

# 基于边界调整的潜像隐蔽性优化方法

韩雪莹, 王琪\*, 葛乃馨

南京林业大学轻工与食品学院, 江苏 南京 210037

**摘要** 针对相位调制潜像防伪技术中存在嵌入的潜像隐蔽性不佳, 影响图像显示效果的问题, 提出了对潜像局部网点进行调整的方案, 以获得更优的潜像隐蔽质量。运用韦伯定律分析潜像区与对应母版区的网点排列特征, 发现潜像内部区域对潜像隐蔽性无影响, 而潜像轮廓区域对其整体隐蔽性影响较大。在研究潜像轮廓区网点位置分布特性的基础上, 推导出能够提高潜像隐蔽性的边界网点调整算法, 确定网点的位移量、补偿位置及面积调整系数, 并进行实验验证。结果表明, 该优化方法在保证潜像提取显著性的前提下, 隐蔽性能明显高于传统相位调制法。本研究为相位调制潜像防伪技术提供了新的优化方案。

**关键词** 图像处理; 相位调制; 边界网点; 隐蔽性; 提取性

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.161003

## Optimization of Latent Image Concealment Based on Boundary Adjustment

Han Xueying, Wang Qi\*, Ge Naixin

College of Light Industry and Food Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China

**Abstract** Focusing on the instability of concealment and display that occurs when embedding a latent image via a phase modulation technique, a scheme was proposed to obtain good anti-counterfeiting quality by adjusting latent image boundary dots. Weber law was used to analyze the dot arrangement characteristics of a latent image area and the corresponding hidden layer. Results indicate that the inner dots of the latent image did not affect the concealment, whereas the boundary dots had a great impact on its overall concealment. The boundary adjustment method was deduced based on the boundary dot location distribution; thus, the displacement, compensation position, and area adjustment coefficient were determined. Results show that the improved method outperformed the conventional phase modulation method under the premise of ensuring ensuring extracting effect, and provide a new optimization scheme for the grating anti-counterfeiting technology.

**Key words** image processing; phase modulation; boundary dots; concealment effect; extraction effect

**OCIS codes** 100.2810; 100.2960; 100.1160; 100.2000

## 1 引言

光栅防伪技术<sup>[1-2]</sup>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改变部分网点空间位置, 从而形成潜像防伪信息; 将对应周期的光栅检测片覆盖在输出图像上, 形成周期无穷大的叠栅条纹, 即形成隐藏的防伪标识。光栅防伪以相

位调制潜像法<sup>[3]</sup>作为基础理论, 其关键技术是保障隐藏信息的嵌入隐蔽性和提取显著性。钟云飞等<sup>[4]</sup>以相位调制法和调幅加网为基础, 分析调幅加网参数对潜像嵌入效果的影响, 通过实验对比得出较合适的加网参数; 王天马等<sup>[5]</sup>基于相位调制潜像法, 研究 C、M、Y、K 四色通道作为母版时的潜像防伪效果, 得出潜像载体最适用的通道。杨熙等<sup>[6]</sup>运用相

收稿日期: 2019-01-11; 修回日期: 2019-02-26; 录用日期: 2019-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(31270629)、江苏省制浆造纸科学与技术重点实验室开放基金(201513)、特殊形态网点设计与防伪应用研究(2017NFUSPITP352)

\* E-mail: wangqi@njfu.edu.cn

位调制潜像方法,将对称潜像分割后分别嵌入两个通道,实现了潜像的双通道隐藏,增强了防伪效果。以上研究均基于相位调制法,虽然有效地完成了防伪信息的隐藏,但隐蔽性效果不是非常理想。王琪等<sup>[7]</sup>分析了潜像信息嵌入率对光栅防伪效果的影响,在有效嵌入率区间内,构成潜像的所有网点对显著性产生贡献,而影响隐蔽性的则只有潜像的边缘网点。在对潜像隐蔽性的研究过程中发现,潜像边界区域网点会出现抖动明显、易被察觉等问题,影响原图像的整体质量。

