

# 基于光学空频域变换的自适应图像分块隐藏技术

王岩<sup>1,2\*</sup>, 牛宏伟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海军睿信息技术有限公司, 上海 201112;

<sup>2</sup>拾贰叁零智能科技(海安)有限公司, 江苏 海安 226600

**摘要** 针对信息隐藏技术中大容量信息嵌入会导致隐蔽性和鲁棒性降低的问题, 提出了一种基于光学空频域变换的自适应图像分块隐藏技术。利用灰色关联分析和回声状态网络构成自适应嵌入机制, 当嵌入容量达到饱和阈值时, 该机制会根据灰度关联序自动调整嵌入位置, 保证鲁棒性不会大幅下降; 在此基础上采用二维离散余弦变换对图像进行空频域互换, 结合人眼对光学高频区域不敏感的特性实现信息在变换域的隐藏, 保证隐蔽性不受影响。仿真和对比实验证明: 大容量信息嵌入载体图像后视觉透视性未受影响; 引入高斯、椒盐噪声干扰和旋转、缩放几何攻击后, 结果表明, 信息载体对噪声干扰和几何攻击不敏感。说明该技术在保证信息容量嵌入的同时也兼顾了隐蔽性和鲁棒性。

**关键词** 全息; 光学空频域变换; 灰色关联分析; 回声状态网络; 二维离散余弦变换; 自适应分块隐藏

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1609001

## Adaptive Image Block Hiding Technology Based on Optical Spatial-Frequency Domain Transform

Wang Yan<sup>1,2\*</sup>, Niu Hongwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shanghai JoyReal Information Technology Co., Ltd., Shanghai 201112, China;

<sup>2</sup>OTTO Intelligent Technology (Haian) Co., Ltd., Haian, Jiangsu 226600, China

**Abstract** Aiming at the problem of large-capacity information embedded in information hiding technology reducing the concealment and robustness, an adaptive image block hiding technology based on optical spatial-frequency domain transform was proposed. The gray-level correlation analysis and echo state network were used to form the adaptive embedding mechanism. When the embedding capacity reached the saturation threshold, the embedding position was automatically adjusted using the mechanism based on the gray-level correlation order to avoid excessive deterioration in robustness. Based on this, the two-dimensional discrete cosine transform was used to hide images in the spatial-frequency domain and combined with the human eye's characteristic of insensitivity to the optical high-frequency area to realize information hiding in the transform domain, thereby ensuring that the concealment was not affected. Simulation and comparative experiments prove that the visual perspective is unaffected after large-capacity information is embedded in the carrier image. After introducing Gaussian and salt and pepper noise interference and rotating and zooming geometric attacks, results show that the information carrier is insensitive to noise interference and geometric attacks, indicating the technology ensures large-capacity embedding while considering concealment and robustness.

**Key words** holography; optical spatial-frequency domain transform; gray relational analysis; echo state network; two-dimensional discrete cosine transform; adaptive block hiding

**OCIS codes** 090.1760; 100.1160; 070.2465

收稿日期: 2020-11-11; 修回日期: 2020-11-21; 录用日期: 2020-12-08

基金项目: 上海市软件和集成电路产业发展专项资金

通信作者: \*wolf\_wong0444@sina.com

# 1 引言

信息的加密和隐藏技术是信息安全研究领域中的重要组成部分,基于光学理论与方法的数据加密、信息隐藏技术在这些领域中一直占据着重要的不可替代的地位,已有不少研究者将信息隐藏技术作为主要的研究方向<sup>[1]</sup>。隐蔽性、鲁棒性和嵌入容量是隐藏技术最核心的三个特征,彼此之间存在着矛盾关系,嵌入容量的提高必然会增加原始载体图像的修改量,从而导致隐蔽性和鲁棒性的大幅降低<sup>[2-3]</sup>。因此在实际应用中,为提升信息隐藏的综合性能,往往会重点关注嵌入容量对隐蔽性和鲁棒性的影响问题。

