting geometric attacks [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(8): 1082-1086.
李新伟,郭宝龙,李雷达.一种基于统计量化的抗几何攻击图像水印算法[J].光电子·激光,2009,**20**(8): 1082-1086.
- [12] WU Yi-quan, XIE Jing, PANG Lei. Multipurpose watermarking algorithm based on krawtchouk moment and contourlet transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2160-2164.
吴一全,谢静,庞磊.基于 Krawtchouk 矩和 Contourlet 变换的多目的水印[J].光子学报,2009,**38**(8): 2160-2164.

A Robust Zero-watermarking Algorithm Against Dual Print-and-scan Process Based on Discrete Cosine Transformation

YE Tian-yu

(College of Information & Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Because the existing robust watermarking algorithms cannot involve the research of robustness against dual print-and-scan process, a robust zero-watermarking algorithm against dual print-and-scan process was proposed. The algorithm was based on the stability of the numerical relationship between each block's direct coefficient and the average of direct coefficients form all blocks in discrete cosine transformation domain. The image was divided into non-overlapping blocks, and each block was transformed with discrete cosine transformation. Zero-watermark sequence was produced by judging the numerical relationship between each block's direct coefficient and the average of direct coefficients form all blocks. Some tests were carried out including its robustness against single print-and-scan process, conventional signal processing after single print-and-scan process, dual print-and-scan process, and conventional signal processing after dual print-and-scan process. The results show that the proposed algorithm has excellent robustness towards those above attacks.

Key words: Discrete Cosine Transformation (DCT); Dual print-and-scan process; Robustness; Zero-watermarking