基于灰度图像的像素量化隐写算法

李江华，章柯俊
（江西理工大学 信息工程学院，赣州 341000）

摘要：目的 为了提高灰度图像处理的规模、嵌入量、安全性及鲁棒性，提出一种基于灰度图像的像素量化隐写算法。**方法** 首先对载体图像进行 Hilbert 曲线扫描和图像像素量化，将量化信息产生的阈值区域准确地划分标记，然后分别对载体图像、待嵌入信息执行 Hilbert 置乱和 D-S（data encryption security algorithm）数据加密处理，最后将加密后产生的秘密信息和相关辅助信息嵌入密文图像内。**结果** 实验结果表明，该算法的嵌入率相较于原算法提升了 10%，接收者能通过密钥解密获取原始信息，还原完整的载体图像。**结论** 该隐写算法信息嵌入率高，鲁棒性和安全性较强。

关键词：可逆信息隐藏；Hilbert 置乱；像素量化；D-S；阈值
中图分类号：TP309.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2019)01-0177-09
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.01.028

A Pixel Quantization Steganography Algorithm Based on Gray Image

LI Jiang-hua, *ZHANG Ke-jun*
(School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a pixel quantization steganography algorithm based on gray image, so as to improve the scale, embedding, security and robustness of gray image processing. Firstly, Hilbert curve scanning and image pixel quantization were performed on the carrier image, and the threshold region generated by the quantization information was accurately divided and marked. Then, Hilbert scrambling and D-S (data encryption security algorithm) data encryption processing were performed on the carrier image and the information to be embedded, respectively. Finally, the secret information generated after the encryption and the related auxiliary information were embedded in the ciphertext image. The experimental results showed that, the embedding rate of the proposed algorithm was increased by 10% compared with the original algorithm. The receiver could decrypt the original information and restore the complete carrier image through the key. The steganography algorithm has high information embedding rate and stronger robustness and security.

KEY WORDS: reversible information hiding; Hilbert scrambling; pixel quantization; D-S; threshold value

信息隐藏技术自 20 世纪 90 年代诞生以来，在隐私、版权保护等信息安全领域发挥的作用日益增强[1]，图像信息隐藏是信息隐藏的一个研究方向，图像信息隐藏技术通过分析图像特性，嵌入秘密信息，在视觉感官上无法察觉到图像的变化，达到隐藏秘密信息的目的[2—4]。传统的信息隐藏通常是非可逆信息隐藏，嵌入过程会给原始图像载体带来无法修复的失真问题，同时未使用加密技术的载体和信息存在受到非法篡改、替换等攻击的风险。如今，数字传输技术和高清的数字音像技术的快速发展，加密技术和可逆信息隐藏技术成为信息隐私保护的 2 个重要研究领域。

收稿日期：2018-09-09
基金项目：国家自然科学基金（61762046）；江西省教育厅科技项目（GJJ160599，GJJ170516）
作者简介：李江华（1976—），男，博士，江西理工大学副教授，主要研究方向为信息安全、语义 Web、大数据分析与处理。

Ma[5]提出了一种多预测可逆隐藏方法，该方法通过多预测算子计算出当前图像像素预测值，计算该预测值同实际像素之间的差，并使用直方图平移的方法隐藏秘密信息。预测值和信息隐藏前后的像素值保持不变，从而可无损地恢复原始图像。Zhang[6]提出基于流加密的算法通过对图像进行分块处理翻转每块图像中像素的最低有效位嵌入 1 bit 信息，并在解密后利用相邻像素的相关性提取数据和恢复原始载体。Hong[7]在 Zhang[6]的方法基础上改进，采用图像块边缘同图像平滑排序方法相结合，解决了原方法嵌入率及信息提取率的问题。Liao[8]运用图像像素间相关性的思路进行信息隐藏，在提取信息方面很好地控制信息错误提取率，但存在着图像与信息处理无法并行的问题。Zheng[9]通过对位平面分 2 层，高 4 位平面压缩产生冗余空间嵌入信息，低 4 位平面位利用直方图平移算法实现信息的嵌入。Xie[10]将图像分解成多个二值图像，使用 0，1 改变黑白交界处像素值，并利用较长或较短游程长度的奇偶性表示秘密信息，实现了盲提取，有较好的不可感知性和较高的数据嵌入量，但存在着鲁棒性差和安全性低等不足。Chen[11]通过 Hilbert 曲线扫描置乱图像的像素进行置乱，分析置乱后各个位平面比特流分布来确定可用于嵌入信息的游程，修改在可嵌入游程的比特流中 0 和 1 交界处至多 1 个值来嵌入一个比特秘密信息，具有良好的不可感知性和鲁棒性。Zhang[12]利用分块图像中相邻块的边界像素的相关性特征，通过选取合适的阈值对图像进行纹理区域和平滑区域划分，根据划分结果将加密之后的图像像素值以 2 种低位取反的方式隐藏秘密信息，有效降低数据提取和图像恢复的错误率，但在进行区域划分未能完整利用载体图像以及阈值区间。Nguyen[13]通过图像内相邻的 4 个像素值和阈值计算图像的平滑系数并将该系数添加到图像的上半区，剩余部分添加到下半区，同时修改后的载体图像进行加密操作和数据嵌入。Hasib[14]对图像进行预处理，将图像分解成步长相等的若干块并计算复杂度。复杂度小的块继续执行分块操作，复杂度适中和复杂度大的块不做块分解。复杂度小的块和复杂度适中的块嵌入数据，复杂度大的块则不做操作。

