

基于扩频调制和视觉掩蔽的彩色图像盲水印算法

胡裕峰 朱善安

(浙江大学电气工程学院, 杭州 310027)

摘要 为了更好地实现彩色图像的版权保护,首先,从理论上说明了应该选择彩色图像绿色分量嵌入水印,然后提出了一种新的适应彩色图像的盲水印算法。该算法先对宿主图像的绿色分量以 8×8 pixels分块进行DCT变换;然后将二值水印图像用两个互不相关的伪随机序列进行扩频调制;最后为了最大限度地增强水印强度,且不影响透明性,通过引入人眼视觉掩蔽因子,将调制好的水印根据视觉掩蔽因子大小,不同强度地嵌入到DCT变换域的中频子带系数上。该算法是通过比较两个伪随机序列和水印化图像的相关性大小来提取水印,不需要原始图像的参与,为盲水印算法。实验结果证明,该算法能有效抵抗JPEG压缩、加噪、剪切、滤波等常见攻击,而且在绿色分量中嵌入水印比在红色和蓝色分量中嵌入水印能更好地抵抗JPEG压缩的攻击。

关键词 视觉掩蔽 扩频调制 绿色分量 盲水印

中图法分类号: TP309 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)07-1307-06

Color Image Blind Watermark Algorithm Based on Spread Spectrum Modulation and Visual Masking

HU Yu-feng, ZHU Shan-an

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract In order to better protect the copyright of the color image, this paper explained theoretically why the green color image component should be chosen to embed into a watermark, and thus proposed a new blind watermark algorithm for a color image. First, the green component of the original image was divided block by block with size 8×8 pixels, and transformed with discrete cosine transformation (DCT). Second, the binary watermark image was spread spectrum modulated by two uncorrelated random sequences. At last, in order to maximize the enhanced watermark strength without affecting transparency, human visual masking factor was imported. And the modulated watermark with different intensities was embedded in mid-frequency region coefficients of DCT domain based on visual masking factor magnitude. The watermark was extracted by comparing the relativity between two random sequences with watermarked image, and the process did not need the original image, which means a blind watermark algorithm. Experimental results demonstrated that this method was invisible and robust against some usual attacks such as JPEG compression, cropping, adding noise, and embedding watermark in a green component is more robust against lossy compression than embedding watermark in a red or blue component.

Keywords visual masking, spread spectrum modulation, green component, blind watermark

收稿日期:2007-12-17; 改回日期:2008-03-27

第一作者简介:胡裕峰(1982~),男。浙江大学电气学院控制理论与控制工程专业博士研究生。主要从事图像处理和数字水印技术的研究。E-mail:huyufeng0726@163.com

通讯作者:朱善安,E-mail:zsa@zju.edu.cn

1 引言

随着计算机网络技术的迅猛发展,多媒体的内容容易被复制、非法传播以及蓄意攻击,其版权保护日益引起人们的关注。数字水印技术(digital watermarking)^[1-4]为网络环境下多媒体内容的版权保护提供了有效的解决方案,它可将不可察觉的信号嵌入到多媒体内容中,使其在发布传播后,能从中提取出这些信息用于版权保护。目前,很多研究者虽已对灰度图像的数字水印技术进行了深入的研究,但由于彩色图像是当前图片内容传播的主流,因此如何在彩色图像中合适地嵌入水印,值得深入研究。作为对灰度图像水印方案的扩展,有研究者利用颜色空间变换先将彩色图像从 RGB 颜色空间变换到 YUV、YIQ^[5-6]等颜色空间,然后在亮度分量的离散余弦变换(DCT)、离散小波变换(DWT)等变换域嵌入水印,这些方法由于在色彩空间相互转换后存储时要进行取整,因此易导致数值误差。Kutter 等人根据人眼对蓝色分量变换不敏感的特性,提出了一种在彩色图像的蓝色分量中嵌入水印的方案^[7]。但是由于彩色图像所占空间大,传播时一般都经 JPEG 压缩处理,经压缩后,红、蓝色分量损失的能量大,在这两个颜色分量中嵌入水印,水印信息相对损失也较大,不易提取,而绿色分量损失的能量则相对较小,因此将水印嵌入到绿色分量是一种较好的选择。

