

潜像信息嵌入率对光栅防伪效果的影响

王琪, 王天马

(南京林业大学, 南京 210037)

摘要: **目的** 建立信息嵌入率与视觉感知阈值的关系模型, 利用韦伯定律和图像显著性相关理论分析嵌入率对潜像隐蔽性和提取效果的影响。 **方法** 在特征不同的宿主图像中, 以0.05为步长在(0, 0.50]区间内的信息嵌入率完成防伪标识的隐藏与光栅检测提取, 并用加权信噪比和彩色结构相似度评价隐蔽性、用信息熵函数和区域对比度评价提取显著性。 **结果** 潜像信息嵌入率与隐蔽性负相关, 与提取显著性正相关; 在潜像嵌入和光栅提取阶段, 纹理复杂的亮调图像其防伪隐蔽性和显著性都最佳, 信息嵌入率取值范围为 $R' \in [0.18, 0.41]$, 验证了理论分析的正确性。 **结论** 适用于大多数基于相位调制的光栅防伪技术。

关键词: 信息嵌入率; 光栅防伪; 数字加网; 人眼视觉特性

中图分类号: TS801 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)01-0147-07

Influence of Information Embedding Rate on Anti-counterfeit of Parallax Barrier

WANG Qi, WANG Tian-ma

(Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

ABSTRACT: The relationship model of information embedding rate and visual perception threshold was constructed in this paper, then the Weber's law and image saliency theory was applied to study the influence of the information embedding rate on imperceptibility and saliency of anti-counterfeit. Among various host images with different characteristics, the hiding and extraction of anti-counterfeit logo was implemented in range (0, 0.50] with step 0.05. The imperceptibility which resulted from the hiding process can be evaluated by WSNR and CISI indexes. The T_i and F_i indexes were applied to analyze the outcome of extraction process. The latent image information embedding rate was negatively related to the imperceptibility while positively related to the saliency. During the hiding and extraction process of latent image, the bright image with complex texture acted best on both imperceptibility and saliency. The information embedding rate ranged from 0.18 to 0.41, indicating that the theoretical analysis was correct. The embedding rate was applicable to most grating anti-counterfeiting technology based on phase modulation.

KEY WORDS: information embedding rate; grating anti-counterfeiting; digital halftone; HVS

光栅防伪技术将数字加网与信息隐藏技术相结合, 在宿主图像半色调加网过程中微量改变部分网点相位, 从而形成防伪标识的潜像。对应周期的光栅检测片覆盖在输出图像上, 形成周期无穷大的莫尔纹即

为隐藏的防伪标识^[1]。由于仿造者难以获取宿主图像及潜像的加网参数, 因此无法提取到防伪潜像。光栅防伪技术通过对莫尔纹的设计可以隐藏美观及具有时效性的防伪标识, 运用在版权保护时, 需要考虑防

收稿日期: 2015-05-08

作者简介: 王琪(1971—), 女, 河南上蔡人, 博士, 南京林业大学副教授、硕导, 主要研究方向为色彩管理与控制技术、印刷防伪技术等。

伪标识的大小及在宿主图像中的嵌入位置和通道。

与数字水印及信息隐藏技术不同,光栅防伪技术除了要保证防伪标识不被察觉,还要确保数字光栅能提取出防伪潜像,所以评价光栅防伪效果的指标主要有嵌入隐蔽性和提取显著性。这2个指标相互矛盾,相互制约,隐蔽性好势必会造成提取显著性的下降。在防伪母版及嵌入位置确定的情况下,防伪标识潜像的信息嵌入率直接影响防伪效果,确定最适用的信息嵌入率是十分必要。

文中将人眼视觉特性与光栅防伪技术原理相结合,分析潜像信息嵌入率对光栅防伪效果的影响,并建立信息嵌入率与隐蔽性、显著性关系模型。选用相位调制潜像法,以不同信息嵌入率将防伪标识隐藏到4幅纹理、亮度特性不同的宿主图像中,并且用对应周期数字光栅完成信息提取。用彩色结构相似度算法(CISI)和加权信噪比(PSNR)评价潜像的隐蔽性,用信息熵函数(T_i)和区域对比度(F_i)评价提取效果。

