

窄色域抗打印扫描全息水印算法

张雯, 王丽颖

(天津职业大学, 天津 300410)

摘要: **目的** 为了提升水印抗打印扫描攻击的鲁棒性, 提出一种窄色域抗打印扫描全息水印算法。**方法** 制作打印机的 ICC 特性文件, 应用特性文件转换宿主图像到 CMYK 颜色模式, 从而获得适应该设备的窄色域, 将制成全息图的水印嵌入到宿主图像的 DWT 域内。**结果** 实验表明, 该算法经历打印扫描后可顺利提取水印, 且打印扫描后获得的水印图像保真度较高。与在 RGB 颜色模式中嵌入水印相比, 该算法水印的鲁棒性和宿主图像的保真度均具有明显优势; 相较于嵌入水印到默认转换的 CMYK 颜色模式, 鲁棒性相当, 该算法宿主图像的保真度具有明显优势。**结论** 该窄色域算法可提升打印扫描过程中颜色传递的一致性, 结合全息图不可撕毁的优势权衡了鲁棒性与保真度的关系, 该算法有益于数字水印在防伪印刷领域的应用。

关键词: 全息水印; 窄色域; 打印扫描; 特性文件

中图分类号: TS805.4; TS853+.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)07-0234-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.07.033

Holographic Watermarking Algorithm for Print-and-Scan Process in Narrow Colour Gamut

ZHANG Wen, WANG Li-ying

(Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a holographic watermarking algorithm for print-and-scan process in narrow color gamut, so as to enhance the robustness of watermark against print-and-scan attacks. The ICC device profile of printer was generated and used to convert the host image into CMYK color space, in order to obtain the narrow color gamut suitable for the device, and the watermarks in the hologram were embedded into DWT domain of the host images. The experiments showed that, after the print-and-scan process, the watermarks could be smoothly extracted by the proposed algorithm with high fidelity of watermarked images. Besides, compared with the watermark embedded in RGB color space, the proposed algorithm showed advantages in watermark robustness and host image fidelity. Compared with CMYK color space with embedded watermark from default conversion, the proposed algorithm showed clear advantage in host image fidelity with basically same robustness. The proposed narrow gamut algorithm can improve the consistency of color transfer in the print-and-scan process and balance the relation between robustness and fidelity with the advantage of hologram integrity. Therefore, the proposed algorithm is conducive to the application of digital watermarking in the anti-counterfeit printing.

KEY WORDS: holographic watermark; narrow color gamut; print-and-scan; device profile

收稿日期: 2019-08-04

基金项目: 2018 年度教育部人文社会科学研究项目 (18YJCZH171)

作者简介: 张雯 (1989—), 女, 硕士, 天津职业大学讲师, 主要研究方向为印刷品全息水印防伪技术。

数字水印技术采用加密的嵌入算法将水印标记嵌入多媒体对象,应用与嵌入算法相对应的提取算法提取水印标记^[1],可应用于数字版权保护^[2-4]、音频取证^[5]和医学图像安全^[6-7]等领域。近年来,学者们聚焦数字水印在防伪印刷领域的移植应用,即在印前的数字图像中嵌入人眼不可见的水印信息,经印刷后以扫描(或拍照)的方式再次将印刷品转为数字图像,由该图像中提取水印信息,从而鉴别印刷品真伪。

在印刷品中植入人眼不可见的水印,大大降低了水印被仿造的风险;数字水印可以被机器读取,提升了防伪识别效率;数字水印技术的实施主要集中于印前对数字图像的处理,无需在印刷过程引入新材料或新工艺,低成本且低碳环保,因而,这种应用于防伪印刷领域的数字水印技术具备“难仿制、易识别、低成本、无公害”的特点^[8]。