上述方法虽然都实现了秘密信息嵌入到数字图像中，但仍存在着数据嵌入量小、鲁棒性和安全性不高等不足。图像执行信息隐藏过程中，灰度图像常常作为载体图像。灰度图像作为载体图像同彩色图像相比，其自身的信息量少，以至于相关运算、处理速度更快。基于此，文中提出一种灰度图像像素量化的可逆信息隐藏算法，根据灰度图像的纹理、平滑度及特征，自适应划分阈值区间，解决鲁棒性、安全性和数据嵌入量等不足。

1　相关研究

1.1　Contourlet 变换

Contourlet 变换是一种多方向和多尺度的频域变换技术。Contourlet 变换能从多方向高效地勾勒图像的曲线和图像的平滑轮廓。Contourlet 变换主要利用拉普拉斯金字塔（LP）对图像进行多尺度分解并捕捉图像中存在的奇异点，采用方向组滤波器（DBF）对存在相关性的奇异点进行勾勒，形成平滑轮廓。LP 和 DFB 之间的关系见图 1。

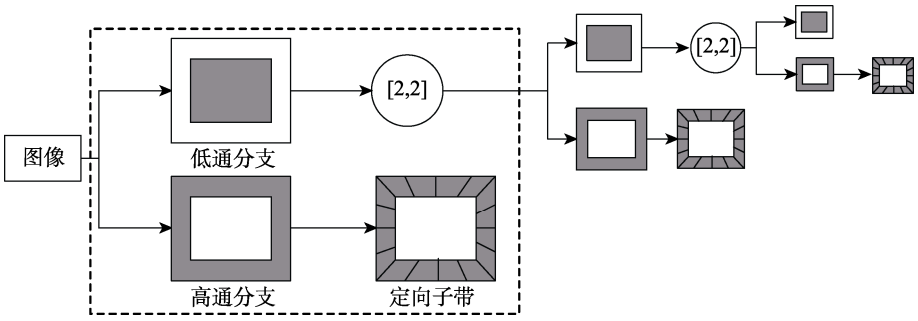


图 1　Contourlet 变换过程

Fig.1 Contourlet transform process

1.2　D-S 加密

DES 算法为密码体制中的对称密码体制，而其中 S 盒是非线性变换，它是一个 4×16 的矩阵，每一行包括所有 16 种 4 位二进制位，同时 S 盒运算时输入是 6 位二进制数，输出 4 位二进制。文中根据原始 DES 算法和 N-DES 的特点，提出一种新的 D-S（data encryption security algorithm）算法，流程见图 2。

当给定信息 1 组二进制数，分别对其偶数位取反，得到 $j_i=j_1j_2j_3j_4j_5j_6$，每个私钥 N 有 64 位，设 j_1j_6 和 $j_2j_3j_4j_5$ 对应的十进制分别为 l_1 和 l_2，则对应的十进制整数就是 S 盒中的 l_1 行 l_2 列的数，而且经过 S 盒加密转换信息容量小于原信息容量，从而可以更好地保证图像信息隐藏的鲁棒性和不可感知性。

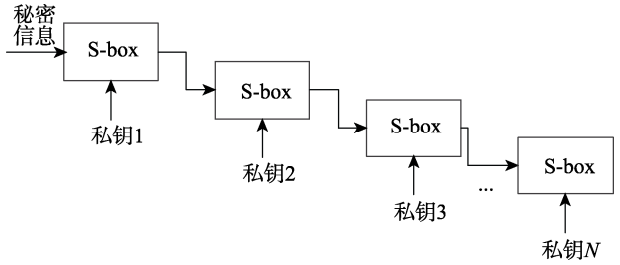


图 2　D-S 加密流程
Fig.2 D-S encryption process

2　算法描述

文中提出一种灰度图像像素量化的可逆信息隐藏算法，算法框架见图 3，具体流程如下所述。

1）图像发送者对载体图像进行 Hilbert 曲线扫描将 2D 数字图像信息转化为 1D 数字序列。

2）对载体图像进行像素量化多分辨分析获得图像数字信号的发展趋势曲线，并将该曲线作为阈值划分临界曲线对 1D 的数字序列进行量化处理，对量化后的 1D 数字序列逆执行曲线逆扫描恢复为 2D 数字图像，并对区域进行标记。

3）载体图像执行 Hilbert 置乱加密，生成密文图像。

4）每个位平面根据不同标记区域嵌入数据。

5）图像接受者接受载密图像，提取秘密信息并对其执行逆序解密获取信息，同时对加密图像执行 Hilbert 曲线逆扫描恢复图像。

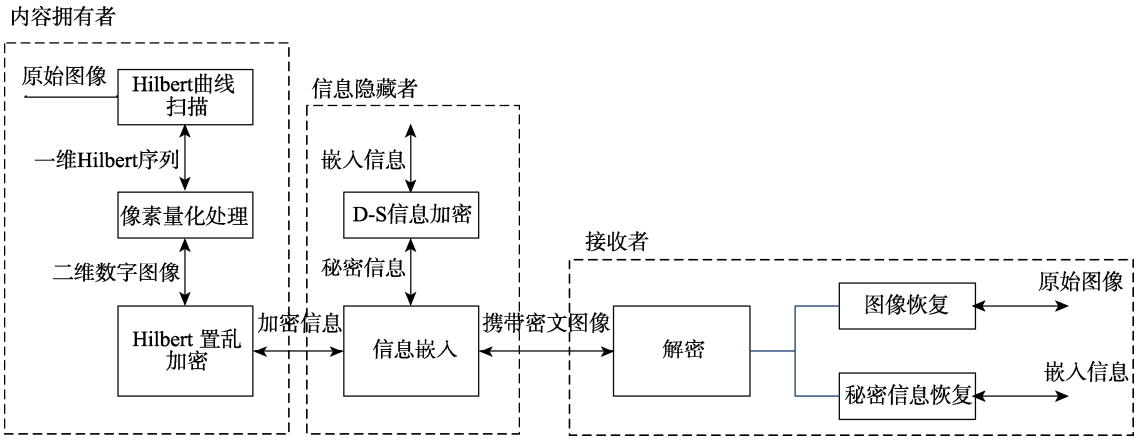


图 3　基于 Hilbert 置乱的灰度图像可逆信息隐藏算法框架
Fig.3 Reversible information hiding algorithm framework of gray image based on Hilbert scrambling