1 潜像信息嵌入率

数字加网后,防伪母版上形成 $M \times N$ 个网点,每一个网点百分比值为 $f(i, j)$,这些网点的集合为 $H = \{(i, j), i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N\}$,潜像区域的网点百分比值为 $g(i, j)$,集合为 $A = \{(i, j), i \leq M', j \leq N'\}$ 。潜像信息嵌入率可定义:

$$R = \frac{\text{card}[A_{(i,j)}]}{\text{card}[H_{(i,j)}]} = \frac{\sum_{i \leq M', j \leq N'} g(i, j)}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M f(i, j)} \quad (1)$$

式中: $\text{card}[A_{(i,j)}]$, $\text{card}[H_{(i,j)}]$ 分别为防伪母版上潜像总网点数和宿主图像总网点数。嵌入率的含义为防伪标识像素占宿主图像总像素的比重,即防伪母版上相位发生变化的网点占网点总量的比例,且 R 满足 $0 < R < 1$ 。

潜像区域边缘网点的集合定义为:

$$A_0 = \{(i, j), (i, j) \in A\} \quad (2)$$

$$\text{card}[A_0(i, j)] = \alpha \text{card}[A(i, j)] \quad (3)$$

式中: α 为系数; $\text{card}[A_0(i, j)]$ 为潜像边缘网点总数。潜像网点增多,潜像边缘区域的网点也必然增多。

信息嵌入率取值范围定义为:

$$R' \in (R_{s_0}, R_{u_0}) \quad (4)$$

式中: R' 为防伪标识不被察觉的情况下光栅检测片又能清晰提取的信息嵌入率取值范围; R_{s_0} 为提取阶段光栅检测片刚好能提取出潜像时的信息嵌入率; R_{u_0} 为嵌入阶段防伪标识潜像刚好被察觉的信息嵌入率。

2 信息嵌入率在光栅防伪中的作用

由于人眼对不同特征的图像具有不同的视觉响应,所以光栅防伪技术在隐藏阶段,宿主图像属于强背景,潜像属于弱信号,只要叠加的信号低于对比度阈值,视觉系统就无法感觉到信号的存在;在提取潜像阶段,相当于在前者上叠加一个刺激信号(数字光栅),潜像区域和宿主图像区域产生不同的视觉响应,当响应高于对比度阈值,视觉系统就会感觉到潜像的存在。当宿主图像、加网参数、防伪母版及嵌入位置确定时,信息嵌入率直接影响视觉感知阈值。文中提出的潜像信息嵌入率与光栅防伪视觉感知阈值的关系见图1。

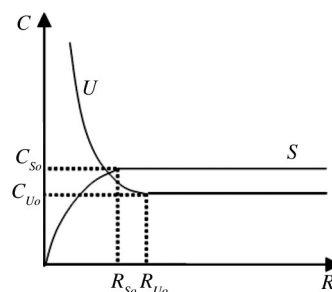


图1 信息嵌入率与视觉感知阈值的关系模型

Fig.1 The relationship model of information embedding rate and visual perception threshold

图1中 R 为潜像信息嵌入率, C 为人眼视觉感知阈值,曲线 U 为信息嵌入率与隐蔽性的关系,曲线 S 为信息嵌入率与提取清晰度的关系, C_{u_0} 为嵌入阶段潜像刚好被察觉的信息嵌入率 R_{s_0} 对应的阈值, C_{s_0} 为提取阶段潜像刚好被清晰提取出的信息嵌入率 R_{u_0} 对应的阈值。

2.1 信息嵌入率与隐蔽性

2.1.1 韦伯定律^[9]

德国实验心理学家韦伯-费纳发现大脑感受刺激强度的变化 ΔI 与初始刺激强度 I 有关。韦伯定律(Weber-Fechner law)可以表述为:感觉差别阈限随原刺激强度的变化而变化,而且差别阈限与原刺激强度的比值只有达到一定比例时,才能引起差别感觉,且该比例为一常数。韦伯定律的数学表达式:

$$\frac{\Delta I}{I} = K \quad (5)$$

式中: ΔI 为知觉差别阈限,也叫最小可觉差; I 为原刺激强度; K 为韦伯分数,不同类型的视觉感知, K 的取值不同。

2.1.2 嵌入率对隐蔽性的影响

将韦伯定律应用于防伪标识潜像嵌入前后的隐蔽性分析中,计算宿主图像每个网点和其邻域间的强度差之间的比值作为这个网点的韦伯分数,从而找到宿主图像中的显著变化来模拟人眼感知。设宿主图像上某点百分比为 $f_a(i,j)$,先计算与其邻域网点百分比差的绝对值和为 $^{[10]}$:

$$\Delta f_a(i,j) = \sum_{e=0}^{t-1} \Delta f_e(i,j) = \sum_{e=0}^{t-1} |f_e(i,j) - f_a(i,j)| \quad (6)$$

