基于QR码的抗几何攻击数字全息水印

龚冬梅, 顾济华, 陈大庆, 陈维霞

(苏州大学,苏州 215006)

摘要:目的 针对含水印QR码图像在扫描和解码过程中的几何攻击,提出一种基于数字全息和傅里叶-梅林变换的数字水印技术。方法 以傅里叶-梅林变换构建几何不变域,并利用全息图的不可撕毁性,将 水印以全息图的方式隐藏在QR码图像离散傅里叶变换中频幅度谱部分。结果 通过对比实验表明,提 出算法可以有效抵抗对含水印QR码图像进行的剪切、缩放和旋转等几何攻击,且算法简便,嵌入信息 量大。结论 在不影响QR码正确识别的基础上,提出算法的鲁棒性和不可见性之间能达到较好的平衡。 关键词:QR码;数字全息;几何攻击;傅里叶-梅林变换

中图分类号: TS801.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2015)09-0124-05

Holographic Digital Watermarking Algorithm Against Geometric Attacks Based on QR Code

GONG Dong-mei, GU Ji-hua, CHEN Da-qing, CHEN Wei-xia (Soochow University, Suzhou 215006, China)

ABSTRACT: Targeting at the geometric attack problem of QR code watermarked images in the process of scanning and decoding, a new watermarking algorithm was proposed based on digital holography and Fourier–Mellin transform. Fourier–Mellin transform was used to construct geometric invariant domain, and holographic watermarking was embedded in the middle frequency of the QR code image' s DFT amplitude spectrum domain taking advantage of the strong anti–tear property of hologram. Comparative experiments showed that the algorithm proposed could effectively resist geometric distortion (rotation, scaling, clipping, and so on) of QR code watermarked images, and this algorithm was simple and had large amount of embedded information. The algorithm proposed in this paper could well balance between the robustness and the invisibility without affecting the correct identification of QR code.

KEY WORDS: QR code; digital holography; geometric distortion; Fourier-Mellin transform

QR码与传统二维条形码相比,因其具有信息容量大、纠错性强、制作成本低廉、识别方便等特点,受到各界人士追捧。尽管二维码本身有一定的防伪性,但只是简单的位异或,严格讲没有加密。QR码是二值图像的一种,因而现有二维码水印嵌入方法大都是基于二值图像水印的^[1-5]。同时,二维码本身也是图像的一种,因此,现代光学图像加密技术完全适用于QR码图像的加密。Refregier和Javidi于1995年最早提出,在光学4f系统中采用双随机相位编码

方法进行信息加密的技术,掀起了光学信息安全领 域的研究热潮,全息技术已被广泛应用于数字水印 的研究中^{16—9]}。

QR码扫描过程中经常会发生不可避免的旋转、 缩放、平移和剪切等几何攻击(RST)。O'Ruanaidh等 首次利用傅里叶-梅林变换(Fourier-Mellin),在图像 中寻找平移变换、尺寸变换和旋转变换不变域¹⁰⁰,此后 几何攻击被广泛研究^[11-14]。在数字水印的鲁棒性研究 中,抵抗几何攻击相对于抵抗其他攻击手段而言更具

收稿日期: 2014-10-12

作者简介: 龚冬梅(1989—), 女, 江苏高邮人, 苏州大学硕士生, 主攻数字水印技术。

通讯作者:顾济华(1957一),男,博士,苏州大学教授,主要研究方向为光学测量与光信息处理。

有挑战性。针对QR码提出一种基于数字全息和傅里 叶-梅林变换的抗几何攻击水印新方法,利用傅里叶-梅林变换的嵌入方法,将数字全息水印隐藏在QR码 图像离散傅里叶变换中频幅度谱部分。通过仿真实 验验证了该方法的可行性和可信性,实验结果也表 明,该方法对一般的图像处理,尤其是对几何攻击有 较好的稳健性和不可见性。

1 抗几何攻击算法描述

几何失真包括剪切、平移、旋转、纵横比变化和投 影变形等,现有的水印算法对几何攻击大多缺乏鲁棒 性。在这里,结合傅里叶变换(Fourier)和对数极坐标 变换(log-polar transformation)构造几何不变域 (RST),与通常基于傅里叶-梅林变换的抗几何失真 数字水印系统相比,计算量和复杂度大大降低。