近年来,针对上述问题,国内外同行进行了大量相关工作。文献[4]利用整数变换图像块的所有像素最低 2 位,产生较大的结构冗余实现大容量信息的嵌入,结果表明该方法虽然提升了信息隐藏的嵌入容量,但并未判定隐藏信息与宿主载体间耦合程度对鲁棒性的影响,如嵌入到灰色关联系数较小的载体分块中反而会导致鲁棒性的大幅下降;Kim 等<sup>[5]</sup>提出了一种根据目标图像邻域内像素最大值和最小值间的差值来决定嵌入容量的方法,此类方法将图像分成若干相邻的像素块,通过修改像素块间的差值产生空间冗余来实现信息的嵌入,不过此类方法用于控制嵌入容量的参数配置得过于主观且随机,无法有效地协调信息嵌入的单位容量,进而可能导致鲁棒性降幅明显;文献[6]利用量化嵌入方法确定隐藏信息的嵌入位置,可避免因盲目嵌入造成隐蔽性下降,但该方法未充分考虑到嵌入容量对信息载体的影响,当嵌入容量超出饱和阈值时,鲁棒性和隐蔽性均会受到较大程度的影响;文献[7]提出先对原始图像进行分块,再通过 Arnold 变换削弱图像邻域像素间的关联性,进而得到加密图像并完成信息隐藏,虽然该变换具有结构简单、运算速度快等优点,但文中忽略了其属于周期性变换,在一定变换次数后会恢复成原始图像,如将其作为信息隐藏的核心算法会导致隐蔽性和安全性无法得到保障;文献[8]利用矢量直方图迁移算法实现在加密域的信息隐藏,通过指定参考帧的方式克服运动矢量修改造成的失真累加效应来兼顾鲁棒性,但矢量迁移属于空间位置的二维变换算法,其算法复杂度和抗暴力破解等特性难以满足信息隐藏技术对隐蔽性提出的要求。文献[9-13]从多角度阐述了光学变换和处理技术在信息安全和隐藏中的应用,为论文的思路

和研究提供了理论基础和方向,其中文献[9-11]利用光学变换将图像由空域变换至频域,再结合人眼对光学高频区域不敏感等特性,实现隐藏信息在变换域的隐藏,有效地增加了信息载体的隐蔽性;文献[12]利用灰色关联系数来衡量不同图像间的相似程度,系数越大表明图像越相似,信息载体图像的隐蔽性也越高或可嵌入的信息容量也越多;文献[13]利用神经网络的递归回溯功能,确保当嵌入容量达到饱和阈值时,递归网络会自动回溯至上一状态值,保证不会因嵌入容量超出饱和阈值而造成隐蔽性和鲁棒性的大幅下降。

综上所述,本文在文献[4-13]的基础上克服现有应用过程中嵌入容量的提升导致鲁棒性和隐蔽性失衡的困难,提出了一种基于光学空频域变换的自适应图像隐藏技术。通过仿真和对比实验证明:使用该技术将大容量隐藏信息嵌入至载体图像后,仍具有良好的视觉透视性,表明隐蔽性未受到影响;引入高斯、椒盐噪声干扰和旋转、缩放几何攻击后,结果数据相比较其他方法而言降幅不大且未超出失真阈值,表现出了良好的鲁棒性。说明该技术起到了嵌入容量提升的同时也能较好地兼顾鲁棒性和隐蔽性的效果。

## 2 隐藏载体/信息的预处理

### 2.1 隐藏载体的分块预处理

隐藏信息直接嵌入到载体图像易受到攻击,需将隐藏信息嵌入至不同的载体分块中以保证隐蔽性和鲁棒性不受影响。载体图像按信息图像尺寸均匀分块可能导致尺寸不均匀,可利用缩放法先将载体图像缩放至合适的大小后再进行均分,如图 1 所示。

### 2.2 隐藏信息的置乱预处理

Arnold 变换具有算法高度对称且运算速度快等优点,可用来对图像进行置乱使得原本有意义的图像变成一张无意义的图像借以提升隐藏信息的安全性。通常这一过程需要反复迭代多次才能达到满意的结果,对隐藏图像进行 1 次、9 次、12 次 Arnold 置乱(水平错切+竖直错切)变换效果如图 2 所示。

其变换形式为

$$\begin{cases} x' = (x + y) \bmod(L) \\ y' = (x + 2y) \bmod(L) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\bmod(\cdot)$ 表示取模运算; $L$ 表示正方形图像的边长; $(x, y)$ 表示变换前的像素坐标; $(x', y')$ 表示变换后的像素坐标。



图 1 载体图像缩放均分处理。(a)隐藏载体 512×512;(b)载体缩放 510×510;(c)隐藏信息 170×170;(d)载体均分 (170×170)×9

Fig. 1 Carrier image scaling and equal processing. (a) Hidden carrier 512×512; (b) carrier scaling 510×510; (c) hidden information 170×170; (d) carrier equalization (170×170)×9