式(6)中 $f_e(i,j)$ ($e=0,1,\dots,t-1$) 为 $f_a(i,j)$ 的第 i 个邻域网点百分比值, t 为邻域网点的个数,根据韦伯定律,计算宿主图像上 (i,j) 处网点的韦伯分数值,记为 $K[f_a(i,j)]$,即

$$K[f_a(i,j)] = \frac{\Delta[f_a(i,j)]}{I[f_a(i,j)]} \quad (7)$$

根据式(7)得到防伪标识嵌入潜像前的宿主图像韦伯分数矩阵 W_f :

$$W_f = \begin{pmatrix} K_f(1,1) & \dots & K_f(1,M) \\ \vdots & & \vdots \\ K_f(N,1) & \dots & K_f(N,M) \end{pmatrix} \quad (8)$$

由于光栅防伪技术对宿主图像的改动仅为防伪标识的嵌入潜像区,所以潜像嵌入后的韦伯分数矩阵 W_f 有如下2种情况。

1) 光栅防伪潜像区域内部和宿主图像区域具有同质性,图2a为防伪母版上潜像部分区域与背景的截图,潜像区域内部的网点与背景网点呈相同规律排布,因此潜像区域内的网点和宿主图像区域 H 的网点韦伯分数值相同且较小。即调制相位前后这两部分对应位置处的网点韦伯分数值不变, $K[f'(i,j)]-K[f(i,j)]=0$ 。当四色通道叠加输出时,图2b中内部网点几乎完全隐藏在其中。

2) 潜像区域边缘的网点变化剧烈(见图2a),其边缘网点相位变动明显,调制相位前后网点韦伯分数值改变,而且边缘区 A_0 的网点的韦伯分数值变大,易被人眼感知,此时 $K[f'(i,j)]-K[f(i,j)] \neq 0$ 。

根据潜像嵌入前后宿主图像各网点韦伯分数变化提取出影响隐蔽性的网点区域,即:

$$\Delta K = K[f'(i,j)] - K[f(i,j)] = \begin{cases} 0 & (i,j) \in H \\ \text{非零常数 } \beta & (i,j) \in A_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\Delta K=0$ 表示不引起视觉感知,网点 (i,j) 为背景区和潜像区域内部的网点; $\Delta K \neq 0$ 表示引起视觉感知,网点 (i,j) 为潜像区域边缘的网点。隐蔽性评价中引起潜像视觉感知的是集合 A_0 中的元素。

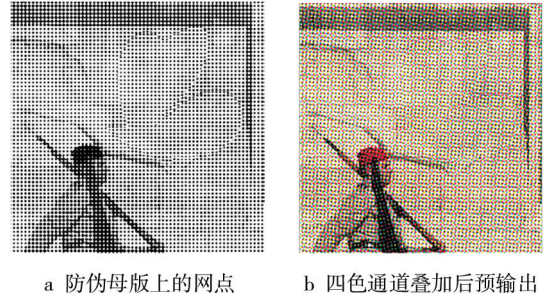


图2 防伪标识潜像部分区域与背景图放大

Fig.2 Part area of the latent image and the background amplification after screening

$$\text{card}(\Delta K \neq 0) = \text{card}[A_0(i,j)] = \alpha \text{card}[A(i,j)] = R \alpha MN \quad (10)$$

由于 α, M, N 都为常数,在防伪母版及嵌入位置确定的情况下,信息嵌入率 R 越大,韦伯分数越高,越易被察觉,隐蔽性越差。

2.1.3 隐蔽性评价

1) 加权信噪比

$$WSNR = 10 \lg \frac{\sum_{u,v} |F(u,v) CSF(u,v)|^2}{\sum_{u,v} |((F(u,v) - G(u,v)) CSF(u,v))|^2} \quad (11)$$