针对潜像区域隐蔽性存在质量不稳定的问题,本文结合韦伯定律分析影响隐蔽性效应的因素,将潜像区域网点分为内部和边界两部分,通过算法推导探索潜像边界调整的方案,并进行实验验证。该方法通过改变潜像边界网点的网点位置及网点面积率,使其与背景网点融合,在提高潜像隐蔽性的同时又保证了潜像提取的显著性。

## 2 潜像嵌入的理论方法

潜像的嵌入以相位调制潜像法为基础理论,将分通道图像进行调幅加网,在加网过程中将预先确定的潜像区域内的网点进行微量位移从而形成潜像。

如图1所示,网点  $E_1$  可移动至相邻网点中心位置  $A_1(A_2)$  或 4 个网点中心位置  $A_3$ 。设相邻网点间的距离为  $d$ , 网点位移量为  $s$ 。

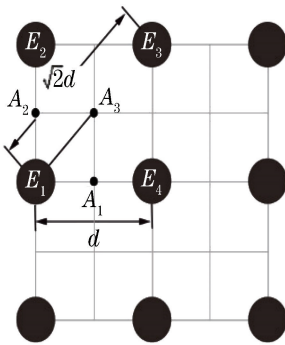


图1 网点位移示意图

Fig. 1 Diagram of dot displacement

将  $E_1$  移动至  $A_1(A_2)$  时,网点位移量为

$$s = \frac{d}{2}, \quad (1)$$

将  $E_1$  移动至  $A_3$  时,网点位移量为

$$s = \frac{\sqrt{2}}{2}d. \quad (2)$$

实验证明,潜像区域的网点位移量越小越不容

易引起人眼的视觉感知,所以  $A_1(A_2)$  为网点  $E_1$  的位移最优点。 $A_1$  与  $A_2$  仅仅在位移方向上有差别,在位移量相等的前提下网点的隐藏效果相同。本文仅以  $A_2$  作为网点移动的位置,研究潜像隐藏效果。

图2是按照相位调制潜像法所实现的标识为“F”在单通道和四色通道的效果图,图像整体再现效果不错。但对于潜像区域,裸眼视觉便可以明显地观察到潜像局部轮廓,影响了潜像的隐蔽性。

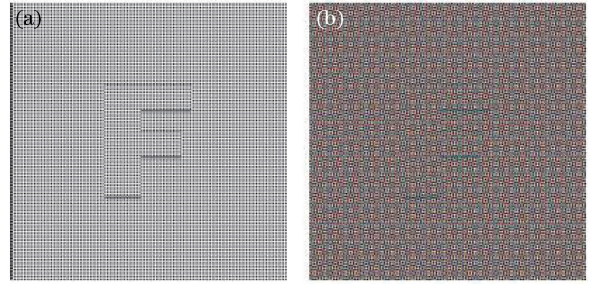


图2 运用相位调制潜像法嵌入防伪标识效果图。

(a) 防伪母版上的网点图;(b) 四色通道叠加后预输出图  
Fig. 2 Diagrams of anti-counterfeiting labels embedded by phase modulation method. (a) Dots on hidden layer; (b) preoutput map after superposition of four color channels

## 3 潜像隐蔽性效应分析

将韦伯定律<sup>[8]</sup>应用到基于过渡区域的图像中,定义一个像素与其邻域强度差的比值为这个像素的韦伯分数。运用韦伯定律分析潜像区域的隐蔽性,宿主图像中每个网点与其邻域间强度差的比值作为该网点的韦伯分数。

设宿主图像上某点百分比为  $f_a(i, j)$ , 其与邻域网点百分比之差的绝对值和表达式为

$$\Delta f_a(i, j) = \sum_{g=0}^{t-1} \Delta f_g(i, j) = \sum_{g=0}^{t-1} |f_g(i, j) - f_a(i, j)|, \quad (3)$$