目前,对数字水印技术算法的研究比较充分,如算法对抗几何^[9-10]、抗剪切^[11]、抗 JPEG 压缩^[12-13]等攻击的鲁棒性与保真度的研究,这些研究为水印由数字版权保护到印刷防伪领域的移植应用奠定了基础。此后,针对印刷(或打印)扫描(或拍照)攻击的研究也相继展开,例如,在印前过程,研究颜色空间转换、嵌入通道选择对水印的影响^[14];在印刷过程,研究不同印刷工艺对水印的影响^[15];在印后图像提取过程,研究图像像素值失真或几何失真对水印的影响^[16-17]。上述研究涉及到了印前、印刷和印后扫描过程,而这 3 个过程实际就是颜色在不同介质间传递的过程,该过程对图像的攻击属于多元异类攻击,如印刷过程颜色空间的转换、图像的半色调化,扫描过程中颜色空间的再次转换与图像的几何形变等。由于印刷(或打印)的色域较小,能表现的颜色数量较少,因而 2 次颜色空间的转换必然会造成像素值的失真。换言之,即使在大色域中嵌入水印,印刷(或打印)后也不一定能表现出电子稿中的颜色,反而会降低印品质量。

文中主要研究在确定打印机能表现的色域后,如何在相对窄的色域中嵌入水印,不同色域转换方式对水印质量和图像保真度的影响,提出一种窄色域抗打印扫描全息水印算法,从而权衡水印算法的鲁棒性和保真度的关系。

1 关键技术

1.1 色彩管理

印刷品本身不能发光,依靠网点反射光线呈现色彩,遵循色料减色法;数字图像在发光的显示屏上表现色彩,遵循色光加色法,因而印刷品与数字图像所能表现的色彩范围不同,即色域不同。不仅如此,即使同是数字图像,在不同设备上呈现的色彩也不尽相

同,每台设备都有自己表现色彩的能力。为了在不同设备之间实现颜色的忠实传递,色彩管理技术应运而生。

由于每台设备所能表现的色彩范围不同,为实现颜色在设备之间的忠实传递,需要在印前完成色彩管理。色彩管理包括设备校正、特征化和转换 3 个步骤,即通过校准实现设备在稳定而优良的状态下工作,以 ICC 特性文件为载体记录设备的色彩特征,从而降低色彩在不同设备之间转换的损失,其中 ICC 特性文件是色彩管理的核心。

1.2 全息图

计算全息图包括了图像的振幅和相位信息,具备由部分可复原整体的优点,借助这种不可撕毁性可提升水印鲁棒性。不仅如此,全息图同时有助于提升水印的透明性和安全性^[11],因而将水印制为全息图后嵌入宿主图像,博奇编码的傅里叶全息图制作过程如下所述^[18]。

1) 输入水印图像后,归一化得到 $f(x,y)$ 。

2) 为模拟毛玻璃漫反射作用,将 $f(x,y)$ 乘以随机相位,再进行傅里叶变换,如式(1),获得傅里叶频谱 $F(x,y)$ 。

$$F(x,y) = \text{FFT}\{f(x,y) \exp[j\phi(x,y)]\} \quad (1)$$

3) 根据 $F(x,y)$ 得到振幅信息 $A(x,y)$ 和相位信息 $\phi(x,y)$, 见式(2)。

$$\begin{aligned} A(x,y) &= \sqrt{\text{real}[F(x,y)]^2 + \text{imag}[F(x,y)]^2} \\ \phi(x,y) &= \arctan \left\{ \frac{\text{real}[F(x,y)]}{\text{imag}[F(x,y)]} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\text{real}[\]$ 和 $\text{imag}[\]$ 分别为取复波面的实部与虚部操作。

4) 在线性记录条件下,光学离轴全息图的透过率函数 $h(x,y)$ 为:

$$\begin{aligned} h(x,y) &= |F(x,y) + R(x,y)|^2 = \\ & |A(x,y) \exp[j\phi(x,y)] + R(x,y) \exp[j2\pi\alpha x]|^2 = \\ & |A(x,y)|^2 + R_0^2 + 2R_0 A(x,y) \cos[2\pi\alpha x - \phi(x,y)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $R(x,y)$ 为离轴平面参考光波; $A(x,y)$ 和 R_0 分别为物光波和参考光波的振幅信息; $2\pi\alpha x$ 表示相位信息。