式中: $F(u,v), G(u,v)$ 分别为经过离散傅里叶变换后的宿主图像和潜像设置后的图像; $CSF(u,v)$ 为视系统对比敏感反应函数。

2) 彩色视觉结构相似度

$$CISI(X,Y) = (M - SSIM(X,Y)_L)^{w_1} \cdot (M - SSIM(X,Y)_C)^{w_2} \cdot (M - SSIM(X,Y)_H)^{w_3} \quad (12)$$

$$M - SSIM(X,Y)_L = \prod_{j=1}^n (C_L^j S_L^j L_L^j)^{\alpha_j} \quad (13)$$

$$M - SSIM(X,Y)_C = \prod_{j=1}^n (C_C^j S_C^j L_C^j)^{\alpha_j} \quad (14)$$

$$M - SSIM(X,Y)_H = \prod_{j=1}^n (C_H^j S_H^j L_H^j)^{\alpha_j} \quad (15)$$

式中: C_L, C_C 和 C_H 分别为2幅图像中亮度、彩度、色相等3个方面对比度比较值; S_L, S_C 和 S_H 分别为2幅图像中亮度、彩度、色相等3个方面纹理结构的比较值; L_L, L_C 和 L_H 分别为2幅图像中亮度、彩度、色相等3个方面亮度比较值; n 为M-SSIM算法尺度数, $w_1=1, w_2=w_3=0.45$ 。

2.2 嵌入率对提取显著性

2.2.1 图像显著性

图像显著性是指图像中的像素点能够区别于其

他点形成明显轮廓从而吸引视觉注意的能力。图像显著性评价是通过图像颜色、强度、对比度等特征的分析,表征图像显著性的一种方法^[11]。

感知方面的研究成果表明^[12]:在低层视觉显著性中,对比度是最重要的影响因素。现有的显著区域检测方法通过计算每个图像子区域同其一定范围内的相邻区域的对比度来度量该图像子区域的显著性。基于全局对比的显著区域检测算法将整幅图像作为对比区域来计算每个图像子区域或像素的显著值。陈明明^[13]等人对每个区域 r_k ,通过计算它与图像其他区域颜色对比度的空间加权来定义它的显著值。

$$S_c(k) = \sum_{r_i \neq r_k} \exp(-D_s(r_k, r_i)/\sigma_s^2) \omega(r_i) \quad (16)$$

式中: $\omega(r_i)$ 为区域 r_i 的像素数; $D_s(r_k, r_i)$ 为区域 r_k 和 r_i 的空间距离,2个区域的空间距离定义为2个区域重心的欧几里得距离; σ_s 为控制空间权值的强度, σ_s 越大,空间权值的影响越小,导致较远区域的对比度会对当前区域显著性值做出较大的贡献。

2.2.2 嵌入率对显著性的影响

光栅防伪标识提取的方法为:将光栅覆盖在宿主图像上并旋转适当角度;当角度正确时,防伪标识便在宿主图像中突显出来,完成防伪信息的提取。如图3所示“蝴蝶”和“HAPPY”即为防伪标识,具有一定的显著性。

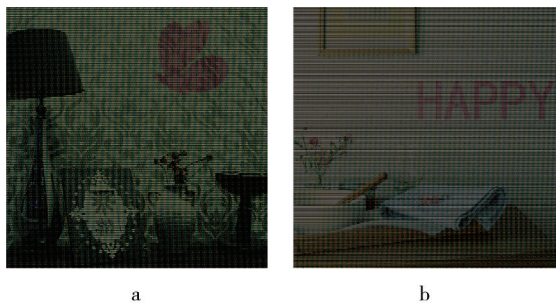


图3 数字光栅提取效果

Fig.3 Extracting image of digital grating

将提取效果图分割成防伪标识区域 A 和其他区域 A_1 两部分,根据式(1),则式(11)可以表达为:

$$S_A(k) = \sum_{r_i \neq r_A} \exp(-D_s(r_A, r_i)/\sigma_s^2) \cdot R \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M f(i, j) \quad (12)$$

$S_A(k)$ 即为防伪标识的显著性值,当宿主图像和嵌入位置确定时,区域 A 和 A_1 的空间距离 $D_s(r_A, r_{A1})$ 为定值,区域 A_1 的像素数 $\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M f(i, j)$ 也为定值。所以此时信息嵌入率 R 与显著性正相关。信息嵌入率越大,