式中:  $f_g(i, j)$  ( $g=0, 1, \dots, t-1$ ) 为  $f_a(i, j)$  的第  $(i, j)$  个邻域网点百分比值;  $t$  为邻域网点个数。根据韦伯定律,计算宿主图像上  $(i, j)$  处网点的韦伯分数值,表达式为

$$K[f_a(i, j)] = \frac{\Delta f_a(i, j)}{I[f_a(i, j)]}, \quad (4)$$

式中:  $I$  为初始刺激强度。记潜像嵌入后  $(i, j)$  处网点的韦伯分数为  $K[f'_a(i, j)]$ , 则潜像嵌入前后网点的分数变化表达式为

$$\Delta K = K[f'_a(i, j)] - K[f_a(i, j)]. \quad (5)$$

网点为潜像内部网点或背景网点时,  $\Delta K = 0$ , 说明调制相位前后这两部分的网点韦伯分数值不变。潜像区域内部网点与背景网点呈相同的规律分布, 内部网点与背景网点具有同质性, 所以潜像内部网点隐蔽性较好。

网点为潜像边界网点时,  $\Delta K \neq 0$ , 说明调制相位前后边界网点韦伯分数值改变。边界网点调制相位后的网点分布规律与网点间距离改变, 网点密度发生变化, 所以潜像边界网点的隐蔽性较差。

#### 4 潜像边界调整法研究

运用韦伯分数分析潜像隐蔽性可知, 潜像内部网点隐蔽性较好, 而潜像区域边界网点隐蔽性较差。结合图 2 可知, 潜像上、下边界网点过渡明显、抖动剧烈, 调整上、下边界网点可以提高潜像隐蔽性。

将潜像区域网点分为内部和边界两部分。为进行区分, 图 3 中的高密度点为背景网点, 中密度点为潜像内部网点, 空心点为潜像边界网点。基于网点分布规律的同质性原理, 对潜像边界网点的位置及大小进行调整, 可使网点密度趋于均衡, 提高隐蔽性。

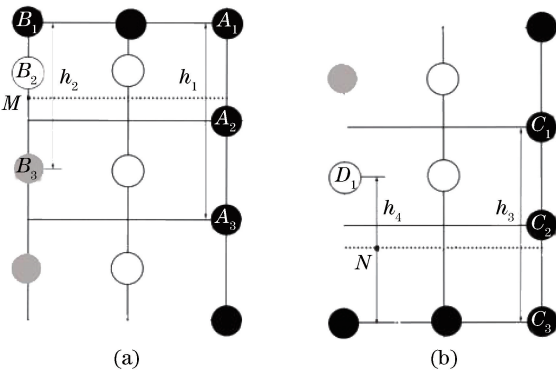


图 3 潜像边界网点调整局部放大图。(a)上边界网点调整;(b)下边界网点调整

Fig. 3 Local enlargement diagrams of latent image boundary dots. (a) Diagram of upper boundary dot adjustment; (b) diagram of lower boundary dot adjustment

图 3(a)中,  $A_1, A_2, A_3$  为 3 个相邻的背景网点,  $B_1, B_2, B_3$  分别为背景网点、潜像上边界网点、潜像内部网点, 网点  $B_1, B_2$  间的距离与网点  $B_2, B_3$  间的距离不等, 即  $B_1B_2 \neq B_2B_3$ 。设两相邻背景网点间的距离为  $d$ , 网点位移量为  $s$ , 则网点  $A_1$  与  $A_3$  间的距离  $h_1$  为

$$h_1 = 2d. \quad (6)$$

结合(1)式和(6)式得到网点  $B_1$  与  $B_3$  间的距离  $h_2$  为

$$h_2 = h_1 - s = \frac{3}{2}d. \quad (7)$$

网点  $B_1, B_2$  间的距离小于网点  $B_2, B_3$  间的距离, 因此网点  $B_1, B_2$  区域形成网点密集区, 网点  $B_2, B_3$  区域形成网点稀疏区, 这种网点区域的密度差异易引起视觉感知。为了消除这种现象, 将网点  $B_2$  位移至网点  $B_1, B_3$  的中间位置  $M$ , 使  $B_1, B_2$  区域与  $B_2, B_3$  区域的网点密度相等。

