

DOI:10.16136/j.joel.2023.11.0478

基于QR码的Contourlet-SVD域全息水印算法

马婷*, 李佳

(中国民用航空飞行学院 计算机学院, 四川 广汉 618307)

摘要:为了解决水印算法中存在水印隐藏程度和鲁棒性的失衡问题,在Contourlet-SVD域将QR(quick response)码与全息技术相联合,提出一种基于QR码的Contourlet-SVD域数字全息水印算法。首先,选择不同的载体图像执行3层Contourlet变换,鉴于低频系数的优势,对低频进行奇异值分解(singular value decomposition, SVD)联合变换;其次,选择“飞行学院”图像经过QR编码生成的QR码作为原始水印图像,对其进行共轭对称扩展傅里叶数字全息,得到QR码全息水印;再次,将全息水印叠加到SVD分解得到的奇异值中,完成水印信息的嵌入。通过仿真实验验证,该算法嵌入水印信息后的图像清晰度较好,峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)超过了31 dB,相似性系数NC(normalized correlation)值达到了0.9890。将图像进行抵抗测试,提取的水印信息可以较清晰地辨别,尤其是椒盐噪声、高斯噪声和中通滤波攻击,NC值均达到0.90以上。

关键词:QR码; Contourlet变换; 奇异值分解(SVD); 数字全息算法

中图分类号: TN911.73; TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)11-1210-09

The holographic watermarking algorithm in the Contourlet-SVD domain based on QR code

MA Ting*, LI Jia

(School of Computer Science, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, Sichuan 618307, China)

Abstract: In order to solve the imbalance between watermark hiding degree and robustness in the watermarking algorithm, the quick response (QR) code and holographic technology are combined in the Contourlet-SVD domain. A digital holographic watermarking algorithm based on QR code in the Contourlet-SVD domain is proposed. First, the different carrier images are chosen to perform 3-layer Contourlet transform. In view of the advantage of low frequency coefficient, the singular value decomposition (SVD) joint transform is performed for the low frequency coefficient. Second, the QR code which is encoded by “Flight School” image is chosen as the original watermark image. The QR code holographic watermark is obtained by conjugating symmetry extended Fourier digital hologram. Thirdly, the holographic watermark is superimposed on the singular value obtained by SVD to complete the embedding of the watermark information. The simulation experiment proves that the image clarity of the algorithm is better after embedding the watermark information. The peak signal-to-noise ratio (PSNR) value of the algorithm is above 31 dB. The similarity normalized correlation (NC) of the algorithm reaches 0.9890. The extracted watermark information can be clearly identified after the image has been tested against resistance. The NC values all reach above 0.90 especially for salt and pepper noise, Gaussian noise and mid-pass filtering attacks.

Key words: quick response (QR) code; Contourlet transform; singular value decomposition (SVD); digital holographic algorithm

0 引言

人工智能及大数据发展迅速,伴随着很多安

全问题,水印对数字产品的版权问题起到了至关重要的作用。以版权信息为处理对象,数字水印技术^[1-4]可用来完成对其的隐藏,从而为其提供安

* E-mail: mtcafuc@163.com

收稿日期:2022-10-31 修订日期:2022-11-08

基金项目:国家自然科学基金项目(60472127,60879022)和中国民用航空飞行学院面上项目(J2021-059)资助项目

全保障,在对纠纷的维权过程中,可通过对水印信息的提取来对归属进行验证,因此,无论是对于信息清晰度以及算法的隐蔽程度,还是对于版权信息所具有的安全性,其均发挥着重要作用。

QR 码(quick response code)属于二进制代码,不仅可用来充当条形一维码,还可用来充当圆形以及矩阵式等的二维码,码中可对大量可用信息进行储存,对于 QR 码来说,其所存在的纠错能力^[5]极为出色,QR 码已经被广泛应用在人们日常生活之中,可借助它来完成扫码操作,从而迅速实现对相关存储信息的获取。随着发展,QR 码的水印算法也相继出现并且取得了较好的实验结果。文献[5]中,以三变换协同联接为理论基础,即 DWT-DCT-SVD,将 QR 码水印信息嵌入到了其复合算法之中,以实验结果为依据,水印信息具有极为出色的隐蔽性,同时算法的稳健性较强劲,但算法对二维图像描述的准确性仍需提高。文献[6]中,在对彩色 QR 码的研究过程中,对水印算法进行了引入,其不仅能够实现复合加密功能,同时还具有极为出色的安全性,以实验结果为依据,算法具有较为出色的抗攻击能力,但在攻击能力上还能再进一步提升。