2.1　Hilbert 曲线扫描

根据 H 曲线遍历规则扫描载体 2D 图像，扫描结束获取所有像素点转化为矩阵 $\boldsymbol{H}'$。H 曲线扫描 2D 图像过程见图 4，图 4 经过遍历规则扫描所得的 1D 数据序列见图 5。在 $\boldsymbol{H}'$扫描矩阵中，H'_{ij} 上数值 α 为 2D 载体图像像素位置对应到 1D 平面的位置，记扫描后的一维数值序列为 R。

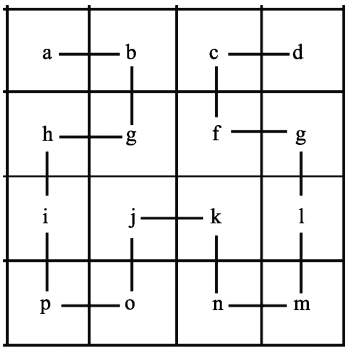


图 4　Hilbert 扫描曲线
Fig.4 Hilbert scan curve

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
字符	a	b	g	h	i	p	o	j	k	n	m	l	e	f	c	d

图 5　一维数据序列
Fig.5 One-dimensional data sequence

2.2　基于 Hilbert 扫描的图像像素量化

图像像素的量化可分为 2 个部分，包括图像像素多梯度二维分解和分解信息的量化过程。

2.2.1　图像像素分解

图像像素多梯度二维分解主要对图像横向和纵向进行分解。小波分析分解体系通过对时域和频域变换，分析、提取出图像的局部信号。图像通过函数和尺度函数的向量积变换对横向和纵向信号进行分解，得到 4 个部分，即低频、横向高频、纵向高频和斜向高频。

2.2.2　图像像素量化

图像的小波变换是将图像信号多尺度细分成为高频、低频部分，但是它对于高维部分及奇异性的分析存在盲区，因此文中提出了一种像素量化的方法。

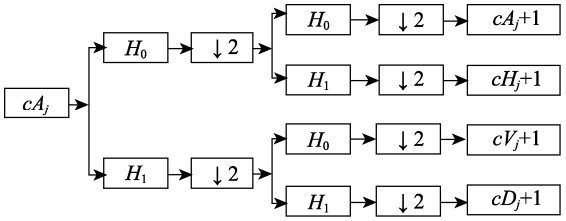


图 6 分解过程
Fig.6 Decomposition process

该方法将离散 contourlet[15]的 LP 滤波器和 DFB 滤波器的特点与小波频段的子带分解结合，构造像素量化的过程，能更好地提取图像信号中的点奇异，从而可自适应构建阈值曲线，并以此针对不同像素区域、不同纹理区域更加合理地嵌入大容量信息。

输入 2D 载体图像信号 $f(t)$，对输入的图像信号进行过滤、Mallat 分解和阈值去燥。同时对 $f(t)$ 各元素取绝对值、元素平方后开方得 $f'(t)$ 见式（1），阈值为 λ_t 见式（2）。

$$f'(t)=(\mathrm{sort}(|f|))^2, t=(0,1\cdots N-1) \tag{1}$$

$$\lambda_t=\sqrt{f(t)'}, t=(0,1\cdots N-1) \tag{2}$$

通过软阈值函数处理信号 $f'(t)$ 去噪得到较好的系数整体连续性以及原始信号的平滑性，见式（3）。

$$\begin{cases} x_k^{(j)}=\sum_n h_0(n-2k)x_n^{(j-1)} \\ d_k^{(j)}=\sum_n h_1(n-2k)x_n^{(j-1)} \end{cases} (j\geqslant 0, j\in Z) \tag{3}$$

式中：$x_k^{(j)}$，$d_k^{(j)}$ 为信号在分解水平 J 下的离散低频分量与离散高频分量；$h_0(n)$ 和 $h_1(n)$ 分别为低通滤波器系数和高通滤波器系数。分别令 $x_k^{(j)}=L_i(\omega)(i=0,1)$ 和 $d_k^{(j)}=D_i(\omega)(i=0,1)$，$\omega\triangleq(\omega_1,\omega_2)$。高通分支 $D_0(\omega)$ 使用 DFB 进行定向分解，第 1 级中的低通滤波器 $L_0(\omega)$ 沿每个下采样 d 维度，d 为一个即将确定的数字，并且第 2 级中的低通滤波器 $D_0(\omega)$ 被下采样（2，2）。为了获得更高水平的分解，可以递归地在点 a_{n+1} 处插入图表内容的副本由虚线矩形包围。在频域中指定低通滤波器 $L_i(\omega)$（i=0,1）作为 $L_i^{1d}(\omega_1)\cdot L_i^{1d}(\omega_2)$，$L_i^{1d}(\omega)$ 是 1D 低通滤波器通带频率 $\omega_{p,i}$ 和阻带频率 $\omega_{S,i}$ 和 a 平滑过渡带，定义为：

$$L_i^{1d}(\omega)=\begin{cases} 1 \quad \text{for} \quad |\omega|\leqslant\omega_{p,i} \\ \frac{1}{2}+\frac{1}{2}\cos\frac{(|\omega|-\omega_{p,i})\pi}{\omega_{s,i}} \quad \text{for} \quad \omega_{p,i}\leqslant|\omega|\leqslant\omega_{s,i} \\ 0 \quad \text{for} \quad \omega_{s,i}\leqslant|\omega|\leqslant\pi \end{cases} \tag{4}$$