目前的水印技术主要分为空域和变换域水印技术两类。其中,空域嵌入水印,水印信息容量大,计算复杂度低,但稳健性差,很难抵抗包括有损压缩和加噪等在内的各种攻击;变换域水印算法稳健性强,是人们研究的主流,它主要包括离散傅里叶变换(DFT)、DCT 变换、DWT 变换等方法。变换域图像的能量主要集中在低频部分,在 JPEG 压缩中,图像 8×8 块 DCT 变换后能明确地分为低、中、高 3 种频带区域^[8]。如图 1(a)所示, R_{FL} 表示图像块 DCT 变换后的低频区域,是影响图像视觉效果的最重要的区域,人眼对这部分的变化最敏感; R_{FM} 表示图像块 DCT 变换后的中频区域; R_{FH} 表示图像块 DCT 变换后的高频区域,也是人眼最不敏感区域,将水印信息嵌入到此区域能取得很好的视觉透明效果,但是此区域正是压缩时量化步长最大的区域,各种常见的图像操作如有损压缩等对其损失很大,水印信息很

容易丢失。综合比较可见,在中频区域嵌入水印能避免图像的严重失真和能增强抗有损压缩的能力,是比较好的选择。另外,DCT 域可以结合人类视觉系统特性,自适应地调整嵌入水印的强度,Waston 提出了一个经典的符合 JPEG 压缩的 DCT 域视觉模型^[9],因此可以充分利用该视觉模型来构建视觉掩蔽因子,以便在保证透明性的前提下最大限度地提高水印嵌入强度来提高算法的鲁棒性。

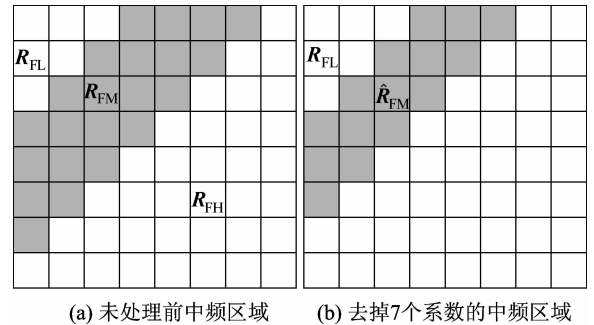


图 1 DCT 变换后频带区域
Fig. 1 Frequency region of DCT

综上所述,本文提出了一种新的水印算法:二值水印图像经两个互不相关的伪随机序列扩频调制后,再利用 DCT 域的视觉模型中的对比敏感算出亮度掩蔽作为原始图像分块 DCT 变换后的像素掩蔽因子,水印则根据该因子不同强度地嵌入到宿主图像绿色分量的 DCT 变换域的中频子带系数上,提取水印时,可直接通过比较两个伪随机序列和水印化图像的相关性大小来提取水印,而不需要原始图像的参与。

2 选择绿色分量的理由

在对 RGB 彩色图像进行 JPEG 压缩时,需经过颜色转换、DCT 变换、量化、编码、颜色转换 5 步。其中, JPEG 压缩只支持 YUV 颜色模式的数据结构,而不支持 RGB 图像数据结构,RGB 彩色图像在进行压缩之前,须按式(1)将图像从 RGB 模型转换到 YUV 模型^[10],即

$$\begin{cases} Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \\ U = -0.169R - 0.3313G + 0.5B \\ V = 0.5R - 0.4187G - 0.0813B \end{cases} \quad (1)$$

其中, Y 表示亮度分量, U 和 V 表示颜色分量。

转换完成之后还需要先进行数据采样,然后再

进行量化。一般采用的采样比例是 2:1:1 或 4:2:2。由式(1)可见,占采样比例大的最重要的亮度分量 Y 中,绿色分量明显高于红色和蓝色分量,因此在进行 JPEG 压缩时,绿色分量信息保存最多,所以选择在绿色分量嵌入水印信息,鲁棒性更强。