光学处理技术具有信息量相对较大等优势。全息图是数字全息技术通过计算机编码、数值计算等形式形成的,并且具有不可撕毁性,在水印算法中可以体现在抗攻击的鲁棒性,并记录了很多物体的信息。在 2002 年中,TAKAI 等^[7]在对数字水印算法的研究过程中,首次对全息技术进行了引入,并取得了良好的效果,从此之后,研究者开始加大对该水印算法的研究力度。文献[8]主要在 DFT 域中对全息盲水印算法进行了介绍,提出基于盲水印对相关算法,但载体图像并未得到运用,因此需对信息所具有的隐藏程度展开深入分析,以实验结果为依据,对于压缩以及剪切来说,攻击行为形成极为强大的防御力,对其他攻击仍需提高。文献[9]以彩色图像为研究对象,提出了 DWT-DCT 全息水印算法,以实验结果为依据,在对算法的稳固性以及隐蔽性进行评价时,能够取得良好的评价效果,算法相对较为成熟,仍需在几何攻击抵抗力方面进一步深入研究。文献[10]以 Contourlet 域为理论基础,以实验结果为依据,在旋转对算法进行了攻击时,依然能够实现清晰水印的提取,在加密处理时可以深入研究。文献[11]则是全息和混沌编码的双重加密方法。文献[12]以 DWT-DCT 域为理论基础,提出了全息水印算法,以实验结果为依据,在噪声以及线性等攻击条件下,该算法能够获得较高的 NC (normal-

ized correlation)值,但其他攻击的鲁棒性表现并未得到改善。文献[13,14]中,对水印的嵌入区域展开了深入研究,以实验结果为依据,该算法进一步提升了其隐蔽性以及安全性,但在隐蔽性及鲁棒性的兼顾方面仍需深入研究。文献[15]中,提出了基于 DCT 域的全息水印算法,以实验结果为依据,在对抗剪切方法的计算过程中,该算法可获取较高的 NC 值,但该嵌入算法仅使用了部分原载体图像,因此算法的隐蔽性效果仍需考量。

综上所述,本文将 QR 码及全息技术结合,加强水印信息的安全性及隐藏程度,应用到 Contourlet-SVD 域,提出一种基于 QR 码的 Contourlet-SVD 域全息水印算法。不仅是对于全息技术,还是对于 QR 码,其在对水印信息的保密过程中,均可对大量信息进行存储,算法在对更多水印信息的嵌入过程中,能够避免其受到过大影响,使水印具有不可见性,另外,全息图存在着不可撕毁性,Contourlet 变换可用来对二维图像进行捕捉,同时奇异值分解(singular value decomposition, SVD)存在着极高的稳定性,能够使算法的鲁棒性对攻击保持较高的抵抗能力,最终使水印的鲁棒性以及不可见性能够达到平衡状态。

1 基本理论

1.1 全息技术

傅里叶全息技术实际上就是对光全息的产生进行模拟,其中生成中假定物像 $I(x, y)$,与随机相位模板 $e^{j\theta(x, y)}$ 相乘,进行调制用以降低光全息动态范围,得到:

$$f(x, y) = I(x, y)e^{j\theta(x, y)}, \quad (1)$$

式中, $\theta(x, y)$ 为相位, $f(x, y)$ 为随机相位模板调制后的物像,再对式(1)进行快速傅里叶变换获得傅里叶频谱物光波,具体如下:

$$O(x_0, y_0) = \iint f(x, y) e^{-j\theta(x_0, y_0)} dx dy = A(x_0, y_0) e^{j\theta(x_0, y_0)}, \quad (2)$$

式中, $O(x_0, y_0)$ 为物光波, $A(x_0, y_0)$ 为物光波的模。

对于物光波以及参考光波来说,两者存在着平行关系,以参考波为处理对象,以下为其表达式^[11]:

$$W(x_0, y_0) = W_0 e^{j2\pi\alpha x_0}, \quad (3)$$

式中, $W(x_0, y_0)$ 为参考光波, α 为载频系数。

经由对参考光波式(3)和物光波式(2)进行干涉得到的全息面的光强,可知:

$$\begin{aligned} H(x_0, y_0) &= |O(x_0, y_0) + W(x_0, y_0)|^2 = \\ &|O(x_0, y_0)|^2 + |W(x_0, y_0)|^2 + O(x_0, y_0) \cdot \\ &W(x_0, y_0)^* + W(x_0, y_0)O(x_0, y_0)^* = \\ &A(x_0, y_0)^2 + W_0^2 + A(x_0, y_0)W_0 e^{j[\theta(x_0, y_0) - 2\pi\alpha x_0]} + \end{aligned}$$

$$A(x_0, y_0)W_0 e^{j[2\pi x_0 - \theta(x_0, y_0)]} = A(x_0, y_0)^2 + W_0^2 + A(x_0, y_0)W_0 \cos [2\pi \alpha x_0 - \theta(x_0, y_0)], \quad (4)$$

式中, * 指复数之间的共轭运算。

由于公式中零频项、自相关项对物像的再现具有一定的影响作用,所以将它们去掉保留后式,其中物光波的最大振幅 $A(x_0, y_0)$ 的最大者设为 1,参考光波的振幅 W_0 设为 1,得到记录物光波全部信息的全息面为:

$$H(x_0, y_0) = 0.5(1 + A(x_0, y_0) \cos [2\pi \alpha x_0 - \theta(x_0, y_0)]). \quad (5)$$

