

基于双层像素值排序的可逆信息隐藏

李 想, 李晓龙

(上海交通大学 信息科学研究所, 北京 100044)

摘要: 基于像素值排序(pixel-value-ordering, PVO)的可逆隐藏方法借助像素块内的最值关系进行有效预测和可逆嵌入, 具有显著优势。然而, 现有基于PVO的方法大多在单一序列中进行预测和修改, 导致每个像素块内参与生成直方图的像素数量相对固定。为了解决这一问题, 提出了一种基于双层像素值排序的可逆信息隐藏方法, 它在像素块中分层得到两个有序序列, 并在两个序列之间进行跨序列预测, 因此能够自适应地确定生成直方图的像素数量。同时, 为双层嵌入所生成的直方图设计了不同的修改规则, 以减少嵌入失真。实验结果表明, 本方法具有较好的可逆嵌入性能。

关键词: 可逆信息隐藏; 像素值排序; 双层预测; 预测误差扩展

中图分类号: TP 309.2

文献标志码: A

Dual-PVO for reversible data hiding

LI Xiang, LI Xiaolong

(Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Reversible data hiding methods based on pixel-value-ordering (PVO) achieve effective prediction and reversible embedding by utilizing the maximum and minimum values in the pixel block. However, most of the existing PVO-based methods perform prediction and modification in a single sequence, resulting in fixed pixels for generating the histogram in each pixel block. To solve this problem, a reversible data hiding method called dual-PVO was proposed, which can adaptively determine the pixels for generating the histogram by dual prediction. Meanwhile, the prediction between two ordered sequences was performed in the pixel block and the histogram modification rules are designed to reduce embedding distortion. Experimental results show that the proposed method achieves significant reversible embedding performance.

收稿日期: 2023-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62372037)

第一作者: 李 想(1998-), 男, 博士研究生。研究方向: 信息隐藏。E-mail: 21112012@bjtu.edu.cn

通信作者: 李晓龙(1976-), 男, 教授。研究方向: 多媒体内容安全。E-mail: lixl@bjtu.edu.cn

引文格式: 李想, 李晓龙. 基于双层像素值排序的可逆信息隐藏[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(3): 243-250.

DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20230930001

Citation: LI Xiang, LI Xiaolong. Dual-PVO for reversible data hiding[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(3): 243-250.

Keywords: *Reversible data hiding; pixel-value-ordering; dual prediction; prediction error expansion*

信息隐藏在国家网络安全和信息化事业中发挥着重要作用,根据应用场景的不同,可分为隐写、数字水印和可逆信息隐藏三类^[1]。隐写用于隐蔽通信,主要考虑嵌入容量和安全性^[2];数字水印多用于版权保护和所有权验证,主要考虑视觉质量和鲁棒性^[3]。这两类技术会对原始载体造成无法修复的失真。与之不同的是,可逆信息隐藏的特点是可逆性,即在提取出秘密数据后能无损地恢复原始载体^[4]。由于这种无损恢复特性,可逆信息隐藏被应用于医学、军事等敏感图像的处理领域^[5-6]。

现有的可逆信息隐藏算法可分为基于无损压缩的框架、基于整数变换的框架和基于直方图修改的框架。最早, Fridrich 等^[7]通过无损压缩载体图像特征释放冗余空间。这类算法的性能取决于所选压缩算法和特征,导致隐藏容量较低。然后, Tian^[8]提出了基于差分扩展的框架。该框架通过将宿主图像分块构造嵌入单元,然后通过整数变换将秘密消息嵌入到每个单元中,这类算法的嵌入失真较大。接着, Ni 等^[9]提出了基于直方图修改的框架,该框架首先生成像素或预测误差直方图,然后通过设计不同的直方图修改规则实现可逆嵌入。基于直方图修改的框架充分利用了图像冗余,实现了容量提升和失真控制,是有效的可逆信息隐藏框架。因此,目前关于可逆信息隐藏的研究主要集中于直方图的框架,其中,基于预测误差直方图修改的框架由于具有更好的嵌入性能而倍受关注^[10-15]。

