

# 自适应压缩移位区间的 IPVO 可逆数据隐藏方法

李 蓉

(广东农工商职业技术学院 计算机学院, 广东 广州 510507)

**摘要:**改进像素值排序(IPVO)算法采用预测差值“0”和“1”进行信息嵌入,其他预测差值执行移位操作,针对其嵌入空间利用率和感知质量较低的问题,提出一种基于自适应压缩移位区间的 IPVO 可逆数据隐藏方法。通过统计像素值排序方法各预测差值出现频率,使用频率为零次的预测差值压缩移位区间,根据嵌入需求选择合适的连续移位预测差值区间和嵌入差值密度较大区域进行信息嵌入,改进 IPVO 可逆数据隐藏方法。通过图像不可感知性、嵌入容量和鲁棒性实验分析表明,在相同嵌入量下,压缩移位区间可以减少执行移位操作的像素数量,降低信息嵌入对图像感知质量的影响;在保证良好视觉质量前提下,算法嵌入容量性能没有下降,并具有较强的鲁棒性。

**关键词:**改进像素值排序;预测误差;数据隐藏;压缩;峰值信噪比

中图分类号:TP309.2

文献标志码:A

## IPVO reversible data hiding method based on self-adaptive compression shift interval

LI Rong

(Computer Department, Guangdong AIB Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510507, China)

**Abstract:** Improved pixel value sorting (IPVO) algorithm uses prediction difference “0” and “1” to hide data and other prediction differences perform shift operation. In view of the low utilization of image embedding space and perception quality, an IPVO reversible data hiding method based on self-adaptive compression shift interval was proposed. The frequency of each prediction difference in the pixel value sorting method was counted and the range of shift prediction difference was compressed by using the prediction difference values with the frequency of “0”. Suitable continuous shift prediction difference interval and the area with high embedding difference density were selected to embed information according to the embedding demand, thus improving the IPVO reversible data hiding method. Experiments on the imperceptibility, embedding capacity and robustness of images were carried out. The experimental analyses show that compressing the shift interval can reduce the number of pixels performing for shift operation under the same embedding capacity, and reduce the influence of information embedding on the image perception quality. Under the premise of ensuring good visual quality, the embedding capacity of the algorithm does not decrease and it has strong robustness.

**Key words:** IPVO; prediction error; data hiding; compression; peak signal-to-noise ratio(PSNR)

随着互联网和数字信息的飞速发展,信息安全的需求越来越迫切。图像可逆数据隐藏(reversible data hiding, RDH)是利用图像作为隐秘载体来保障信息安全的一种新兴技术,因其失真小且无损恢复的优点被广泛应用于隐秘通信、版权保护、数字认证、遥感技术、医学图像处理等领域。

图像可逆数据隐藏领域具有代表性的算法包括:①基于无损压缩的可逆数据隐藏方法<sup>[1-2]</sup>,主要是对原始图像通过无损压缩释放一些空间,将节省出来的空间用于存储秘密信息,这类算法因隐藏容量有限且对原始图像改动较大,在实际使用中存在局限性;②基于直方图平移的可逆数据隐藏方法<sup>[3-5]</sup>,先生成原始图像直方图,再利用图像自身的统计特性通过平移直方图来实现可逆嵌入,方法简单,但嵌入量过分依赖于图像自

收稿日期:2021-02-19

基金项目:广东省普通高校重点科研平台和项目(2019GKTSCX057);广东省教育科学“十三五”规划课题(2018GXJK325)

作者简介:李 蓉(1979—),女,山西长治人,副教授,主要从事信息安全等方面研究.E-mail: rli@gdaib.edu.cn

身特点;③基于整数变换的可逆数据隐藏方法<sup>[6-8]</sup>,利用数学上的整数变换原理实现可逆的信息嵌入和提取,优点是嵌入容量大且计算复杂度低,但嵌入效率较低;④基于预测误差扩展的可逆数据隐藏方法<sup>[9-10]</sup>,核心思想是以预测误差代替原有的实际差值从而实现信息嵌入,能够更好地利用图像相关性,在嵌入容量和嵌入性能上均有较大提高。近年来,Li 等<sup>[11]</sup>在预测误差扩展思想基础上提出基于像素值排序(pixel value ordering,PVO)的数据隐藏方法,极大地改善了嵌入性能和载秘图片视觉效果;Ou 等<sup>[12]</sup>提出基于多直方图修改的 PVO 算法,引入对嵌入误差的优选过程,提高了载秘图像的信噪比;文献[13]提出一种图像分区优选思想,利用图像嵌入空间改善 PVO 算法的嵌入性能;Peng 等<sup>[14]</sup>提出一种改进的像素值排序可逆数据隐藏方案(improved PVO,IPVO),延展利用了最大像素值与次大像素值相等的像素,利用预测误差值“0”和“1”嵌入秘密信息,提高了嵌入容量。文献[15]基于 IPVO 算法,提出浮动预测差值思想,针对不同的嵌入容量选择适当的差值完成数据隐藏,能更好地利用图像冗余空间,提高算法性能。之后陆续出现多种基于像素值排序思想的改进方法<sup>[16-17]</sup>,来进一步优化隐藏性能。

由以上研究可知,像素值排序算法性能与图像自身特性有一定的相关性,为充分提高图像冗余空间的利用率,本研究在考虑 IPVO 算法与图像像素分布相关性的基础上,以满足嵌入需求为前提,提出自适应压缩移位区间方法。首先,统计最大值预测差值和最小值预测差值的分布情况,利用频率为 0 次的预测差值获取其连续分布区间;其次,计算各区域嵌入差值密度;然后,根据处理图像特征和嵌入需求优先选择合适的连续分布区间和嵌入差值比较集中的区域进行信息嵌入,使其与图像嵌入差值统计分布特征相适应,从而减少移位像素数量,提高图像的嵌入性能和载秘图像的质量。