以参考光波为研究对象,将重构光设为其共轭光波 $W(x_0, y_0)^* = W_0 e^{-j2\pi x_0} = e^{-j2\pi x_0}$,便可对再现的数字全息技术进行获取:

$$B(x, y) = \iint A(x_0, y_0) \cos [2\pi \alpha x_0 - \theta(x_0, y_0)] \cdot e^{-j2\pi x_0} e^{j2\pi(x_0 x + y_0 y)} dx_0 dy_0 + 1/2 f^* (-x, -y) + 1/2 f(x - 2\alpha, y). \quad (6)$$

以学校名称为处理对象,图 1(a)对其相关图像进行了展示,在借助傅里叶全息技术完成了对其的处理后,便可获取全息图为图 1(b),然后借助再现全息技术完成了对其的处理之后,便可对图 1(c)进行获取。

图 2(a)为图 1(a)对应的 QR 编码,对 QR 编码进行再现全息技术处理后的全息图如图 2(b)所示。

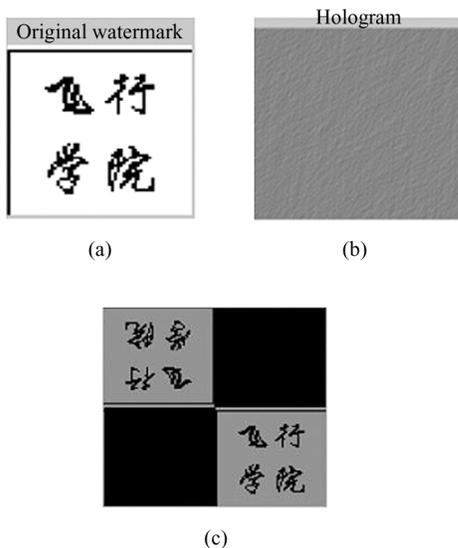


图 1 水印图像、全息图和再现全息图:
(a) 水印图像; (b) 全息图; (c) 再现全息图
Fig. 1 Watermark image, hologram image and reproduction hologram image:
(a) Watermarked image;
(b) Hologram; (c) Reconstructed hologram

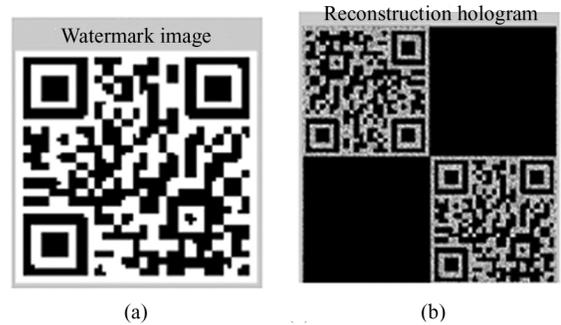


图 2 QR 图和再现全息图:(a) QR 图; (b) 再现全息图
Fig. 2 QR image and reproduction hologram image:
(a) QR image; (b) Reconstruction hologram

1.2 QR 码

QR 码是由二进制来进行存取及组成的,它具有结构性,并且是黑白色的矩阵阵列,分为功能区和编码区两部分,如图 3 所示,像素值为 0 和 255,它可以对汉字、数字等不同数据进行识别,数据类型不同,构成的编码模式也不相同。

以飞行学院为研究对象,图 4(a)对其原始水印图像进行了展示,在完成了对其的处理之后,图 4(b)展示了其 QR 码图像。

1.3 Contourlet 变换

以 Curvelet 方向滤波为依据,在 2002 年, VETTERLI 以及 DO 提出了 Contourlet 变换,其可通过二维信号来实现对相关信息的表示^[10]。Contourlet 变换存在着诸多优点,当描述图像任意的平滑边缘时,Contourlet 变换用到的系数更少,系数呈非线性相关性,所以它的表示方法效率更高,并且对于图像的几何特性,Contourlet 变换捕捉的也更为精确。

以 Contourlet 变换为研究对象,拉普拉斯金字塔为其重要组成部分,其冗余性使得此种变换存在着 4/3 的冗余度^[10],可借助水印嵌入原理将足够的水印嵌入到各载体图像之内。

2002 年, VETTERLI 以及 DO 以方向滤波为理论依据,对 Contourlet 变换^[10]进行了提出。

对相同的一条曲线分别用 Wavelet 基, (见图 5(a)) 和 Contourlet 变换基(见图 5(b)) 进行描述,从图 5 中能够看出正方形描述曲线用的个数比长方形个数多。

Contourlet 变换存在着双层滤波器组结构,方向滤波器(directional filter bank, DFB) 以及拉普拉斯金字塔(LP) 为其重要组成部分,图 6 对其结构进行了展示,可将其称作塔形方向滤波器组(pyramid directional filter bank, PDFB)^[10]。