在上述基于直方图修改的框架中,基于像素值排序(pixel-value-ordering, PVO)的方法较好地利用了图像局部信息,预测结果准确,因此生成了分布更集中的直方图^[16]。传统的像素值排序方法首先对图像分块,然后对块中像素值排序,并对最值像素预测,生成预测误差直方图^[17]。基于统计结果,在直方图修改阶段确定0作为不变点,1作为扩展点,剩余点作为移位点,并可根据噪声等级自适应确定最终的嵌入位置。为了改进这一方法, Peng 等^[18]考虑了像素的空间位置关系,提出了将传统像素值排序方法生成的直方图分为两部分,使生成的直方图能够向两个不同方

向修改,实现可逆嵌入。在直方图修改阶段确定0和1作为扩展点,剩余点作为移位点,并使用与传统像素值排序方法相同的方式确定嵌入位置。此外, Ou 等^[19]提出 PVO-K 方法,将 K 个相等的最值像素作为一个单元来嵌入数据,得到更多扩展点,其直方图修改规则与传统像素值排序方法相同。

然而,现有基于 PVO 的可逆隐藏方法均在单一序列中预测和修改,导致每个像素块内参与直方图生成的像素数量相对固定。对于上述方法,不论分块大小如何变化,每个块内只有两个最值的预测误差参与直方图生成。为了解决这一问题,提出了一种基于双层像素值排序的可逆信息隐藏方法,能够自适应地确定生成直方图的像素数量,充分利用更多的平滑像素来提升嵌入性能。首次提出了在像素块中分层得到的两个序列之间跨序列预测,即在迭代嵌入中用一层序列最值预测另一层序列若干值,以此增加块内参与直方图生成的预测误差数量。然后,为双层迭代嵌入所生成的两个直方图设计不同的修改规则,在保证嵌入容量的前提下进一步降低嵌入失真。实验结果表明,相比于经典方法,基于双层像素值排序的方法具有较好的可逆嵌入性能。

1 相关工作

本节简要介绍传统的像素值排序方法^[17]、改进的像素值排序方法^[18]和 PVO-K 方法^[19]。基于 PVO 的可逆信息隐藏方法,首先将载体图像划分为大小相等且含有 n 个像素的非重叠块;然后,对每个像素块 $(x_1, \dots, x_n)$ 分别排序得到 $(x_{\sigma(1)}, \dots, x_{\sigma(n)})$, 其中 $\sigma: \{1, \dots, n\} \rightarrow \{1, \dots, n\}$ 是稳定的升序排序函数,即排序时保持相同数的相对顺序不变;最后通过修改每个块中的最大值和最小值实现嵌入。由于最大值和最小值的修改规则类似,以最大值像素为例介绍嵌入和提取机制。

1.1 像素值排序方法

传统的像素值排序方法采用次大值 $x_{\sigma(n-1)}$ 来预测最大值 $x_{\sigma(n)}$, 预测误差为

$$e_{\text{PVO}}^{\max} = x_{\sigma(n)} - x_{\sigma(n-1)}$$

由于预测误差是非负的, 因此直方图仅在 $[0, \infty)$ 上有取值。实验观察到, 生成直方图中 1 处的峰值通常最高, 意味着更高的嵌入容量, 因此该方法将 1 作为扩展点嵌入秘密信息, 0 作为不变点不参与修改, 而剩余点作为移位点向正方向移位, 确保可逆性。即在嵌入过程中, 将预测误差 $e_{PVO}^{\max}$ 修改为

$$e_{PVO}^{\max} = \begin{cases} e_{PVO}^{\max}, & \text{if } e_{PVO}^{\max} = 0 \\ e_{PVO}^{\max} + m, & \text{if } e_{PVO}^{\max} = 1 \\ e_{PVO}^{\max} + 1, & \text{if } e_{PVO}^{\max} > 1 \end{cases}$$

其中 $m \in \{0, 1\}$ 是嵌入的二进制消息位。与预测误差的修改相对应, 最大值像素 $x_{\sigma(n)}$ 被修改为

$$x'_{\sigma(n)} = x_{\sigma(n-1)} + e_{PVO}^{\max'}$$

且块中的其他像素不修改。注意到, 最大值在嵌入信息后增大或不变, 因此最值像素在有序序列中的位置保持不变, 进而保证了方法的可逆性, 直方图修改过程, 见图 1。

