

一种解密图像无背景噪声的加密全息数字水印技术

刘 真 白韬韬* 卢 鹏

上海理工大学出版印刷与艺术设计学院, 上海 200093

摘要 提出了一种新的加密计算全息技术,原始水印图像经过双随机相位编码,所得复数图像经过共轭对称延拓和傅里叶变换后得到全息图,所得全息图解密图像上没有视觉可见噪声污染。将快速识别矩阵(QR)码作为原始水印图像,进行加密得到全息图水印,并嵌入在原始图像的Haar小波对角线中频系数中,在较高的水印信息不可见性的情况下,含水印图像经过打印过程获得的印刷品再扫描后,提取出的全息图水印经解密后依然能够得到可解码的QR码,QR码的使用使得算法可以准确定位版权人。所提的数字水印技术有很好的实用价值。

关键词 全息;数字水印;版权保护;共轭对称延拓;双随机相位编码;打印扫描

中图分类号 TP391.41;TN911.73

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0209002

Encrypted Holographic Watermarking Technology with Decrypted Image Superposed No Noise

Liu Zhen Bai Taotao Lu Peng

*College of Communication and Art Design, University of Shanghai for Science and Technology,
Shanghai 200093, China*

Abstract A new encrypted computer-generated holographic technique is presented. The watermark image is encoded with double-random-phase encoding. The encrypted image with complex value is transformed to hologram by conjugate symmetric extension and Fourier transform. The decrypted image is not superimposed by perceptual noise. The original watermark is quick response (QR) code. The hologram generated from the preprocessed QR code is embedded in the intermediate frequency coefficients of original image. The extracted QR code from the watermarked image under print-scan attack can be decoded correctly. The QR code represents not only a picture, but also text message. So the message decoded from the QR code makes authority verification more precisely. The proposed algorithm is of high practical value.

Key words holography; watermarking technology; copyright protection; conjugate symmetric extension; double-random-phase encoding; print-scan

OCIS codes 090.1760; 100.2000

1 引 言

随着计算机技术和多媒体技术的迅速发展,数字图像、视频和文本的流通变得更加方便、快捷,但是随之而来的是更为突出的版权保护问题。数字水印技术^[1-3]为版权保护提供了一种有效途径,一经提出就引起了广大学者的注意。现阶段数字水印技术针对电子图像的保护有了很深入的研究,可以从受到图像处理攻击的电子稿中有效提取出水印信息。但是随着数字印刷的兴起以及文档、图像的打印变得更加便利,数字图像打印稿的版权保护变得同样重要。

收稿日期: 2014-07-28; 收到修改稿日期: 2014-10-15

基金项目: 新闻出版重大科技工程项目(GXTC-CZ-1015004/15-3)、上海市研究生教育创新计划

作者简介: 刘 真(1953—),女,教授,博士生导师,主要从事图文信息处理、色彩再现理论与应用等方面的研究。

E-mail: lunaprint@163.com

*通信联系人。E-mail: taotaobai123@gmail.com

目前,针对数字图像打印扫描攻击的数字水印技术已经有了一定的发展,其主要分为两大类,第一类算法基本上是找出原始数字图像和打印扫描电子稿在空域或变换域中较稳定的系数,并利用此种系数进行水印的嵌入或构造零水印^[4-5]。另一类主要是利用全息技术来抵抗打印扫描攻击。

抗打印扫描的全息水印技术已经有了一定的研究。2002年,Takai等^[6]将数字全息引入到数字水印技术中,取得了良好的抗裁切能力,但是由于载体图像经过滤波后损失了大量高频细节,使得图像的质量较差。随后,许多学者进一步研究了数字全息水印技术,针对打印扫描攻击的全息水印技术也引起了学者的注意^[7-9]。2007年,Sun等^[10-11]将双随机相位调制加密技术与同轴全息技术结合,提出了加密同轴傅里叶全息技术,由于使用的同轴全息在全息图傅里叶变换时产生了不可消除的共轭像,在双随机逆调制时被打散为噪声信息叠加在图上,使得这种技术生成的全息图解密后所得水印图上叠加了较多的噪声,同时该方法并没有用客观指标评价水印信息的不可见性。2008年,孙云峰等^[12]提出的抗打印扫描的数字水印技术并未对水印信息的不可见性做说明,同时安全性较差。2009年,黄素娟等^[13]提出了共轭对称延拓傅里叶计算全息,并将其应用在全息水印技术^[14]中,该算法水印的安全性较差,水印信息经过傅里叶变换即可得到,实用价值较为欠缺。