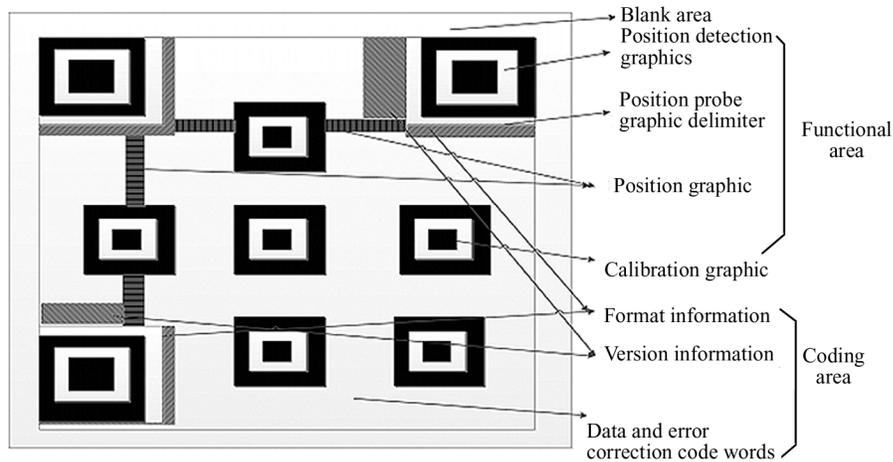


图 3 QR 码结构

Fig. 3 QR code structure

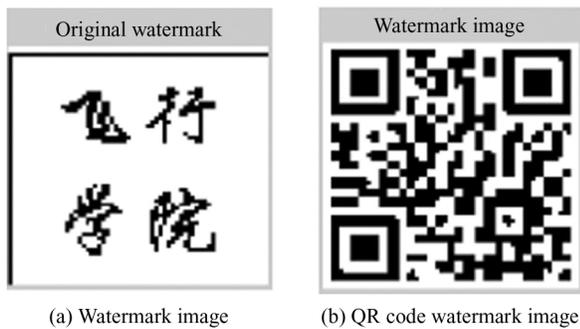


图 4 水印图像和 QR 码水印

Fig. 4 Watermark image and QR code watermark image

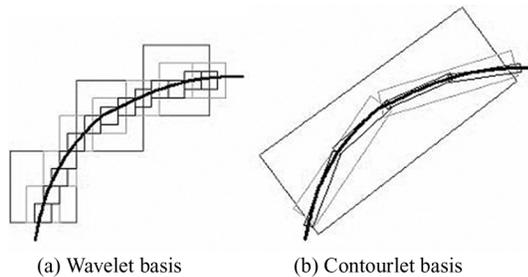


图 5 Wavelet 基和 Contourlet 基的对比

Fig. 5 Wavelet basis and Contourlet basis comparison

在对 Contourlet 变换的使用过程中,需经过两个阶段来达到相应的目的,通过对图 6(a)的观察会发现,实施多尺度分解(LP)属于第一个阶段,即以相关信息为处理对象,借助对系数部分的解析来对其奇异点进行获取。DFB 阶段属于第二个阶段,其可完成对第一阶段 LP 的解析,从而对高频系数进行获取,在系数的方向上,对奇异点进行加载,从而实现带通子带的构建,可将其称为低频系数轮廓。可通过变换将低频部分除去,第二阶段仅对高频系数

进行保留,因此能够避免“泄漏”(leaking)漏洞的出现。Contourlet 解析的 3 层系数,囊括了 4 个、8 个和 16 个细节方向,如图 6(b)所示。

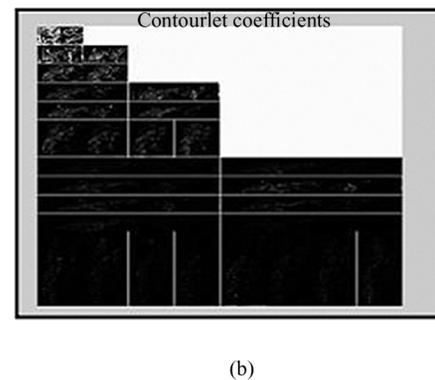
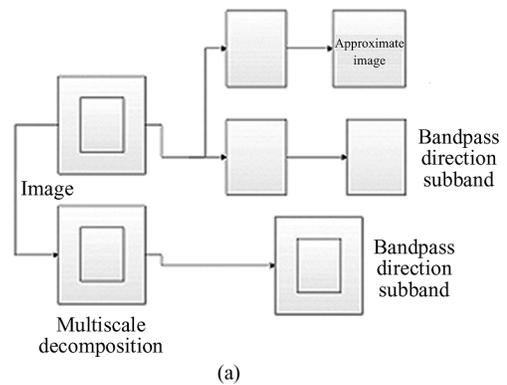


图 6 (a) 3 层离散 Contourlet 变换及 (b) Contourlet 变换系数
Fig. 6 (a) 3-layer discrete Contourlet transform and (b) Contourlet transform coefficients