3 水印图像和原始图像预处理

3.1 水印的扩频调制

对一个大小为 64×64 的二值水印图像矩阵 W 通过进行从左到右、从上至下逐行扫描,生成 1 维水印序列 $\hat{W}_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2, 3, \dots, 64 \times 64$ 。由图 1(a) 得知,图像 8×8 块 DCT 变换后中频区域有 22 个 pixels,由于用于版权保护的水印算法要在透明性和鲁棒性两个矛盾之间折中,改变了过多像素容易引起图像失真,且水印扩频序列长度超过 8 以上足以满足鲁棒性的要求,因此可去掉中频区域斜右下一排 7 pixels,保留 15 pixels,组成中频区域 \hat{R}_{FM} 。按下式规则生成两个伪随机序列 D_0 和 D_1 :

$$\begin{cases} D_0 = \{d_{0,k} \mid d_{0,k} \in \{-1, 0, 1\}, k = 1, 2, 3, \dots, 15\} \\ D_1 = \{d_{1,k} \mid d_{1,k} \in \{-1, 0, 1\}, k = 1, 2, 3, \dots, 15\} \\ \sum_{k=1}^{15} d_{0,k} = 0, \sum_{k=1}^{15} d_{1,k} = 0, \sum_{k=1}^{15} d_{0,k} \times d_{1,k} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

即 D_0 和 D_1 均为值为零、互不相关的两个伪随机序列。1 维水印序列 \hat{W}_i 的每一位用两个伪随机序列进行扩频调制,其中“0”以 D_0 表示,“1”以 D_1 表示,并将每一位(如图 1(b) 所示)填充为 8×8 的矩阵 $\hat{W} = [\hat{W}_j(u, v)]$; ($u = 1, 2, \dots, 8, v = 1, 2, \dots, 8$), 后文提到的 u 和 v 都在此范围,表示 8×8 块的各个系数位置,下标 j 表示水印的第几位。伪随机序列 D_0 或 D_1 的元素按照从左至右、从上至下的顺序依次填入灰色的中频区域 \hat{R}_{FM} , 其他白色区域的元素都填为 0。

3.2 亮度视觉掩蔽因子

Watson 提出了适应 JPEG 压缩的 DCT 域的视觉模型^[9],它利用人的感知掩蔽特性算出在 JPEG 压缩中分块 DCT 变换后图像的掩蔽因子。掩蔽因子越大,证明人眼对该像素越不敏感,可以嵌入较大强度的水印信息,掩蔽因子小,证明人眼对该处敏感,相应地则应嵌入较小强度的水印信息。这样就

可以充分利用掩蔽因子来控制水印嵌入的强度,在保证透明性的前提下,尽可能地增大水印的嵌入强度,以提高算法的鲁棒性。

Waston 模型定义了一个 8×8 的对比敏感表 $t(u, v)$,表中每个数字表示在不存在掩蔽的情况下可被感知的最小 DCT 系数,具体数值参考文献[9]。在此基础上综合像素的平均亮度大,DCT 系数可进行较大幅度的修改,然后即可得出 DCT 系数的以下亮度掩蔽因子:

$$\beta_j(u, v) = t(u, v) \left(\frac{c_{00j}}{\bar{c}_{00}} \right)^\alpha \quad (3)$$

式中, j 表示分块 DCT 变换后的块的序号, c_{00j} 表示当前块的 DC 系数, \bar{c}_{00} 为图像分块余弦变换后的平均 DC 系数,它表示图像的平均亮度, α 是控制亮度因子强度的参数,文献[9]中推荐该参数取 0.649。

4 水印的嵌入和提取

4.1 水印的嵌入

水印嵌入的步骤如下:

(1) 提取原始 RGB 图像的绿色分量 G 。

(2) 对绿色分量先按照先 8×8 分块,再分别进行 DCT 变换得到 $B_j(u, v)$,然后计算出绿色分量的视觉掩蔽因子 $\beta_j(u, v)$, j 表示图像块的序号,块的扫描顺序是从上至下,从左至右。

(3) 按下式分块加性地嵌入水印

$$B_j^w(u, v) = B_j(u, v) + K \times \beta_j(u, v) \times \hat{W}_j(u, v) \quad (4)$$

其中, K 为嵌入强度,当 $u, v \notin \hat{R}_{FM}$ 时,取值为 0,即不嵌入水印;当 $u, v \in \hat{R}_{FM}$ 时,则取一正常数,用于控制水印的总体嵌入强度。