其中 $|\omega|\leqslant\pi$ 且 i=0,1。当指定了低通滤波器，高通滤波器 $D_i(\omega)$ 可以从式（4）获得，以确保完美的重构，详细流程见图 7。

$$|L_i(\omega)|^2+|D_i(\omega)|^2=1, \text{for} \quad i=0,1 \tag{5}$$

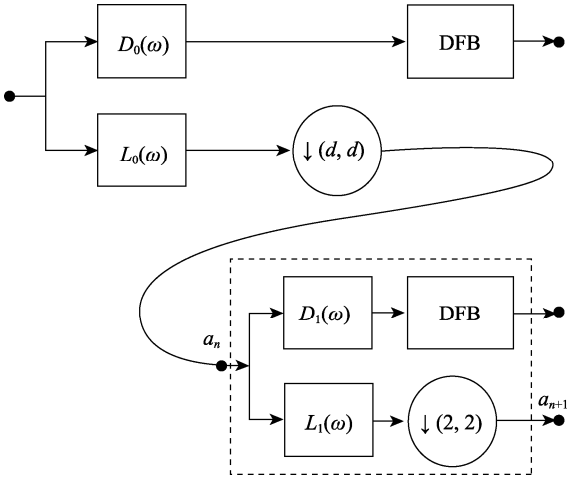


图 7 轮廓波变换
Fig.7 Contour wave transform

式中：$x_k^{(j)}$ 和 $d_k^{(j)}$ 为信号在分解水平 J 下的离散低频系数与离散高频系数；$h_0(n)$ 和 $h_1(n)$ 分别为低通滤波器系数和高通滤波器系数，分解的初始信号 $x_t^{(0)}$ 为待分解的原信号，即 $F(t)$。对信号的小波分解和重构算法可以实现对任意平稳和非平稳信号的处理，信号的重构算法见式（6）。

$$x_n^{(j-1)}=\sum_k h_0(n-2k)x_k^{(j)}+\sum_k h_1(n-2k)d_k^{(j)} \tag{6}$$

通过分解去除高频分量、低频分量进行重构得到 H 数值序列 $F(t)$ 的趋势曲线 $f(t)$。由于重构了低频分量，所以重构信号稳定且原信号对其影响为 0，提取出趋势曲线 $f(t)$ 有强抗干扰性和抗噪能力。整体阈值法和局部阈值法主要缺陷是没有充分考虑图像灰度信息特征的局部和整体变化趋势。为此，文中通过引入离散 contourlet 的 LP 和 DFB 滤波器并将其特性融合在分解及重构步骤间，解决了缺陷带来的不足。

使用上述像素量化算法提取序列 R 的趋势曲线，将该曲线作为阈值临界曲线，并对临界进行区域标记 Q_i。将阈值处理后的一维信号通过 H 曲线遍历规则逆执行生成 2D 图像，进行矢量转换序列使不仅保证了信息完整度而且也保证了像素点的空间相关性。

2.3 数据预处理

QR 码属于矩阵二维码，可携带大量数字信息，它的主要结构包括位置探测图形、定位图形、校正图形、格式版本信息、纠错码及数据，见图 8。

定位和校正功能利用 RS 算法使 QR 码具有纠错功能，纠错功能包含 4 个级别且在一定范围内正确解码。文中利用 QR 码的纠错功能这一特质，即使水印被破坏后依然可获取隐含的信息，这样保证水印信息的鲁棒性。QR 码根据不同版本、不同码元数及不同的纠错级别，其所包含数据信息的比特数量也有相应

不同，最大量可达 208，与此同时 QR 码的大小也随着包含数据量的大小而不同。QR 码的纠错功能能保证信息输入与输出前后的完整度以及 QR 码数据的大装载容量，因此文中在数据预处理阶段提出了将 D-S 加密与 QR 码相结合的方案，避免了信息隐藏算法中存在着秘密信息不安全的问题，解决了在切割情况下仍能获取原始且完整的信息，改善了数据嵌入量小的问题。

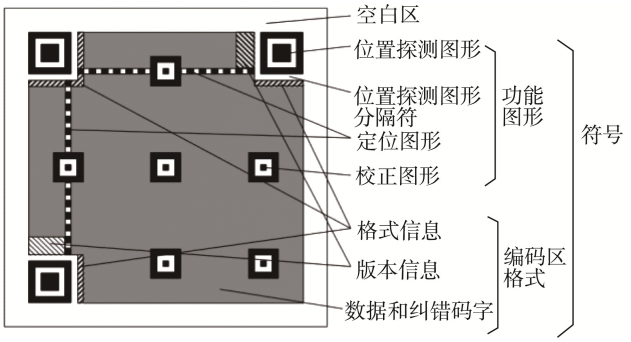


图 8　QR 结构
Fig.8 QR structure

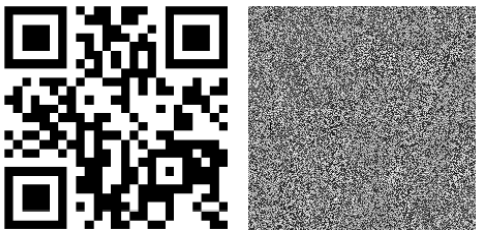
数据预处理步骤如下所述。

1）将待嵌入信息执行 D-S 算法数据加密，输出结果 θ_i。

2）将 θ_i 数据处理生成 QR 码，见图 9a。

3）将生成的 QR 码执行多重 2DLogistic 混沌置乱，见图 9b。

4）将置乱生成的密文图执行 Hilbert 曲线扫描生成 1D 数值序列 J。



a 原图　　b 加密图

图 9　QR 图
Fig.9 QR image

2.4　信息嵌入及提取

文中数据嵌入算法是在 Liao[8], Zheng[9], Xie[10], Chen[11]研究的算法存在数据嵌入量小和嵌入空间利用率低的问题下，提出了一种改进数据嵌入算法，通过对非阈值区黑白交界处像素值的改变以及通过奇偶性对带嵌入信息执行异或取反运算实现嵌入及提取，阈值区对像素进行位翻转实现信息的嵌入及提取，非阈值区采用比特替换的方式嵌入数据。