设f(x,y)为 $M \times M$ 的原始图像,F(u,v)是其相 应的离散傅里叶变换(DFT),原图像f(x,y)经过平 移(α , β)单位后的图像为 $f'(x,y) = f(x-\alpha$, $y-\beta$),f'(x,y)经过DFT变换为 $F'(u,v) = e^{-2\pi(u\alpha+v\beta)}$. F(u,v)。可以看出,图像空域的偏移量对应于DFT频 谱的相位,又因为DFT频谱的周期性,所以空域的平 移在DFT频域是周期不变的。

原图像f(x,y)经过旋转 φ 角度、缩放 μ 倍攻击后的 图像为: $f'(x,y)=f(\mu(x\cos\varphi - y\sin\varphi), \mu(x\sin\varphi + y\cos\varphi)), f'(x,y)$ 经过DFT变换为:

$$F'(u,2) = \frac{1}{\mu^2} F\left(\frac{1}{\mu} \left(u\cos\varphi - v\sin\varphi\right)\right),$$

$$\frac{1}{\mu} \left(u\sin\varphi + v\cos\varphi\right)\right)$$
(1)

可以看出,空域旋转的角度在DFT频域频谱会旋转相同的角度,空域缩放的因子在DFT频域频谱会反方向缩放互为倒数的因子。也就是说,在笛卡儿坐标系中不能直接实现旋转及缩放的不变性,但可以通过对数极坐标变换实现。令:

 $u=e'\cos\theta$, $v=e'\sin\theta$ $0 \le \theta < 2\pi$ $r \in \mathbb{R}^2$ (2) 笛卡尔坐标I(x,y)转化到对数极坐标 $I(r, \theta)$,将 式(2)代入式(1)可得:

 $|F'(r, \theta)| = |\mu|^2 F(r - \ln \mu, \theta + \varphi)$ (3)

从式(3)可以看出,在空域放大μ倍,图像的傅里 叶幅度系数沿着极径坐标轴(上下)平移 lnμ单位;而 旋转图像φ角度,使傅里叶幅度系数沿着角度坐标平 移φ单位,因此,在空域中平移图像,对傅里叶幅度系 数没有影响,但其对剪切攻击并没有特别大的优势, 这就有必要用数字全息图作为水印嵌入。

2 QR码生成

QR码是快速识别矩阵码(Quick Response)的简称,其支持编码的内容包括纯数字、数字和字符混合编码、8位字节码和包括汉字在内的多字节字符。QR码利用 RS(Reed-Solomon)纠错算法,一共有7%,15%,25%和30%等4个纠错等级。QR码的结构见图1,其中,a区域为寻像图像(Finder Pattern)和定位图像(Timing Pattern),用来帮助解码程序确定图形中具体符号的坐标;b区域用来标识纠错的级别和掩模图像(Mask Pattern),该区域被称为"格式化信息"(Format Information);c区域用来保存被编码的数据内容及纠错信息码。



图 1 QR码结构 Fig.1 Structure of the QR code

QR码图像属于二值图像,即0(黑色)和1(白色)。 在QR码图像中嵌入水印时须考虑像素点领域情况,否 则会引起视觉异常。文献[15]采用高斯噪声模糊处理, 尽管一定的噪声不会影响QR码的识读,但这已经是一 种失真处理,会影响水印的嵌入与提取。因此,这里直 接将其映射至0~255,做简单的灰度化处理。

3 全息水印生成

利用共轭对称延拓的傅里叶计算全息方法生成 数字全息图。设灰度水印图像为 $w_0(x,y)$,为取得较 平稳的傅里叶谱,先对水印图像进行调制,调制后的 水印图像表示为 $w_0(x,y) = w(x,y) \cdot e^{i\varphi(x,y)}$,其中 $\varphi(x,y)$ 是由高斯随机数决定的。通过调制后的水印 图像经过傅里叶变换,同参考光相干涉,干涉产生的 强度分布场就是用来嵌入傅里叶变换全息图的。

设物光波f₀(m,n)可用公式表示为:

 $f_0(m,n) = A_1(m,n) \exp(j\varphi(x,y)) =$

 $A(m,n)\cos(\varphi(m,n)) + jA(m,n)\sin(\varphi(m,n))$ (4)

式中: $A_1(m,n)$ 为幅度分布函数; $\varphi(m,n)$ 为相 位分布函数; $A_1(m,n)$ 为图像信息; $m=1,2,\dots,M-1$;

式中:上标"*"表示复共轭。二维离散Fourier变换为:

$$F(\mu, v) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) \cdot \exp\left[-j2\pi\left(\frac{m\mu}{M} + \frac{nv}{N}\right)\right]$$
(6)

 $\mu = 0, 1, 2, \cdots, M-1; v=1, 2, \cdots, N-1$

一个物光波 f₀(m,n)经过共轭对称延拓和DFT变换后,可得到二维离散实值函数 F(μ,v),将此实值函数映射至0~255即可生成数字全息图。由式(7)可见, 全息图中的任意一点都不包含原始物光波的振幅和 相位信息,具有不可撕毁性。全息水印的生成和再现 见图 2。其中,图 2a为63 pixel × 127 pixel 太极水印布 局图像;图 2b 为共轭对称延拓后的图像,大小为128 pixel × 128 pixel;图 2c 为生成的全息图。



图2 全息水印的生成和再现

Fig.2 Generation and reconstruction of holographic watermark

4 水印嵌入与提取

在嵌入方式上,选择在中频部分嵌入水印图像, 这主要是由于DFT的中频成分对一般的图像处理具 有较好的稳定性,也不会因微小的变动对宿主图像 造成较严重的失真。数字水印的嵌入和提取方案见 图3。

4.1 水印嵌入

设载体图像为以版本号为5、纠错等级为30%和



图3 水印嵌入与提取结构

Fig.3 Structure of watermark embedding and extraction

掩码为2的文本字符串"优秀是一种习惯, 123456abcdef"编码生成的512 pixel×512 pixel的QR 码图像*I*,水印图像为以63 pixel×127 pixel太极图生 成的128 pixel×128 pixel的全息图*W*。水印嵌入算法 描述见图4,其嵌入算法步骤如下所述。





1) 对*I*进行预处理,即二值图像灰度化;再对*I*做 离散傅里叶变换,得到幅度谱*F*₄和相位谱*F*_P。

2) 对幅度谱 $F_{A}(u,v)$ 进行对数极坐标变换(LPT) 得到 $F_{A}(r, \theta)$ 。

3)考虑到离散傅里叶变换幅度谱的中心对称性, 将全息水印图作对称性嵌入到 $F_A(r, \theta)$ 的中频区域。见图4a,区域1和区域3对称,区域2和区域4对称,嵌入公式为:当 $R_L < r < R_H$ 时, $F_A^w(r,\theta) =$ $F_A(r,\theta) \cdot (\alpha W + 1)$ 。式中: R_L 为极坐标系中最小半径, R_H 为极坐标系中最大半径, $R_H - R_L$ 为全息水印图的宽度; α 为嵌入强度, α 越大水印的鲁棒性越好,但不可见性会降低。

4) 对 $F_{A}^{w}(r,\theta)$ 作逆的对数极坐标变换(ILPT)得

到*F*^w_A(*u*,*v*),见图4b嵌入的矩形块转化为圆环。这 就充分利用了中频区域,与文献[15]相比,嵌入方法简 便快捷,并且嵌入水印的信息量大大提高。

5)用新的幅度谱 $F_{A}^{w}(u,v)$ 和原始相位谱 F_{P} 作逆的离散傅里叶变换,得到加含水印QR码的图像 I_{Wo} 。

4.2 水印提取

水印提取是水印嵌入的逆过程,且需要原始图像 参与,提取过程如下所述。

1) 对载体图像I和含水印图像 I_w 分别作傅里叶变换和对数极坐标变换,得到对数极坐标下的幅度谱分别为 $F_A(r,\theta)$ 和 $F_A^w(r,\theta)$ 。

2) 提取水印信号 W, 当 $R_{L} < r < R_{H}$ 时, W = $(F_{A}^{w}(r,\theta)/F_{A}(r,\theta) - 1)/\alpha$ 。