## 1 IPVO 算法及分析

### 1.1 IPVO 算法简介

Peng 等<sup>[14]</sup>提出的 IPVO 数据隐藏方案使用预测误差“0”和“1”进行信息嵌入,算法过程为:

- 1) 将图像分成若干非重叠的像素组,假设某像素组中包含  $n$  个像素,其像素值分别为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。
- 2) 将组中像素按像素值升序排序,记为  $x_{\sigma(1)}, x_{\sigma(2)}, \dots, x_{\sigma(n-1)}, x_{\sigma(n)}$ ,且满足  $x_{\sigma(1)} \leq x_{\sigma(2)} \leq \dots \leq x_{\sigma(n-1)} \leq x_{\sigma(n)}$ , $\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(n-1), \sigma(n)$  为像素在原始像素组中的位置顺序。
- 3) 计算最大值像素预测误差

$$e_{\max} = x_u - x_v \quad (1)$$

其中,  $u = \min(\sigma(n-1), \sigma(n)), v = \max(\sigma(n-1), \sigma(n))$ 。

- 4) 使用预测误差“0”和“1”嵌入秘密数据, $s$  为嵌入的秘密信息,最大值预测差值的变化公式为:

$$e'_{\max} = \begin{cases} e_{\max} + s, e_{\max} = 1; \\ e_{\max} + 1, e_{\max} > 1; \\ e_{\max} - s, e_{\max} = 0; \\ e_{\max} - 1, e_{\max} < 0. \end{cases} \quad (2)$$

最大值像素变化过程为:

$$x'_{\sigma(n)} = \begin{cases} x_{\sigma(n)} + s, e_{\max} = 1; \\ x_{\sigma(n)} + 1, e_{\max} > 1; \\ x_{\sigma(n)} + s, e_{\max} = 0; \\ x_{\sigma(n)} + 1, e_{\max} < 0. \end{cases} \quad (3)$$

5) 采用与最大值预测差值和最大值像素变化的类似过程,计算最小值像素预测误差  $e_{\min}$ ,并使用预测误差“0”和“1”嵌入秘密数据。嵌入过程没有改变  $x_{\sigma(n)}$  和  $x_{\sigma(1)}$  的排序位置,利用文献[14]的方法提取隐信息并无损恢复原始图像。

### 1.2 算法分析

对于 256 灰阶度图像,IPVO 算法预测差值分布于区间 $[-255, 255]$ ,采用预测差值“0”“1”完成信息嵌入时,大于 1 的最大值(或最小值)像素预测差值右移 1 像素;小于 0 的最大值(或最小值)像素预测差值左移

1 像素,为预测差值“0”“1”隐藏信息预留空间,保证顺利实现信息提取。

事实上,每幅图像的最大值像素预测差值与最小值像素预测差值的分布不一致。一方面,预测差值通常集中在靠近差值“0”的区域,使得在使用差值“0”或“1”完成信息嵌入时能够尽可能提高图像的载荷容量;另一方面,预测差值区间的两端分布较为稀疏,经常有某些差值出现频率为 0 的情况,分布往往呈现不均匀不连续的状态。基于以上考虑,在像素执行移位操作中,当预测差值大于 1 时,IPVO 移位差值区间 $[2, 255]$ 可压缩为 $[2, e_r - 1]$ ,  $e_r$  为所有大于 1 且出现频率为 0 的预测差值中的最小差值;当预测差值小于 0 时,移位差值区间 $[-255, -1]$ 可压缩为 $[e_l + 1, -1]$ ,  $e_l$  为所有小于 0 且出现频率为 0 的预测差值中的最大差值。将 $[2, e_r - 1]$ 和 $[e_l + 1, -1]$ 作为压缩后的连续差值分布区间,利用压缩移位区间实现数据隐藏的差值直方图变化,如图 1 所示。若将图像划分为若干个区域<sup>[13]</sup>,寻找每个区域差值出现频率为 0 的  $e_r$  和  $e_l$ , 预期可进一步减少对直方图的修改,降低信息隐藏过程的移位率,提高隐秘图像的信噪比。

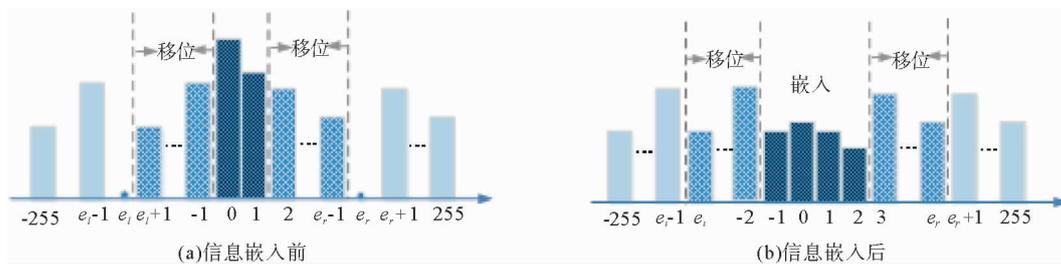


图 1 压缩移位区间的差值直方图变化过程

Fig. 1 Histogram modification after compression shift interval

## 2 改进的 IPVO 可逆数据隐藏算法

### 2.1 差值连续分布区间的嵌入差值密度计算

对于灰度图像,假设最大值像素预测差值为  $e_{\max,t} (t = -255, \dots, 255)$ , 每个差值出现频率为  $n_{\max,t} (t = -255, \dots, 255)$ , 若  $n_{\max,t} = 0$ , 则称差值  $e_{\max,t}$  为最大值像素预测差值的零次差值。同理,最小值像素预测差值为  $e_{\min,t} (t = -255, \dots, 255)$ , 每个差值出现频率为  $n_{\min,t} (t = -255, \dots, 255)$ , 若  $n_{\min,t} = 0$ , 则称差值  $e_{\min,t}$  为最小值像素预测差值的零次差值。