2.4.1　数据嵌入

秘密信息嵌入步骤如下所述。

1）图像预处理。Hilbert 曲线扫描载体图像输出一维序列 R，序列执行图像像素量化确定阈值曲线并对其标记 Q_i 逆操作还原图像。

2）对图像像素进行逐行扫描。扫描方式为扫描相邻 1 和 0 数字段，记 J 首位位 J_1。如果首位为 0，扫描到下一个 0 为截断点，反之同理。记前一段为 c_i 后一段为 d_i，记 $l_{\max}$ 为 $\max(c_i, d_i)$，$l_{\min}$ 为 $\min(c_i, d_i)$。

3）嵌入信息。当字段有标记 Q_i 时，$l_{\min} > Q_i$ 条件下，$\mathrm{mod}(l_{\max}, 2) = \mathrm{mod}(J_i, 2)$，取 J（容量为 1 bit）嵌入，$l_{\min}$ 值进 1 位，$l_{\max}$ 值减 1 位；$\mathrm{mod}(l_{\max}, 2) \neq \mathrm{mod}(J_i, 2)$ 不执行嵌入，$l_{\max}$ 和 $l_{\min}$ 值不变。在执行步骤 1）进位和减位条件下依然是 $l_{\min} > Q_i$，当 $\mathrm{mod}(l_{\max}, 2) = \mathrm{mod}(J_i, 2)$，$l_{\max}$ 值进 2 位，$l_{\min}$ 值进 2 位；$\mathrm{mod}(l_{\max}, 2) \neq \mathrm{mod}(J_i, 2)$ 不执行嵌入，$l_{\max}$ 和 $l_{\min}$ 值不变。当字段无标记 Q_i 时，将像素后 4 个最不重要位翻转，取反方式见式（7），其中 $\boldsymbol{G}'$ 为图像像素矩阵。

$$X_{i,j} = \hat{X}_{i,j} \quad (i,j) \in \boldsymbol{G}' \tag{7}$$

4）循环操作直到遍历完所有位置，信息嵌入完成。

2.4.2　数据提取及解密

秘密信息提取及解密步骤如下所述。

1）Hilbert 曲线扫描含秘密信息的图像输出一维序列 R'。

2）对图像像素进行逐行扫描。扫描方式如数据嵌入步骤 2），得到 $l_{\max}$ 和 $l_{\min}$ 值。

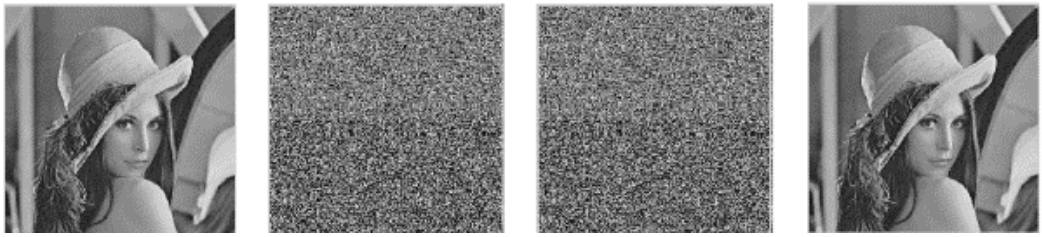
3）非阈值区对 $l_{\max}$ 和 $l_{\min}$ 值与比较，如果 $l_{\min} > Q_i$，嵌入信息为执行 $\mathrm{mod}(l_{\max}, 2)$；阈值区执行取反逆操作最终输出的信息 J_i。

4）将 J_i 与 S 盒执行逆序解密既得原始信息。

3　实验结果与分析

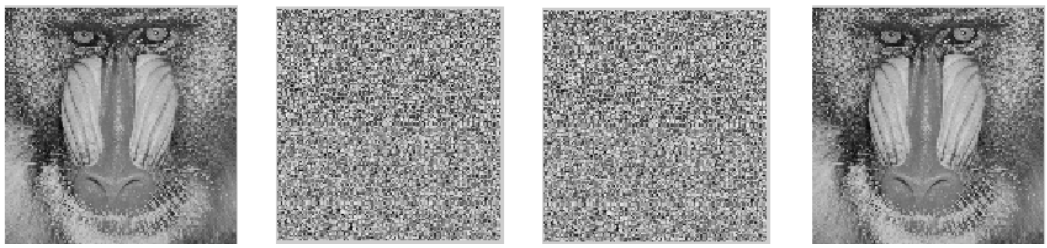
文中实验在 Matlab 2015b 平台进行实验操作，选取尺寸为 512×512 标准测试图像作为实验图像。实验对每幅图像嵌入的秘密信息大小为 64 bit，并对文献[10]、文献[12]的算法和文中的算法进行了性能比较。

文中实验首先利用 D-S 加密秘密信息，然后在密文图像中隐藏秘密信息生成含秘密信息的加密图像，最后提取信息、解密密钥获得秘密信息和恢复图像。图 10、图 11 分别表示原始图像、加密后图像、嵌入数据秘密信息图像和解密后的图像。从人体视觉感官分析图 10a 和图 10d、图 11a 和图 11d，辨别不出图像在一系列处理后的变化。文中算法恢复出来的图 10d 与图 10a、图 11d 与图 11a 之间的 MSE 均方差为 0，即表示恢复得到的载体图像与原始图像相同，同时从图像里提取的密文水印及密文水印解码后的 QR 码与原始一致且提取解密后的信息与原待嵌入信息一致，见图 12，证明了文中算法的可逆性。