3) 通过傅里叶反变换或光学再现,即可得到原始 水印信息。

5 实验与结果分析

在 MatlabR2012B 的平台上进行仿真实验,仿真结 果见图5。选择512 pixel × 512 pixel 的QR 码图像作为 宿主图像(图5a),采用制作的全息图作为待嵌入水印 图像(图2c)。该实验的结果是在 R_L =192, R_H =320, α = 0.02 的条件下得到的。图5b为嵌入水印后的QR 码图 像能正确解码;图5c为提取的全息水印图,通过光学 全息再现可得到原始水印信息(图5d)。



图5 仿真结果 Fig.5 Results of simulation

用峰值信噪比 PSNR 来客观评价宿主图像的不可 见性,采用归一化互相关系数 NC 衡量提取水印的鲁 棒性。PSNR 值越大表明宿主图像的不可见性越好, NC 系数越大表明提取的水印质量更优。为验证提出 算法抵抗几何攻击的能力,将提出算法与文献[15]算 法进行对比实验。

5.1 旋转攻击对比实验

选择常用的bieubie插值方式对含水印QR码进行 不同角度的旋转攻击(旋转角度分别为2°,5°, 30°,45°,60°和90°),见图6。提出算法的NC系数与文献[15]的对比见表1,在不影响QR码正确解码的情况下,可以看出提出算法提取水印的鲁棒性优于文献[15]的方法。



图6 旋转攻击

Fig.6 Rotation attack

表1 旋转攻击对比

Tab.1 Rotation attack contrast experiment

旋转角度/(°) PSNR 值/dB	提出算法NC/%	文献[15]算法NC/%
2	44.66	80.16	65.01
5	44.46	76.72	54.57
30	43.85	83.32	56.18
45	43.79	78.90	66.26
60	43.90	83.02	57.22
90	44.69	100	100

5.2 等比例缩放对比实验

选择常用的bicubic 插值方式,对QR码进行不同 等比例的缩放攻击(缩放倍数分别为0.875,0.75,1.25, 1.5和2),提出算法和文献[15]算法的等比例缩放攻击 结果见图7。可见,文献[15]提取的水印信息会随着缩 放比例的变化而变化,提出算法提取的水印只是均匀 的噪声叠加,对水印信息不会造成整体布局的影响。 与文献[15]的算法相比,提出算法在抵抗缩放攻击上 存在较大优势。



5.3 平移攻击对比实验

对QR码图像进行不同尺度的平移(平移尺度分别为:向右平移100,200;向下平移100,200;向右平移120及向下平移80;向右平移50及向下平移150,

单位均为pixel),结果见图8,可以看出文献[15]算法 在平移过程中S分量损失的数据较多,全息再现后的 水印质量明显下降,相比之下,提出算法提取的水印 更清晰。



a 向右平移100;b 向右平移200;c 向下平移100;d 向下平移200; e 向左平移120及向下平移80;f 向右平移50及向下平移150



6 结语

对二维码本身做特殊处理(如加密、复合、变形 等)的目的有二:一是可以让别人的识读软件无法识 别码图,二是可以在这些码图中编入特别信息,以作 防伪校验之用。QR码的应用是一种趋势,但是当QR 码图像信息经过几何攻击后,如旋转、缩放、剪切等, 水印信息的提取往往失效,提出算法将数字全息水印 和QR码进行结合,有效利用傅里叶-梅林变换来构造 几何不变域,能够抵抗几何攻击。提出算法的各种参 数均经过大量的实验对比确定,并不仅仅局限于理论 分析。仿真实验结果表明,提出算法可以有效抵抗几 何攻击,且算法简便,嵌入信息量大。

参考文献:

- PANYAVARAPORN J, HORKAEW P, WONGTRAIRAT W. QR Code Watermarking Algorithm Based on Wavelet Transform[J]. IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies, 2013, 13(3):791-796.
- [2] DAI M H, ZHAO Y, YUAN Y, et al. An Improved Scheme for Watermarking QR-code Based on SVD in NSCT-CT[J]. Asia Modeling Symposium, 2013, 23(7):116-121.
- [3] 王子煜,孙刘杰.改进的基于QR码的数字全息水印[J].包装工程,2014,35(7):144—148.
 WANG Zi-yu, SUN Liu-jie. Improved QR Code-based Digi-

tal Holographic Watermark[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(7):144—148.