本文研究了双随机相位加密技术和傅里叶共轭对称性,提出了一种新的加密计算全息技术,将双随机相位调制的复数图像利用共轭对称延拓傅里叶计算全息方法记录为全息图像。由于现有的全息水印算法大多靠人眼辨别恢复出的水印信息,无法准确定位版权人,这就使得版权的确定变得更加困难,所以本文选择使用快速识别矩阵(QR)码作为原始水印,来解决这一突出问题,QR码解码也解决了全息水印^[15-17]算法客观评价的问题。

2 一种解密图像无背景噪声的加密全息数字水印技术

2.1 共轭对称延拓傅里叶计算全息的加解密

加密全息图的生成过程主要分为两部分,即将水印信息进行空域和频域的随机模板调制,得到一个复数的加密图像,再对复数加密图像进行共轭对称延拓傅里叶计算全息记录为实值图像。设原始水印图像已归一化为 $f(x,y)$, 图像的大小为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 。 $p(x,y)$ 、 $b(u,v)$ 分别为均匀分布在 $[0,1]$ 上的两个独立白噪声矩阵模板,其中 (x,y) 为空域坐标, (u,v) 为频域坐标。设双随机相位加密后的复数图像为 $\varphi(x,y)$, 则加密后的复数图像为

$$\varphi(x,y) = \{f(x,y)\exp[j2\pi p(x,y)]\} \otimes h(x,y), \quad (1)$$

式中 $h(x,y)$ 是 $\exp[j2\pi b(u,v)]$ 的脉冲响应,符号 \otimes 表示卷积操作。

对得到的复数图像构造大小为 $(2M+2)\text{pixel} \times (N+1)\text{pixel}$ 的共轭复数图像 $\Phi(x,y)$, 表示为

$$\Phi(x,y) = \begin{cases} 0, & x=0, \text{ or } y=0, \text{ or } x=M+1 \\ \varphi(x,y), & x=1, \dots, M, y=1, \dots, N \\ \{R_{180}[\varphi(x,y)]\}^*, & x=M+2, \dots, 2M+1, y=1, \dots, N \end{cases}, \quad (2)$$

$R_{180}[\varphi(x,y)]$ 表示对复数图像做 180° 的旋转, * 表示对复数做共轭运算, 设记录得到的实值全息图像为 $H(x,y)$, 则

$$H(x,y) = \mathcal{F}[\Phi(x,y)], \quad (3)$$

式中 \mathcal{F} 表示离散傅里叶变换。由傅里叶变换的性质,即共轭对称的复数矩阵经过快速傅里叶变换后得到实数矩阵,对实数矩阵编码从而得到包含振幅和相位信息的实数图像即全息图。

全息图的解密是上述过程的逆过程,即对全息图像 $H(x,y)$ 做逆傅里叶变换得到 $\Phi(x,y)$, 从复数图像 $\Phi(x,y)$ 中提取出 $\varphi(x,y)$, 利用解密模板对复数图像解密,得到解密后的图像。

2.2 快速识别矩阵码

快速识别矩阵码也称 QR 二维码^[18],属于二维条形码,是一种利用 Reed-Solomon(RS)纠错算法的纠错编码。其纠错等级可以选择,有 7%、15%、25%、30% 四个纠错等级。每个 QR 码符号由名义上的正方形模块构

成,它由编码区域和包括寻象图形、分隔符、定位图形和校正图形在内的功能图形组成。功能图形不能用于数据编码。符号的四周由空白区包围,空白区域没有编码作用和实际功能作用。图1为QR码版本7符号的结构图。