防伪标识显著性值越大,防伪标识越容易被识别,提取效果越好。

2.2.3 显著性评价

1) 区域对比度图像评价

$$F_i = \frac{1}{mn} \sum_M \sum_N dev(x, y) \quad (18)$$

$$dev(x, y) = \frac{\max f_{\Delta}(x, y) - \min f_{\Delta}(x, y)}{\max f_{\Delta}(x, y)} \quad (19)$$

式中: $dev(x, y)$ 为上述定义的区域对比度; $\max f_{\Delta}(x, y)$ 和 $\min f_{\Delta}(x, y)$ 分别为该区域内灰度的最大值和最小值, $0 \leq dev(x, y) \leq 1$ 。

2) 信息熵函数

$$T_i = - \sum_{k=1}^N p_k \log_e p_k \quad (20)$$

式中: p_k 为灰度值 k 在该图像中出现的频率; N 为图像的灰度等级。

3 结果与分析

3.1 实验

通过已有的研究可知^[14],亮调和中间调区域是光栅防伪最适用的图像载体,因此文中选择适合作潜像嵌入的4幅特征图像作为宿主图像进行研究。根据信息嵌入率理论模型,在 $(0, 0.50]$ 信息嵌入率区间内以0.05为间隔,选取青通道作为防伪母版完成防伪标识的隐藏与光栅检测,同时对嵌入信息的隐蔽性及提取信息的显著性进行客观评价。

嵌入的隐藏防伪标识为图3a所示的“蝴蝶”形状,隐藏位置如图4中红色虚线圈标出的位置,分别在图4a纹理复杂图像的亮调区、图4b平滑图像亮调区、图4c纹理复杂图像的中间调区、图4d平滑图像的中间调区。

3.2 结果分析

3.2.1 信息潜入率对隐蔽性影响

实验结果表明,对于相同的宿主图像,潜像嵌入率越小,信息隐蔽性越好,即原图像的保持度越好,反之,则越差。若针对亮度和纹理特性不同的图像时,即便是相同的潜像嵌入率,其防伪信息的隐蔽性也会存在不同。如图5所示为潜像嵌入率均为0.3时4幅图像的显示效果,观察潜像所在区域可以发现,图5a与5b中的“蝴蝶”图案几乎不可见,而图5c与图5d中“蝴蝶”图案则可依稀觉察。可见,宿主图像本身的纹