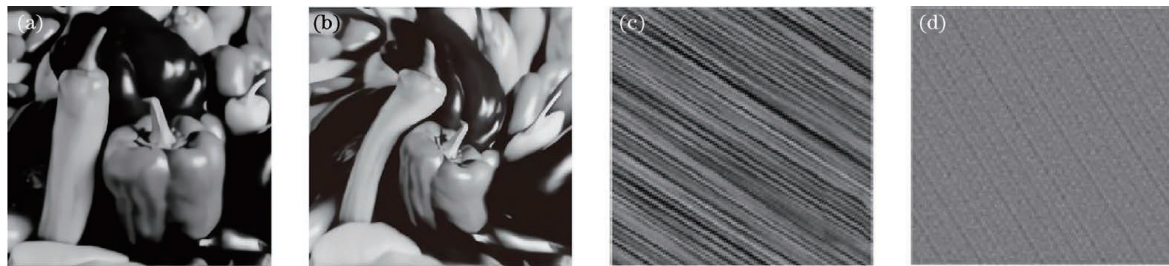


图 2 信息图像 Arnold 置乱处理。(a)隐藏信息原始图像;(b)第 1 次水平垂直错切;(c)第 9 次水平垂直错切;(d)第 12 次水平垂直错切

Fig. 2 Information image Arnold scrambling processing. (a) Hidden information original image; (b) 1st horizontal and vertical stagger; (c) 9th horizontal and vertical stagger; (d) 12th horizontal and vertical stagger

其逆变换形式为

$$\begin{cases} x = (2x' - y') \bmod(L) \\ x = (-x' + y') \bmod(L) \end{cases} \quad (2)$$

### 2.3 隐写载体/信息的无量纲化处理

为避免隐藏载体和信息图像间因单位或量级不同而导致无法直接评价的问题,需对图像的灰度值进行无量纲化处理,具体效果如图 3 所示。



图 3 极值法和均值法图像处理效果对比。(a)隐藏载体图像;(b)极值法图像处理效果;(c)均值法图像处理效果

Fig. 3 Comparison of image processing effects between extreme value method and mean value method. (a) Hidden carrier image; (b) image processing effect of extreme value method; (c) image processing effect of mean value method

对比图 3(b)和(c)效果,从视觉效果角度来看,均值法处理色调更偏向于隐藏载体图像灰度。故采用均值法进行无量纲化处理,其变换形式为

$$C_i(j) = \frac{G_i(j)}{\bar{G}_i}, \quad (3)$$

式中: $G_i(j)$ 表示像素灰度值矩阵  $G$  中第  $i$  行第  $j$  列的灰度值; $\bar{G}_i$ 表示像素灰度值矩阵  $G$  中第  $i$  行的灰度均值; $C_i(j)$ 表示经均值法无量纲化处理后像素

灰度系数矩阵  $C$  中第  $i$  行第  $j$  列的灰度系数,  $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ 。

## 3 自适应嵌入机制中位置与容量的确定

### 3.1 灰色关联分析算法确定嵌入位置

灰色关联分析是用灰色关联序来判断各因素样本数据间关系的强弱、大小和次序等,如样本数据反映出的关系态势越一致,则灰度关联系数越大。利

用灰色关联分析模型确定信息图像与载体各分块图像间的关联系数,系数越大表明可嵌入的信息容量

越大或隐蔽性越高。

灰度关联系数的计算公式为

$$\zeta_i(j) = \frac{\min_j |Y_i(j) - X_i(j)| + \rho \max_j |Y_i(j) - X_i(j)|}{|Y_i(j) - X_i(j)| + \rho \max_j |Y_i(j) - X_i(j)|}, \quad (4)$$

式中: $\zeta_i(j)$ 表示灰度关联系数矩阵  $\zeta$  中第  $i$  行第  $j$  列的灰度关联系数; $X_i(j)$ 和  $Y_i(j)$ 表示隐藏信息和载体分块像素灰度值矩阵  $X$  和  $Y$  中第  $i$  行第  $j$  列的灰度系数; $\min \min$  和  $\max \max$  表示  $|Y_i(j) - X_i(j)|$  的极值; $\rho$  表示分辨系数, $\rho \leq 0.5463$  时分辨力最好,因此本文实验中  $\rho = 0.5$ 。

灰度关联序的计算公式为

$$\gamma_K = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \zeta_i(j), \quad (5)$$

式中: $K$  表示载体图像按信息图像尺寸均分的分块数; $\gamma_K$  表示第  $K$  载体分块图像的灰度关联序。

### 3.2 回声状态网络算法确定嵌入容量

非均匀量化方案相对于均匀量化方案在抗各种常见的攻击方面表现出更强的稳健性<sup>[14]</sup>。

隐藏信息在载体图像中的非均匀化嵌入可以有效地降低嵌入容量对鲁棒性和稳健性的影响,隐藏信息图像与载体分块图像之间灰色关联系数的不同意味着各分块载体的饱和阈值也存在着差异,信息嵌入前预测分块载体的容量饱和阈值可以大大降低当嵌入容量超过饱和阈值时对信息载体稳健性和鲁棒性的影响。回声状态网络(ESN)是一种新型的递归神经网络,相比于常见的循环神经网络具有记忆力好、学习和运算速度快及递归回溯功能等优点,确保当嵌入容量超出临界阈值时,递归回溯功能会自动回退至上一状态值,避免出现因嵌入容量超出临界阈值而造成稳健性和鲁棒性降幅过大的问题,其工作原理如图 4 所示。