1.4 SVD

SVD 所存在的几何坚固度极为出色,奇异值可借助其稳固性^[9]被确定,能使水印算法对攻击具有

极强的抵抗能力,对几何攻击的抵抗能力更为出色。

假设图像为 $I \in R^{m \times n}$, 对 I 进行 SVD, 见式(7), 得到一体系的奇异值 $S = \text{diag}(\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m)$, S 中的奇异值均符合 $\nu_1 \geq \nu_2 \geq \dots \geq \nu_n \geq 0$:

$$[U, S, V] = SVD(I), \quad (7)$$

即 $I = USV^T$, 式中, R 表示实数, U 和 V 为正交矩阵。

以上面公式为基础, 得:

$$II^T = USS^T U^T, \quad (8)$$

$$I^T I = US^T S V^T, \quad (9)$$

若 U 和 V 表示为:

$$U = [u_1 u_2 \dots u_n]$$

$$V = [v_1 v_2 \dots v_n], \quad (10)$$

对于 U 以及 V 等矩阵来说, u_i 以及 v_i 分别对其向量进行了表示, 在式(11)之中, 秩由 k 来表示:

$$I = \sum_{i=1}^k \nu_i u_i v_i^T. \quad (11)$$

2 水印算法

2.1 水印嵌入过程

Step1 原始水印信息 W 是由学校名称构成的图像 I 进行 QR 编码加密得到;

Step2 用 $e^{j\theta(x,y)}$ 随机相位因子对 QR 码水印信息 W 进行调制, 然后对调制后的 QR 码水印信息进行二维傅里叶变换 $\iint W(x,y) e^{-j\theta(x_0,x+y_0,y)} dx dy$, 生成全息图 H , 并进行二值化处理 W' ;

Step3 读取各个不同原始载体图像 A , 并对它们进行 3 层 Contourlet 离散变换, 变换后的低频细节矩阵 A_m 进行 SVD : $A_m = U_m S_m V_m^T$;

Step4 经过 Step3 的 SVD, 得到奇异值矩阵 $S_m = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_t]$, 式中, λ_i 为 t 个系列奇异值, 确定嵌入强度系数 α 的值, 实现水印嵌入 $S' = S_m + \alpha W_1$, S' 为已嵌入水印信息后的奇异值矩阵;

Step5 对含水印信息的矩阵再次实施 SVD : $S' = U_{1m} S_{1m} V_{1m}^T$ 。获得的 S_{1m} , 与 Step3 的正交矩阵 U_m 、 V_m 结合施行低频系数的重构;

Step6 在完成了对低频系数部分 A_m 的重构之后, 便可完成对其的 Contourlet 逆变换, 使得所获取的 Contourlet 系数包含着水印 A'_m 。

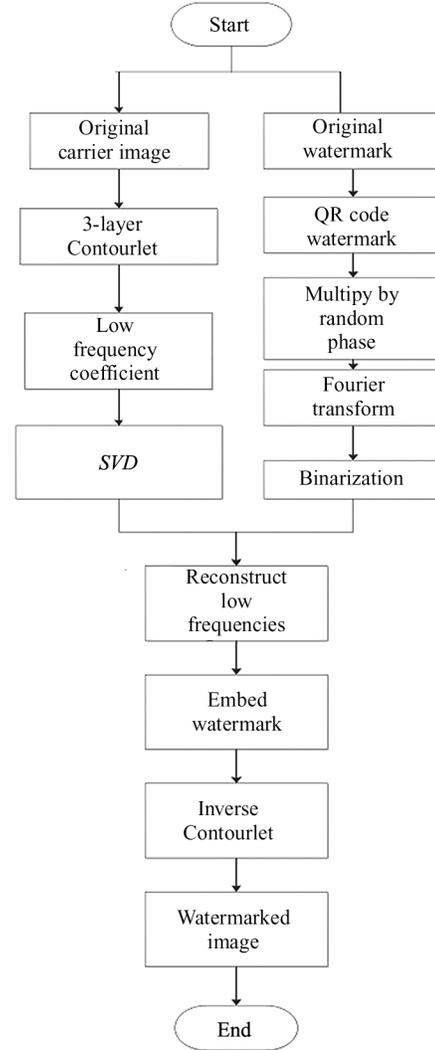


图7 水印的嵌入过程

Fig. 7 Watermark embedding process

2.2 水印提取过程

Step1 以原始载体 A 以及含水印 A' 图像作为处理对象, 进行 3 层 Contourlet 变换;

Step2 依次对 Contourlet 变换之后所获得的低频子带矩阵 A_m 和 A'_m 展开 SVD : $A_m = U_m S_m V_m^T$, $A'_m = U'_m S'_{1m} V_m^T$, 并得到奇异值矩阵 S_{1m} 和 S'_{1m} ;

Step3 在这一过程中选取两个奇异值矩阵作为处理对象, 通过减法运算获取水印奇异值, 然后借助 $W' = (U_{1m} S_{1m} V_{1m}^T - S_m) / \alpha$ 来对全息 QR 码水印图像 W' 进行获取。

