

基于 SVD 分解的数字图像盲水印^①

Blind Watermark of Digital Image Based on SVD

许海霞 周维 陈维 (湘潭大学信息工程学院 湖南湘潭 411105)

摘要:本文设计了一种基于奇异值分解(SVD)的盲检测数字图像水印算法,将原图像分块进行 SVD 分解,再对每块最大奇异值适当量化并嵌入水印;水印检测时,直接对含水印图像的分块最大奇异值的量化结果的奇偶性判别来提取水印。进一步,通过对图像的不可见性及鲁棒性分析,给出量化强度的理论分析和理论取值。实验表明,该方法可行,算法简洁,抗压缩、滤波、几何攻击性强。

关键词:数字水印 奇异值分解 量化

1 引言

随着信息时代数字化、网络化的到来,多媒体技术的飞速发展和 Internet 的普及,人们可以方便地资源共享,发布自己的作品、重要消息,进行网络交易等,但随之也带来了一系列问题,如内容的篡改、交易欺诈、侵权等问题,网络的开放性和资源共享使得如何有效的保护网络信息的安全和多媒体数字化产品的版权保护是急待研究和解决的热点问题。将数字产品嵌入水印是一种有效的解决途径。

目前,数字水印已有大量的研究成果,文献[9]提出嵌入分形水印,可增强鲁棒性,另一方面,从实际应用来看,盲水印(也称公有水印)由于其不需要原始图像,具有更广的应用前景。典型的算法,cox 等人提出的基于扩频通信方法的盲水印^[1],小波域 ACF 峰值盲水印^[3,4],SVD 分解的盲水印^[2],还有 DFT、DCF 变换的盲水印等^[5,6],多数都是嵌入无意义的随机噪声信息,相关检测,确定有无水印,即只有两种状态,表示了 1 位信息。若要嵌入有意义的多位信息,如版权序列号、版权标志图等,需精确逐位信息提取,SVD 分解是一种很好的水印嵌入方式。2002 年 Sun 等人提出 SVD 和量化的方法^[7],后来 Chin-Chen 提出的利用 SVD 的正交分量 U 的保号性^[8],精确提出水印图标,但是上两文方法中没有给出定量的理论分析。

本文提出一种新的基于奇异值分解(SVD)的盲检测数字图像水印算法,将原图像分块进行 SVD 分解,块

数量由水印信息位决定,取出每块的最大奇异值适当量化,利用量化值与水印值的奇偶性嵌入水印;水印检测时,直接只对含水印图像的分块最大奇异值的量化值的奇偶性判别来提取水印。进一步分析了反映图像不可见性或图像质量的因素:信噪比,及图像抗攻击的鲁棒性,给出量化强度的理论取值。通过大量实验表明,该方法可行,抗攻击性强。

2 奇异值分解 SVD

一幅位图,图像的像素值(0~255)存于数据矩阵 I 中, $I \in R^{n \times n}$

则矩阵 I 的 SVD 分解 $I = U\sigma V^T$ (1)

其中 $U \in R^{n \times n}$, $V \in R^{n \times n}$ 的正交阵, T 表示转置, $\sigma = \text{diag}[\sigma_1, \dots, \sigma_n]$ 的对角阵,矩阵奇异值的稳定性非常好,若对矩阵 I 有微小的扰动 δI , σ_i 不会有大的变化,反之,亦然。

即 $I + \delta I = U(\sigma + \Delta\sigma)V^T = U\sigma'V^T$, σ' 与 σ 相差不大。

因此,可以通过对奇异值 σ 的微小改变来嵌入水印,不会引起视觉改变;而另一方面,对矩阵的微小的扰动,相当于对含水印图像进行某种攻击,对 σ 的影响不大,不影响水印的提取,则从根本上保证水印的不可见性及鲁棒性。

① 本课题系湖南省教育厅与湘潭大学共同资助的基金项目(编号:06XZX10)

3 基于 SVD 的图像水印算法

3.1 水印信息

在嵌入水印过程中,须考虑的因素:嵌入的水印信息容量和图像质量。常用于水印信息的内容:通过相关检测提取的随机序列或精确提取的代表版权的序号、标志等。随机水印所需的嵌入位置多,但代表的信息少,只有有无两种情况,版权标志,虽然需精确提取,但表示的信息多。文中,选大小为 $p \times q$ 的标志图标 M , 记作 $M = [m_1, m_2, \dots, m_{p \times q}]$ 作为待嵌入水印信息,在嵌入前,为了增强攻击性,先将其置乱。

由初始种子密钥 x_0 产生二值混沌随机序列 $x_k = u(\cos(10 \arccos(x_{k-1})))$ (2)

$$\text{其中 } u(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & \text{others} \end{cases}$$

将混沌随机数 $X = [x_1, \dots, x_k, \dots, x_{p \times q}]$ 与待嵌入图标 M 逐点异或形成水印信息 $W, W = X \oplus M$ 。

3.2 水印嵌入过程

给定大小为 $N_r \times N_c$ 的图像 I 及 $p \times q$ 的水印 W , 将图像分块执行 SVD 分解,修改每块的一个奇异值来嵌入一位信息。其嵌入步骤如下:

- (1) 图像 I 分成大小为 $n \times n$ 小块 I_i , 共 $p \times q$ 块;
- (2) 逐块分别进行 SVD 分解, $I_i = U \sigma V^T$;
- (3) 量化每块中最大的奇异值 σ_i , 记作 $\lambda_i = \text{round}(\frac{\sigma_i}{Q})$, (3)。

式(3)中 $\text{round}()$ 为舍入取整, Q 为量化强度, Q 的取值在下文讨论。

- (4) 修改奇异值嵌入水印, 将每块的最大奇异值 σ_i 修改为 σ_i' ,

$$\sigma_i' = \begin{cases} (\lambda_i + 0.5)Q & \text{if } (\lambda_i + W_i \in \text{odd}) \\ (\lambda_i - 0.5)Q & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

- (5) 由修改后的奇异值重构图像 $I_i', I_i' = U \sigma' V^T$, 合并所有子块, 得到含水印的图像 I_w 。

3.3 水印提取过程

水印提取是其嵌入的逆过程, 相应的过程如下:

- (1) 将图像 I_w 或受到攻击后的 I_w' 进行分块, 每块 I_w' 执行 SVD 分解,
- (2) 量化每一块的最大奇异值 σ_w , 记作 $\lambda_w = \text{floor}(\frac{\sigma_w}{Q})$, ($\text{floor}()$ 为向下取整)。

- (3) 根据 λ_w 的奇偶性确定提取的水印信息, 当 λ_w 为偶数, W_i 取值为 1; 当 λ_w 为奇数, W_i 取值为 0;

3.4 量化强度 Q 的选择

水印嵌入过程中, 显然 Q 越大, 图像 I_w 质量下降, 而抗扰动能力强, 鲁棒性强, Q 越小, 反之。水印图像的质量与其鲁棒性是矛盾的, 而这个矛盾的折中由量化强度 Q 大小去平衡决定。

下面先引入一范数引理:

若 $U \in R^{n \times n}, V \in R^{n \times n}$ 为正交阵, 且 $A \in R^{n \times n}$, 则 $\|UAV\|_F = \|A\|_F$ (5)

式(5)中 $\| \cdot \|_F$ 为谱范数

在原图像 I 、含水印图像 I_w 中, 每一块 I_i, I_w 其含水印噪声信息能量 ϵ_i^2 为 $\epsilon_i^2 = \|I_w - I_i\|_F^2 = \|U(\sigma + \Delta\sigma)V^T - U\sigma V^T\|_F^2 = \|U \cdot \Delta\sigma V^T\|_F^2 = \|\Delta\sigma\|_F^2 = \frac{1}{4}Q^2$ (6)

图像质量的衡量: 其信噪比 $\text{PSNR} = 10 \log(\max(I)^2 / \frac{\epsilon_i^2}{n \cdot n}) = 10 \log(\frac{4 \max(I)^2 \cdot n \cdot n}{Q^2})$ (7)

图像鲁棒性的分析: 设图像矩阵 A 的 SVD 分解: $A = U\sigma V^T$

嵌入水印的图像 $A_w = A + \delta_1 A = U(\sigma + \Delta\sigma_1)V^T$ (8)

对水印图像攻击 $A_w' = A + \delta_1 A + \delta_2 A = U(\sigma + \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2)V^T$ (9)

提取的水印值 W 取决于量化值 λ 的奇偶性, 其中

$$\lambda = \begin{cases} \text{floor}(\frac{\sigma + \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2}{Q}) \\ \text{floor}(\frac{\sigma + \Delta\sigma_2}{Q}) \end{cases} \quad (10)$$

由(8), (9), (10)可得出:

当攻击扰动满足 $4n < |\frac{\Delta\sigma_2}{Q}| < (4n+1)0.5$, ($n = 0, 1, 2, \dots$ 整数), 不会改变 λ 的奇偶性, 则不影响水印值的提取。若 $n=1$, 信噪比、鲁棒性与量化强度 Q 的关系如图 1 所示。

4 实验结果及性能分析

采用 matlab 6.5 对大量的灰度图像进行实验, 选

其中的一幅 256 * 256 lena. bmp 来分析说明,由图 1 的量化强度关系看出,选量化强度为 Q = 20,理论计算信噪比 PSNR = 92.4995dB,实际计算 PSNR = 85.6193dB。图 2 (a)待嵌入水印图标,(b)置乱后的水印图标;图 3 (a)为原始载体图像 lena,(b)是加入水印后图像,(c)提取的水印图标,由此可看出两图没有明显的差别,不可见性强。