[4] 王子煜,孙刘杰,李孟涛.强鲁棒性QR码水印技术[J].包装 工程,2012,33(15):84-87. WANG Zi-yu, SUN Liu-jie, LI Meng-tao. QR Code Watermark Technology with Strong Robustness[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15):84-87.

[5] 肖菲菲,刘真.二维码防伪技术在可变数据印刷中的应用 [J].包装工程,2011,32(21):102—109.

XIAO Fei-fei, LIU Zhen. Application of Anti-counterfeiting Technology Based on Two-dimensional Bar Code in Variable Data Printing[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(21):102— 109.

[6] 黄素绢,王杜瑶,任艳丽.基于数字全息及失真校正的抗打 印扫描数字图像水印[J].应用科学学报,2011,29(3): 281-288.

HUANG Su-juan, WANG Du-yao, REN Yan-li. Print-scan Resilient Watermarking Based on Digital Hologram and Distortion Correction[J]. Journal of Application Science-electronics and Information Engineering, 2011, 29(3):281-288.

[7] 周中原,孙刘杰,王文举,等. 抗几何攻击的强鲁棒性全息 水印研究[J]. 包装工程,2014,35(5):131—136.
ZHOU Zhong-yuan, SUN Liu-jie, WANG Wen-ju, et al. Holographic Digital Watermarking Algorithm against Geometric Attacks with Strong Robustness[J]. Packaging Engineering, 2014,35(5):131—136.

[8] 陈大庆,顾济华.基于相位恢复的傅里叶变换全息图像数 字水印[J].光学学报,2009,29(12):3310—3316.
CHEN Da-qing, GU Ji-hua. An Image Digital Watermarking with Phase Retrieval Algorithm and Fourier Transformation Hologram[J]. Acta Optica Sinica,2009,29(12):3310—3316.

- [9] 孙刘杰,王子煜. 一种新的安全鲁棒全息数字水印技术[J]. 包装工程,2013,34(1):106—109.
 SUN Liu-jie, WANG Zi-yu. A New Holographic Digital Watermarking Technology with Good Security and Robustness
 [J]. Packaging Engineering, 2013,34(1):106—109.
- [10] O RUANAIDH J J K, PUN T. Rotation, Scale and Translation Invariant Spread Spectrum Digital Image Watermarking[J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 303–317.
- [11] LIN C Y, WU M, BLOOM J A, et al. Rotation, Scale, and Translation Resilient Watermarking for Images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(5):767-782.
- [12] ZHENG D, ZHAO J Y, SADDIK A E. RST Invariant Digital Image Watermarking Based on Log-polar Mapping and Phase Correlation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(8):753-765.

[13] 李旭东. 抗几何攻击的空间域图像数字水印算法[J]. 自动 化学报,2008,34(7):832—837.
LI Xu-dong. Geometric Attack Resistant Image Watermarking in Spatial Domain[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34 (7):832—837.

[14] 何冰, 王晅, 赵杰. 基于 Fourier-Mellin 变换抗仿射变换水 (下转第 138 页) Baoji University of Arts and Science, 2013, 33(4):64-70.

- [2] BASSOLI E, GATTO A, IULIANO L, et al. 3D Printing Technique Applied to Rapid Casting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2007, 13(3):148–155.
- [3] 杨小玲,周天瑞. 三维打印快速成形技术及其应用[J]. 浙江 科技学院学报,2009(3):186—189.
 YANG Xiao-ling, ZHOU Tian-rui. Three Dimensional Printing Prototyping Rapidly Technology and Its Application[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2009(3):186—189.
- [4] LADD C, SO J H, MUTH J, et al. 3D Printing of Free Standing Liquid Metal Microstructures[J]. Advanced Materials, 2013, 25 (36): 5081—5085.
- [5] LIPSON H, KURMAN M. The New World of 3D Printing[M]. John Wiley & Sons, 2013.
- [6] CAMPBELL T A, IVANOVA O S. 3D Printing of Multifunctional Nanocomposites[J]. Nano Today, 2013, 8 (2) : 119– 120.
- [7] 李晓燕,张曙,余灯广. 三维打印成形粉末的均匀试验设计研究[J]. 上海理工大学学报,2007(2):183—188.
 LI Xiao-yan, ZHANG Shu, YU Deng-guang. Application of Uniform Design in Research of Three Dimensional Printing's Powder[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology,2007(2):183—188.
- [8] 王建.化学芯片的喷墨快速成型技术研究[D].南京:南京理
 工大学,2006.
 WANG Jian. Research on Rapid Prototyping Technology of

chemical Chip[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.