归一化操作,使 $|A(x,y)|_{\max}=1$,再令参考光波 $|R(x,y)|=1$ 则有:

$$h'(x,y) = 0.5 \{1 + A(x,y) \cos[2\pi\alpha x - \phi(x,y)]\} \quad (4)$$

式(4)为博奇编码的傅里叶计算全息图算法。

1.3 离散小波变换

采用离散小波变换可以同时展现图像的空间和频域特性,二次 haar 小波分解见图 1。经一次分解后

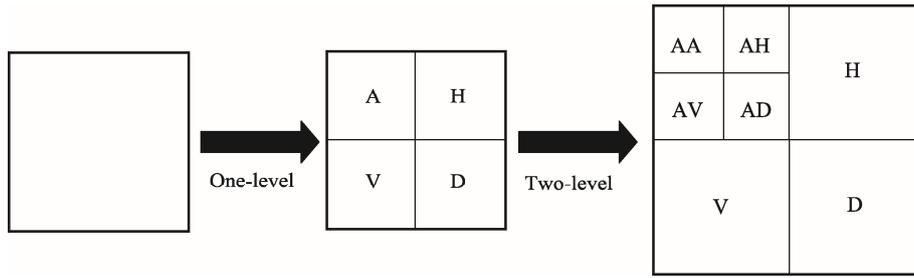


图1 二次 haar 小波分解示意

Fig.1 Wavelet decomposition diagram of 1-level and 2-level haar

获得图像的低频(A)、水平高频(H)、垂直高频(V)和对角高频(D),在此基础上对低频(A)进行二次小波分解,获得二次小波分解的低频(AA)、水平高频(AH)、垂直高频(AV)和对角高频(AD)。低频部分集中了图像的主要信息,在此嵌入水印会降低水印的透明性,而在高频部分嵌入的水印相对脆弱,因而,文中将取二次分解的对角高频(AD)嵌入水印。

设备、承印物的窄色域。包括3个步骤如下所述。

1) 打印色标文件。配合 Eye-One iSis 设备,文中以“IT8.7-3 CMYK ISis (A4)” (见图3)为颜色标准文件。开启柯尼卡美能达 C6501 打印机,预热 30 min 后,在 128 g 重铜版纸上打印颜色标准文件,获得色标文件的打印稿。

2 嵌入与提取水印

2.1 材料与软硬件设备

水印嵌入前,采用的色彩管理软件为 Profile Maker Professional 5.0.10,色标采集硬件为 Eye-One iSis,使用 Photoshop 软件转换颜色空间;水印嵌入阶段,采用 Matlab 2012b 嵌入水印;打印设备为柯尼卡美能达 C6501 四色打印机,承印物为 128 g 铜版纸,扫描设备为中晶 9800XL 扫描仪。

2.2 嵌入水印

文中选择包含文字为“防伪印刷”的水印,测试图“Monarch”为原宿主图像,见图2,其中水印为 64 像素×64 像素灰度图,原宿主图像尺寸为 512 像素×512 像素,RGB 颜色空间。



图2 水印与原宿主图像

Fig.2 Watermark and original host image

制作适用于柯尼卡美能达 C6501 四色打印机、128 g 铜版纸的 ICC 色彩特性文件,从而确定适合该

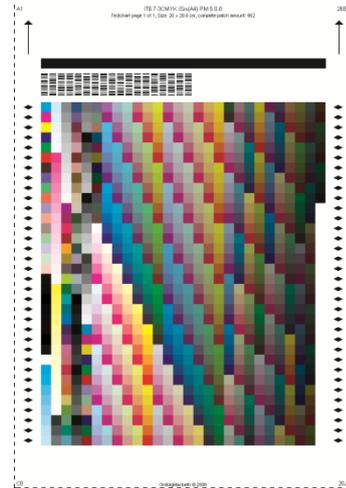


图3 IT8.7-3 CMYK ISis (A4)