根据(7)式可知,  $M$  与网点  $B_1$  间的距离为  $\frac{3}{4}d$ 。设上边界网点的位移为  $S_0$ , 则

$$S_0 = d - \frac{3}{4}d = \frac{1}{4}d. \quad (8)$$

网点  $B_2$  位移至  $M$  点后, 为使网点  $B_1, B_2$  (或网点  $B_2, B_3$ ) 与网点  $A_1, A_2$  (或网点  $A_2, A_3$ ) 间的距离满足  $h_2$  与  $h_1$  的比例关系, 还需调整  $B_2$  的网点百分比。

结合(6)式和(7)式, 得到  $h_1$  与  $h_2$  的关系式为

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{3}{4}. \quad (9)$$

设加网后圆形网点半径为  $R$ , 网点  $B_2$  位移至  $M$  点调整后的网点半径为  $r$ , 网点百分比调整系数为  $\alpha$ , 则  $R, r$  需满足

$$\frac{\frac{3}{4}d - R - r}{d - 2R} = \frac{3}{4}, \quad (10)$$

$$\pi r^2 = \alpha \times \pi R^2. \quad (11)$$

根据(10)式和(11)式得到调整系数  $\alpha$  为 0.25, 即上边界网点百分比改为原网点百分比的 0.25 倍。

图 3(b)中,  $C_1, C_2, C_3$  为 3 个相邻的背景网点,  $D_1, D_2$  分别为潜像下边界网点、背景网点。网点  $D_1, D_2$  间的距离大于网点  $C_2, C_3$  间的距离, 导致下边界网点与背景网点分离, 因此人眼可以清晰地察觉到潜像信息的下边界轮廓。为了提高下边界网点的隐蔽性, 需要在网点  $D_1, D_2$  间的中间位置  $N$  处补充一个网点。

网点  $C_1, C_3$  间的距离  $h_3$  满足

$$h_3 = h_1. \quad (12)$$

网点  $D_1, D_2$  间的距离  $h_4$  满足

$$h_4 = h_2. \quad (13)$$

同理易得补充网点的调整系数也为 0.25, 即补充网点的面积率为加网网点面积的 0.25。图 4 为调整方案流程。



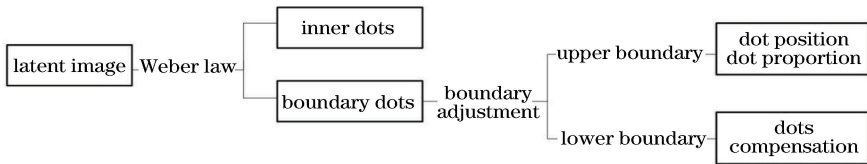


图4 调整方案流程图

Fig. 4 Flowchart of adjustment scheme

## 5 实验验证与评价

### 5.1 实验验证

#### 5.1.1 隐蔽性比较与分析

为验证边界调整算法的有效性,选用 GATF 中的 4 幅测试图作为宿主图像,4 幅测试图分别代表不同阶调的图像,可全面验证边界调整算法在不同阶调图像中的有效性。对图像四色通道进行调幅加网,加网线数为  $144 \text{ line} \cdot \text{inch}^{-1}$ ,输出分辨率为  $1440 \text{ dot} \cdot \text{inch}^{-1}$ ,C、M、Y、K 的加网角度分别为  $0^\circ, 15^\circ, 45^\circ, 75^\circ$ ,网点形状为圆形,潜像嵌入在 C 版上,  $1 \text{ inch} = 2.54 \text{ cm}$ 。由于边界调整算法是基于相位调制法的改进,为验证改进方法的优越性,只需将传统相位调制法与本文算法进行比较。根据传统相位调制法和本文方法将防伪标识“F”分别嵌入到 4 幅宿主图像的不同位置,如图 5 所示。其中图 5(a)为含有潜像“F”的图像,潜像区域用点状线框标示;图 5(b)为采用传统相位调制法获得的潜像区放大图;图 5(c)为使用本文算法获得的潜像区放大图。