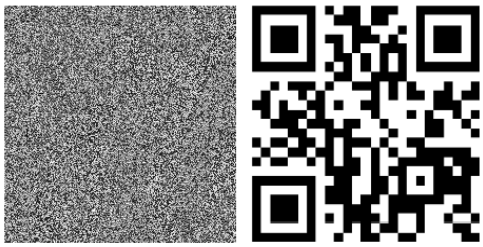
a Lena 原图　b 加密后图像　c 信息嵌入后图像　d 解密后图像

图 10　Lena 图像
Fig.10 Lena image



a Baboon 原图　b 加密后图像　c 信息嵌入后图像　d 解密后图像

图 11　Baboon 图像
Fig.11 Baboon image

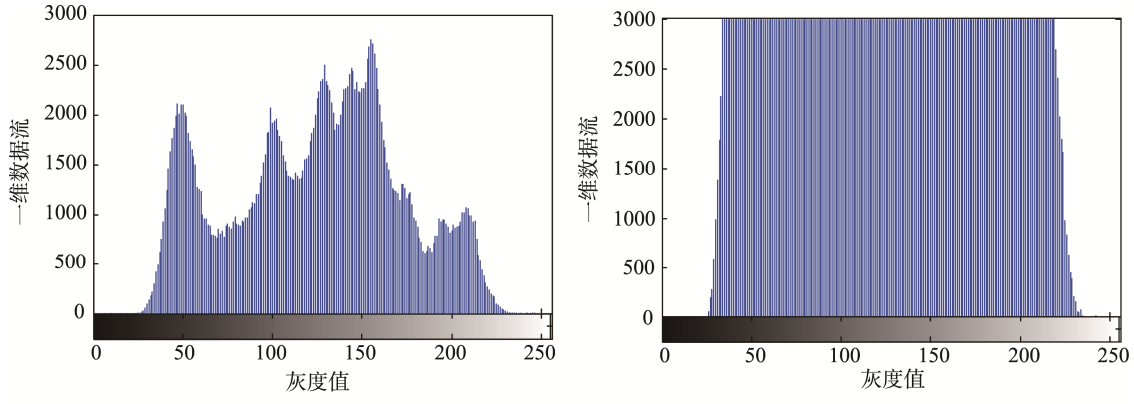


a 加密图　b 原图

图 12　QR 图像
Fig.12 QR image

2 幅标准测试图像经过多次的 Hilbert 曲线扫描置乱，大幅度降低了图像像素间的相关性，增强了随机性。lena 测试图经过 Hilbert 曲线扫描置乱后输出的一维数据流与灰度值的关系见图 13，baboon 测试图经过 Hilbert 曲线扫描置乱后输出的一维数据流与灰度值的关系见图 14。当原图以 m 或 n（m，n 为图像尺寸）为周期进行曲线变化时，在合适的阈值条件下且定长游程内，数值越大，有效游程数量越少。由图 13、图 14 可知，图像通过 Hilbert 曲线扫描得到的一维数据流的灰度值曲线在数值上与原图相比有较好的连续性，获取比特平面连续游程的平均长度更长、有效游程数更多。

PSNR 峰值信噪比评价函数对于评价灰度图像失真及信息隐藏已不客观准确，文中实验采用文献[16]WPSNR 评测图像，并与文献[10]、文献[12]的 WPSNR 结果进行了比较，详见表 1 及图 15；为了评价隐藏信息后的不可感知性，文中采用文献[16]VDSF 评测图像，并与文献[10]、文献[12]的 VDSF 结果进行了比较，详见表 1。从表 1 中数据可知 2 幅图像不可感知性指标与加权峰值信噪比指标均超标