Fig.3 IT8.7-3 CMYK ISis (A4)

2) 色标打印稿静置 30 min 稳定后,使用 Profile Maker Professional 5.0.10 软件与 Eye-One iSis 设备扫描色标文件的打印稿并生成 ICC 色彩特性文件。其中涉及的参数如下,“Profile Size”为“Large”,“Perceptual Rendering Intent”为“Paper-colored Gray”,“Gamut Mapping”为“LOGO Classic”,“Viewing Light Source”为“D50”。

3) 在 Photoshop 软件中,以步骤 2) 制作的 ICC 色彩特性文件作为配置文件,将宿主图像由 RGB 颜色模式转为 CMYK 颜色模式,其中“再现意图”为“可感知”,获得新宿主图像(见图4)。与原宿主图像相比,新宿主图像所处的色域相对较小,尤其亮调部分能表现的颜色数量有限。

将水印制为博奇编码的傅里叶全息图,见图5。

对全息图进行 1 次 haar 小波分解,获得其对角高频 D 子带。



图 4 新宿主图像
Fig.4 Developmental host image

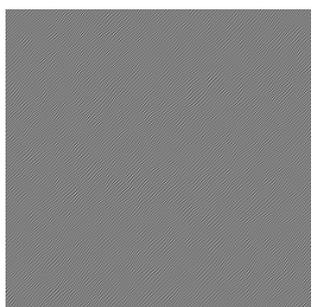


图 5 全息图
Fig.5 Hologram

将新宿主图像分为 C, M, Y 和 K 等 4 层, 在 C 层嵌入水印^[19], 将 C 层进行二次 haar 小波分解, 取二次小波分解的对角高频 (AD) 子带, 采用代换方式, 将全息图的对角高频子带 D 嵌入新宿主图像的 AD 子带, 嵌入方程见式 (5)。

$$M'(i, j) = \alpha m'(i, j) \quad (5)$$

式中: $M'(i, j)$ 为水印嵌入后 AD 子带的系数值; α 为强度因子, $\alpha=1.0$; $m'(i, j)$ 为全息图对角高频 D 子带的系数值。

进行二次逆小波运算, 合并图层, 获得含有水印的图像, 见图 6。



图 6 含水印图像
Fig.6 Watermarked image

2.3 打印扫描

使用柯尼卡美能达 C6501 打印机, 承印物为 128 g 铜版纸, 打印含水印图像, 获得打印稿。

使用中晶 9800XL 扫描仪, 分辨率为 300 ppi,

RGB 颜色模式, 存储为 TIFF 格式文件, 扫描打印稿, 在 Photoshop 软件中截取到打印扫描图, 见图 7。采用峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 评价打印扫描图像 (图 7) 与原宿主图像 (图 2) 之间的保真度, 其 PSNR 值为 18.66 dB, 由此可知, 经历打印扫描过程后, 含图像质量明显下降。



图 7 打印扫描图
Fig.7 Print-and-scan image

2.4 提取水印

应用 ICC 特性文件作为配置文件, 将打印扫描图由 RGB 颜色模式转为 CMYK 颜色模式, 应用与嵌入算法相对应的提取算法, 由打印扫描图的 C 层提取水印。提取到的水印如见图 8, 可清晰识别“防伪印刷”文字, 其 NC 值为 0.71。