观察图 5(b)可知:1)通过传统方法获得的潜像,肉眼便能察觉到部分轮廓痕迹,即潜像上、下边界网点抖动明显,使隐蔽性下降;2)潜像“F”边缘轮廓的横线条纹视觉可见,影响了图像均匀性,而纵向轮廓线对潜像无明显影响。

观察图 5(c)可知:1)不论是偏亮调的 still life 和 scenery 图,还是偏暗调的 portrait 和 fruit 图,潜像均与源图像融为一体,隐蔽性明显优于图 5(b);2)本文方法改善了潜像边缘网点的抖动性,在不同阶调、纹理的图像上均有很好的潜像隐蔽性。

比较两种方法获得的潜像发现,图 5(b)优于图 5(c)的原因在于潜像内部网点与边缘网点密度相差不大,潜像网点融于背景网点。这是因为本文在运用传统方法进行网点调制的基础上,再一次对潜像上、下边界网点进行了调整,其中对上边界网点进行了网点重新移动与网点缩放,对下边界网点进行了网点补充。本文方法相比于

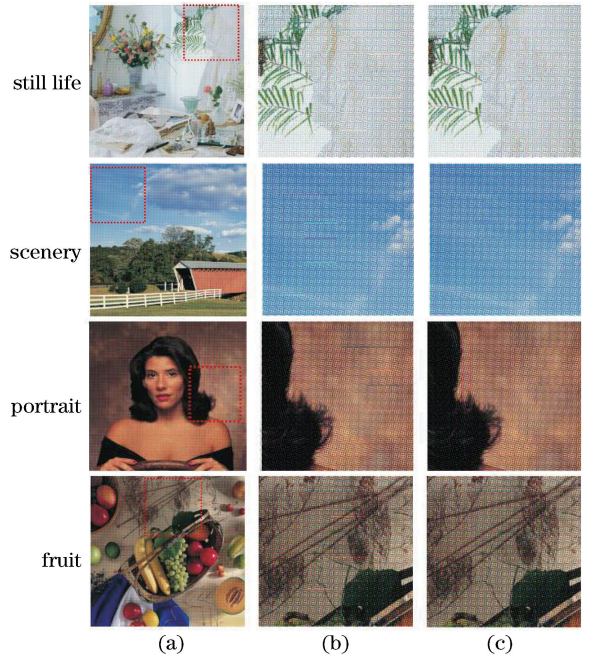


图5 潜像隐蔽效果比较。(a)潜像隐藏区域;  
(b)原始方法;(c)改进方法

Fig. 5 Comparison of concealment effects. (a) Hidden areas of latent images; (b) original method; (c) improved method

传统方法,潜像网点与背景网点具有较好的同质性,在视觉上能够融于背景网点,因此本文方法对潜像的隐蔽性进行了最直接地改善,优化了潜像质量。

#### 5.1.2 显著性比较与分析

评价光栅防伪技术的两个关键指标为隐蔽性与提取显著性。根据文献[9]中的方法制作对应周期的数字光栅,完成防伪信息的提取,实验结果如图 6 所示。

观察图 6 发现,对于不同方法生成的潜像,光栅均能完成潜像“F”的提取;对于不同属性的源图,对应的光栅也均能提取出潜像。对于中亮调图像 still life 和 scenery,潜像的提取清晰度较高,而对于暗调图 portrait 和 fruit,潜像提取效果相对不够显著。由实验可知,传统潜像法与本文潜像法对潜像显著性无明显视觉影响。而潜像清晰度与源图像中潜像