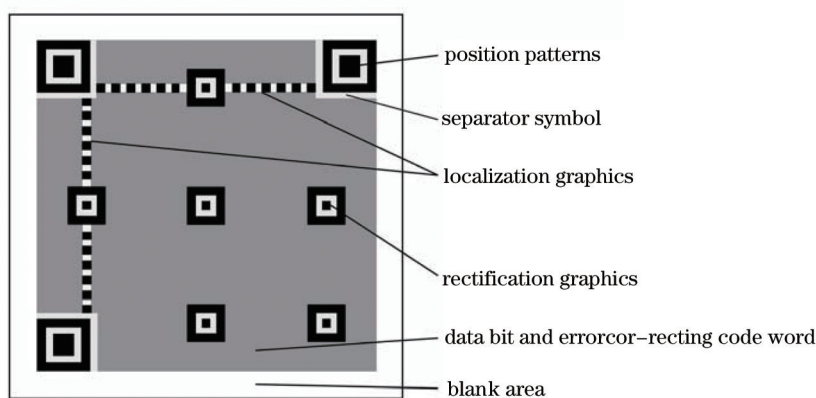


图1 QR码结构图

Fig.1 Images for structure of QR code

QR码不仅是一幅图片,更包含了一定的文字信息,其在日常生活中的使用已经非常普遍。如姓名、地址、网站、电话和邮箱等文字信息均可以通过QR码生成器简单、快速地得到对应的QR码图片。此外,QR码作为原始二值水印信息为准确定位版权人提供了有效的途径。

2.3 算法分析

这里充分研究了双随机相位调制加密技术和共轭对称延拓傅里叶计算全息技术,提出了新的加密全息技术,主要分为两个步骤:1)将原始的二值图像进行空域和频域的双随机相位调制,得到加密的白噪声复数图像,保证水印的安全性;2)利用共轭对称延拓傅里叶计算全息技术将得到的复数图像记录为实值的全息图。由于这种技术在全息图逆傅里叶变换时没有普通同轴全息不可避免的共轭像的生成,得到的对称像是可以分割对应解密的,所以提取相应部分解密出的图像对比度高,理论上没有任何噪声。但是由于实际过程中对全息图进行8位深度编码会对其像素值进行一定放缩和取整,所以实际情况中会引入一定的噪声,但是由于解出的图像对比度极高,人眼也难以辨别实际情况的噪声。

现阶段全息水印算法的原始水印均为含文字或图形的普通二值图像,并且为了尽量降低图像的能量,二值图像有意义图形部分均较小,且有意义的文字也较少。当含水印图像受到打印扫描等攻击时,提取出的水印视觉质量较差,主观评判也使得版权的归属判别比较困难。由于QR码不仅代表一幅图像,也表示了一定的文本信息,所以将其作为水印可以解决现有全息水印算法无法准确定位版权人和只能进行主观评价的问题。但是由于QR码的纠错能力是有限的,要在一定的限度内才可以解码读取文本信息,所以对生成全息图像的算法要求更高。由于这里提出的加密全息在解密时无噪声叠加干扰,为QR码作为原始二值水印信息的使用提供了一定的保障。这里将生成的全息图隐藏在原始图像的Haar小波对角线中频系数中,含水印图像的视觉效果良好,经过打印扫描攻击后,提取的QR码依然可以准确解码。

3 水印信息的嵌入与提取

3.1 水印信息的预处理

由于QR码的纠错能力有限,所以不能直接将其作为原始的二值水印进行全息加密,需要进行一定的预处理进一步提高其纠错性能。因为QR码中一些固定非编码区域是不起编码纠错作用的QR码“模板”,为了减少全息图的能量将其裁去不作为原始二值图像的一部分。再将QR码剩余的部分进行像素扩充,并放置在相应的黑背景上得到最终的原始二值图像。像素扩充的目的主要是增加QR码的纠错性能。具体步骤为:

- 1) 将作为版权信息的字符串进行编码,转换为标准QR二维码;

2) 裁切掉 QR 二维码的部分非编码区域,即外围空白区域、寻象图形、分隔符,并将剩余非编码区域的校正图形、定位图形和编码区域保留;

3) 将保留部分的二值图像进行扩充,即每一像素扩充为 3×3 大小的像素块,块中像素值均等于对应的像素值,如图 2 所示。并将所有像素块按顺序添加在黑色图片背景上,作为待加密二值水印图像 $f(x,y)$,并将像素块的首位置记录作为密钥。