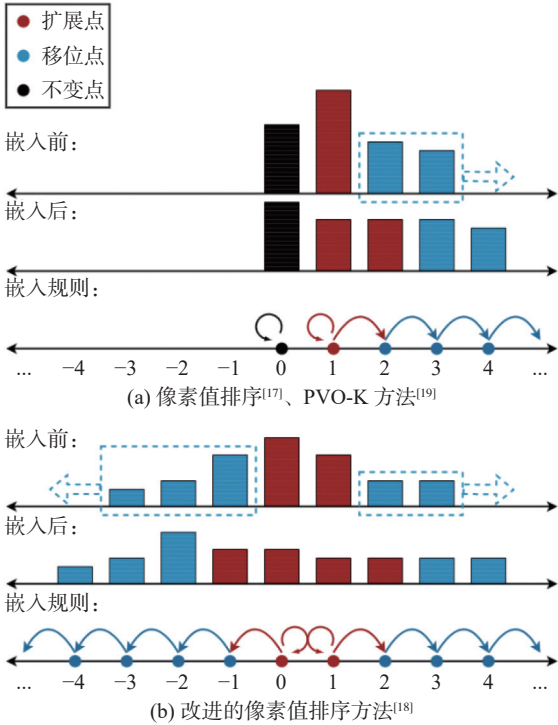


图 1 各方法的直方图修改过程

Fig.1 Histogram modification process for methods

在提取阶段, 将图像按照与嵌入相同的方式分块和排序, 得到最大值的预测误差 $e_{PVO}^{\max'}$ 。提取出的秘密消息为

$$m = \begin{cases} 0, & \text{if } e_{PVO}^{\max} = 1 \\ 1, & \text{if } e_{PVO}^{\max} = 2 \end{cases}$$

然后反向修改直方图恢复出的原始预测误差为

$$e_{PVO}^{\max} = \begin{cases} e_{PVO}^{\max'}, & \text{if } e_{PVO}^{\max} = 0 \text{ or } 1 \\ e_{PVO}^{\max'} - 1, & \text{if } e_{PVO}^{\max} > 1 \end{cases}$$

相应地, 原始最大值像素被恢复为

$$x_{\sigma(n)} = x_{\sigma(n-1)} + e_{PVO}^{\max}$$

最后, 对有序序列通过 σ^{-1} 逆排序, 恢复出原始载体。

1.2 改进的像素值排序方法

为了提高传统像素值排序方法中的不变点的利用率, 改进的像素值排序方法 (improved pixel-value-ordering, IPVO) 通过考虑最大值和次大值的空间位置关系来生成新的预测误差直方图。预测误差被定义为

$$e_{IPVO}^{\max} = \begin{cases} x_{\sigma(n)} - x_{\sigma(n-1)}, & \text{if } \sigma(n) < \sigma(n-1) \\ x_{\sigma(n-1)} - x_{\sigma(n)}, & \text{if } \sigma(n) > \sigma(n-1) \end{cases}$$

此时, 预测误差直方图在 0 点两侧均有取值。该方法将 0 和 1 作为扩展点嵌入秘密信息, 剩余点作为移位点向两方向移位以确保可逆性。即在嵌入过程中, 将预测误差 $e_{IPVO}^{\max}$ 修改为

$$e_{IPVO}^{\max'} = \begin{cases} e_{IPVO}^{\max} - 1, & \text{if } e_{IPVO}^{\max} < 0 \\ e_{IPVO}^{\max} - m, & \text{if } e_{IPVO}^{\max} = 0 \\ e_{IPVO}^{\max} + m, & \text{if } e_{IPVO}^{\max} = 1 \\ e_{IPVO}^{\max} + 1, & \text{if } e_{IPVO}^{\max} > 1 \end{cases}$$

其中, $m \in \{0, 1\}$ 是嵌入的二进制消息位。与预测误差的修改相对应, 最大值像素 $x_{\sigma(n)}$ 被修改为

$$x'_{\sigma(n)} = x_{\sigma(n-1)} + |e_{IPVO}^{\max'}|$$

且块中的其他像素不修改。因此, 与传统像素值排序方法相同, 最值像素在有序序列中的位置保持不变, 进而保证了方法的可逆性。

在提取阶段, 提取出的秘密消息为

$$m = \begin{cases} 0, & \text{if } e_{IPVO}^{\max} = 0 \text{ or } 1 \\ 1, & \text{if } e_{IPVO}^{\max} = 2 \text{ or } -1 \end{cases}$$

然后反向修改直方图恢复出的原始预测误差为

$$e_{IPVO}^{\max} = \begin{cases} e_{IPVO}^{\max'}, & \text{if } e_{IPVO}^{\max} < 0 \\ e_{IPVO}^{\max'}, & \text{if } e_{IPVO}^{\max} = 0 \text{ or } 1 \\ e_{IPVO}^{\max'} - 1, & \text{if } e_{IPVO}^{\max} > 1 \end{cases}$$