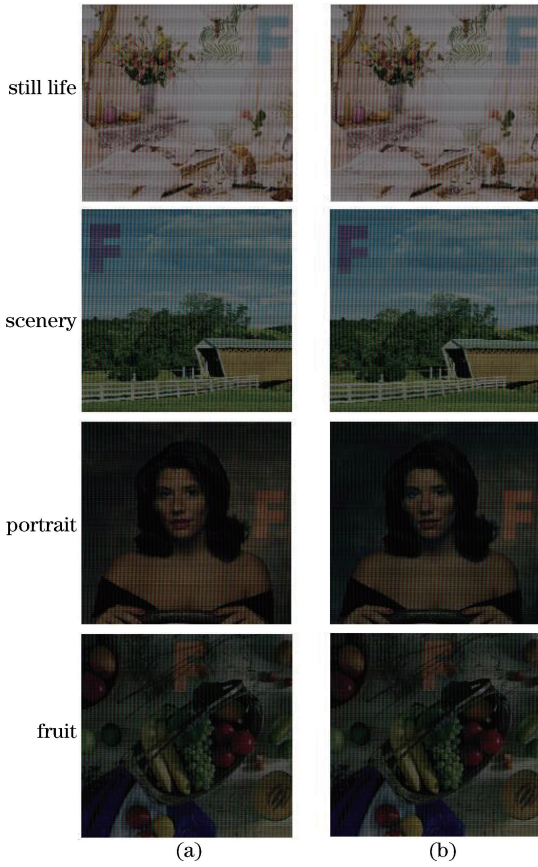


图 6 提取显著性比较。(a)原始方法;(b)改进方法  
Fig. 6 Comparison of extraction effects. (a) Original method; (b) improved method

嵌入部位的阶调属性有关,即中亮调更有利于识别出高显著性的潜像<sup>[10]</sup>。

表 1 隐蔽性评价

Table 1 Evaluation of concealment effect

Method	Still life		Scenery		Portrait		Fruit	
	$W_{SNR}$	$C_{ISI}$	$W_{SNR}$	$C_{ISI}$	$W_{SNR}$	$C_{ISI}$	$W_{SNR}$	$C_{ISI}$
Improved method	22.7824	0.5914	23.5439	0.6245	25.15873	0.7832	28.1863	0.8132
Original method	20.8732	0.5512	19.5345	0.4021	17.0732	0.3953	15.0423	0.3256

由表 1 数据可知,本文方法对应的  $W_{SNR}$  值和  $C_{ISI}$  值均大于传统方法对应的  $W_{SNR}$  和  $C_{ISI}$  值,这说明本文方法较传统方法在防伪隐蔽性上有明显的提高。运用传统方法嵌入潜像后,上、下边界网点与其相邻网点的间距发生改变,且当网点密度较大时,上边界网点移动到相邻网点中心时造成网点搭界,下边界网点出现“缺失”现象,导致隐蔽性明显下降。对边界网点进行调整后,上、下边界网点与背景网点具有一定的同质性,边界网点隐藏与背景网点中,隐蔽性较好。

### 5.2.2 显著性评价

使用区域对比度和信息熵函数评价潜像的提取

## 5.2 潜像质量评价

### 5.2.1 隐蔽性评价

使用加权信噪比<sup>[11-12]</sup>和彩色结构相似度<sup>[13-14]</sup>评价潜像的隐蔽性。

#### 1) 加权信噪比

加权信噪比通过逐点计算图像处理前后的变化情况,评价处理图像与原始图像的差异性,表达式为

$$W_{SNR} = 10 \lg \frac{\sum_{u,v} |F(u,v)R_{CSF}(u,v)|^2}{\sum_{u,v} |\{[F(u,v) - G(u,v)]R_{CSF}(u,v)\}|^2}, \quad (14)$$