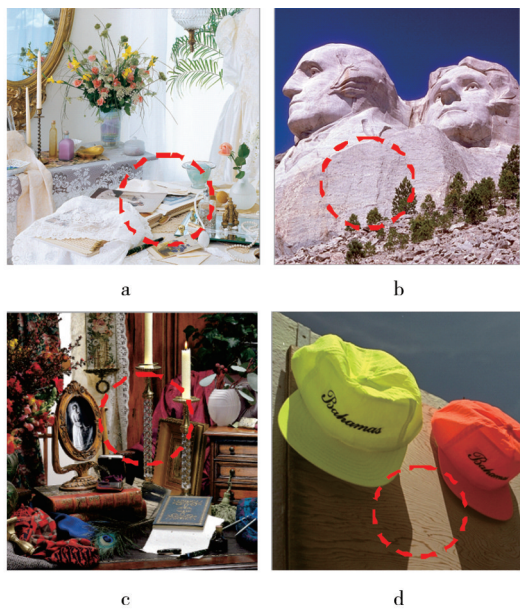


图4 宿主图像
Fig.4 The host images

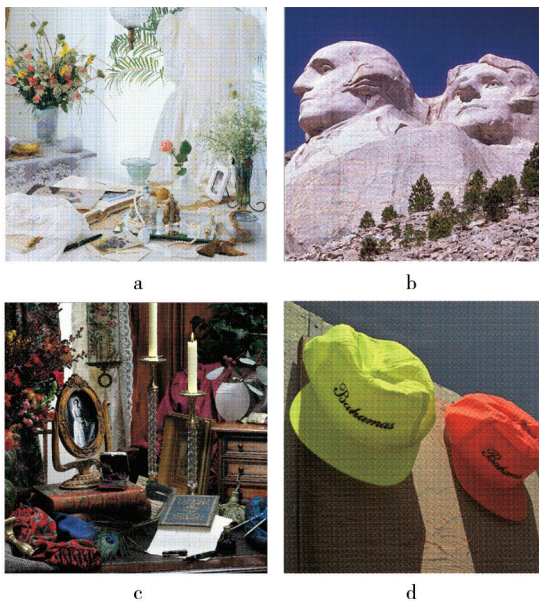


图5 携带防伪信息的半色调图像
Fig.5 Halftone images with anti-counterfeit information

理及亮度结构也会影响到防伪标识的隐蔽性。纹理复杂的亮调区域适合作为嵌入位置。

依据文中上述潜像隐蔽性客观评价算法,当CISI值越接近1,与原图结构就越相似,嵌入隐蔽性越好;当WSNR值越大,说明其嵌入隐蔽性越好。在(0,0.5]信息嵌入率区间,计算出以0.05为间隔所对应的WPSNR与CISI值,绘制出不同类型宿主图像的信息嵌入率与隐蔽性关系见图6。当宿主图像及嵌入位置确定后,隐蔽性随信息嵌入率的增大呈衰减趋势。

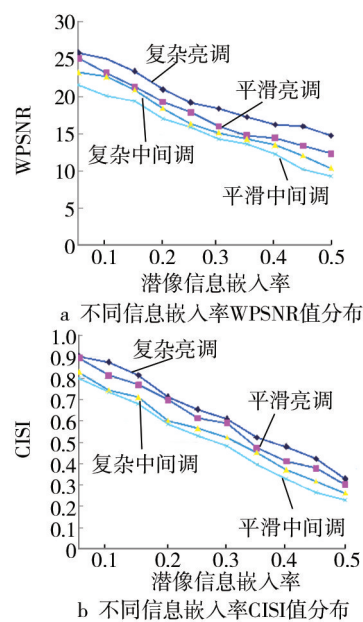


图6 信息嵌入率与隐蔽性关系
Fig.6 Relationship of information embedding rate with the imperceptibility

3.2.2 信息潜入率对提取显著性的影响

将对应周期的数字光栅覆盖在图7中预复制的宿主图像上,旋转至正确角度便可提取到正确的防伪标识,见图7。4幅图中蝴蝶图案均可见,但图7a和图7b的潜像提取效果明显优于图7c和图7d,提取出潜像的显著性依次a>b>c>d。



图7 数字光栅与半色调图像覆盖
Fig.7 Host image after overlapped digital grating

基于区域对比度和信息熵函数理论,它们的值越接近1,显著性越好。在(0,0.5]信息嵌入率区间内,潜

像嵌入率与提取显著性关系曲线见图8。在宿主图像确定的情况下,潜像的信息嵌入率与显著性正相关;当嵌入率大于0.15时,区域对比度和信息熵函数值的增大趋势则更为明显。

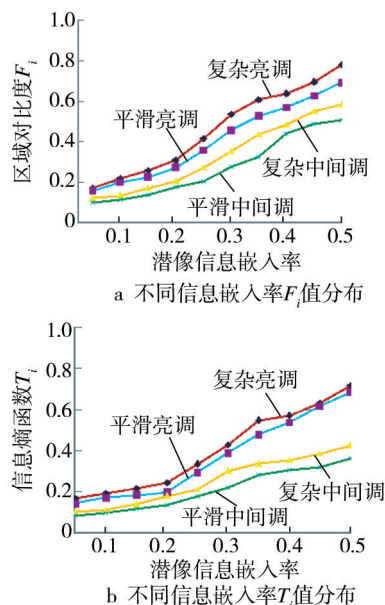


图8 信息嵌入率与显著性关系

Fig.8 Relationship of information embedding rate and the saliency

综上可知,纹理复杂的亮调区域最适合嵌入潜像,选取10幅全局纹理复杂的亮调图作为宿主图像进行实验,以主观评价隐蔽性和提取显著性的差异。每幅测试图中潜像刚好被感知时的信息嵌入率为 R_{uo} ,求均值为0.41。叠加数字光栅后防伪标识刚好在宿主图像凸显时的信息嵌入率为 R_{so} ,求均值为0.18。