相应地, 原始最大值像素被恢复为

$$x_{\sigma(n)} = x_{\sigma(n-1)} + |e_{\text{IPVO}}^{\max}|$$

最后, 对有序序列通过 σ^{-1} 逆排序, 恢复出原始载体。

对比两方法, 预测误差之间的关系为

$$e_{\text{PVO}}^{\max} = \begin{cases} e_{\text{IPVO}}^{\max} > 0, & \text{if } \sigma(n) < \sigma(n-1) \\ -e_{\text{IPVO}}^{\max} \geq 0, & \text{if } \sigma(n) > \sigma(n-1) \end{cases}$$

因此, 传统像素值排序方法可在生成的预测误差 $e_{\text{IPVO}}^{\max}$ 的直方图上实现。此时区别在于, 传统像素值排序方法的扩展点相当于-1和1, 而改进的像素值排序方法扩展点为0和1。此外, PVO-K方法^[19]将 K 个相等的最大值像素作为一个单元, 生成的直方图具有更多的1, 其直方图修改规则与传统像素值排序方法相同。

然而, 现有基于PVO的可逆隐藏方法均在同一序列中预测和修改, 这限制了每个像素块内生成直方图的像素数量。例如, 对于上述多个方法, 无论分块大小如何变化, 每个块内只有两个最值的预测误差参与直方图生成。即便PVO-K方法考虑了更多的像素, 但由于相同的最值要同时修改并嵌入相同的信息, 因此生成直方图的预测误差数量并未增加。

2 双层像素值排序方法

基于双层像素值排序的可逆信息隐藏方法, 包括直方图生成和直方图修改两个步骤。

2.1 直方图生成

根据像素值排序方法的分块策略, 载体图像被划分为若干个非重叠的像素块, 每个块包含 n 个像素。同时, 采用双层嵌入策略每层嵌入一半载荷, 于是每个像素块被划分为两个互斥的序列 $X = A + B$, 且 $A \cap B = \emptyset$, 序列的元素数分别为 p 和 q , 因此有 $p + q = n$ 。然后, 对两个序列分别排序得到 $(a_{\sigma(1)}, \dots, a_{\sigma(p)})$ 和 $(b_{\sigma(1)}, \dots, b_{\sigma(q)})$, 其中 $\sigma: \{1, \dots, n\} \rightarrow \{1, \dots, n\}$ 是稳定的升序排序函数, 即保持相同数的相对顺序不变。

双层像素值排序方法在像素块中的两个有序序列之间进行跨序列预测, 用不变层序列最值预测嵌入层序列, 以嵌入 A 层为例, 最大值的预测误差为

$$e_A^p = a_{\sigma(p)} - b_{\sigma(q)}, \text{ if } a_{\sigma(p)} \geq b_{\sigma(q)}$$

相应地, 最小值的预测误差为

$$e_A^1 = b_{\sigma(1)} - a_{\sigma(1)}, \text{ if } a_{\sigma(1)} \leq b_{\sigma(1)}$$

此时最多可得到一对预测误差。

为了增加生成直方图的预测误差数量, 双层像素值排序方法对像素块的噪声等级进行评估。当选择 A 层(B 层)作为嵌入层时, 噪声等级 NL 由预测层 B 层(A 层)任意两两像素绝对差的期望计算得到。然后设定噪声等级阈值, 将像素块分类为复杂块、普通块和平滑块。其中复杂块不参与嵌入, 普通块与传统像素值排序方法保持一致, 最多有一对最值预测误差 (e_A^p, e_A^1) 。此外, 由于平滑块像素具有较高的相似度, 采用相同的方式预测块中的非最值, 可以使平滑块具有多个预测误差。对于 $1 \leq i \leq p$, A 层的预测误差定义为

$$e_A^i = \begin{cases} a_{\sigma(i)} - b_{\sigma(q)}, & \text{if } a_{\sigma(i)} \geq b_{\sigma(q)} \\ b_{\sigma(1)} - a_{\sigma(i)}, & \text{if } a_{\sigma(i)} \leq b_{\sigma(1)} \text{ and } b_{\sigma(1)} \neq b_{\sigma(q)} \end{cases}$$