式中: $u, v$  为原始图像与处理图像; $F(u, v), G(u, v)$  为经过傅里叶变换后的原始图像与处理图像; $R_{CSF}$  为对比敏感度(CSF)的卷积,对图像分量进行加权处理。

#### 2) 彩色结构相似度

彩色结构相似度是将人眼视觉特性和图像结构信息相结合的一种图像质量评价方法,该算法从处理图像和原始图像的亮度、对比度、结构 3 个方面进行评价,表达式为

$$C_{ISI}(u, v) = [S_{M-SSIM}(u, v)_L]^{W_1} \cdot$$

$$[S_{M-SSIM}(u, v)_C]^{W_2} \cdot [S_{M-SSIM}(u, v)_H]^{W_3}, \quad (15)$$

式中: $W_1, W_2, W_3$  为表征权重系数;下角标 L、C、H 表示亮度、饱和度、色相。根据  $W_{SNR}$  和  $C_{ISI}$  算法含义可知  $W_{SNR}$  和  $C_{ISI}$  值越大,两幅图像差异越小,即潜像隐蔽性越好。

显著性。

#### 1) 区域对比度

$$dev(x, y) = \frac{\max f_{\Delta}(x, y) - \min f_{\Delta}(x, y)}{\max f_{\Delta}(x, y)}, \quad (16)$$

$$F_i = \frac{1}{mn} \sum_M \sum_N dev(x, y), \quad (17)$$

式中: $dev(x, y)$  为某一区域的对比度; $f_{\Delta}(x, y)$  为灰度值; $F_i$  为区域对比度。在每一个定义区域中,用该区域内灰度最大值与最小值之差除以最大值后的商值称为该区域的区域对比度<sup>[15]</sup>。求所有像素区域对

比度的平均值,得到归一化的显著性评价算法。

## 2) 信息熵函数

$$T_i = - \sum_{k=1}^N P_k \ln P_k, \quad (18)$$

表 2 提取性评价

Table 2 Evaluation of extraction effect

Method	Still life		Scenery		Portrait		Fruit	
	$F_i$	$T_i$	$F_i$	$T_i$	$F_i$	$T_i$	$F_i$	$T_i$
Improved method	0.5322	0.4673	0.5682	0.5134	0.6324	0.5893	0.7816	0.6821
Original method	0.5421	0.4712	0.5692	0.5232	0.6562	0.5934	0.7883	0.6893

由表 2 数据可知,本文方法对应的  $F_i$  和  $T_i$  值与传统方法对应的  $F_i$  和  $T_i$  值十分接近,说明本文方法对显著性的影响较小,从而保证了潜像的显著性。

## 6 结 论

针对相位调制潜像法设置潜像时存在边界网点抖动明显而导致隐蔽性降低的问题,提出一种潜像边界调整法。经过理论推导计算出边界网点位移位置及网点百分比调整系数,并通过实验和主客观评价验证了潜像边界调整法的优越性。研究结果表明,潜像边界调整法能明显提高潜像的隐蔽性,同时对提取显著性无明显影响。所提出的边界调整潜像法是一种优化的潜像生成方法,其综合防伪性能较好,拓宽了光栅防伪技术领域。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Y P, Jiang J, Zha Y L, *et al.* Research on embedding capacity and efficiency of information hiding based on digital images [J]. International Journal of Intelligence Science, 2013, 3(2): 77-85.
- [2] Ren L Y. The study of halftone security technology based on digital screening [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012: 16-19.  
任乐义. 基于数字加网的半色调防伪技术的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2012: 16-19.
- [3] Han X Y, Wang Q, Ge N X. Influence of phase modulation latent image on color rendering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 071011.  
韩雪莹, 王琪, 葛乃馨. 相位调制潜像对图像呈色效果的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 071011.
- [4] Zhong Y F, Zhu Z Y, Liu C Y. Color security printing based on moire patterns [J]. Optical Technique, 2014, 40(2): 128-132.  
钟云飞, 朱志勇, 刘春燕. 彩色印刷品莫尔纹防伪技

式中:  $T_i$  为信息熵;  $P_k$  为灰度值  $k$  在该图像中现的概率。图像信息熵<sup>[16-18]</sup>是一种清晰度评价函数。

根据  $F_i$  和  $T_i$  算法含义可知  $F_i$  和  $T_i$  值越大, 提取显著性越好。

术研究[J]. 光学技术, 2014, 40(2): 128-132.