图 8 提取水印
Fig.8 Extracted watermark

3 实验结果分析

3.1 打印扫描攻击

在打印扫描过程中, 由于打印机的呈色原理决定了打印过程的颜色模式为 CMYK, 扫描仪自身采集颜色的元件决定了扫描过程的颜色模式为 RGB。因而, 不论是在 RGB 还是 CMYK 颜色模式中嵌入水印, 水印在经历打印扫描过程中, 都将伴随着颜色空间的转换。值得注意的是, 不同颜色空间能表现的颜色范围不同, 即色域不同。如图 9 所示, 白色边框中描绘的色域是 sRGB 颜色空间, 这是在数字条件下能表现的色域; 红色框中描绘的是以默认配置文件 (Japan Color 2001 Coated) 转换为 CMYK 颜色模式的色域; 蓝色框中描绘的是文中制作的 ICC 特性文件的色域。如图 9 可知, sRGB 颜色模式中能表现的颜色范围最广, 其次是 Japan Color 2001 Coated, 文中采用的设备能表现的颜色最少, 当然, 也存在文中采用的设备能表现的颜色不能被 sRGB 颜色模式表现的情况。

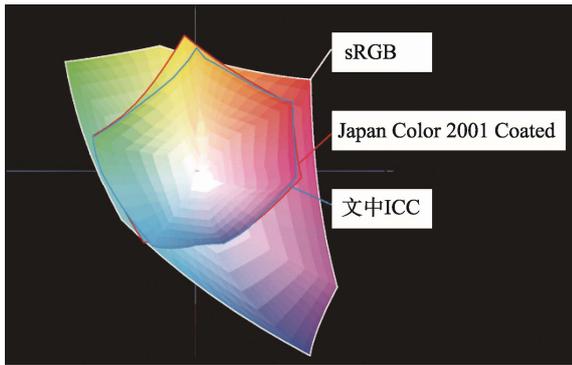


图9 色域
Fig.9 Color gamut

为实现印品的“所见即所得”，同时为减小颜色模式转换对水印造成的攻击，采用了色域最窄的文中ICC进行颜色模式之间的转换。

此外，在打印扫描过程中也伴随着几何攻击，如打印过程中非绝对套准引起的小角度倾斜，扫描过程中引起的旋转、倾斜等几何攻击。当承印物较薄时，甚至会出现卷曲的现象。打印扫描图的局部放大见图10。



图10 局部放大
Fig.10 Locally enlarged image

3.2 不同色域嵌入水印的对比试验

为验证文中算法的稳定性，选取了2张宿主图像，分别是测试图“Monarch”和“Lena”，2种水印分别是文字水印和二维码水印。为对比在不同色域中嵌入水印的保真度和鲁棒性，分别试验了在sRGB颜色模式的R层^[18]、在CMYK颜色模式的C层（配置文件为Japan Color 2001 Coated）、在CMYK颜色模式的C层（配置文件为文中ICC）中嵌入水印，打印扫描后，计算了打印扫描图与原宿主图像之间的PSNR值，见表1。

在经历打印扫描后，图像的PSNR值普遍偏低，说明打印扫描攻击对图像造成了较严重的攻击，图像质量明显下降。经窄色域操作后嵌入水印，图像PSNR值偏高23%以上。

为考察在不同色域中嵌入水印对鲁棒性的影响，采用归一化相关系数（Normalized Coefficient，NC）度量提取的水印质量，计算了不同宿主图像、不同水印、不同色域嵌入水印的NC值，见表2。

表1 不同色域嵌入水印的PSNR值测试结果

Tab.1 Test result of PSNR value of watermarked images in different color space

宿主图像	水印	打印后扫描图像 PSNR/dB		
		sRGB 颜色模式	CMYK 颜色模式 (应用默认 ICC : Japan Color 2001 Coated)	CMYK 颜色模式 (应用步骤 2 中 ICC 特性文件)
Lena	文字	15.8539	15.5958	20.3405
	二维码	15.7845	16.0596	20.1728
Monarch	文字	16.1388	15.7075	18.6598
	二维码	14.3284	16.1581	19.0244
平均值		15.5264	15.8803	19.5494

表2 不同色域嵌入水印的NC值测试结果

Tab.2 Test result of NC value of watermarks in different color space

宿主图像	水印	打印后扫描图像 NC		
		sRGB 颜色模式	CMYK 颜色模式 (应用默认 ICC : Japan Color 2001 Coated)	CMYK 颜色模式 (应用步骤 1 中 ICC 特性文件)
Lena	文字	0.6341	0.7194	0.7246
	二维码	0.7523	0.8410	0.7935
Monarch	文字	0.6789	0.7037	0.7126
	二维码	0.7509	0.8502	0.8723
平均值		0.7041	0.7786	0.7758