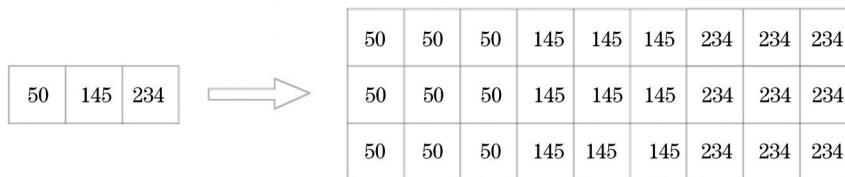


图 2 像素扩充示意图

Fig.2 Diagram of pixel expansion

3.2 水印信息的嵌入

将 3.1 节得到的待加密二值水印根据 2.1 节的加密全息生成过程得到对应加密的全息水印图像,并嵌入在原始图像 Haar 小波对角线中频系数中,具体步骤为:

1) 生成两个均匀分布的随机模板 $p(x,y)$ 和 $b(u,v)$,作为空间域和频率域的相位调制加密模板,并将其作为密钥;

2) 对二值水印图像 $f(x,y)$ 进行以 $p(x,y)$ 为模板的空域相位调制,对调制后图像进行傅里叶变换得到复数图像,对其进行以 $b(u,v)$ 为模板的频域相位调制,再对调制后图像进行逆傅里叶变换,最终得到复数的加密图像 $\varphi(x,y)$;

3) 将得到的复数图像 $\varphi(x,y)$ 进行共轭、对称、延拓计算,并对其做傅里叶变换,得到实值的计算全息图像 $H(x,y)$,作为待嵌入的全息水印;

4) 对原始灰度图像进行 Haar 小波变换分解,得到原始图像的一级低频分量,再对低频分量进行 Haar 小波变换分解,得到原始图像的中频对角线分量系数矩阵;

5) 将步骤 4) 得到的全息水印乘以嵌入强度 k 替换原始图像的中频对角线分量系数矩阵,将水印嵌入到原始图像的中频对角线分量系数矩阵中,实现水印的嵌入

$$I' = k \times H, \tag{4}$$

式中 k 为水印嵌入强度, H 为全息图, I' 为嵌入水印信息后的图像。

6) 对步骤 5) 得到的嵌入水印的原始图像采用二级逆 Haar 小波变换,得到含水印的图像。

3.3 水印信息的提取

水印信息的提取是水印信息嵌入、水印预处理过程的逆过程,具体步骤为:

1) 将含水印的灰度图进行 Haar 小波变换分解,得到含水印图像的一级低频分量,再对低频分量进行 Haar 小波变换分解,得到含水印图像的中频对角线分量系数矩阵,作为提取出的全息水印信息 $H'(x,y)$;

2) 对提取出的信息进行逆傅里叶变换,取所得图像的一半,并将第一行和第一列的像素裁掉,得到对应待解密的复数图像 $\varphi'(x,y)$;

3) 将复数图像 $\varphi'(x,y)$ 进行傅里叶变换,对得到的频域图像进行以 $-b(u,v)$ 为模板的频域相位调制,再进行逆傅里叶变换,求其幅值并二值化得到提取出的二值水印图像 $f'(x,y)$;

4) 利用密钥在提取的二值水印图像对应位置处,取出相应像素块,根据多数原则确定每个 3×3 块所代表的水印位,即计算对应提取的像素块中像素值“0”、“1”的个数,如果像素值“0”的数量大于像素值“1”的数量,则此块代表水印位“0”,反之代表水印位“1”。并将得到的水印位放到对应的位置,添加被裁掉的 QR 码“模板”信息重新组合成 QR 码图像;

5) 将得到的 QR 码用计算机或手机解码软件进行解码得到版权信息字符串。

4 仿真实验

为了验证所提出算法的稳健性,设计了相应的仿真实验。采用512 pixel×512 pixel的8位“Lena”灰度图像作为原始图像,如图3(a)所示。将字符信息“上海理工大学综合楼 A205”编码形成QR码作为原始的水印,如图3(b)所示。并利用3.1节方法得到预处理后的二值水印,尺寸为63 pixel×127 pixel,如图3(c)所示。