- [9] WANG H M, CHEN G X, ZHANG W B. 3D Printing of Topographic Map Based on UV Ink-jet Printer[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(469): 309–312.
- [10] 王焕美,陈广学.基于 UV 油墨的 3D 地形图呈现[J].包装学报,2014,6(1):48—52.

WANG Huan-mei, CHEN Guang-xue. 3D Printing of Topographic Map Based on UV Inks[J]. Packaging Journal, 2014, 6

(上接第128页)

印算法[J]. 计算机工程与应用,2009,45(17):91—94. HE Bing, WANG Heng, ZHAO Jie. Digital Watermarking Method Resisting to Affine Transforms Based on Fourier-mellion Transform[J]. Computer Engineering and Applications, 2009,45(17):91—94.

[15] 刘丽,周亚建,张斌,等. 基于 DCT 和 SVD 的 QR 码数字水 印算法[J]. 红外与激光工程,2013,42(S2):304—311.
LIU Li, ZHOU Ya-jian, ZHANG Bin, et al. Digital Watermarking Method for QR Code Images Based on DCT and SVD
[J]. Infrared and Laser Engineering,2013,42(S2):304—311. (1):48-52.

[11] 韩玄武. UV 油墨光引发剂与颜料匹配的研究[J]. 包装工程,2009,30(4):48-51.

HAN Xuan-wu. Research on Matching between Photointiator and Pigment of UV Ink[J]. Packaging Engineering, 2009, 30 (4):48—51.

- [12] 陈海生. 用于 PE 材料印刷的 UV 固化油墨的研制[J]. 包装 工程,2012(11):97—100.
 CHEN Hai-sheng. Development of UV Curable Ink Used on PE Materials[J]. Packaging Engineering,2012(11):97—100.
- [13] 童博士. UV 油墨固化概述及泰威 UV 数码喷印发展路线 [J].印刷工业,2010(3):51—53.

TONG Bo-shi. Overview of UV Ink Curing and Printing Development Route of Taiwei UV Digital Printing[J]. Print China,2010(3):51—53.

- [14] 顾小萍,唐正宁.对喷墨印刷中油墨铺展和渗透的研究[J].
 包装工程,2005,26(5):98—100.
 GU Xiao-ping, TANG Zheng-ning. Research on Ink Penetration and Spreading in Ink-jet Printing[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(5):98—100.
- [15] 李莹.涂布纸油墨渗透的表征及影响油墨渗透因素的研究 [D].广州:华南理工大学,2011.

LI Ying. Study on Characterization of Ink Penetration into Coated Paper and Factors Affecting Ink Penetration[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2011.

- [16] 胥春雨,许卫东,李胜水,等.不同光源下样品颜色三刺激 值测试的比较分析[J]. 包装工程,2012,33(17):102—105.
 XU Chun-yu, XU Wei-dong, LI Sheng-shui, et al. Comparative Analysis of Test Color Tristimulus Values Under Different Light Sources[J]. Packaging Engineering,2012,33(17):102— 105.
- [17] 朱元泓. 油墨叠印的密度与色度评价分析[J]. 包装工程, 2008,29(6):64-66.

ZHU Yuan-hong. Analysis of Densitometric and Colorimetric Evaluation Methods for Ink Trapping[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6):64-66.

[16] 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.

BAI Tao-tao, LIU Zhen, LU Peng. Digital Watermarking Scheme in Contourlet Domain Based on QR Code[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, 25(4):769-776.

[17] 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.
WU Qing-le, PENG Dai-yuan. Digital Hologram Watermarking Based on Discrete Fourier Transform[J]. Journal of Com-

puter Applications, 2013, 33(3):752-755.