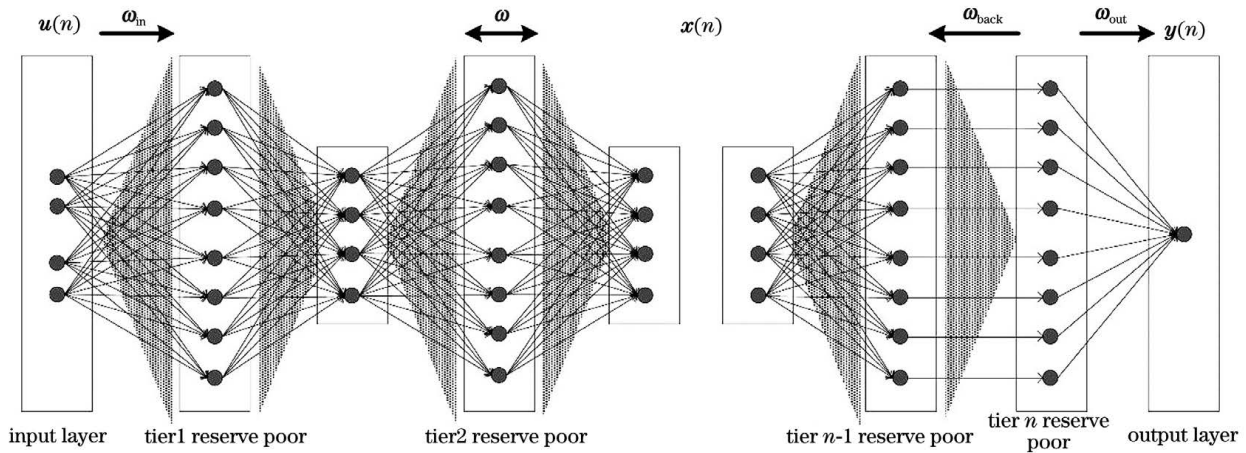


图 4 回声状态网络工作原理

Fig. 4 Working principle of echo state network

ESN 主要由输入层、储备池、输出层三部分构成, $P_I(t)$ 、 $P_R(t)$ 、 $P_O(t)$ 为三部分在某一时刻  $t$  的状态向量,其权值连接矩阵与状态更新公式如下。

- 1) 输入层与储备池间的权值连接矩阵为  $\theta_I^{m \times n}$ ;
- 2) 储备池与输出层间的连接权值矩阵为  $\theta_O^{1 \times m}$ ;
- 3) 输出层回退储备池的连接权值矩阵为  $\theta_{BK}$ ;
- 4) 储备池内状态更新公式为  $P_I^{m \times 1}(t+1) = f[\theta_I^{m \times n} \times P_R^{n \times 1}(t+1) + \theta_{BK} \times P_I^{m \times 1}(t)]$ ,  $f$  是 Tanh 函数;

5) 输出状态公式为  $P_O(t+1) = \theta_O^{1 \times m} \times P_I^{m \times 1}(t+1)$ 。

具体操作步骤如下。

- 1) 初始化回声状态网络的相关参数,将嵌入图像信息的大小作为回声状态网络输入。
- 2) 回声状态网络确定一个隐藏图像信息的嵌入容量,输出图像信息嵌入后的效果。
- 3) 对图像信息嵌入后的效果与实际需求进行比对,得到结果:①如未满足实际需求,则返回步骤 2),回声状态网络继续学习;②如满足实际需求,则

确定最优的嵌入容量值并输出;③如超出实际需求,则状态网络递归回溯至上一状态,并将其作为最优嵌入容量值输出。

## 4 基于光学空频域变换的自适应分块隐藏

### 4.1 光学空频域变换及逆变换

二维离散余弦变换(2D-DCT)的基向量能很好地描述人类语音和图像信号的特征,被公认为准最佳图像变换函数<sup>[15]</sup>,因此选取 2D-DCT 作为光学空频域变换函数。

2D-DCT 的变换公式为

$$\mathbf{F}(u, v) = \alpha(u)\alpha(v) \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) \times \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2m} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2n}, \quad (6)$$

式中: $f(x, y)$ 表示空域矩阵; $\mathbf{F}(u, v)$ 表示频域矩阵;

$$\alpha(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{m}}, & u=0 \\ \sqrt{\frac{2}{m}}, & u \neq 0 \end{cases}, \alpha(v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{n}}, & v=0 \\ \sqrt{\frac{2}{n}}, & v \neq 0 \end{cases}; x, u =$$

$0, 1, \dots, m-1; y, v = 0, 1, \dots, n-1$ 。

2D-DCT 的逆变换公式为

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{m-1} \sum_{v=0}^{n-1} \alpha(u)\alpha(v)\mathbf{F}(u, v) \times \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2m} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2n}. \quad (7)$$