图3 (a)原始图像; (b) QR码; (c)水印图像

Fig.3 (a) Original image; (b) QR code; (c) watermark image

图4(a)为所提算法得到的8位全息水印图像,对应重建图像(未二值化)如图4(b)所示。图4(c)为文献[11]中生成全息图的解密图像。图5(a)是图4(b)的重建像灰度直方图,由直方图可以看出,虽然全息图被压缩到8位,但是恢复出的重建像仍然有极高的对比度,人眼无法看出叠加的背景噪声。图5(b)是图4(c)的重建像灰度直方图,从图5(b)和图4(c)可以看出文献[11]中生成全息图的解密图像背景叠加了一定的噪声,影响了解密图像的质量。



图4 (a)加密全息图像; (b)再现图像; (c)文献[11]中的再现图像

Fig.4 (a) Encrypted hologram and (b) its reconstructions; (c) reconstruction of hologram in Ref[11]

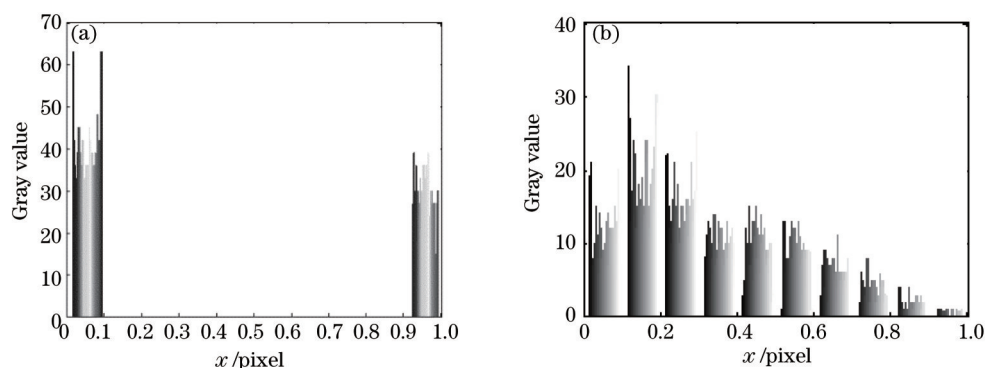


图5 全息图再现像的直方图。(a)图4(b)重建像的直方图; (b)图4(c)重建像的直方图

Fig.5 Histograms of the reconstruction images. (a) Histogram of Fig.4(b); (b) histogram of Fig.4(c)

利用3.2节方法将水印嵌入在原始图像的Haar小波对角线中频中得到含水印图像,如图6(a)所示。嵌入强度 k 为0.1,对应的含水印图像的峰值信噪比(PSNR)为37.5015,说明含水印图像与原始图像的相似度高,视觉质量好。对应提出的二值水印和重组的QR码如图6(b)和6(c)所示。重组的QR码可以准确解码得到“上海理工大学综合楼 A205”字符串。