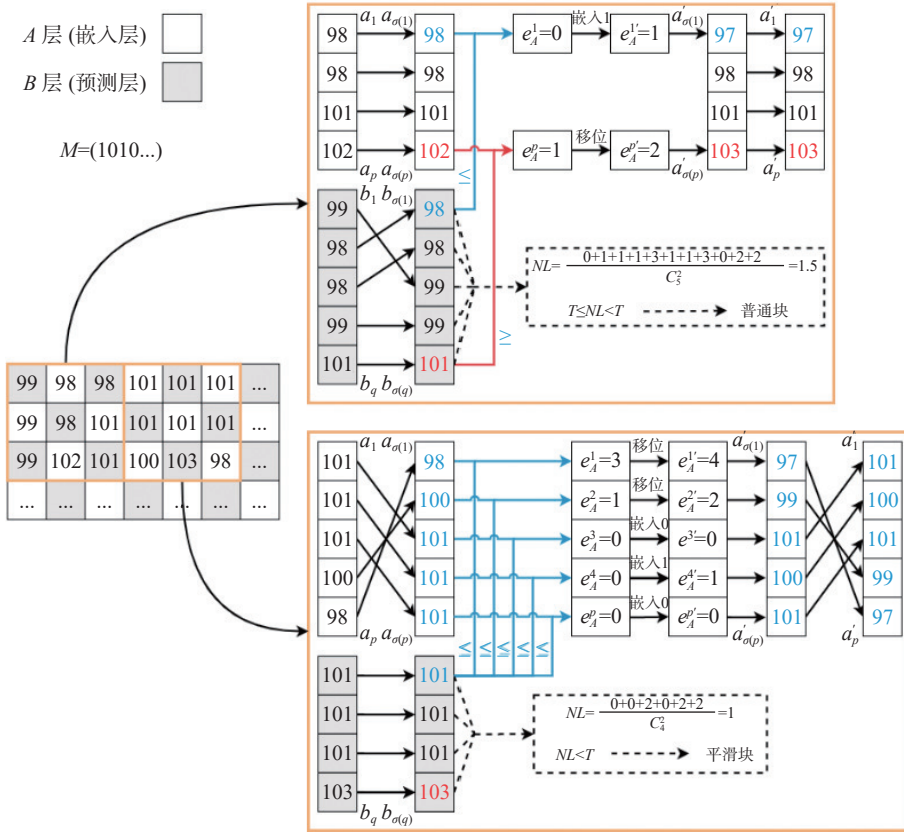
此时最多可得到 p 个预测误差用于直方图生成, 提高了平滑块中像素的利用率。同时, 噪声等级有助于生成更适合可逆嵌入的预测误差直方图。

(图2)展示了第一层嵌入的例子。对于第一个大小为 3×3 的块, 排序后的嵌入层序列为(98, 98, 101, 102), 排序后的预测层序列为(98, 98, 99, 99, 101), 此时 $p = 4$ 且 $q = 5$ 。根据预测层序列元素计算噪声等级并与阈值比较, 确定该块为普通块(实验中阈值通过枚举确定)。此时, 嵌入层最多有一对预测误差参与直方图生成。由于 $a_{\sigma(4)} = 102 > b_{\sigma(5)} = 101$ 且 $a_{\sigma(1)} = b_{\sigma(1)} = 98$, 故该层得到包含2个元素的预测误差(1, 0)。同理, 对于第二个块, 排序后的嵌入层序列为(98, 100, 101, 101, 101), 排序后的预测层序列为(101, 101, 101, 103), 此时 $p = 5$ 且 $q = 4$ 。根据噪声等级, 确定该块为平滑块, 则嵌入层最多有 p 个预测误差参与直方图生成。虽然 $a_{\sigma(5)} = 101 < b_{\sigma(4)} = 103$ 没有产生预测误差, 但另一侧全部元素均小于等于 $b_{\sigma(1)} = 101$, 因此该层可以得到包含5个元素的预测误差(3, 2, 0, 0, 0)。

2.2 直方图修改

由于预测误差是非负的, 因此直方图可向正方向修改。在双层像素值排序方法的第一层嵌入中, 选择0作为扩展点嵌入秘密信息, 剩余点作为移位点来保证可逆性。即在嵌入 A 层时, 将预测误差 e_A^i 修改为

$$e_A^{i'} = \begin{cases} e_A^i + m, & \text{if } e_A^i = 0 \\ e_A^i + 1, & \text{if } e_A^i > 0 \end{cases}$$