a 原始数据流直方图　b 密文数据流直方图

图 13　Lena 数据流直方图
Fig.13 Lena data stream histogram

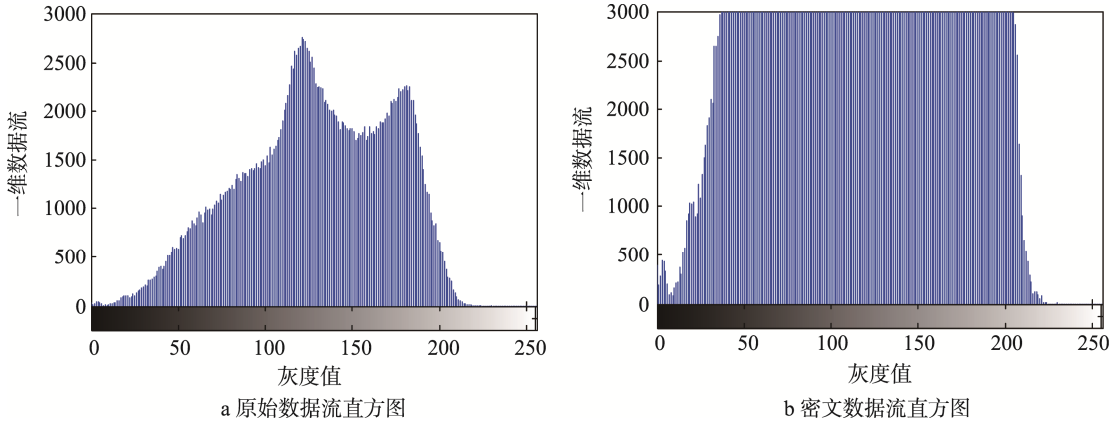


图 14　Baboon 数据流直方图

Fig.14 Baboon data stream histogram

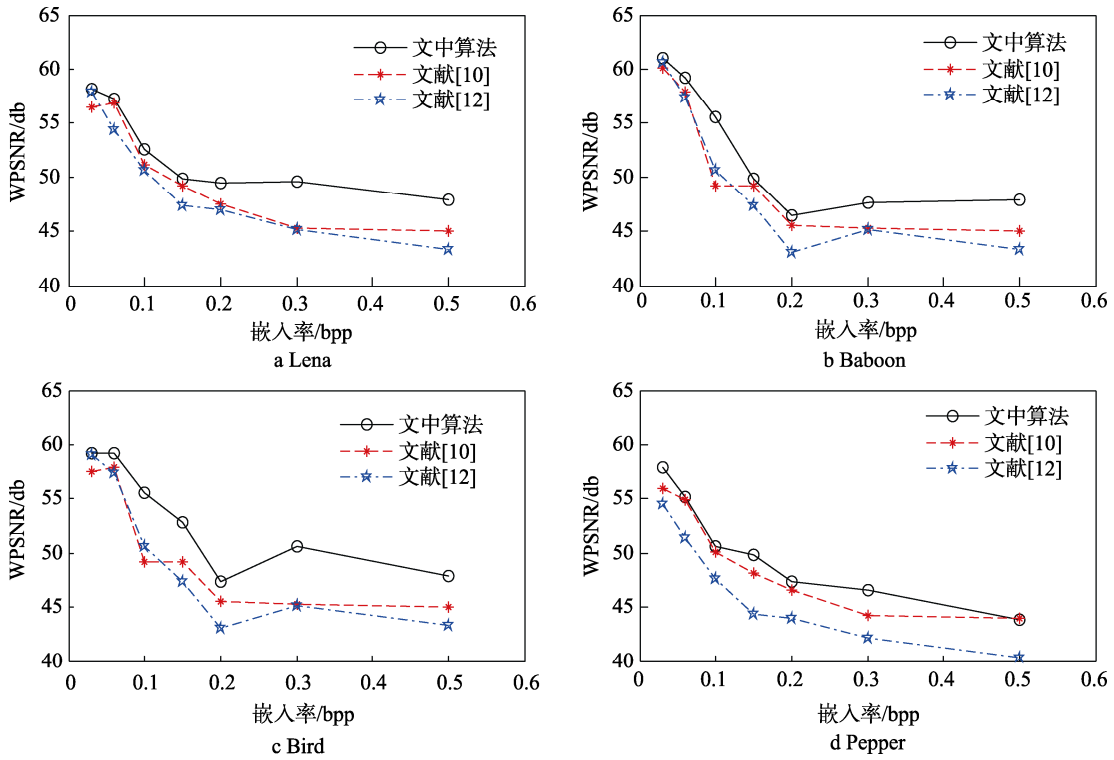


图 15　WPSNR 对比

Fig.15 WPSNR comparison

表 1　数据比较

Tab.1 Data comparison

测试图像	最大可嵌入容量/bit			WPSNR/db			VDSF		
	文献[10]	文献[12]	文中	文献[10]	文献[12]	文中	文献[10]	文献[12]	文中
Lena	2283	2048	2461	54.46	55.98	57.89	46.22	48.53	48.85
Baboon	3282	2048	3370	57.94	56.47	58.22	42.32	44.90	46.90
Bird	2961	2048	3144	60.63	60.11	61.04	51.39	50.62	52.01
Pepper	2789	2048	2832	59.13	57.54	59.27	48.97	48.23	48.36

准视觉可感知阈值且相较于文献[10]、文献[12]的值都有部分提升，证明在不可感知性方面文中算法基于文献[10]、文献[12]算法的优化效果良好。文中实验测试的 4 幅图像嵌入容量与文献[10]、文献[12]中隐写算法输出结果做了比较详见表 1，根据结果显示，文中算法通过 Hilbert 曲线扫描图像结合小波分析确

定阈值条件下最大量嵌入数据相对文献[10]、文献[12]的算法提升了 10%。

图像的鲁棒性指标对应着载密图像在经过相关处理、剪切等恶意攻击后秘密信息的完整度，文中用 NC 值作为评价指标。通过与文献[10]、文献[12]的抗剪切攻击对比，当图像检测率达到 60%，文中算法的 NC 指标高达 70%，该指标同文献[10]和文献[12]相比分别高出 30%和 28%，见图 16，说明该算法在剪切恶意攻击后图像的鲁棒性较好。

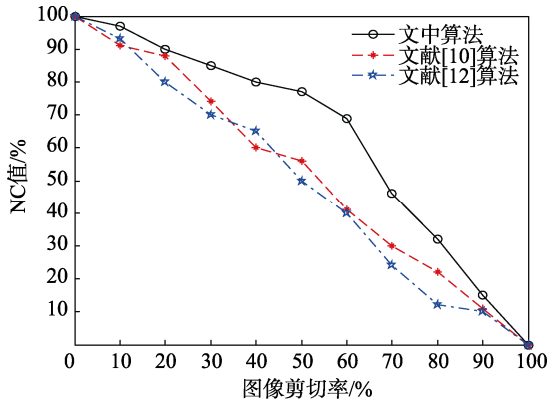


图 16　抗剪切攻击对比实验结果

Fig.16 Anti-shear attack comparison experiment results

在图像攻击实验中，对图像分别采用 0.1 和 0.25 高斯噪声、0.1 和 0.3 椒盐噪声、JEPG 压缩（比例为 30%，60%和 90%）、旋转及图像缩放等攻击手段。实验结果表明，文中算法正确提取率均值都高于文献[10]、文献[12]，且比率均值高达 98.63%，由此说明文中算法在原先算法的基础上又进一步地提高了图像的安全性，结果详见表 2。同时 QR 码因其构造的特殊性，在其受到上述等恶意攻击后仍能准确地读取完整信息，结果详见表 3。