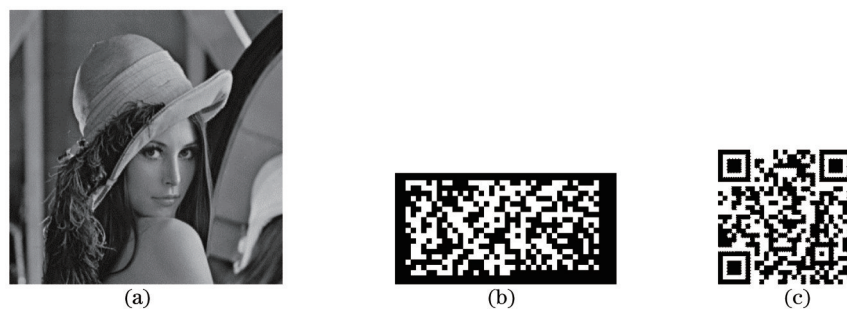


图 6 (a)含水印图像; (b)提取出的水印; (c) QR 码

Fig.6 (a) Watermarked image; (b) extracted watermark; (c) QR code

4.1 打印扫描攻击实验

实验将含水印的“Lena”电子稿图像进行印刷输出并扫描,再进行水印的提取来验证所提算法抵抗打印扫描攻击的稳健性。打印扫描实验采用 HPZ3200 打印机作为硬拷贝输出设备,打印分辨率为 150 inch^{-1} ($1 \text{ inch} = 2.54 \text{ cm}$),印刷稿的扫描输入设备为 EPSON V500 扫描仪,扫描分辨率设置为 600 inch^{-1} 。从扫描得到的电子稿中提取的水印图像和重组的 QR 码如图 7 所示。打印扫描攻击使得图像的细节信息损失较多,导致二值化后的提取水印产生了一定的损失,但是水印轮廓视觉上较为清晰,经过多数原则初步纠错后重组的 QR 码依然可以正确解码得到版权信息字符串。由于打印稿在使用时难免会受到污损,这里模拟了涂鸦攻击来检测所提算法得到图像的打印稿抵抗污损的能力。实验结果如图 8 所示,虽然提取的二值化水印损失进一步增加,但最后重建的 QR 码图像可以正确解码。

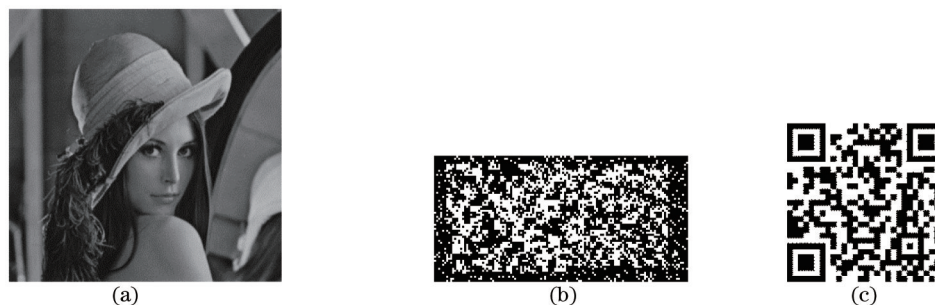


图 7 打印扫描攻击实验结果。(a)水印图像; (b)提取出的水印; (c) QR 码

Fig.7 Experimental result of print-scan attack. (a) Watermarked image; (b) extracted watermark; (c) QR code

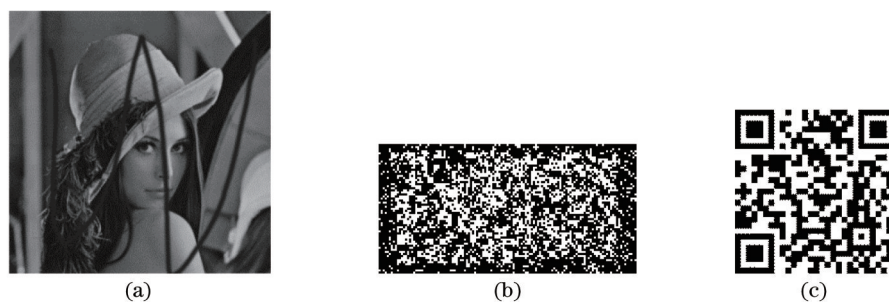


图 8 对打印扫描图像进行涂鸦攻击实验的结果。(a)涂鸦攻击的水印图像; (b)提取的水印; (c) QR 码

Fig.8 Experimental result of composite attacks of print-scan and painting. (a) Watermarked image under painting attack; (b) extracted watermark; (c) QR code

4.2 亮度、对比度调整攻击实验

由于人们的审美逐渐提高,加之照片处理软件的普及,对图片进行亮度和对比度调整后应用变得极为广泛,也是人为主观攻击的一种重要形式。由于全息图像对像素非线性调整攻击有很强的抵抗能力,所以用全息图像作为水印可以有效地抵抗亮度和对比度的人为调整攻击。在 Photoshop 中对图像进行亮度和对比度调整攻击,在“图像—调整—亮度/对比度”选项框中,将亮度和对比度的值分别从 0 调整到 100,得到调整后