4 结语

建立信息嵌入率与视觉感知阈值的关系模型,利用韦伯定律和图像显著性相关理论分析嵌入率对潜像隐蔽性和提取效果的影响。在特征不同的宿主图像中,以0.05为步长在(0,0.50]区间内的信息嵌入率完成防伪标识的隐藏与光栅检测提取。潜像嵌入后,获得每幅宿主图像信息嵌入率 R 与WSNR,CISI值的关系曲线;光栅覆盖后,获得每幅宿主图像信息嵌入率 R 与 F_i , T_i 值的关系曲线。针对纹理复杂的亮调图像进一步研究,寻找潜像不被感知时可嵌入的 R_{uo} ,以及光栅刚好提取出潜像时可嵌入的 R_{so} ,从而确定最适用于光栅防伪的最佳信息嵌入率范围。

通过对以上实验结果的观察与分析可知,信息嵌入率与隐蔽性负相关,与显著性正相关。由得到的关

系曲线图可知,客观评价与视觉主观评价具有较高的一致性;信息嵌入率决定了防伪标识网点数量,区域内全部网点数影响光栅防伪的显著性,而影响隐蔽性的则只是区域边缘网点;不同特征的宿主图像信息嵌入率的最佳范围各不相同,复杂纹理的亮调图像范围最大,更适用做光栅防伪技术的宿主图像,其信息嵌入率取值范围为 $R \in [0.18, 0.41]$ 。

参考文献:

- [1] WANG Qi, WANG Xiao-bo. Research on the Relationship of Grayscale between Digital Grating and the Host Image[J]. Appl Opt, 2014, 53(16): 66—72.
- [2] 方蒙蒙,何加铭,史智慧. 基于视觉掩蔽的隐写不可感知性评价方法[J]. 计算机工程, 2014(9): 167—170.
FANG Meng-meng, HE Jia-ming, SHI Zhi-hui. Imperceptibility Evaluation Method of Steganography Based on Visual Masking[J]. Computer Engineering, 2014(9): 167—170.
- [3] 谢建全,黄大足,阳春华. 图像信息隐藏不可感知性指标研究[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(5): 953—957.
XIE Jian-quan, HUANG Da-zu, YANG Chun-hua. Study on Imperceptibility Index of Information Hidden Based on Image [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2011, 32(5): 953—957.
- [4] 王琪,周小凡. 基于网点结构形态的图像信息印刷复制研究[D]. 南京:南京林业大学, 2013.
WANG Qi, ZHOU Xiao-fan. Image Information Printing Reproduction Research of Dot Structure[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.
- [5] 赵秀芝,谢德红,潘康俊. 彩色视觉相似性图像评价方法[J]. 计算机应用, 2013, 33(6): 1715—1718.
ZHAO Xiu-zhi, XIE De-hong, PAN Kang-jun. Color Image Quality Assessment Algorithm Based on Color Structural Similarity[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(6): 1715—1718.
- [6] 王晓博,王琪,刘萧豪. 基于周期无穷大纵向莫尔条纹的半色调防伪技术研究[J]. 包装工程, 2014, 35(1): 130—135.
WANG Xiao-bo, WANG Qi, LIU Xiao-hao. Research of Half-tone Anti-counterfeiting Technology Based on the Infinite Periodic Vertical Moiré [J]. Packaging Engineering, 2014, 35(1): 130—135.
- [7] 张亚涛,吉书鹏,王强锋,等. 基于区域对比度的图像清晰度评价算法[J]. 应用光学, 2012, 33(2): 293—299.
ZHANG Ya-tao, JI Shu-peng, WANG Qiang-feng, et al. Definition Evaluation Algorithm Based on Regional Contrast[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(2): 293—299.
- [8] 姜楠,王健,钮心忻,等. 信息隐藏模型及容量分析[J]. 计算机应用研究, 2005(3): 116—134.
JIANG Nan, WANG Jian, NIU Xin-xin, et al. Model and Ca-