(4) 对 $B_j^w(u, v)$ 进行 IDCT 变换先得到水印化图像的绿色分量,然后和原图像的红、蓝分量合成水印化的 RGB 图像。

4.2 水印的无源提取

本文的水印算法为盲提取算法,其在提取水印时不需要原始图像的参与,是直接通过比较相关值的大小关系来重构水印,在实际应用中可适应原图像难以获得的情况。水印提取的步骤如下:

(1) 提取水印化 RGB 图像的绿色分量 \hat{G} 。

(2) 先对绿色分量按照 8×8 分块,再通过分别进行 DCT 变换来得到 $\hat{B}_j(u, v)$,然后取各块的中频区域中的点 (u, v) 的系数 $\hat{B}_j(u, v)$ ($u, v \in \hat{R}_{FM}$),再按

从左至右、从上至下的顺序将每个中频系数重排为 1 维序列 $\hat{\mathbf{B}}_j(m)$, ($m=1,2,3,\dots,15$), 上面提到的下标 j 表示块的序号。

(3) 依次分块计算中频系数 1 维序列 \mathbf{D}_0 和伪随机序列 \mathbf{D}_1 的相关值, 并按式(5)来确定提取水印的位置。

$$L_j = \begin{cases} 0 & \text{Corr2}(\mathbf{D}_0, \hat{\mathbf{B}}_j) > \text{Corr2}(\mathbf{D}_1, \hat{\mathbf{B}}_j) \\ 1 & \text{Corr2}(\mathbf{D}_0, \hat{\mathbf{B}}_j) \leq \text{Corr2}(\mathbf{D}_1, \hat{\mathbf{B}}_j) \end{cases} \quad (5)$$

其中, Corr2 表示计算两者的相关值, 具体定义如式(6)所示, \bar{M} 和 \bar{N} 分别表示矩阵 \mathbf{M} 和 \mathbf{N} 中元素的平均值。

$$\begin{aligned} & \text{Corr2}(\mathbf{M}, \mathbf{N}) \\ &= \frac{\sum_m \sum_n (M_{m,n} - \bar{M})(N_{m,n} - \bar{N})}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n (M_{m,n} - \bar{M})^2\right) \left(\sum_m \sum_n (N_{m,n} - \bar{N})^2\right)}} \end{aligned} \quad (6)$$

(4) 将 1 维水印 \mathbf{L} 重新排列成原 2 维水印图像大小, 即得到提取的水印图像。

(5) 水印提取出来后, 可通过主观视觉判断水印是否相同, 也可以比较提取的水印和原始水印的相似度, 相似度的定义如下:

$$S = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \overline{W(x,y) \oplus \hat{W}(x,y)}}{X \times Y} \quad (7)$$

其中, \hat{W} 为提取的水印, W 为原始水印, \oplus 为异或操作, X, Y 分别表示水印图像的宽和高, S 表示提取出来的水印和原始水印对应位置像素值相同的像素个数与总像素个数的比值。

(6) 给定一个阈值 T , 如果 $S > T$, 则认为待检测图像中含有原始水印, 否则水印不存在。

5 实验结果和分析

本文以大小为 64×64 的二值图像作为水印, 依照均值为零, 互不相关的规则取值, 扩频调制的两个伪随机序列分别选为

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_0 &= [0, -1, -1, -1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, -1, -1, 0, 1, 1] \\ \mathbf{D}_1 &= [0, 0, 0, -1, 1, 0, 0, -1, 0, 1, 1, 0, -1, 1, -1] \end{aligned}$$

图 2(a) 是大小为 512×512 的 256 级 RGB 颜色模型的 Lena 彩色图像。实验时, 先提取其绿色分量, 并将绿色分量分成 8×8 大小的子块, 然后分块

进行 DCT 变换, 同时在中频区域按式(4)定义嵌入扩频调制后的水印序列; 最后经 IDCT 变换得到水印化图像(图 2(b)), 图 2(c) 为两者的图像差(为方便观察, 亮度增强 20 倍)。水印嵌入强度 $K=15$, 本文用峰值信噪比(PSNR)^[11]来评价两幅图像的保真度。从图 2 可以看出, 人眼无法察觉原始图像和水印化图像的差别, 这证明本文算法能保证水印的透明性。从两者差异图可见, 水印信息分布在纹理复杂区域, 且在边缘处对比度较大的地方嵌入的水印强度大。