的图像。将含水印图像的亮度和对比度均进行了大幅度提高,并对应提取出水印信息,实验结果如图9所示。提取出的水印经二值化后损失较少,经过多数原则初步纠错并重组的QR码均可正确解码。



图9 亮度和对比度调整攻击实验的结果。(a)亮度调整的水印图像和(b)提取的水印; (c)对比度调整的水印图像和(d)提取的水印
Fig.9 Experimental results of brightness and contrast adjustment attack. (a) Watermarked image with brightness adjustment and (b) its extracted watermark; (b) water marked iamge with contrast adjustment and (b) its extracted watermark

4.3 其他攻击实验

除了打印扫描实验和亮度、对比度调整实验外,这里还对算法抵抗裁切、噪声、滤波和压缩攻击的稳健性进行了测试。噪声实验选择了加性噪声和乘性噪声进行测试,分别为高斯噪声、椒盐噪声和 Speckle 噪声,滤波实验选择了高斯滤波。实验结果如表 1 所示。

表 1 其他攻击实验结果

Table 1 Experimental result of other attacks

Attack	PSNR between original image and watermarked image	Normalized correlation coefficient (NC) between original QR code and extracted QR code	Can be decoded or not
Cropping (20%)	14.6655 dB	0.9969	Yes
Cropping (30%)	13.3026 dB	0.9892	Yes
Cropping (40%)	12.3349 dB	0.9522	Yes
Cropping (50%)	11.1517 dB	0.9322	No
Gaussian noise (0.001)	28.3853 dB	0.9599	Yes
Gaussian noise (0.002)	25.7550 dB	0.8567	No
Salt & pepper noise (0.002)	30.0838 dB	0.9861	Yes
Salt & pepper noise (0.003)	29.0294 dB	0.9476	No
Speckle noise (0.005)	28.8866 dB	0.9846	Yes
Speckle noise (0.006)	28.2275 dB	0.9469	No
Gaussian low-pass filter (3×3)	36.1121 dB	1	Yes
JPEG (Q=70)	34.0822 dB	0.9769	Yes
JPEG (Q=60)	33.6879 dB	0.9122	No

表 1 中提取 QR 码归一化相关系数(NC)值栏中的 NC 值计算未涉及裁掉的 QR 码部分,所算值为 QR 码嵌入部分的 NC 值。表 1 中也列举了各个实验的临界实验值,即不可解码时对应的攻击参数。由表 1 可知,算法抵抗裁切的性能较好,裁切 50%及以上时,提取的 QR 码虽不可以解码,但是 NC 值仍为 0.93 以上;抵抗 JPEG 压缩的能力较为有限,当压缩因子在 60%及以下时,提取的 QR 码无法解码;对噪声的抵抗性较好,当受攻击图像 PSNR 较低,质量下降严重时,提取的 QR 码也可解码;对高斯滤波有很强的稳健性。从表 1 中可以看出,利用 QR 码作为水印虽然可以有效地定位版权人,使得有效版权信息增加,但是这种方式对算法的要求极高,当所提出的 QR 码不可正确解码时,其 NC 值也均在 0.85 以上。

5 结 论

提出了一种新的加密全息方法,使用共轭对称延拓傅里叶计算方法将双随机相位调制加密后的复数图

像记录为实值全息图。全息图最终解密后的图像不会叠加视觉可分辨的噪声污染,将加密全息图作为水印信息大大提高了算法抵抗打印扫描攻击的稳健性,由于算法的这种优势,使得利用QR码作为水印信息准确定位版权归属成为可能。算法可以有效抵抗打印扫描攻击和亮度、对比度调整攻击。但是由于算法是针对打印扫描攻击设计的水印技术,所以其抵抗一般图像处理攻击的能力相对并不突出,今后会进一步研究全息图像的嵌入方法增加其相关的稳健性。本文提出的数字水印技术可以很好地应用到印刷稿版权保护实践中,有效保护版权所有者的权益。