- capacity of Information Hiding[J]. Application Research of Computer, 2005(3): 116—134.
- [9] JAIN A. Fundamentals of Digital Image Processing[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1989.
- [10] 邹小林, 冯国灿. 基于韦伯定律的过渡区提取及阈值分割[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(5): 4217—4221.
ZHOU Xiao-lin, FENG Guo-cai. Weber's Law-based Transition Region Extraction and Thresholding[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(5): 4217—4221.
- [11] 孙娜娜, 刘鑫. 图像显著性检测方法解析[J]. 现代电子技术, 2014, 37(22): 1—5.
SUN Na-na, LIU Xin. Analysis for Method of Image Saliency Detection[J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(22): 1—5.
- [12] 景慧昀, 韩琦, 牛夏牧. 显著区域检测算法综述[J]. 智能计算机与应用, 2014, 4(1): 38—44.
JING Hui-yun, HAN Qi, NIU Xia-mu. Survey of Salient Region Detection Algorithms[J]. Intelligent Computer and Applications, 2014, 4(1): 38—44.
- [13] CHENG Ming-ming, ZHANG Guo-xin, NILOY J M, et al. Global Contrast Based Salient Region Detection[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2011: 409—416.
- [14] 王天马, 王琪, 刘洪豪. 分通道相位调制潜像法防伪效果的评价[J]. 包装工程, 2015, 36(5): 117—121.
WANG Tian-ma, WANG Qi, LIU Hong-hao. Evaluation of Latent Image Anti-counterfeiting Effect Based on Sub-channel Phase Adjustment[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(5): 117—121.
- [15] LEGGE G E, FOLEY J M. Contrast Masking in Human Vision[J]. JOSA, 1980, 70(12): 1458—1471.
- [16] HECHT S. The Visual Discrimination of Intensity Mid the Weber-Fechner Law[J]. The Journal of General Physiology, 1924, 7(2): 235—267.
- [17] 胡安洲. 主客观一致的图像感知质量[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
HU An-zhou. Research on Subjectively-consistent Objective Image Quality Assessment[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [18] ACHANTAR, HEMAMI S, ESTRADA F, et al. Frequency Tuned Salient Region Detection[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009: 1597—1604.

(上接第 141 页)

- Imaging Conference, 2001: 355—359.
- [5] 张显斗, 徐海松. 液晶显示器颜色特征化的分段分空间模型[J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1719—1724.
ZHANG Xian-dou, XU Hai-song. Piecewise Partition Model of Color Characterization on Liquid Crystal Display[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(9): 1719—1724.
- [6] GUAN S S, LUO M R. Investigation of Parametric Effects Using Small Colour-differences[J]. Color Research and Application, 1999, 24(5): 331—343.
- [7] XU Hai-song, HIROHISA Y, SATOSHI S. Correlation between Visual and Colorimetric Scales Ranging from Threshold to Large Color Difference[J]. Color Research and Application, 2002, 27(5): 349—359.
- [8] GARRETT M J, MARK D F. Measuring Images: Differences[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5007: 51—60.
- [9] MONTAG E D, BERNS R S. Lightness Dependencies and the Effect of Texture on Suprathreshold Lightness Tolerances[J]. Color Research and Application, 2004, 29(5): 374—380.
- [10] 汪哲弘, 徐海松. 用阴极射线管显示器研究辨色阈值 I: 实验数据及人眼颜色视觉特性分析[J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1139—1143.
WANG Zhe-hong, XU Hai-song. Study on Color Discrimination Threshold Using CRT Display Part I: Analysis of Experimental Data and Human Color Vision Characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(7): 1139—1143.
- [11] 司占军, 胡媛, 张显斗. 专业显示器性能测试方法研究[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 102—106.
SI Zhan-jun, HU Yuan, ZHANG Xian-dou. Study on Performance Testing Method of Professional Display[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 102—106.
- [12] WANG Yong, XU Hai-song. Colorimetric Characterization of Liquid Crystal Display Using an Improved Two-stage Model[J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(7): 432—434.
- [13] 杨健, 石俊生, 黄小乔. 小范围内精确控制 CRT 显示颜色和色差的研究[J]. 光学技术, 2007, 33(4): 569—571.
YAN Jian, SHI Jun-sheng, HUANG Xiao-qiao. Study on the Color and Color Difference Control on CRT Display in Small Scale[J]. Optical Technique, 2007, 33(4): 569—571.
- [14] ROBERSTON A R. CIE Guidelines for Coordinated Research on Colour-difference Evaluation[J]. Color Research and Application, 1978, 3(3): 149—151.
- [15] BERNS R S, FERNANDEZ S R, LAPLIN L E. Black Level Emissions of Computer-controlled Displays[J]. Color Research and Application, 2003, 28(5): 379—383.