利用  $n_{\max,t} = 0$  的零次差值可将  $e_{\max,t}$  分布区间 $[-255, 255]$ 划分为若干区间段,若出现连续多个零次差值,则跳过后将非零次差值作为区间段的边界点,保证每个区间段中不存在零次差值,所得区间段称为差值连续分布区间。统计每个区间段所有差值出现的次数总和,获取差值总次数最大的区间段 $[e_{\max,l}, e_{\max,r}]$ 及对应的差值总次数  $N_{\max}$ , 且满足  $N_{\max} = \sum_{t=l}^r n_{\max,t}$ 。同理,利用  $n_{\min,t} = 0$  的零次差值可将  $e_{\min,t}$  分布区间 $[-255, 255]$ 划分为若干差值连续分布区间,统计每个区间段所有差值出现的次数总和,获取差值总次数最大的区间段 $[e_{\min,l}, e_{\min,r}]$ 及对应的差值总次数  $N_{\min}$ , 且满足  $N_{\min} = \sum_{t=l}^r n_{\min,t}$ 。

统计嵌入差值“0”和“1”在差值连续分布区间中出现的比率,称为嵌入差值密度  $DS$ , 其值为:

$$DS = \frac{\sum_{t=0,1} n_{\max,t} + \sum_{t=0,1} n_{\min,t}}{\sum_{t=l}^r n_{\max,t} + \sum_{t=l}^r n_{\min,t}} \quad (4)$$

### 2.2 改进的 IPVO 可逆数据隐藏算法

#### 2.2.1 信息嵌入过程

将秘密信息嵌入图像中可得载密图像,嵌入过程如下。

1) 对于  $M \times N$  像素的原始图像  $I$ , 将图像平均分为互不重叠的  $B$  个区域, 记每个区域为  $I_b (b = 1, 2, \dots,$

B), 每个区域像素个数  $P = (M \times N) / B$ 。

2) 将区域  $I_b$  像素按  $2 \times 2$  的大小分组, 设分组数为  $U$ , 则  $U = P / (2 \times 2)$ 。

3) 区域  $I_b$  中每个像素组包含 4 个相邻像素, 记第  $u$  组像素的像素值为  $x_u^b, x_{u+1}^b, x_{u+2}^b, x_{u+3}^b$ , 且  $0 \leq x_u^b, x_{u+1}^b, x_{u+2}^b, x_{u+3}^b \leq 255$ , 其中  $u = 1, 2, \dots, U$ 。

4) 对区域  $I_b$  第  $u$  组像素, 按像素值从低到高进行排序, 得到序列  $x_{\sigma(u)}^b, x_{\sigma(u+1)}^b, x_{\sigma(u+2)}^b, x_{\sigma(u+3)}^b$ , 满足  $x_{\sigma(u)}^b \leq x_{\sigma(u+1)}^b \leq x_{\sigma(u+2)}^b \leq x_{\sigma(u+3)}^b$ , 其中  $x_{\sigma(u+3)}^b$  是最大像素值,  $x_{\sigma(u)}^b$  是最小像素值。  $\sigma: \{u, u+1, u+2, u+3\} \rightarrow \{u, u+1, u+2, u+3\}$  为一一映射关系。当  $x_{\sigma(m)} = x_{\sigma(n)}$  且  $m < n$  时,  $\sigma(m) < \sigma(n)$  ( $m, n = u, u+1, u+2, u+3$ )。

5) 计算区域  $I_b$  第  $u$  组像素的最大像素值  $x_{\sigma(u+3)}^b$  与次大像素值  $x_{\sigma(u+2)}^b$  的差, 得到最大值预测误差

$$e_{\max}^{b,u} = \begin{cases} x_{\sigma(u+2)}^b - x_{\sigma(u+3)}^b, \sigma(u+3) \geq \sigma(u+2); \\ x_{\sigma(u+3)}^b - x_{\sigma(u+2)}^b, \sigma(u+3) < \sigma(u+2)。 \end{cases} \quad (5)$$

计算最小像素值  $x_{\sigma(u)}^b$  与次小像素值  $x_{\sigma(u+1)}^b$  的差, 得到最小值预测误差

$$e_{\min}^{b,u} = \begin{cases} x_{\sigma(u)}^b - x_{\sigma(u+1)}^b, \sigma(u+1) \geq \sigma(u); \\ x_{\sigma(u+1)}^b - x_{\sigma(u)}^b, \sigma(u+1) < \sigma(u)。 \end{cases} \quad (6)$$

6) 对区域  $I_b$ , 设  $e_{\max,t}^b$  ( $t = -255, \dots, 255$ ) 为计算得到的不同最大值像素预测差值,  $n_{\max,t}^b$  ( $t = -255, \dots, 255$ ) 为差值  $e_{\max,t}^b$  出现的次数, 统计获得次数之和最大的差值连续分布区间  $[e_{\max,l}^b, e_{\max,r}^b]$ , 该区间差值

总次数为  $N_{\max}^b$ , 则  $N_{\max}^b = \sum_{i=l}^r n_{\max,i}^b$  ( $l, r \in [-255, 255]$ )。同理, 设  $e_{\min,t}^b$  ( $t = -255, \dots, 255$ ) 为计算得到的

不同最小值像素预测差值,  $n_{\min,t}^b$  ( $t = -255, \dots, 255$ ) 为差值  $e_{\min,t}^b$  出现的次数, 统计获得次数之和最大的