图2 第一层嵌入过程举例(块大小 3×3)Fig.2 Example of the first layer embedding process (block size 3×3)

其中 $m \in \{0, 1\}$ 是嵌入的二进制消息位。与预测误差的修改相对应, 像素 $a_{\sigma(i)}$ 被修改为

$$e'_{\sigma(i)} = \begin{cases} b_{\sigma(q)} + e_A^i, & \text{if } a_{\sigma(i)} \geq b_{\sigma(q)} \\ b_{\sigma(1)} - e_A^i, & \text{if } a_{\sigma(i)} \leq b_{\sigma(q)} \text{ and } b_{\sigma(1)} \neq b_{\sigma(q)} \end{cases}$$

其中

$$\begin{cases} 1 \leq i \leq p, & \text{if } 0 \leq NL < T_1 \\ i = 1 \text{ or } p, & \text{if } T_1 \leq NL < T_2 \end{cases}$$

式中, T_1 和 T_2 是噪声等级阈值, 块中的其他像素不修改。注意到, 当前层嵌入后的像素与预测层序列最值之间的大小关系相同, 这保证了方法的可逆性。

在第一层嵌入完毕后, 第二层继续嵌入剩余的 secret 消息, 直方图的生成和修改方式与第一层相似。不同的是, 由于第一层嵌入修改了部分预测误差为 0 的像素, 第二层嵌入时 0 将不再具有更高的峰值, 相同的修改方式会导致第二层的嵌入性能下降。因此, 与传统像素值相同, 第二层选择 1 作为扩展点, 0 作为不变点, 剩余点作为移位点。图 3 展示了常用 Lena 图像生成的预测误差直方图和修改规则。图 3(b) 和 (f) 中 $T_1 = 0$ 代表无

平滑块, 即每块至多有一对预测误差参与直方图生成; 图 3(c) 和 (g) 中 B 层直方图由 A 层模拟嵌入 5 000 bits 随机秘密信息后得到。可以看到, 在第一层嵌入完成后, 第二层的直方图中预测误差 0 的数量明显下降, 此时预测误差 1 具有最高峰值, 对应更高的嵌入容量。提取过程与嵌入过程相反, 即先提取并恢复第二层的秘密消息和像素, 再提取并恢复第一层的秘密消息和原始载体。

具体地, 在 B 层载体像素恢复后, 可以得到预测误差 e_A^i , 则 A 层提取出的秘密消息为

$$m = \begin{cases} 0, & \text{if } e_A^i = 0 \\ 1, & \text{if } e_A^i = 1 \end{cases}$$

然后反向修改直方图恢复出的原始预测误差为

$$e_A^i = \begin{cases} e_A^i, & \text{if } e_A^i = 0 \\ e_A^i - 1, & \text{if } e_A^i > 0 \end{cases}$$

相应地, 原始像素被恢复为

$$a_{\sigma(i)} = \begin{cases} b_{\sigma(q)} + e_A^i, & \text{if } a'_{\sigma(i)} \geq b_{\sigma(q)} \\ b_{\sigma(1)} - e_A^i, & \text{if } a'_{\sigma(i)} \leq b_{\sigma(1)} \text{ and } b_{\sigma(1)} \neq b_{\sigma(q)} \end{cases}$$