### 4.2 隐藏信息的嵌入

隐藏信息嵌入过程的具体步骤如下。

1) 采集载体图像灰度值矩阵  $\mathbf{y}(u, v)$  和隐藏信息灰度值矩阵  $\mathbf{x}(m, n)$ , 将载体图像灰度值矩阵  $\mathbf{y}(u, v)$  按照隐藏信息灰度值矩阵  $\mathbf{x}(m, n)$  大小均分成  $K$  个分块, 记作  $\mathbf{y}_K(m, n)$ ; 将隐藏信息灰度值矩阵  $\mathbf{x}(m, n)$  利用(1)式进行 Arnold 置乱变换, 记作  $\mathbf{x}_A(m, n)$ 。

2) 将隐藏载体第  $K$  分块灰度值矩阵  $\mathbf{y}_K(m, n)$  和隐藏信息置乱灰度值矩阵  $\mathbf{x}_A(m, n)$  利用(3)式进行无量纲化处理, 分别记作  $\mathbf{y}_K^D(m, n)$  和  $\mathbf{x}_A^D(m, n)$ 。

3) 利用(4)式逐一计算 Arnold 置乱和无量纲化处理后隐藏信息灰度值矩阵  $\mathbf{x}_A^D(m, n)$  与无量纲化处理后隐藏载体第  $K$  分块灰度值矩阵  $\mathbf{y}_K^D(m, n)$  的灰色关联系数, 记作  $\zeta_i(j)$ ; 再利用(5)式得到第  $K$  分块的关联序  $\gamma_K$ , 从而确定了隐藏信息嵌入位置顺序; 利用回声状态网络确定隐藏信息矩阵  $\mathbf{x}_A^D(m, n)$

在隐藏载体分块矩阵  $\mathbf{y}_K^D(m, n)$  的第  $K$  分块嵌入容量  $\omega_K$ , 构成自适应嵌入机制。

4) 将隐藏信息矩阵  $\mathbf{x}_A^D(m, n)$  和隐藏载体第  $K$  分块矩阵  $\mathbf{y}_K^D(m, n)$  利用(6)式进行二维离散余弦变换由空域矩阵变换为频域矩阵, 分别记作  $\mathbf{X}(m, n)$  和  $\mathbf{Y}_K(m, n)$ 。

5) 在自适应嵌入机制嵌入位置  $\gamma_K$  和嵌入容量  $\omega_K$  的基础上, 利用人眼对于高频区域的噪声干扰和几何攻击不敏感等特性<sup>[16]</sup>, 将隐藏信息嵌入至隐藏载体第  $K$  分块的高频区域合成隐藏信息载体矩阵  $\mathbf{Y}_K^X(m, n)$ , 其嵌入公式为  $\mathbf{Y}_K^X(m, n) = \mathbf{Y}_K(m, n) + \omega_K \times \mathbf{X}(m, n)$ 。

6) 当第  $K$  分块的嵌入容量达到饱和阈值时, 自适应嵌入机制会自动调整下一嵌入位置直至隐藏信息矩阵  $\mathbf{X}(m, n)$  全部嵌入完成, 最后利用(7)式进行二维离散余弦逆变换由频域矩阵变换为空域矩阵, 记作  $\mathbf{y}_K^X(m, n)$ , 后续可用作网络传输等行为活动。

### 4.3 隐藏信息的提取

隐藏信息提取过程的具体步骤如下。

1) 得到隐藏信息载体第  $K$  分块矩阵  $\mathbf{y}_K^X(m, n)$ , 利用(6)式进行二维离散余弦变换由空域矩阵变换为频域矩阵, 得到  $\mathbf{Y}_K^X(m, n)$ 。

2) 结合自适应嵌入机制嵌入位置  $\gamma_K$  和嵌入容量  $\omega_K$ , 从隐藏信息载体第  $K$  分块矩阵  $\mathbf{Y}_K^X(m, n)$  中提取出隐藏信息矩阵  $\mathbf{X}(m, n)$ , 其提取公式为  $\mathbf{X}(m, n) = \frac{[\mathbf{Y}_K^X(m, n) - \mathbf{Y}_K(m, n)]}{\omega_K}$ 。

3) 隐藏信息矩阵  $\mathbf{X}(m, n)$  利用(7)式进行二维离散余弦逆变换由频域矩阵变换为空域矩阵, 得到隐藏信息矩阵  $\mathbf{x}_A^D(m, n)$ 。

4) 置乱的隐藏信息矩阵  $\mathbf{x}_A^D(m, n)$  利用(2)式 Arnold 逆变换得到  $\mathbf{x}^D(m, n)$ ; 再利用无量纲化处理恢复原始隐藏信息  $\mathbf{x}(m, n)$ 。