窄色域中提取到的二维码水印可成功扫描提取信息，见图 11。



图 11 由窄色域打印扫描图像中提取的水印
Fig.11 Extracted watermark from print-and-scan image in narrow color gamut

在 CMYK 颜色模式中嵌入水印，其 NC 值相对 RGB 颜色模式较高，具备明显优势，见表 2。为结合图像保真度综合分析，将 PSNR 与 NC 的平均值一同绘制于图 12 中。

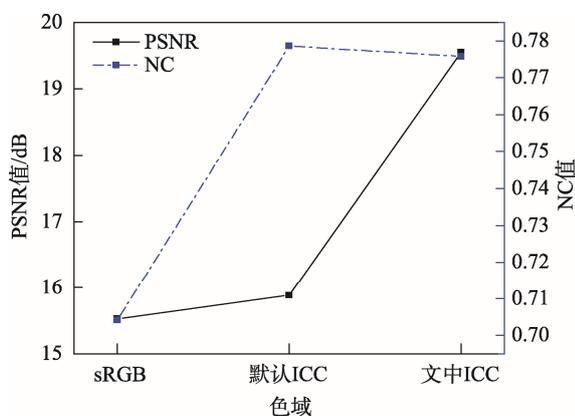


图 12 不同色域下 PSNR 值与 NC 值
Fig.12 PSNR and NC values in different gamut

如图 12 所示，综合保真度和鲁棒性 2 个指标，在应用文中 ICC 特性文件转换颜色模式后嵌入水印，与在 sRGB 颜色模式中嵌入水印相比，鲁棒性与保真度均有明显优势；文中 ICC 与以默认 ICC 相比，鲁棒性相当，保真度具有明显优势。这种通过为设备量身定制 ICC 特性文件从而确定窄色域的方法具备可移植性，可移植应用于其他印品水印防伪算法。

4 结语

文中提出了一种窄色域抗打印扫描全息水印算法。制作打印机的 ICC 特性文件，从而获得适合该设备的窄色域，在窄色域中嵌入水印，利用窄色域提升颜色在不同介质之间传递的一致性，从而提升水印对打印扫描攻击的鲁棒性。采用全息水印，结合全息图独特的不撕毁性和高频干涉条纹的编码形式，权衡水印鲁棒性与不可见性之间的关系。打印扫描试验表明，相对直接在 CMYK 或 RGB 颜色模式中嵌入水印，文中算法的鲁棒性和不可见性均具备明显优势，说明算法有益于数字水印在防伪印刷领域的应用。该算法

的不足之处是：算法不具备几何不变性，而拍照方式采集图像会产生倾斜、透视，因而算法限制了水印图像采集方式为扫描；没有考虑、测评算法对不同印刷方式、工艺参数及常用印后工艺攻击的鲁棒性，如上光、烫印、覆膜等。今后的研究可以从如下 2 个方面着手：结合尺度不变特征、极谱变换等算法优化水印抗几何攻击的鲁棒性；进行不同印刷方式及工艺参数条件下的水印性能试验，建立原稿、水印算法和印刷方式、工艺参数之间的关系模型，从而为不同特征的原稿选择适合的水印算法和印刷工艺参数。