差值连续分布区间  $[e_{\min,l}^b, e_{\min,r}^b]$ , 该区间差值总次数为  $N_{\min}^b$ , 则  $n_{\min}^b = \sum_{i=l}^r n_{\min,i}^b$  ( $l, r \in [-255, 255]$ )。

7) 利用式(4)计算区域  $I_b$  每个分区的嵌入差值密度  $DS_b$  ( $b = 1, 2, \dots, B$ )。

8) 对序列  $\{DS_1, DS_2, \dots, DS_B\}$  进行降序排列, 得到新序列  $\{DS_{\delta(1)}, DS_{\delta(2)}, \dots, DS_{\delta(B)}\}$ , 满足  $DS_{\delta(1)} \geq DS_{\delta(2)} \geq \dots \geq DS_{\delta(B)}$ ,  $\delta: \{1, 2, \dots, B\} \rightarrow \{\delta(1), \delta(2), \dots, \delta(B)\}$  为一一映射关系。当  $DS_{\delta(m)} = DS_{\delta(n)}$  且  $m > n$  时,  $\delta(m) > \delta(n)$  ( $m, n = 1, 2, \dots, B$ )。以满足嵌入需求为前提, 结合嵌入差值统计分布特征, 自动优先选择密度较大区域进行信息嵌入。

9) 假设位串  $M = m_0 m_1 \dots m_{l-1}$  是需嵌入的  $l$  位秘密消息, 其中  $m_j \in \{0, 1\}$ ,  $0 \leq j \leq l$ 。

10) 使用区间  $[e_{\max,l}^b, e_{\max,r}^b]$  完成嵌入过程, 修改后的最大值预测差值

$$e'_{\max}{}^{b,u} = \begin{cases} e_{\max}^{b,u} + m_j, e_{\max}^{b,u} = 1; \\ e_{\max}^{b,u} + 1, 1 < e_{\max}^{b,u} < e_{\max,r}^b; \\ e_{\max}^{b,u} - m_j, e_{\max}^{b,u} = 0; \\ e_{\max}^{b,u} - 1, e_{\max,l}^b < e_{\max}^{b,u} < 0。 \end{cases} \quad (7)$$

利用差值区间段  $[e_{\min,l}^b, e_{\min,r}^b]$  完成嵌入过程, 修改后的最小值预测差值

$$e'_{\min}{}^{b,u} = \begin{cases} e_{\min}^{b,u} + m_j, e_{\min}^{b,u} = 1; \\ e_{\min}^{b,u} + 1, 1 < e_{\min}^{b,u} < e_{\min,r}^b; \\ e_{\min}^{b,u} - m_j, e_{\min}^{b,u} = 0; \\ e_{\min}^{b,u} - 1, e_{\min,l}^b < e_{\min}^{b,u} < 0。 \end{cases} \quad (8)$$

11) 利用式(9)修改最大像素值  $x_{\sigma(u+3)}^b$  为:

$$x'_{\sigma(u+3)}{}^b = \begin{cases} x_{\sigma(u+3)}^b + m_j, e_{\max}^{b,u} = 1; \\ x_{\sigma(u+3)}^b + 1, 1 < e_{\max}^{b,u} < e_{\max,r}^b; \\ x_{\sigma(u+3)}^b - m_j, e_{\max}^{b,u} = 0; \\ x_{\sigma(u+3)}^b - 1, e_{\max,l}^b < e_{\max}^{b,u} < 0。 \end{cases} \quad (9)$$

利用式(10)修改最小像素值  $x_{\sigma(u)}^b$  为:

$$x'_{\sigma(u)} = \begin{cases} x_{\sigma(u)}^b - m_j, e_{\min}^{b,u} = 1; \\ x_{\sigma(u)}^b - 1, 1 < e_{\min}^{b,u} < e_{\min,r}^b; \\ x_{\sigma(u)}^b - m_j, e_{\min}^{b,u} = 0; \\ x_{\sigma(u)}^b - 1, e_{\min,l}^b < e_{\min}^{b,u} < 0. \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $b = 1, 2, \dots, B; u = 1, 2, \dots, U; 0 \leq j \leq l - 1$ 。利用式(9)、式(10)嵌入所有信息  $M$ , 可得到标记图像。在算法改进过程中, 映射  $\sigma$  保持不变, 因此可以实现秘密数据的提取和图像的无损恢复。

12) 对于图像像素, 当  $x_{\sigma(u+3)}^b = 255$ , 且满足  $1 < e_{\max}^{b,u} < e_{\max,r}^b$  或  $e_{\max,l}^b < e_{\max}^{b,u} < 0$  时, 像素值变化可能导致上溢, 在这种情况下, 设置  $h_{1b,u} = 1$ , 否则设置  $h_{1b,u} = 0$ , 将所有像素标记后得到位图  $H1 = \{h_{11,1}, h_{11,2}, \dots, h_{1B,U}\}$ ; 当  $x_{\sigma(u)}^b = 0$ , 且满足  $1 < e_{\min}^{b,u} < e_{\min,r}^b$  或  $e_{\min,l}^b < e_{\min}^{b,u} < 0$  时, 像素值变化可能导致下溢, 在这种情况下, 设置  $h_{2b,u} = 1$ , 否则设置  $h_{2b,u} = 0$ , 将所有像素标记后得到位图  $H2 = \{h_{21,1}, h_{21,2}, \dots, h_{2B,U}\}$ ;  $H1$  和  $H2$  是提取嵌入消息所需的位图信息, 长度均为  $B \times U$ , 且  $h_{1b,u} \in \{0, 1\}, h_{2b,u} \in \{0, 1\} (b = 1, 2, \dots, B; u = 1, 2, \dots, U)$ 。由于位图信息中只有极少数 1, 可以使用无损压缩来显著减小  $H1$  和  $H2$  的大小。将压缩后的位图表示为  $H1c$  和  $H2c$ , 其长度分别为  $l1c$  和  $l2c$ 。