## 5 实验结果与分析

### 5.1 实验结果

实验随机选取了 100 幅不同内容、不同格式, 大小为  $512 \times 512$  的图像作为隐藏载体, 并随机选取 1 幅  $170 \times 170$  的图像作为隐藏信息, 借助 MATLAB 语言编程软件模拟工况环境。为了客观衡量提取的隐藏信息与原始的隐藏信息之间区别, 采用相似性系 (NC)  $C_N$  作为隐蔽性的评判标准; 为了衡量图像失真或是噪声水平的客观标准, 采用峰

值信噪比(PSNR) $R_{PSN}$  作为鲁棒性的评判标准<sup>[17]</sup>。经计算分块载体灰色关联序为： $\gamma_7(0.7861)$ 、 $\gamma_5(0.7575)$ 、 $\gamma_4(0.7226)$ 、 $\gamma_8(0.6245)$ 、 $\gamma_6(0.5433)$ 、

$\gamma_9(0.5087)$ 、 $\gamma_3(0.4237)$ 、 $\gamma_2(0.4128)$ 、 $\gamma_1(0.3142)$ ；再利用二维离散余弦变换及其逆变换实现隐藏信息在变换域的嵌入和提取过程，如图 5 所示。



图 5 嵌入/提取后载体和信息比对情况。(a)带灰度关联序的均分载体图像；(b)置乱后信息图像；(c)隐藏信息载体；(d)提取+逆变换后的信息图像  $C_N=0.9993$

Fig. 5 Carrier and information comparison after embedding/extraction. (a) Evenly divided carrier image with gray-level correlation order; (b) information image after scrambling; (c) hidden information carrier; (d) information image after extraction and inverse transformation  $C_N=0.9993$

隐藏载体图 5(a)嵌入 Arnold 置乱后的隐藏信息图 5(b),得到载体信息载体图 5(c),提取后隐藏信息图 5(d)的相似系数  $C_N=0.9993 \approx 1.0000$ ,表明隐藏信息图片几乎无损进行了恢复。从视觉角度看,嵌入信息的载体图像与原始载体图像之间差异不大,像素灰度分布十分均匀,说明隐蔽性未受影响。

实验过程中在持续隐藏信息时随机抽取 5 个时刻的嵌入容量值,并利用本文方法与文献[4]、[6]方法进行比对,从结果(表 1)可以看出:当嵌入容量持续增加时,本文方法的峰值信噪比(鲁棒性)虽然呈下降趋势,但幅度不明显,最终值  $R_{PSN}=48.76 \text{ dB} > 40 \text{ dB}$ (失真阈值),表明隐藏信息载体图像鲁棒性降幅不大,具有较强的伪随机性可以有效地伪装其中的隐藏信息,符合信息隐藏技术的要求。

表 1 本文方法与其他方法实验结果对比

Table 1 Comparison of experimental results between proposed method and other methods

Embedded capacity /bit	$R_{PSN}/\text{dB}$		
	Proposed method	Ref. [4] method	Ref. [6] method
46.21	52.48	52.45	52.47
62.37	51.07	49.89	50.17
95.08	49.83	45.33	46.86
160.33	49.15	39.62	42.01
210.95	48.76	31.77	35.30

## 5.2 性能分析

### 5.2.1 噪声干扰

#### 1) 高斯噪声干扰

噪声服从高斯分布,方差  $\sigma$  越大噪声也就越多,高斯噪声干扰效果如图 6 所示。



图 6 高斯噪声干扰效果。(a)原图；(b) $\sigma=0.1$ ；(c) $\sigma=0.5$ ；(d) $\sigma=1.0$ ；(e) $\sigma=2.0$ ；(f) $\sigma=5.0$

Fig. 6 Gaussian noise interference effect. (a) Original image; (b)  $\sigma=0.1$ ; (c)  $\sigma=0.5$ ; (d)  $\sigma=1.0$ ; (e)  $\sigma=2.0$ ; (f)  $\sigma=5.0$