- [5] Wang T M, Wang Q, Liu H H. Evaluation of latent image anti-counterfeiting effect based on sub-channel phase adjustment [J]. Packaging Engineering, 2015, 36(5): 117-121.  
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.
- [6] Yang X, Wang Q, Gao Q H, *et al.* Sub-channel grating anti-counterfeiting based on splice latent image[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(21): 192-197.  
杨熙, 王琪, 高晴华, 等. 分通道拼接潜像光栅防伪方法[J]. 包装工程, 2016, 37(21): 192-197.
- [7] Wang Q, Wang T M. Influence of information embedding rate on anti-counterfeit of parallax barrier [J]. Packaging Engineering, 2016, 37(1): 147-153.  
王琪, 王天马. 潜像信息嵌入率对光栅防伪效果的影响[J]. 包装工程, 2016, 37(1): 147-153.
- [8] Zou X L, Feng G C. Weber's law-based transition region extraction and thresholding [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(15): 4217-4222.  
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(15): 4217-4222.
- [9] Wang Q, Wang X B. Research on the relationship of grayscale between digital grating and the host image [J]. Applied Optics, 2014, 53(18): 4072-4078.
- [10] Guo L H, Xing T D, Liu G D, *et al.* Appearing effect of information hiding technology based on halftone screening[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(15): 135-137, 158.  
郭凌华, 邢铁豆, 刘国栋, 等. 半色调加网信息隐藏技术显隐效果研究[J]. 包装工程, 2015, 36(15): 135-137, 158.
- [11] Wang C S, Liu L. Weighted cooperative spectrum sensing technology based on signal to noise ratio[J]. Wireless Communication Technology, 2011, 20(1):

- 37-41.  
王春生, 刘林. 基于信噪比加权的合作频谱检测算法[J]. 无线通信技术, 2011, 20(1): 37-41.
- [12] Chen Q, Xu X P, Jiang Z G, *et al.* Watermarking scheme for four dimensional light field imaging based on light field camera and its evaluation [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0411003.  
陈琦, 徐熙平, 姜肇国, 等. 基于光场相机的四维光场图像水印及质量评价[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0411003.
- [13] Kolaman A, Yadid-Pecht O. Quaternion structural similarity: a new quality index for color images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 1526-1536.
- [14] Zhao X Z, Xie D H, Pan K J. Color image quality assessment algorithm based on color structural similarity [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(6): 1715-1718.  
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.
- [15] Zhang Y T, Ji S P, Wang Q F, *et al.* Definition evaluation algorithm based on regional contrast [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(2): 293-299.  
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.
- [16] Bai L F, Han J, Zhang Y, *et al.* Registration algorithm of infrared and visible images based on improved gradient normalized mutual information and particle swarm optimization [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 248-254.  
柏连发, 韩静, 张毅, 等. 采用改进梯度互信息和粒子群优化算法的红外与可见光图像配准算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 248-254.
- [17] Wu Z P, Guo L L, Zhu M C, *et al.* Improved image registration using feature points combined with image entropy [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2846-2852.  
吴泽鹏, 郭玲玲, 朱明超, 等. 结合图像信息熵和特征点的图像配准方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2846-2852.
- [18] Zheng J S. An image information entropy-based algorithm of no-reference image quality assessment [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015: 23-26.  
郑加苏. 基于图像信息熵的无参考图像质量评估算法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 23-26.