参考文献：

- [1] HEBAH H O N. Digital Watermarking a Technology Overview[J]. International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 2011, 6(1): 89—93.
- [2] TRÉMEAU A, MUSELET D. Recent Trends in Color Image Watermarking[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2009, 53(1): 1—15.
- [3] VENI M, MEYYAPPAN T. Digital image Watermark Embedding and Extraction Using Oppositional Fruit Fly Algorithm[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(19): 27491—27510.
- [4] YAZDAN B F, MOGHADDAM M E. A Robust HDR Images Watermarking Method Using Artificial Bee Colony Algorithm[J]. Journal of Information Security and Applications, 2018, 41: 12—27.
- [5] RENZA D, LEMUS C. Authenticity Verification of Audio Signals Based on Fragile Watermarking for Audio Forensics[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 91: 211—222.
- [6] QASIM A F, MEZIANE F, ASPIN R. Digital Watermarking: Applicability for Developing Trust in Medical Imaging Workflows State of the Art Review[J]. Computer Science Review, 2018, 27: 45—60.
- [7] ARAGHI T K, MANAF A A. An Enhanced Hybrid Image Watermarking Scheme for Security of Medical and Non-medical Images Based on DWT and 2-D SVD[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 101: 1223—1246.
- [8] 张雯, 孟婕. 数字水印技术在印刷防伪领域应用的研究进展[J]. 包装工程, 2017, 38(15): 143—148.
ZHANG Wen, MENG Jie. Progress of Applying Digital Watermarking Technology in Printing Anti-counterfeiting[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(15): 143—148.
- [9] XU H, KANG X, CHEN Y, et al. Rotation and Scale Invariant Image Watermarking Based on Polar Harmonic Transforms[J]. Optik, 2019, 183: 401—414.
- [10] 严敏, 陈军. 基于 QR 分解的 Contourlet 域抗几何攻击水印算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(9): 2813—2818.
YAN Min, CHEN Jun. Anti-geometric Attack Wa-

- ter-marking Algorithm Based on QR Decomposition in Contourlet Domain[J]. *Application Research of Computers*, 2016, 33(9): 2813—2818.
- [11] TAKAI N, MIFUNE Y. Digital Watermarking by a Holographic Technique[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(5): 865—873.
- [12] OKMAN O E, AKAR G B. Quantization Index Modulation Based Image Watermarking Using Digital Holography[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2007, 24(1): 243—252.
- [13] MOOSAZADEH M, EKBATANIFARD G. A New DCT-based Robust Image Watermarking Method Using Teaching-learning-Based Optimization[J]. *Journal of Information Security and Applications*, 2019, 47: 28—38.
- [14] 肖颖喆, 张雯, 谢勇. CMYK 与 RGB 颜色空间数字水印在印刷品中的应用比较[J]. *包装学报*, 2015, 7(2): 11—15.
XIAO Ying-zhe, ZHANG Wen, XIE Yong. The Application of Digital Watermarking Technology for Printings in CMYK and RGB Color Space[J]. *Packaging Journal*, 2015, 7(2): 11—15.
- [15] 张金龙. 平版印刷工艺对全息水印防伪信息的影响与评估[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015: 17—48.
ZHANG Jin-long. The Impact and Assessment of Li-thography Process for Holographic Watermark Security Information[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2015: 17—48.
- [16] THONGKOR K, AMORNRAKSA T, DELP E J. Digital Watermarking for Camera-captured Images Based on Just Noticeable Distortion and Wiener Filtering[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2018, 53: 146—160.
- [17] PRAMILA A, KESKINARKAUS A, SEPPÄNEN T. Increasing the Capturing Angle in Print-cam Robust Watermarking[J]. *Journal of Systems and Software*, 2018, 135: 205—215.
- [18] 谢勇, 谭海湖, 王凯丽. 基于 DWT-QDFT 的硬拷贝彩色图像全息水印[J]. *光电子·激光*, 2016, 27(10): 1086—1093.
XIE Yong, TAN Hai-hu, WANG Kai-li. A Hologram Algorithm Based on DWT-QDFT for Hardcopy Color Image[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2016, 27(10): 1086—1093.
- [19] XIAO Ying-zhe, ZHANG Wen, XIE Yong. Influence of Different Color Space on Digital Watermarking for Anti-counterfeiting Printed Images[C]// *Control and Decision Conference(CCDC)*, Qingdao, China: IEEE, 2015: 1535—1539.