13) 将辅助信息  $SI$ 、 $H1c$  和  $H2c$  嵌入到图像  $l_s + l1c + l2c$  个像素的最低有效位(least significant bit, LSB), 并记录像素原 LSB 的二进制序列  $S_{LSB}$ 。  $l_s$  是辅助信息  $SI$  的长度, 包括嵌入容量  $CR$ , 阈值  $TS$ , 区域数  $B$ , 嵌入差值密度选择区域标号  $b$ , 连续差值分布区间边界值  $e_{\max,r}^b, e_{\max,l}^b, e_{\min,r}^b, e_{\min,l}^b$ 。使用式(9)、式(10)以相同方法将序列  $S_{LSB}$  嵌入到图像的其余部分, 可得载秘图像  $I'$ 。

### 2.2.2 信息提取过程

1) 读取负载图像  $I'$  中前  $l_s + l1c + l2c$  个像素的 LSB, 获取信息提取所需的辅助头信息  $SI$ 、 $H1c$  和  $H2c$ , 并利用  $H1c$  和  $H2c$  解压缩得到位图  $H_1$  和  $H_2$ 。

2) 使用与嵌入过程相同的规则, 将载秘图像  $I'$  分为互不重叠的  $B$  个区域, 记每个区域为  $I'_b (b = 1, 2, \dots, B)$ 。

3) 对区域  $I'_b$ , 使用与嵌入过程相同的方法对像素进行分组排序, 设分组数为  $U$ , 对第  $u (u = 1, 2, \dots, U)$  组像素  $y_u^b, y_{u+1}^b, y_{u+2}^b, y_{u+3}^b$  进行升序排列, 记为  $y_{\sigma(u)}^b, y_{\sigma(u+1)}^b, y_{\sigma(u+2)}^b, y_{\sigma(u+3)}^b$ 。

4) 对区域  $I'_b$  第  $u$  组像素, 若  $h_{1b,u} = 0$  且  $h_{2b,u} = 0$ , 计算最大值像素预测差值

$$e_{\max}^{b,u} = \begin{cases} y_{\sigma(u+3)}^b - y_{\sigma(u+2)}^b, \sigma(u+3) < \sigma(u+2); \\ y_{\sigma(u+2)}^b - y_{\sigma(u+3)}^b, \sigma(u+3) \geq \sigma(u+2). \end{cases} \quad (11)$$

同理, 计算最小值像素预测差值

$$e_{\min}^{b,u} = \begin{cases} y_{\sigma(u+1)}^b - y_{\sigma(u)}^b, \sigma(u+1) < \sigma(u); \\ y_{\sigma(u)}^b - y_{\sigma(u+1)}^b, \sigma(u+1) \geq \sigma(u). \end{cases} \quad (12)$$

5) 对区域  $I'_b$  第  $u$  组像素, 秘密信息  $m_j (0 \leq j \leq l - 1)$  通过式(13)、式(14)进行提取。

$$m_j = \begin{cases} 1, e_{\max}^{b,u} = 2 \text{ 或 } e_{\max}^{b,u} = -1; \\ 0, e_{\max}^{b,u} = 1 \text{ 或 } e_{\max}^{b,u} = 0. \end{cases} \quad (13)$$

$$m_j = \begin{cases} 1, e_{\min}^{b,u} = 2 \text{ 或 } e_{\min}^{b,u} = -1; \\ 0, e_{\min}^{b,u} = 1 \text{ 或 } e_{\min}^{b,u} = 0. \end{cases} \quad (14)$$

6) 对区域  $I'_b$  第  $u$  组像素, 恢复最大像素值  $y_{\sigma(u+3)}^b$  方法如式(15)所示, 并记为  $\hat{y}_{\sigma(u+3)}^b$ ; 同理, 恢复最小像素值  $y_{\sigma(u)}^b$  方法如式(16)所示, 记为  $\hat{y}_{\sigma(u)}^b$ 。

$$\hat{y}_{\sigma(u+3)}^b = \begin{cases} y_{\sigma(u+3)}^b - 1, 2 < e_{\max}^{b,u} < e_{\max,r}^b + 1; \\ y_{\sigma(u+3)}^b - m_j, e_{\max}^{b,u} = 1 \text{ 或 } 2; \\ y_{\sigma(u+3)}^b - m_j, e_{\max}^{b,u} = -1 \text{ 或 } 0; \\ y_{\sigma(u+3)}^b - 1, e_{\max,l}^b - 1 < e_{\max}^{b,u} < -1. \end{cases} \quad (15)$$

$$y_{\sigma(u)}^b = \begin{cases} y_{\sigma(u)}^b + 1, 2 < e_{\min}^{b,u} < e_{\min,r}^b + 1; \\ y_{\sigma(u)}^b + m_j, e_{\min}^{b,u} = 1 \text{ 或 } 2; \\ y_{\sigma(u)}^b + m_j, e_{\min}^{b,u} = -1 \text{ 或 } 0; \\ y_{\sigma(u)}^b + 1, e_{\min,l}^{b,u} - 1 < e_{\min}^{b,u} < -1. \end{cases} \quad (16)$$

7) 根据区域索引和像素组索引排列组合从各像素组中提取秘密消息  $m_j (0 \leq j \leq l-1)$ 。对图像的剩余区块,提取嵌入过程生成的序列  $S_{LSB}$  并替换图像中长度为  $l_s + l1_c + l2_c$  像素的 LSB。至此,获得秘密信息  $M$  并无损地恢复原始图像  $I$ 。