2) 椒盐噪声干扰  
信噪比 (SNR)  $R_{SN}$  越小噪声越多, 信噪比

$R_{SN}=1$  图像不含噪声;  $R_{SN}=0$  为胡椒噪声。椒盐噪声干扰效果如图 7 所示。

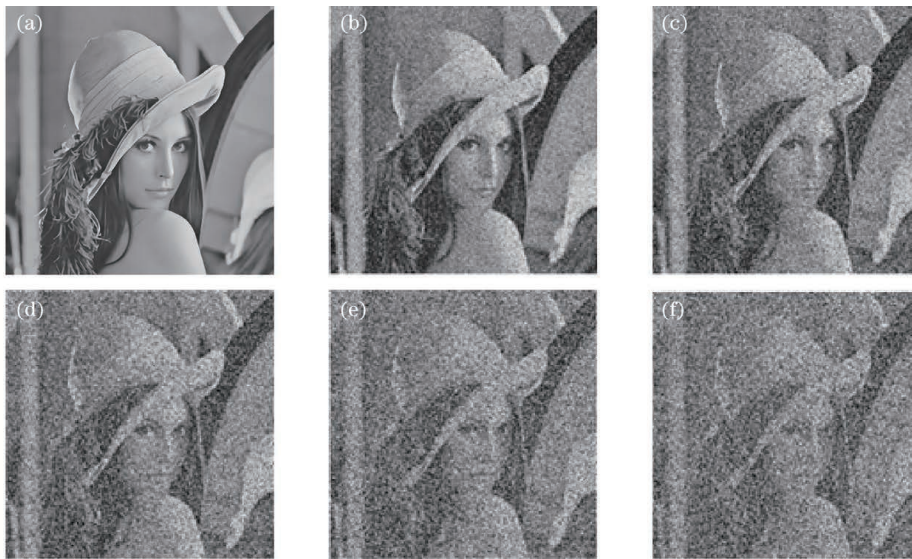


图 7 椒盐噪声干扰效果。(a)  $R_{SN}=1.0$ ; (b)  $R_{SN}=0.8$ ; (c)  $R_{SN}=0.6$ ; (d)  $R_{SN}=0.4$ ; (e)  $R_{SN}=0.2$ ; (f)  $R_{SN}=0.0$   
Fig. 7 Salt and pepper noise interference effect. (a)  $R_{SN}=1.0$ ; (b)  $R_{SN}=0.8$ ; (c)  $R_{SN}=0.6$ ; (d)  $R_{SN}=0.4$ ; (e)  $R_{SN}=0.2$ ; (f)  $R_{SN}=0.0$

对隐藏信息载体图 6(a) 和 7(a) 加入不同比例的高斯噪声图 6(b)~(f) 和不同系数的椒盐噪声图 7(b)~(f) 干扰, 从视觉质量角度隐藏信息载体受到噪声干扰后, 隐藏信息载体图像整体视觉具有隐蔽性, 说明该模型对噪声干扰不敏感, 在抗噪方面

具有更强的稳健性和鲁棒性。

### 5.2.2 几何攻击

对图像的缩放和旋转是数字图像中经常会遇到的几何攻击, 图 8 给出了几种对隐藏信息载体图像的不同程度的缩放、旋转等几何攻击后的实验结果。



图 8 几何攻击效果对比。(a) 原图; (b) 旋转攻击; (c) 翻转攻击; (d) 曲线攻击; (e) 扭曲攻击; (f) 平移攻击; (g) 缩小攻击; (h) 放大攻击

Fig. 8 Geometric attack effect comparison. (a) Original image; (b) spin attack; (c) flip attack; (d) curve attack; (e) twist attack; (f) translation attack; (g) shrink attack; (h) amplification attack

从图 8(a) 与 (b)~(h) 的效果比对可以看出, 对隐藏信息载体图像的旋转、缩放等几何攻击并未影

响到图像的视觉效果, 说明引入光学全息技术可以提高信息隐藏的质量, 更好地保障秘密信息的安全。

## 6 结 论

信息隐藏技术是近几年来国际学术界兴起的一个前沿研究领域,特别是在网络技术迅速发展的今天,信息隐藏技术的研究更具有现实意义。信息隐藏一般分为预处理阶段、嵌入阶段、传输阶段和提取阶段等阶段<sup>[18]</sup>,通过理论分析和仿真实验证明基于光学空频域变换的自适应图像分区隐藏技术不仅满足信息隐藏四个阶段的要求,而且还调和隐蔽性、鲁棒性和嵌入容量间的矛盾关系,由此可见光学信息的处理技术和信息安全相结合具有较大信息量、多自由度以及较高的并行性和速率等优势,利用光学信息的处理技术对图像信息进行隐藏,可以有效地提高图像信息的安全性。

但技术本身也存在着一定的提升空间。主要是因为通过加密处理如 Arnold 置乱变换等,使得隐藏载体信息熵最大化,信息的隐藏势必会进一步增加信息熵,在信息熵存在极值的情况下如何平衡隐藏与加密之间的关系<sup>[19-20]</sup>,这一深层次问题有待于后续继续的研究和实验证明。