表 2　攻击实验结果

Tab.2 Attack experiment result

攻击方式	正确解码率/%		
	文献[10]	文献[12]	文中
高斯噪声（0.1）	99	99	99
高斯噪声（0.25）	95	92	97
椒盐噪声（0.1）	99	98	99
椒盐噪声（0.3）	98	97	99
JEPG 压缩 30%	99	99	99
JEPG 压缩 60%	98	98	99
JEPG 压缩 90%	97	96	98
旋转 60°	99	99	99
旋转 120°	98	98	99
放大 1.5 倍	96	94	98
缩小 0.5 倍	95	97	99

表 3　信息提取结果

Tab.3 Information extraction result

攻击方式	信息完整率（均值）/%		
	文献[10]	文献[12]	文中
高斯噪声	96	95	99
椒盐噪声	97	91	99
JEPG 压缩	86	88	98
旋转	72	77	100
缩放	90	89	100
剪切	65	53	99

4　结语

针对现阶段信息隐藏算法的需求及文献[8—11]方法中存在的缺陷，提出了一种图像像素量化方法。像素量化方法通过对载体图像及 QR 码的利用，进一步拓展了信息嵌入的空间；算法融合 Hilbert 变换和 D-S 算术加密等技术，在保证秘密信息的安全性和完整度的情况下加大了数据量，实现灰度图像下的信息隐写。实验结果表明，文中算法在嵌入率上提高了 10%；并且秘密信息的嵌入与提取准确、图像的加密与恢复完整，在受到噪声、压缩、旋转、缩放等攻击时正确提取率仍高达 98.63%，具有较高的安全性。文中所提算法局限于灰度图像，对于 RGB 图像进行隐写处理是今后研究的重点。

参考文献：

[1] 柯彦，张敏情，刘佳，等. 密文域可逆信息隐藏综述[J]. 计算机应用, 2016, 36(11): 3067—3076.
KE Yan, ZHANG Min-qing, LIU Jia, et al. Overview of Reversible Information Hiding in Ciphertext Domain[J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(11): 3067—3076.

[2] 董振华，李喜艳. 基于 SVD 和 EMD-S 编码的隐藏算法[J]. 微型机与应用, 2016, 35(18): 42—44.
DONG Zhen-hua, LI Xi-yan. Hidden Algorithm Based on SVD and EMD-S Coding[J]. Microcomputer & Applications, 2016, 35(18): 42—44.

[3] 龚一珉，孙刘杰. 纹理特征自适应的全息水印算法[J]. 包装工程, 2017, 38(23): 211—216.
GONG Yi-zhen, SUN Liu-jie. Texture Feature Adaptive Holographic Watermarking Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(23): 211—216.

[4] WANG C, WANG X, ZHANG C, et al. Geometric Correction Based Color Image Watermarking using Fuzzy least Squares support Vector Machine and Bessel K Form Distribution[J]. Signal Processing, 2017, 134: 197—208.

[5] MA X, PAN Z, HU S, et al. High-fidelity Reversible Data Hiding Scheme Based on Multi-predictor Sorting and Se-

lecting Mechanism[J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2015, 28(C): 71—82.

[6] ZHANG X. Reversible Data Hiding in Encrypted Image[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(4): 255—258.

[7] HONG W, CHEN T S, WU H Y. An Improved Reversible Data Hiding in Encrypted Images Using Side Match[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(4): 199—202.

[8] LIAO X, SHU C. Reversible Data Hiding in Encrypted Images Based on Absolute Mean Difference of Multiple Neighboring Pixels[J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2015, 28: 21—27.

[9] 郑洪英, 任雯, 程惠惠. 基于位平面压缩的密文医学图像可逆信息隐藏算法[J]. 计算机应用, 2016, 36(11): 3088—3092.
ZHENG Hong-ying, REN Wen, CHENG Hui-hui. Reversible Information Hiding Algorithm for Ciphertext Medical Image Based on Bit Plane Compression[J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(11): 3088—3092.

[10] 谢建全, 谢勍, 黄大足. 一种基于游程长度的高安全性图像信息隐藏算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(3): 172—175.
XIE Jian-quan, XIE Wei, HUANG Da-zu. A High Security Image Information Hiding Algorithm Based on Run Length[J]. Computer Science, 2014, 41(3): 172—175.

[11] 陈贞佐, 杨任尔, 陈计. 结合 Hilbert 曲线扫描与游程长度的图像隐写算法[J]. 宁波大学学报(理工版), 2018, 31(1): 41—45.
CHEN Zhen-zuo, YANG Ren-er, CHEN Ji. Image Steganography Algorithm Based on Hilbert Curve Scan and Run Length[J]. Journal of Ningbo University(Natural Science Edition), 2018, 31(1): 41—45.

[12] 张巧妹, 顾军华, 侯向丹. 基于阈值划分的加密域信息隐藏算法[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(6): 1424—1428.
ZHANG Qiao-mei, GU Jun-hua, HOU Xiang-dan. Encryption Domain Information Hiding Algorithm Based on Threshold Partitioning[J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38(6): 1424—1428.

[13] NGUYEN T S, CHANG C C, CHANG W C. High Capacity Reversible Data Hiding Scheme for Encrypted Images[J]. Signal Processing Image Communication, 2016, 44: 84—91.

[14] HASIB S A, NYEEM H. Developing a Pixel Value Ordering Based Reversible Data Hiding Scheme[C]// International Conference on Electrical Information and Communication Technology IEEE, 2018: 1—6.

[15] LU Y, DO M N. A New Contourlet Transform With Sharp Frequency Localization[C]// IEEE International Conference on Image Processing IEEE, 2007: 1629—1632.

[16] 谢建全, 谢勍, 黄大足, 等. 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, XIE Wei, HUANG Da-zu, et al. Study on the Invisibility Index of Image Information Hiding[J]. Mini-micro Systems, 2011, 32(5): 953—957.