### 3 实验结果

为验证改进后的 IPVO 算法有效性,使用 Matlab(R2015b)进行仿真实验,将改进后 IPVO 算法与其他 4 种算法进行比较。测试图像为  $512 \times 512$  灰度图像,像素值在 0 到 255 之间,如图 2 所示。



图 2 用于嵌入信息的原始图像

Fig. 2 Original image for embedding information

#### 3.1 图像感知质量分析

通常可逆数据隐藏使用峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)来衡量算法性能,PSNR 值越大,载秘图像性能越高,越不容易被肉眼察觉。选用文献[11, 13-15]中算法与本研究算法(简称本算法)进行比较,将图像划分为  $8 \times 8$  个区域进行实验,分别使用图 2(a)~2(f)中 6 幅图像进行信息嵌入,改进后的 IPVO 方法与其他方法的性能比较如图 3(a)~3(f)所示。

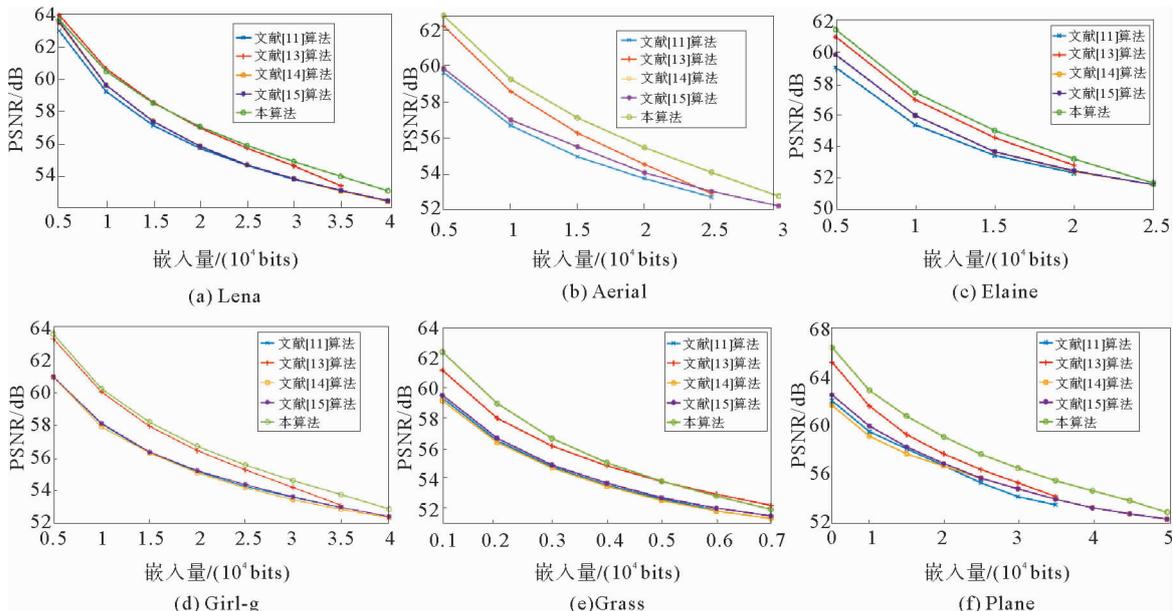


图 3 不同算法的载秘图像 PSNR 比较

Fig. 3 PSNR comparison of different algorithms for stego-image

由图3可知,随着嵌入容量增加,PSNR值逐渐减小,符合理论特征。图像Aerial、Elaine、Plane、Girl-g的测试结果显示,不论是低负载还是高负载嵌入,本算法的PSNR值均大于其他方法;图像Lena在高负载嵌入情况下和图像Grass在低负载嵌入情况下,本算法优于其他方法。实验整体效果说明,在IPVO算法基础上采用移位区间压缩思想,在信息嵌入过程中使用零次差值缩小执行移位操作的区间范围,以满足嵌入需求为前提,自适应选择差值连续分布区间,优先选择嵌入差值密度较大区域进行信息嵌入,在相同嵌入量的条件下,本算法的PSNR值较之前有进一步提高,图片的载秘质量和视觉感受相对较好。

为进一步说明本算法预测差值区间分布变化情况,以图像Lena为例,当划分区域为 $1 \times 1$ 时,最大值预测差值和最小值预测差值的连续分布区间分别为 $[-43, 51]$ 和 $[-47, 62]$ ,移位像素为34 807 bits;当划分区域为 $4 \times 4$ 时,各区域最大值预测差值和最小值预测差值的连续分布区间及嵌入差值数量如表1所示。

表1 各区域预测差值区间分布情况  
Tab. 1 Interval distribution of prediction difference in each regions

划分区域 $I_b$	最大值预测差值 区间分布情况		最小值预测差值 区间分布情况		划分区域 $I_b$	最大值预测差值 区间分布情况		最小值预测差值 区间分布情况	
	$[e_{max,l}^b, e_{max,r}^b]$	差值 数量	$[e_{min,l}^b, e_{min,r}^b]$	差值 数量		$[e_{max,l}^b, e_{max,r}^b]$	差值 数量	$[e_{min,l}^b, e_{min,r}^b]$	差值 数量
11	$[-11, 11]$	4 090	$[-9, 11]$	4 089	19	$[-34, 34]$	4 085	$[-29, 31]$	4 077
12	$[-17, 18]$	4 081	$[-19, 14]$	4 085	110	$[-38, 51]$	4 077	$[-38, 45]$	4 061
13	$[-15, 14]$	4 048	$[-17, 18]$	4 051	111	$[-19, 18]$	4 065	$[-19, 26]$	4 079
14	$[-22, 25]$	4 078	$[-19, 28]$	4 075	112	$[-13, 12]$	4 090	$[-13, 9]$	4 089
15	$[-14, 15]$	4 081	$[-15, 17]$	4 080	113	$[-30, 32]$	4 073	$[-26, 31]$	4 075
16	$[-36, 35]$	4 088	$[-28, 32]$	4 067	114	$[-41, 42]$	4 085	$[-36, 39]$	4 070
17	$[-32, 31]$	4 078	$[-32, 24]$	4 052	115	$[-19, 17]$	4 059	$[-25, 12]$	4 059
18	$[-16, 23]$	4 066	$[-20, 20]$	4 066	116	$[-12, 21]$	4 085	$[-13, 23]$	4 094