受到各种常见攻击后的水印化图像如图 3 所示。

图 2 Lena 原始图像和水印化图像
($K=15$, PSNR = 36.8 dB)

Fig. 2 Original image and watermarked image

图 3 受到攻击后的水印化图像

Fig. 3 Attacked watermark image

表 1 为从各种攻击后的水印化图像中提取出来的水印图像及它们与原始水印图像的相似度 S 。从表中可以看出, 本文方法能有效抵抗 JPEG 压缩、加噪、剪切、滤波等常见攻击。当图像压缩度大, 压缩质量因子达到 20% 时, 本文算法提取出来的水印相

表 1 各种攻击提取出来的水印图像及它们与原始水印图像的相似度 S

Tab. 1 Extracted watermarks from different attacked and S with original watermark

攻击方法	未受攻击时	JPEG 压缩 $Q = 80\%$	JPEG 压缩 $Q = 70\%$	JPEG 压缩 $Q = 60\%$	JPEG 压缩 $Q = 50\%$	JPEG 压缩 $Q = 40\%$	JPEG 压缩 $Q = 30\%$
S	0.991 2	0.980 9	0.977 7	0.976 8	0.971 1	0.958 2	0.921 6
水印图像							
攻击方法	JPEG 压缩 $Q = 20\%$	高斯噪声 (0.0.01)	高斯噪声 (0.0.02)	椒盐噪声 (0.02)	3×3 中值滤波	剪切部分区域	剪切多区域
S	0.797 3	0.964 3	0.965 3	0.974 3	0.963 6	0.948	0.941 6
水印图像							

似度 S 为 0.797 3,人眼还是能判断出提取的水印就是原始水印,这证明采用图像作为水印信息,在提取的时候更容易被人眼的自适应性判断出水印的正确与否。即使剪切不同的区域,包括边缘、中央等,本文方法都能正确地提取出水印,这是因为剪切破坏的只是图像部分块的信息,而水印信息是嵌入到图像的各个区域,即使破坏了部分水印信息,还能够利用人眼视觉特性辨认出水印。为了提高安全性,还可以采用各种置乱算法^[12]把水印信息打散到图像的各个区域,令剪切破坏的水印信息均匀分布在水印图像里面,而不是集中在一个区域。

表 2 给出了在宿主图像的不同颜色分量中嵌入同强度水印 ($K = 15$) 后,抵抗 JPEG 有损压缩的性能试验数据。由表 2 可以看出,在不同的颜色分量嵌入水印,其抵抗 JPEG 压缩攻击的性能差别很大。在嵌入同等强度水印、同等 JPEG 压缩因子的情况下,由嵌入水印的绿色分量图像中提取的水印与原始水印的相似度 S 最高,红色分量次之,蓝色分量最低。特别是当 JPEG 压缩度大(压缩质量因子小于 60%)的时候,红色分量和蓝色分量抗攻击的能力迅速下降,而绿色分量还能保持大的相似度。这证明绿色分量抗 JPEG 压缩的鲁棒性最好,红色分量次之,蓝色分量很差。同时,也对嵌入水印后的不同颜色分量的水印化图像进行加噪、剪切等攻击性试验,发现 3 个颜色分量对此类攻击的鲁棒性相差不大。主要是因为 JPEG 压缩时,对绿色分量影响最

小,而对红、蓝色分量舍弃得较多,在进行其他加噪、剪切等攻击的时候,各个颜色分量受影响的程度相差不大。

表 2 不同颜色分量嵌入同强度水印 ($K = 15$) 经 JPEG 压缩攻击后提取的水印的相似度 S 比较

Tab. 2 Comparison of S in different color components under JPEG compression attack

压缩质量 因子 Q (%)	JPEG 压缩攻击后提取的水印的相似度 S		
	红色分量	绿色分量	蓝色分量
90	0.961 1	0.981 6	0.923 5
80	0.943 8	0.980 9	0.876 4
70	0.940 1	0.977 7	0.817 6
60	0.926 7	0.976 8	0.716 5
50	0.897 7	0.971 1	0.631 1
40	0.837 1	0.958 2	0.579 5
30	0.672 6	0.921 6	0.538 3
20	0.493 6	0.797 3	0.474 8