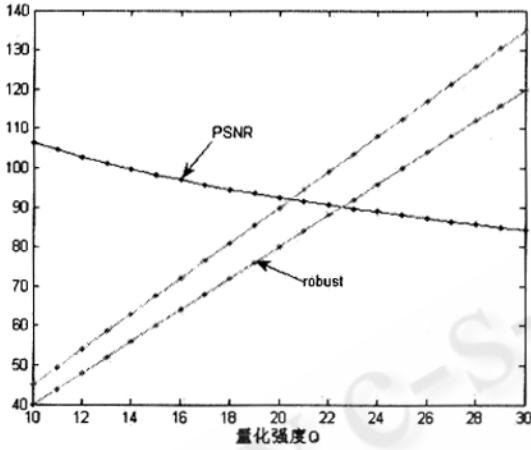


图 1 量化强度 Q 与信噪比/鲁棒性关系

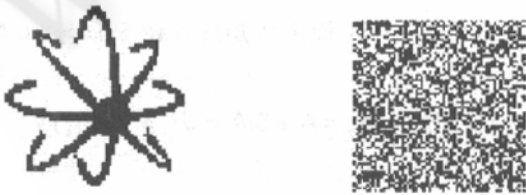


图 2 (a) 待嵌入水印 (b) 置乱后的水印



图 3 (a) 原图像 (b) 嵌入水印后的图像 (c) 提取的水印图标

对算法可行性的分析,可以定性的从提取的水印图像和定量的求其相似系数 NC 来评判。表征原水印

与提取的水印的相似程度的相似系数 NC 定义为: NC

$$= 1 - \frac{\sum_{i,j} W \oplus \tilde{W}}{p \cdot q} \quad (p \times q \text{ 是水印图像的大小})。$$

Stirmark 软件模拟攻击测试:

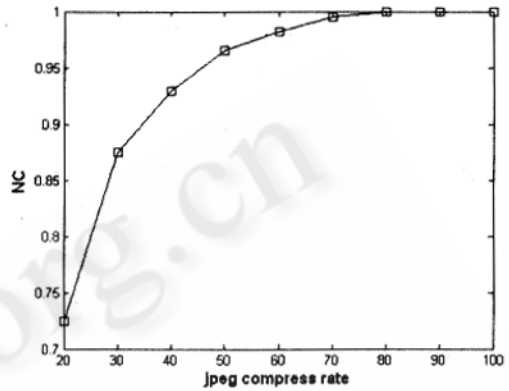


图 4 (a) Jpeg 压缩攻击水印检测 NC 值变化曲线



图 4 (b) JPEG 压缩率为 50% 时提取的水印

图 4 抗 Jpeg 压缩的分析,随压缩程度加大,水印 NC 值渐小,当压缩为 20% 时,水印模糊不清。

表 1 抗 RST(旋转、平移、尺度)几何攻击分析,对图像施加不同的几何攻击,提取的水印与原水印的相似



确的提取出来。具有很强的抗几何攻击性。

由水印检测图、变化曲线可看出,此水印系统算法

可行,有较强的抗 RST 几何攻击、抗压缩性、噪声攻击,不可见性,鲁棒性强。

表 1 抗 RST 几何攻击分析

攻击方法	缩小 0.75	放大 1.25	旋转 45	旋转 15	放大 1.5 且旋转 5	缩小 0.75 再旋转 20
NC 值	0.9518	0.9751	0.9758	0.9800	0.9763	0.9426



(a) 放大 1.25 (b) 缩小 0.75 (c) 旋转 45 (d) 中值滤波 (e) 低通滤波

图 5 受到各种攻击后提取的水印

5 结束语

本文分析了各种数字图像盲水印,设计了可嵌入多位有意义信息的 SVD 分解的盲水印,经滤波或受到几何失真后,图像仍可检测出水印。但是 SVD 算法,本身不具有几何失真自识别能力,不具有抗剪切性,必须另外嵌入模板,在这些方面有待于进一步改进算法。

本文作者创新点:提出了一种新的简洁的 SVD 数字图像盲水印,并首次对量化强度的理论取值作了定量分析,具有现实指导意义。

参考文献

- 1 I. J. Cox, J. Kilian, F. T. Leighton, Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1997, 6(12): 1673-1687.
- 2 刘瑞祯、谭铁牛,基于奇异值分解的数字图像水印方法,电子学报[J], 2001, 29(2):168-171.
- 3 C-H Lee, H-K Lee. Improved autocorrelation function based watermarking with side information [J]. Journal of Electronic Imaging, 2005, 14(1):1-13.
- 4 H. C. Huang, J. S. Pan, and H. M. Hang, "Watermarking based on transform domain," in Intelligent watermarking Techniques[J]. (World Scientific, Singapore, 2004), pp. 147-163.
- 5 Chu, W. C., DCT-based image watermarking using sub-sampling. IEEE Trans. Multimedia 5, 2003: 34-38.
- 6 李旭东. 基于分块 DCT 和量化的图像盲水印算法 [J], 计算机工程, 2006, 32(21):139-140.
- 7 Sun R, Sun. H., Yao T. A SVD and quantization based semi-fragile watermarking technique for image authentication [C]. Proc Int Conf. Signal Process. 2002(2):1952-1955.
- 8 Chin-Chen Chang, Piyu Tsai, Chia-Chen Lin. SVD-based digital image watermarking scheme [J], Pattern Recognition Letters, 2005(26):1577-1586.