参 考 文 献

- 1 Bai Taotao, Liu Zhen, Lu Peng. Digital watermarking scheme in Contourlet domain based on QR code [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2014, 25(4): 769-776.
白韬韬, 刘真, 卢鹏. 基于QR码的Contourlet域数字水印算法[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(4): 769-776.
- 2 M Urvoy, D Goudia, F Atrousseau. Perceptual DFT watermarking with improved detection and robustness to geometrical distortions [J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2014, 9(7): 1108-1119.
- 3 E D Tsougenis, G A Papakostas, D E Koulouriotis, *et al.*. Adaptive color image watermarking by the use of quaternion image moments [J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(14): 6408-6418.
- 4 A Keskinarkaus, A Pramila, T Seppanen. Image watermarking with feature point based synchronization robust to print - scan attack [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2012, 23(3): 507-515.
- 5 Ye Tianyu. A watermarking algorithm for print forgery prevention based on comparison between norm and mean of norm [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(6): 126-133.
叶天语. 基于范数与范数均值比较的印刷防伪水印算法[J]. *光电工程*, 2011, 38(6): 126-133.
- 6 N Takai, Y Mifune. Digital watermarking by a holographic technique [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(5): 865-873.
- 7 Shi Xiaoyan, Zhao Daomu. Image hiding in Fourier domain by use of joint transform correlator architecture and holographic technique [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(5): 766-772.
- 8 C Martinez, O Lemonnier, F Laulagnet, *et al.*. Complementary computer generated holography for aesthetic watermarking [J]. *Opt Express*, 2012, 20(5): 5547-5556.
- 9 Li Jianzhong. An optimized watermarking scheme using an encrypted gyrator transform computer generated hologram based on particle swarm optimization [J]. *Opt Express*, 2014, 22(8): 10002-10016.
- 10 Sun Liujie, Zhuang Songlin. Watermarking by encrypted Fourier holography [J]. *Opt Eng*, 2007, 46(8): 085801.
- 11 Sun Liujie, Zhuang Songlin. Forgery prevention based on inline Fourier holographic watermark with double random phase encryption [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 621-624.
孙刘杰, 庄松林. 双随机相位加密同轴傅里叶全息水印防伪技术[J]. *光学学报*, 2007, 27(4): 621-624.
- 12 Sun Yunfeng, Zhai Hongchen, Yang Xiaoping, *et al.*. Application of Fourier CGH digital watermarking technique in color image forgery-prevention printing [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2008, 19(7): 952-955.
孙云峰, 翟宏琛, 杨晓苹, 等. 傅里叶计算全息数字水印在彩色图像印刷防伪中的应用[J]. *光电子·激光*, 2008, 19(7): 952-955.
- 13 Huang Sujuan, Wang Shuozhong, Yu Yingjie. Computer generated holography based on Fourier transform using conjugate symmetric extension [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(2): 952-958.
黄素娟, 王朔中, 于瀛洁. 共轭对称延拓傅里叶计算全息[J]. *物理学报*, 2009, 58(2): 952-958.
- 14 Huang Sujuan, Wang Duyao, Liu Xiaojing, *et al.*. Hardcopy hologram watermarking based on discrete wavelet transform [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(9): 1415-1420.
黄素娟, 王杜瑶, 刘晓静, 等. 基于小波变换的硬拷贝全息水印[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(9): 1415-1420.
- 15 Chen Daqing, Zhou Hao, Tao Zhi, *et al.*. Fourier computer-generated hologram digital watermarking with nonlinear amplitude limiting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0207002.
陈大庆, 周皓, 陶智, 等. 非线性限幅傅里叶计算全息的数字水印方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0207002.
- 16 Chen Jiazhen, Zheng Zihua, Lian Guiren, *et al.*. Computer-generated holographic watermark technology based on four detour phases encoding scheme [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(6): 060901.
陈家祯, 郑子华, 连桂仁, 等. 基于四阶迂回相位编码的计算全息水印技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(6): 060901.

17 Chen Jiazhen, Zheng Zihua, Lian Guiren, *et al.*. Nonuniform quantization digital holography and its application in information hiding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(12): 120901.

陈家祯, 郑子华, 连桂仁, 等. 非均匀量化数字全息图及在信息隐藏中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(12): 120901.

18 国家质量技术监督局. GB/T 18284-2000,快速响应矩阵码[S]. 2000.

栏目编辑: 何卓铭