为了验证算法的可靠性,用随机序列发生器设计了 250 个不同的 64×64 大小的二值水印,并用本文的原始水印替代第 100 个水印,分别嵌入到原始宿主图像,首先得到 250 个不同的水印化图像;然后分别对每个嵌入了水印的图像进行水印提取,并计算提取出的水印与原始水印的相似度 S ,提取的水印图像与原始水印图像的相似度曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出,只有水印化图像嵌入的是原始水印的时候,相似度 S 才产生峰值,而嵌入其他随机水印的相似度 S 都在 0.5 附近很小地波动。

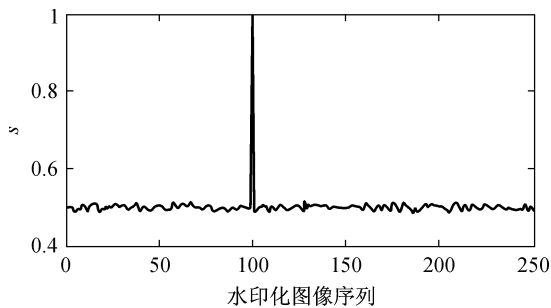


图 4 从 250 幅随机水印化图像中检测出来的水印的相似度

Fig. 4 Similarity degree of watermark detecting from stochastic 250 watermarked images

6 结 论

本文首先从理论上说明了 RGB 彩色图像最好选择绿色分量嵌入水印,而提出的算法则是采用二值图像作为水印图像,通过互不相关的两个伪随机序列扩频调制水印后,再由视觉掩蔽因子控制不同的强度,将水印嵌入到彩色图像的绿色分量的中频系数中。由于引入了视觉掩蔽因子,因此水印在不影响视觉失真的前提下,可最大强度地将水印嵌入到载体当中,从而增强了水印算法的鲁棒性。实验结果表明,其对加噪、剪切、滤波和 JPEG 压缩有很好的鲁棒性,在绿色分量中嵌入水印,其抵抗 JPEG 有损压缩攻击的能力远远好于在红色分量和蓝色分量中嵌入水印。本文算法提取水印的时候不需要原始图像的参与,为盲提取水印算法。

参考文献 (References)

- 1 Miller M L, Doerr G J, Cox I J. Applying informed coding and embedding to design a robust, high capacity watermark [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, **13**(6): 792-807.
- 2 Podilchuk C I, Delp E J. Digital watermarking: algorithms and applications [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2001, **18**(4): 33-46.
- 3 Lin C Y, Wu M, Lui Y M, *et al.* Rotation, scale and translation resilient public watermarking for images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, **10**(5): 776-782.
- 4 Kang X G, Huang J W, Shi Y Q. A DWT-DFT composite watermarking scheme robust to both affine transform and JPEG compression [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, **13**(8): 776-786.
- 5 Barni M, Bartolini F, Piva A. Multichannel watermarking of color images [J], IEEE Transactions on Circuits Syst. Video Technology, 2002, **12**(5):142-156.
- 6 He X P, Zhu Q S. A roust wavelet-domain watermarking algorithm for color image [A]. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics [C], Dalian, China, 2006:3940-3943.
- 7 Kutter M, Jordan F, Bossen F. Digital signature of colorimages using amplitude modulation [J]. Journal of Electronic Imaging, 1998, **7**(2): 326-332.
- 8 Langelaar G, Setyawan I, Lagendijk R L. Watermarking digital image and video data [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2000, **17**(9):20-43.
- 9 Watson A B. DCT quantization matrices visually optimized for individual images [A]. In: Proceeding of SPIE Conference Human Vision, Visual Processing, and Digital Display VI[C], Bellingham, WA, USA, 1995, 202-216.
- 10 Zhu Hong. Digital Image Process Foundation[M]. Beijing: Science Press, 2004. [朱虹. 数字图像处理基础[M]. 北京:科学出版社,2004.]
- 11 Stefan K, Fabien, A P P Information Hiding Techniques for Steganography and Digital Watermarking [M]. London, UK: Artec House, 1999:97-119.
- 12 Ding Wei, Yan Wei-qi, Qi Dong-xu. Digital image scrambling technology based on arnold transformation [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2001, **13**(4):338-341. [丁玮, 闫伟齐, 齐东旭. 基于 Arnold 变换的数字图像置乱技术 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, **13**(4):338-341.]