可以看出,每个区域的差值连续分布区间存在差异,比划分区域为 $1 \times 1$ 时的差值分布区间更加集中。当嵌入量为10 000 bits,完成信息嵌入执行移位操作的像素数量为12 791,较原始IPVO算法移位13 717像素减少926;当嵌入量为20 000 bits时,移位的像素数量为26 818 bits,较原始IPVO方法移位34 838像素减少8 020,降幅为23%,大大降低移位率,有效提高载秘图像质量。

在不同区域划分情况下的性能指标比较如表2所示。其中图像Grass因受最大嵌入容量限制,嵌入量为6 000 bits,其他图像的嵌入量为10 000 bits。可以看出,随着分区数量的增加,图像执行嵌入过程的移位率逐渐减小,PSNR值逐渐增加。

表2 不同区域数量情况下的算法性能指标  
Tab. 2 Comparison of algorithm performance under different regions division

图像	性能 指标	分区数量					图像	性能 指标	分区数量				
		$2 \times 2$	$4 \times 4$	$8 \times 8$	$16 \times 16$	$32 \times 32$			$2 \times 2$	$4 \times 4$	$8 \times 8$	$16 \times 16$	$32 \times 32$
Lena	PSNR	58.915 3	59.922 7	60.445 8	60.760 1	61.151 1	Girl-g	PSNR	58.797 3	59.653 4	60.255 8	60.854 6	61.503 5
	移位率	0.627 4	0.551 7	0.508 3	0.480 9	0.445 5		移位率	0.637 5	0.573 7	0.524 8	0.477 3	0.417 4
Aerial	PSNR	58.811 4	58.795 3	59.221 2	60.284 0	61.322 5	Grass	PSNR	52.334 6	52.443 0	52.767 8	54.187 7	57.889 4
	移位率	0.635 4	0.636 1	0.605 8	0.522 1	0.429 9		移位率	0.941 6	0.940 1	0.935 6	0.911 9	0.805 2
Elaine	PSNR	56.211 3	56.777 1	57.433 0	58.071 6	58.957 8	Plane	PSNR	59.977 9	62.516 6	62.866 9	63.234 0	63.489 3
	移位率	0.781 4	0.754 6	0.720 2	0.682 8	0.624 4		移位率	0.547 3	0.310 6	0.273 5	0.233 8	0.205 7

### 3.2 嵌入量性能分析

衡量算法性能的另一重要指标是嵌入量(embedding capacity, EC),嵌入量越大,算法的秘密信息负载能力就越强。将本算法与其他算法的嵌入量进行比较,结果如表 3 所示。

表 3 不同算法的嵌入容量比较

Tab. 3 Comparison of embedding capacity for different algorithms

算法	实验样本图片					
	Lena	Aerial	Elaine	Girl-g	Grass	Plane
文献[11]算法	36 543	26 694	21 448	35 702	6 724	37 560
文献[13]算法	36 543	26 694	21 891	35 702	6 855	38 935
文献[14]算法	44 594	32 711	25 137	44 135	7 394	52 595
文献[15]算法	44 594	32 711	25 137	44 135	7 394	52 595
本算法	44 594	32 711	25 137	44 135	7 394	52 595

文献[11]采用差值“-1”和“1”完成信息嵌入过程,嵌入容量略低;文献[14]与本算法均采用差值“0”和“1”完成信息嵌入,嵌入容量指标略高;文献[13]采取了分区和差值优选策略,嵌入量比文献[11]稍高,但较本算法明显偏低;文献[15]采取浮动预测差值策略,可根据不同嵌入需求选择合适的嵌入差值,在高负载嵌入情况下,仍采用差值“0”和“1”完成嵌入,与本算法的嵌入容量一致。在相同嵌入率情况下,本算法具有更高的信噪比,载密图像质量得到改进。

### 3.3 鲁棒性分析

鲁棒性反映信息隐藏技术的抗干扰能力。为验证本算法的鲁棒性,分别进行加噪攻击、缩放攻击和剪贴攻击<sup>[18]</sup>来测试算法的可靠性。图像在传播过程中最易受到的攻击就是加入噪声,因此对图像进行均值为 0、方差为 0.000 1 的噪声攻击;其次进行缩放攻击,将图像宽度和高度的尺寸缩小为原来的一半;剪贴攻击使用大小为  $64 \times 64$ 、像素值为 192 的区域来替代载密图像的一部分。针对这些攻击方式,采用 Lena 的载密图像作为测试对象,得到被攻击的载密图像和恢复后的图像如图 4 所示。



图 4 被攻击的载密图像和恢复后的图像(Lena)

Fig. 4 attacked stego-image and restored image(Lena)

由图 4 可以看出,图像在受到几种攻击后未出现画面质量的明显下降,视觉系统对信号感知微弱,噪声攻击后的视觉恢复效果比较理想。表 4 为不同图像在嵌入量为 10 000 bits(其中 Grass 图像为 5 000 bits)情况下,受到加噪、缩放和剪贴攻击后的峰值信噪比变化情况。