Step4 对 W' 全息 QR 码水印图像实行二值化 W_2 , 随即通过逆傅里叶变换对全息图 H_1 进行再现, 完成 QR 码的水印图像提取。

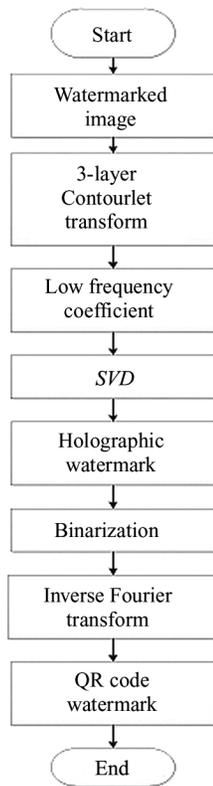


图 8 水印的提取过程

Fig. 8 Watermark extraction process

3 仿真实验

图 9(a)以 512×512 的 Lena 图像作为叠加水印前的实验图像,选取学校名称“飞行学院”组成图像转换的 QR 码作为水印图像,如图 9(b)、(c)所示。式(12)给出了峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR),它是用来衡量加入图 9(d)后的图 9(b)与未加之前的图 9(a)的算法稳定性。

$$PSNR = \frac{10 \lg \{m * n * \max[\max(A * A)]\}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (A - B)^2} \quad (12)$$

式中, A 表示原始载体图像, B 表示通过嵌入算法嵌入水印后的图像, m 和 n 分别为图像长度和宽度的像素宽度。

变换中的滤波器即方向和塔形滤波器选用‘pk-va’基函数。式(13)是根据提取原理提取的水印与原水印相似度 NC 的计算式^[9],算法的鲁棒性用 NC 来进行标准评判,其中 a 代表原水印图像, b 代表算法提取的水印图像。

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a(i, j) * b(i, j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [a(i, j)]^2} \quad (13)$$

对 Lena 图像(图 9(a))经过水印嵌入算法嵌入“飞行学院”转换的 QR 码,如图 9(b)所示,肉眼看两张图的相似度极高,看不到有什么差别,通过式(12)计算峰值信噪比 PSNR 超过了 31 dB,说明算法在水印信息的隐蔽性方面得到了很好的处理,满足了水印不可见性的要求。图 9(c)–(e)为飞行学院的水印图像、转换形成 QR 码的水印图像及通过提取算法提取的水印信息,提取的水印信息与原水印信息相比较为清晰,通过式(13)计算相似度, NC 值达到了 0.989 0,说明算法鲁棒性较好。

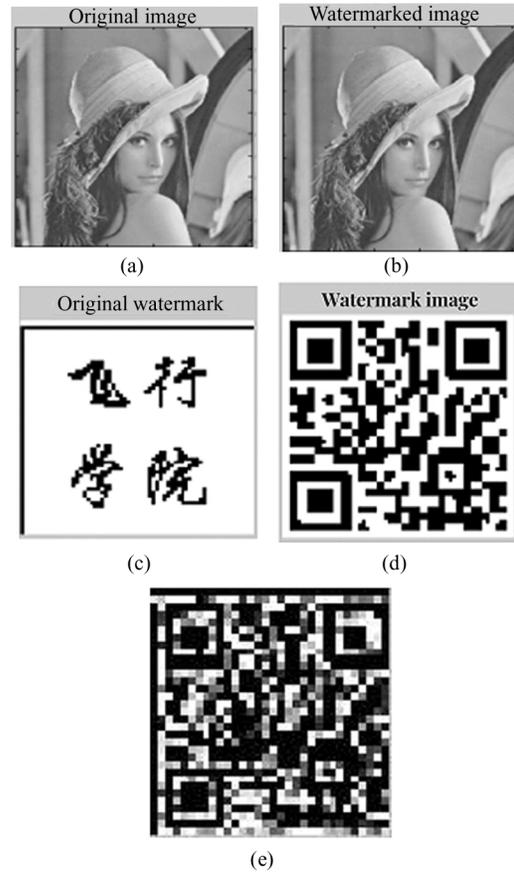


图 9 (a) 叠加水印前的图像; (b) 嵌入水印后的图像; (c) 水印图像; (d) QR 码水印; (e) 提取的水印

Fig. 9 (a) Image before superimposing watermark; (b) Image after superimposing watermark; (c) Watermark image; (d) QR code watermark; (e) Extracted watermark

为了验证算法的鲁棒性,实验依次采用 Barbara 图像、Gameraman 图像、Peppers 图像和 Baboon 图像作为原始载体图像,通过算法提取出的水印信息都较为清晰,如图 10(a)–(d)所示,表 1 给出了各载体含水印图像及遭受攻击测试后提取出的水印图像与计算获得的 NC 数据。

从表 1 给出的 5 幅不同载体含水印图像及实验 NC 值数据可以看出,针对 5 幅不同的载体图像,通过本文提取算法提取出的 QR 码水印图像纹理都比较分明,算法稳固性评判参数 NC 值均在 0.95 以上,说明本文算法可以确保算法安全性、隐蔽性及稳固

性的相互平衡。为了对算法优越的鲁棒性进行更好的验证,对 Lena 已经嵌入了图 9(e)QR 码水印信息的图像实施图 11 中的各种攻击遭遇,通过本文提取算法提取出 QR 码水印图像,如图 11(a)–(g)所示。