最后, 对有序序列通过 σ^{-1} 逆排序, 逐块恢复原始载体。

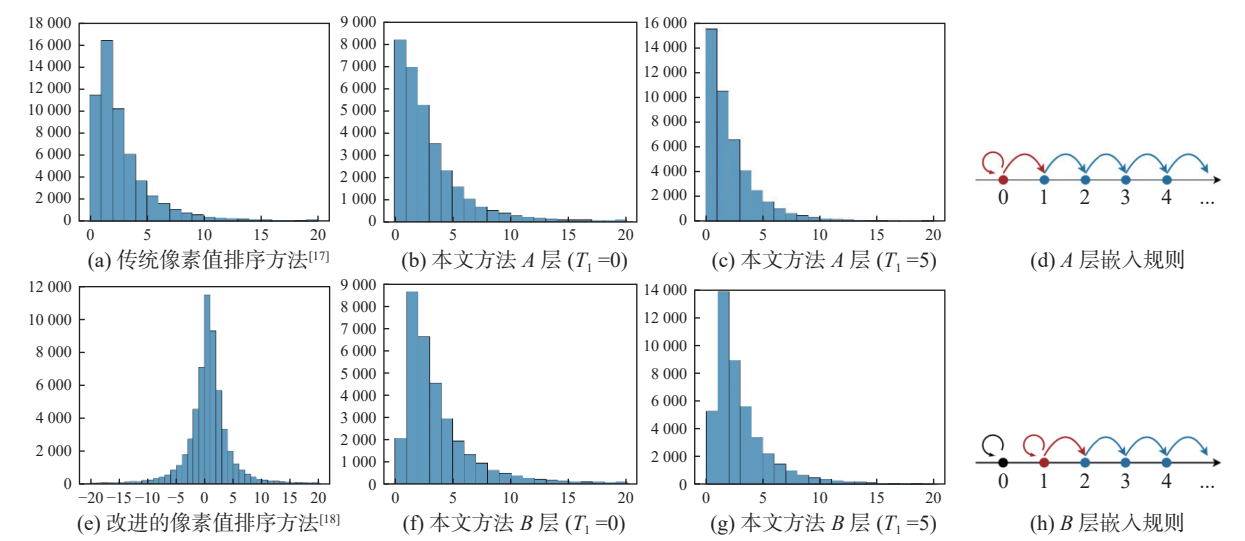


图3 分块大小为3×3的Lena图像使用不同方法生成的预测误差直方图

Fig.3 Histograms of prediction-errors from Lena images with the size of 3×3 block by different RDH methods

3 实验结果

实验使用了 USC-SIPI 数据集中 512×512 的灰度图像，分别是 Lena, Airplane, Barbara, Lake, Boat 和 Elaine。为了评估所提出的方法，将其与一些经典的可逆隐藏方法进行了对比，包括像素值排序方法^[17]、改进的像素值排序方法^[18]、PVO-K 方法^[19]和使用遗传算法自适应确定扩展点的多直方图移位方法^[20]。

在双层像素值排序方法中，枚举了块的宽和高在 $[2,2^3]$ 区间内和复杂度阈值在 $[0,2^5]$ 区间内的所有组合，选择最优峰值信噪比（peak signal-to-noise ratio, PSNR）对应的参数作为嵌入参数。表 1 列出了 Lena 图像不同载荷下的最优参数，包括第一层和第二层的块大小和噪声等级阈值。实验结果显示，低载荷时可以使用较大的分块，并且只在平滑块中嵌入消息，即噪声等级阈值将像素块分类为平滑块和复杂块两种。随着载荷的增加，最优

分块逐渐缩小，由 10 000 bits 时的 7×4 减少到 30 000 bits 时的 5×2，并且在高载荷时部分消息也会嵌入到普通块中，以提高性能。

图 4 绘制了各测试图像的 PSNR 与嵌入容量的关系曲线。嵌入容量从 5 000 bits 到传统像素值排序方法的最大容量变化，步长为 1 000 bits。表 2 和表 3 分别列出了 10 000 和 20 000 bits 嵌入容量下各方法在不同图像上的 PSNR。

实验结果表明，本文方法在 10 000 bits 嵌入容量下达到了 59.81 dB 的平均 PSNR，超过其他对比方法。特别是在 Lena 和 Elaine 上，本文方法分别比基于多直方图移位的方法高出 0.62 dB 和 0.78 dB。改进的像素值排序方法在 Boat 和 Lake 上也有较好的表现，但与本文方法相差不大，分别相差 0.14 dB 和 0.02 dB。在 20 000 bits 嵌入容量下，本文方法的平均 PSNR 为 55.52 dB，仅低于 PVO-K 方法 0.03 dB，但高于其他对比方法。结果表明，本文方法在大多数情况下优于经典可逆隐藏方法 [17-

表 1 对于不同载荷下的 Lena 图像的最优参数和 PSNR

Tab.1 The optimal parameters and PSNR for Lena images with varies payloads

嵌入容量/bits	A层块大小	A层阈值	B层块大小	B层阈值	PSNR/dB
10 000	(7,4)	(5,5)	(8,2)	(6,6)	60.73
15 000	(6,3)	(5,5)	(6,2)	(8,8)	58.41
20 000	(5,3)	(6,6)	(4,2)	(7,7)	56.79
25 000	(5,2)	(5,5)	(3,2)	(7,7)	55.32
30 000	(5,2)	(7,8)	(2,2)	(6,6)	54.00