### 参 考 文 献

- [1] Chen D Q, Zhou H, Tao Z, et al. Fourier computer-generated hologram digital watermarking with nonlinear amplitude limiting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0207002.  
陈大庆, 周皓, 陶智, 等. 非线性限幅傅里叶计算全息数字水印方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0207002.
- [2] Li W. Research on automatically changing feature technology of information hiding[D]. Changsha: Hunan University, 2014: 11-12.  
李旺. 信息隐藏特征自变异技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014: 11-12.
- [3] Chen D Q, Gu J H, Zhou H, et al. An image digital watermarking with phase retrieval algorithm and Fourier transformation hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3310-3316.  
陈大庆, 顾济华, 周皓, 等. 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.
- [4] Qiu Y Q. Reversible data hiding method with large embedded capacity[J]. *Application Research of Computers*, 2014, 31(3): 850-852, 856.  
邱应强. 一种大嵌入容量的可逆数据隐藏方法[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(3): 850-852, 856.
- [5] Kim H J, Sachnev V, Shi Y Q, et al. A novel difference expansion transform for reversible data embedding [J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2008, 3(3): 456-465.
- [6] Huang B, Shi L, Deng X H, et al. Adaptive high-capacity reversible data hiding algorithm for medical images[J]. *Journal of Computer Applications*, 2012, 32(10): 2779-2782.  
黄斌, 史亮, 邓小鸿, 等. 自适应高容量医学图像可逆数据隐藏算法[J]. *计算机应用*, 2012, 32(10): 2779-2782.
- [7] Xing K. Secondary Arnold transformation image scrambling encryption algorithm[J]. *Natural Science Journal of Harbin Normal University*, 2015, 31(2): 36-39.  
邢坤. 二次 Arnold 变换图像置乱加密算法[J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2015, 31(2): 36-39.
- [8] Niu K, Zhang S, Yang X Y. Reversible data hiding scheme in encrypted videos based on vector histogram shifting [J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, 39(3): 756-762.  
钮可, 张硕, 杨晓元. 基于矢量直方图迁移的视频加密域可逆隐写方案[J]. *计算机应用*, 2019, 39(3): 756-762.
- [9] Chen M S. Application of Fresnel digital holography in image encryption[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(2): 223-226.  
陈木生. 菲涅耳数字全息在图像加密中的应用[J]. *激光与红外*, 2010, 40(2): 223-226.
- [10] Wang P, Yuan C J. Information hiding scheme based on gray-level segmentation and double-random phase-encoding techniques [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(s1): s111008.  
王鹏, 袁操今. 基于灰度分割和双随机相位编码的隐藏技术[J]. *光学学报*, 2012, 32(s1): s111008.
- [11] Yang Q L, Zhou B H, Zheng W, et al. Dim and small target detection based on fully convolutional recursive network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1310002.  
杨其利, 周炳红, 郑伟, 等. 基于全卷积递归网络的弱小目标检测方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1310002.
- [12] Wang G Q, Gui J B, Jiang Z X, et al. Progress of interactive holographic display[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(8): 080004.  
王国庆, 桂进斌, 姜智翔, 等. 交互式全息显示进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(8): 080004.
- [13] Chen Y B, Yan X P, Su J, et al. One-step holographic stereogram printing method based on effectivel perspective images' segmentation and mosaicking method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0209002.



- 陈祎贝, 闫兴鹏, 苏健, 等. 有效视差图像分割与重组的单步全息体视图打印方法[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0209002.
- [14] Chen J Z, Zheng Z H, Lian G R, et al. Nonuniform quantization digital holography and its application in information hiding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(12): 120901.
- 陈家祯, 郑子华, 连桂仁, 等. 非均匀量化数字全息图及在信息隐藏中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(12): 120901.
- [15] Xi S X, Sun X, Liu B, et al. New image encryption technology of image based on computer generated hologram [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 040902.
- 席思星, 孙欣, 刘兵, 等. 基于计算全息的双随机相位图像加密技术[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(4): 040902.
- [16] Zheng X L, Liu R X, Xia M L, et al. Temporal properties study of ocular wave aberrations with high frequency sampling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0733001.
- 郑贤良, 刘瑞雪, 夏明亮, 等. 高频采样下人眼波像差特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0733001.
- [17] Yang S L. Research on digital image watermarking algorithms resistant to geometric attacks[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011.
- 杨胜利. 抗几何攻击数字图像水印算法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.
- [18] Xiao Y M. Image information hiding algorithm based on optical information processing technology[J]. *Laser Journal*, 2018, 39(7): 105-109.
- 肖渝梅. 基于全息技术的光学图像信息隐藏研究[J]. 激光杂志, 2018, 39(7): 105-109.
- [19] Ning R, Li C G, Lou Y L, et al. Matlab fast algorithm of computer generated holograms based on multi-graphic processing unit[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 050901.
- 宁冉, 李重光, 楼宇丽, 等. 基于多图像处理单元的 Matlab 计算全息图快速算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 050901.
- [20] Han C, Jiang X Y, Fan F, et al. Printing method of holographic stereogram reconstructed with white light based on effective perspective image segmentation and mosaicking[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(12): 120901.
- 韩超, 蒋晓瑜, 樊帆, 等. 基于有效视角图像切片嵌入的白光再现全息体视图打印方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(12): 120901.