从图 11(a)–(g)中可以清楚辨别出本文算法提

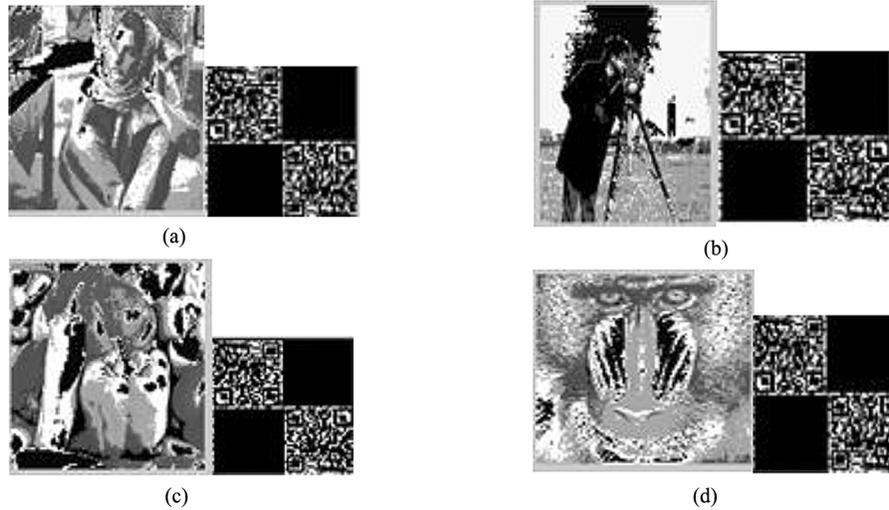


图 10 (a) Barbara 图像和提取的水印; (b) Gameraman 图像和提取的水印;
(c) Peppers 图像和提取的水印; (d) Baboon 图像和提取的水印

Fig. 10 (a) Barbara image and extracted watermark; (b) Gameraman image and extracted watermark;
(c) Peppers image and extracted watermark; (d) Baboon image and extracted watermark

表 1 未攻击的性能指标

TAB. 1 Unattacked performance metrics

Watermarked image					
Extracted image					
NC	0.989 0	0.965 8	0.961 2	0.950 2	0.965 9

(a)	(b)	(c)	(d)
(e)	(f)	(g)	

图 11 含水印图像进行攻击后提取的图像:(a) 椒盐噪声; (b) 高斯噪声; (c) 剪切;
(d) JPEG 压缩; (e) 旋转; (f) 高斯滤波; (g) 中值滤波

Fig. 11 The extracted images after the watermarked images were attacked: (a) Salt and pepper noise; (b) Gaussian noise; (c) Clipping; (d) JPEG compression; (e) Rotation; (f) Gaussian filter; (g) Median filter

取出的 QR 码的水印图像,说明本文算法抵抗各种攻击具有较强的坚固性。以各类载体图像为处理对象,在完成了对其各种攻击测试之后,表 2 对所获取的部分 NC 值进行了展示。

表 2 本文算法鲁棒性测试
Tab. 2 Algorithm robustness test

Attack	NC				
	Lena	Barbara	Gamera man	Peppers	Baboon
Salt and pepper noise 0.01	0.969 5	0.921 7	0.923 5	0.904 8	0.915 3
Gaussian noise 0.005	0.995 3	0.998 7	0.908 8	0.871 8	0.891 3
Cut 1/6	0.827 7	0.987 2	0.987 8	0.900 1	0.886 9
Cut 1/4	0.718 9	0.852 4	0.862 7	0.838 8	0.772 5
Cut 1/2	0.646 5	0.770 6	0.635 4	0.621 9	0.771 6
JPEG 20%	0.942 6	0.939 7	0.962 3	0.924 3	0.933 1
JPEG 30%	0.911 3	0.924 0	0.945 2	0.905 5	0.909 9
JPEG 60%	0.880 3	0.891 2	0.910 0	0.856 7	0.858 6
3° rotation	0.937 5	0.929 8	0.990 2	0.945 2	0.901 1
5° rotation	0.853 7	0.922 3	0.871 7	0.887 7	0.752 2
10° rotation	0.725 2	0.865 6	0.730 1	0.860 8	0.599 9
Median filtering	0.910 8	0.961 5	0.929 3	0.979 2	0.905 2
Gaussian filtering	0.616 2	0.802 3	0.805 4	0.727 6	0.795 5

本水印算法以文献[8]以及文献[9]为理论依据,在同等条件下,借助各类抵抗攻击实验来展开对 Lena 的研究,其包含着 QR 码载体图像,并对所获取的 NC 值展开了对比分析,表 3 对相关数据进行了展

表 3 本文与文献[8]、[9]算法攻击 NC 值比较表
Tab. 3 Comparison table of attack test NC between algorithm in this paper and algorithms in Ref. [8],[9]

Attack	NC		
	Ref. [8]	Ref. [9]	In this paper
Salt and pepper noise 0.01	0.969 5	0.785 6	0.778 6
Gaussian noise 0.005	0.995 3	0.724 5	0.715 6
Cut 1/6	0.827 7	0.772 5	0.803 2
Cut 1/4	0.718 9	0.725 4	0.795 3
JPEG 30%	0.911 3	0.814 5	0.810 2
10° rotation	0.725 2	0.645 7	0.627 8
Median filtering	0.910 8	0.847 8	0.848 6
Gaussian filtering	0.616 2	0.825 4	0.819 5