由表 4 可以看出,噪声攻击的平均 PSNR 值在 39 dB 以上,图像的不可感知性较好,抗噪声攻击能力较强;缩放和剪贴攻击对大多数测试图像来说 PSNR 值都在 31 dB 以上,在缩放攻击中,Aerial 图像的 PSNR 值为 27.308 8 dB,Grass 图像的 PSNR 值为 21.539 3 dB;剪贴攻击中,Aerial 图像的 PSNR 值为 28.009 2 dB,相对抗攻击能力而言较弱。总体来看,抗缩放攻击和剪贴攻击的能力均较为理想。

通过上述实验结果分析,本算法在同等嵌入率情况下,具有更高的载秘图像信噪比,且没有降低嵌入容量性能,对图像的攻击(如噪声、剪贴、缩放等)具有较好的鲁棒性。

表 4 不同图像受到攻击后的 PSNR 值  
Tab. 4 PSNR value of different images after being attacked dB

图像	攻击后的 PSNR 值			图像	攻击后的 PSNR 值		
	噪声	缩放	剪贴		噪声	缩放	剪贴
Lena	39.915 3	35.094 4	34.597 1	Girl-g	39.904 6	31.485 5	32.902 6
Aerial	39.895 2	27.308 8	28.009 2	Grass	39.752 4	21.539 3	31.650 1
Elaine	39.876 8	33.088 4	39.686 8	Plane	39.927 9	31.353 3	31.094 2

#### 4 结论

为使数据隐藏取得更好的处理效果,本研究设计并实现了一种基于自适应压缩移位区间的可逆数据隐藏算法。该算法对图像分区后进行像素值分组排序,计算最大(小)值像素预测差值并生成预测差值直方图,考虑不同图像差值直方图分布特征的差异性,利用预测差值统计频率为 0 次的差值压缩移位区间,用户根据自身需求优先选择嵌入差值密度较大的区域进行嵌入,改进信息嵌入过程,实现信息的可逆隐藏。从图像感知质量、嵌入容量和鲁棒性三方面进行仿真实验,数据结果显示:改进后的算法充分利用了图像自身相邻像素的冗余性,实现了自适应调整移位区间,较原始 IPVO 方法减少了像素修改数量,无论在低负载嵌入还是高负载嵌入条件下,都具有良好的不可感知性,同时算法有较好的抗噪声攻击性能,满足数据隐藏的可靠性和安全性要求。

#### 参考文献:

[1] CELIK M U, SHARMA G, TEKALP A M, et al. Lossless generalized-LSB data embedding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(2): 253-266.

[2] CELIK M U, SHARMA G, TEKALP A M. Lossless watermarking for image authentication: A new framework and an implementation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(4): 1042-1049.

[3] NI Z C, SHI Y Q, ANSARI N, et al. Reversible data hiding[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2006, 16(3): 354-362.

[4] LEE S K, SUH Y H, HO Y S. Reversible image authentication based on watermarking[J]. Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia & Expo, 2006, 7: 1321-1324.

[5] XUAN G, SHI Y Q, CHAI P, et al. Optimum histogram pair based image lossless data embedding[C]// Proceedings of International Workshop on Digital-forensics and Watermarking, Berlin: Springer, 2007, 4: 264-278.

[6] COLTUC D, CHASSERY J M. Very fast watermarking by reversible contrast mapping[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(4): 255-258.

[7] COLTUC D. Low distortion transform for reversible watermarking[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(1): 412-417.

[8] PENG F, LI X L, YANG B. Adaptive reversible data hiding scheme based on integer transform[J]. Signal Processing, 2012, 92(1): 54-62.

[9] THODI D M, RODRIGUEZ J J. Expansion embedding techniques for reversible watermarking[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(3): 721-730.

[10] LEE C F, CHEN H L, TSO H K. Embedding capacity raising in reversible data hiding based on prediction of difference expansion[J]. The Journal System and Software, 2010, 83(10): 1864-1872.

[11] LI X L, LI J, LI B, et al. High-fidelity reversible data hiding scheme based on pixel-value-ordering and prediction-error expansion[J]. Signal Processing, 2013, 93(1): 198-205.

[12] OU B, LI X L, ZHAO Y, et al. Reversible data hiding using invariant pixel-value-ordering and prediction-error expansion

- [J].Signal Processing:Image Communication,2014,29(7):760-772.
- [13]李蓉,李向阳.图像分区选择的像素值排序可逆数据隐藏[J].中国图像图形学报,2019,22(12):1664-1676.
- LI Rong,LI Xiangyang.Pixel value ordering reversible data hiding algorithm based on image block selection[J].Journal of Image and Graphics,2019,22(12):1664-1676.
- [14]PENG F,LI X L,YANG B.Improved PVO-based reversible data hiding[J].Digital Signal Processing,2014,25:255-265.
- [15]LI R,LI X Y,XIONG Y,JIANG A,et al.An IPVO-based reversible data hiding scheme using floating predictors[J].Mathematical Biosciences and Engineering,2019,16(5):5324-5345.
- [16]KAUR G,SINGH S,RANI R.PVO based reversible data hiding technique for roughly textured images[J].Multidimensional Systems and Signal Processing,2020,12:1-26.
- [17]WHA B,ZC A,YWA B.Flexible spatial location-based PVO predictor for high-fidelity reversible data hiding[J].Information Sciences,2020,520:431-444.
- [18]张秋余,冯玉春.鲁棒的密文彩色图像可逆数据隐藏方法[J].兰州理工大学学报,2020,46(2):103-110.
- ZHANG Qiuyu,FENG Yuchun.Robust reversible data hiding method for encrypted color images[J].Journal of Lanzhou University of Technology,2020,46(2):103-110.

(责任编辑:傅 游)