示。以实验数据为依据,文献[8]在对全息水印算法的使用过程中,通过高斯滤波、JPEG 压缩以及中值来对水印图像进行攻击,从而获取算法稳固性的评判值,即 NC 值超过了 0.8,文献[9]提出了三变换联结算法,通过高斯滤波、JPEG 压缩以及中值来对水印图像进行攻击,从而获取算法稳固性的评判值,取得了更出色的效果,能够获得超过 0.9 的 NC 值。

4 结 论

本文算法为了解决水印算法中水印的隐藏程度和鲁棒性的失衡,依据 QR 码及全息图的高储存性、高安全性,将其应用到 Contourlet-SVD 域的水印算法中,可以满足算法安全性及隐藏性的需求。通过实验计算得到的峰值信噪比 PSNR 超过了 31 dB。算法将全息图的不可撕毁、Contourlet 变换对二维图像的多方向多分辨性及时频局部性、SVD 奇异值的稳定性相结合,使得 QR 码的 Contourlet-SVD 域的全息水印算法在对抗常规的攻击上也具有较好的鲁棒性,尤其是椒盐、高斯噪声及中值滤波攻击,NC 值达到了 0.9 以上,使得算法足以平衡水印的隐蔽性和抵抗攻击稳健性。

参考文献:

- [1] CHENG B, ZHANG B. Application of robust digital watermarking technology in Image copyright disputes[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1883 (1): 012124.
- [2] KADIAN P, ARORA S M, ARORA N. Robust digital watermarking techniques for copyright protection of digital data: a survey [J]. Wireless Personal Communications, 2021, 118: 3225-3249.
- [3] SHARMA S S, CHANDRASEKARAN V. A robust hybrid digital watermarking technique against a powerful CNN-based adversarial attack[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79: 32769-32790.
- [4] WEN B, ZHANG T Q, XIONG T, et al. The robust image watermarking algorithm based on graph transformation and DWT-SVD [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2022, 33(8): 879-886.
闻斌, 张天骐, 熊天, 等. 基于图变换和 DWT-SVD 的鲁棒图像水印算法[J]. 光电子 • 激光, 2022, 33(8): 879-886.
- [5] SHEN Y B, YANG Y, LI Z. A color digital watermarking algorithm for QR code [J]. Journal of Intelligent Systems, 2020, 15(5): 949-955.
沈艳冰, 杨阳, 李竹. 一种适用于 QR 码的彩色图像数字水印算法[J]. 智能系统学报, 2020, 15(5): 949-955.

- [6] SUN L M. Research on QR code-oriented digital watermark encryption algorithm [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2020.
孙丽敏. 面向 QR 码的数字水印加密算法研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2020.
- [7] TAKAI N, MIFUNE Y. Digital watermarking by a holographic technique[J]. Applied Optics, 2002, 41(5): 865-873.
- [8] WU Q L, PENG D Y. Digital holographic watermark based on discrete Fourier transform[J]. Computer Application, 2013, 33(3): 752-755.
吴清乐, 彭代渊. 基于离散傅里叶变换的数字全息水印[J]. 计算机应用, 2013, 33(3): 752-755.
- [9] KONG L J, NIE P. A holographic watermarking technology based on DWT-DCT transform domain[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2016, 27(2): 198-202.
孔玲君, 聂鹏. 一种基于 DWT-DCT 变换域的全息水印技术[J]. 光电子·激光, 2016, 27(2): 198-202.
- [10] MA T, CHEN N T, ZHU J G. YIQ color image holographic watermarking algorithm in Contourlet-SVD domain[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(12): 1270-1277.
马婷, 陈农田, 朱建刚. Contourlet-SVD 域的 YIQ 彩色图像全息水印算法[J]. 光电子·激光, 2020, 31(12): 1270-1277.
- [11] SU Y G, XU W J. Double image encryption based on digital holography and chaotic random phase coding[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(9): 939-946.
苏永钢, 徐文君. 基于数字全息和混沌随机相位编码的双图像加密[J]. 光电子·激光, 2020, 31(9): 939-946.
- [12] LIU Z Y, WANG A L, XIN K, et al. Digital holographic watermarking algorithm based on DWT-DCT[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1693(1): 012099.
- [13] XIN K, WANG A L, LIU Z Y, et al. Information hiding algorithm based on edge detection and holographic watermarking[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1693(1): 012113.
- [14] XIN K. Research on anti-geometric distortion holographic digital watermarking algorithm based on image segmentation[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Printing, 2021.
辛旷. 基于图像分割的抗几何畸变全息数字水印算法研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2021.
- [15] WU W M, LIU X. Watermarking method combining Fourier transform digital holography and DCT domain bit embedding[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 24(1): 68-71.
吴为民, 刘新. 结合傅里叶变换数字全息与 DCT 域位嵌入的水印方法[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2022, 24(1): 68-71.

作者简介:

马 婷 (1985—), 女, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事信息安全、图像处理、计算机应用等方面的研究。