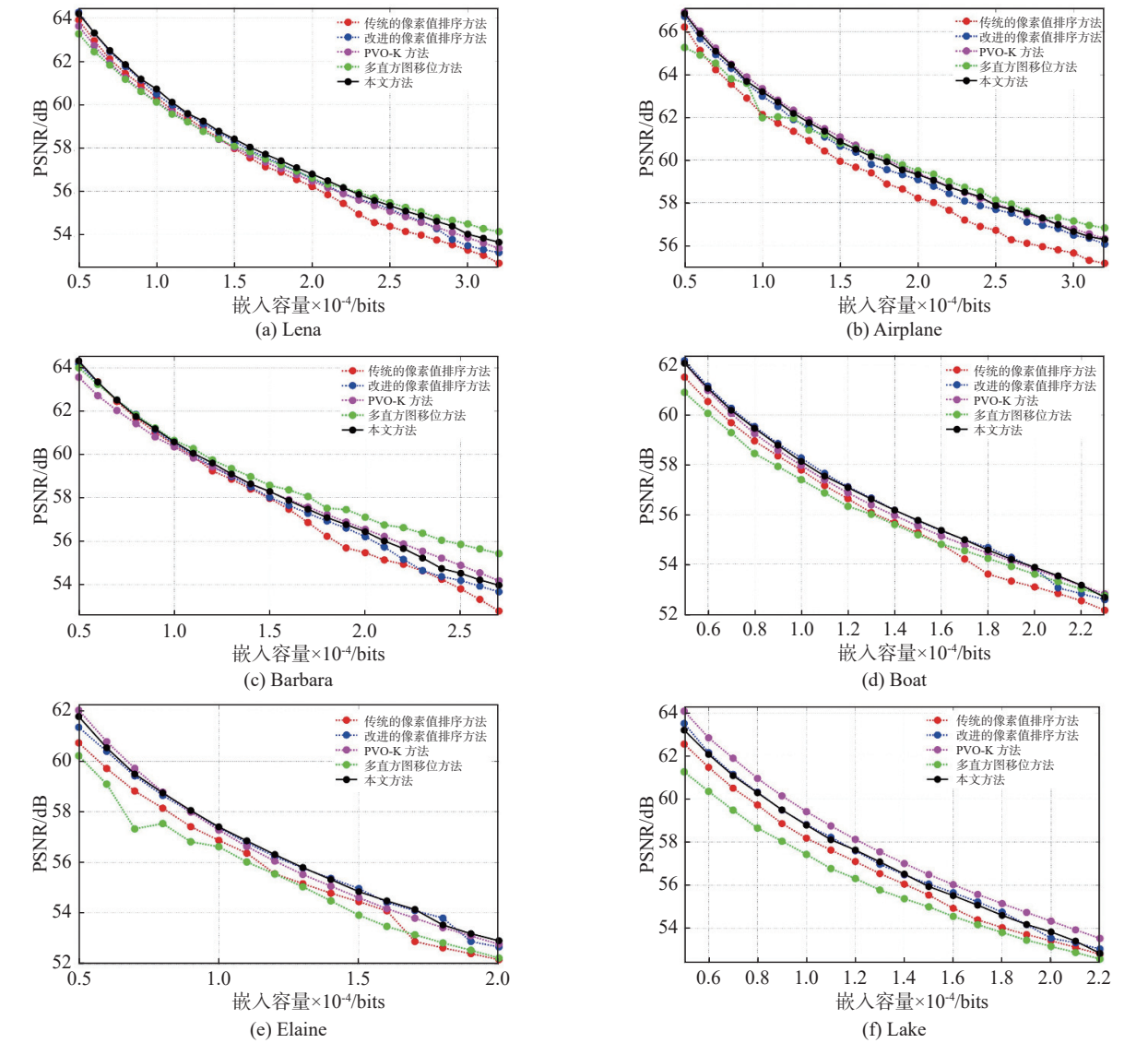


图 4 本方法与经典可逆信息隐藏方法^[17-20]的性能对比

Fig.4 Performance comparison of the proposed method with the classic RDH methods^[17-20]

表 2 各方法的 PSNR 比较 (嵌入容量为10 000 bits)

Tab.2 PSNR comparison of methods (embedded capacity 10 000 bits)

图像	方法[17]	方法[18]	方法[19]	方法[20]	本文方法
Lena	60.34	60.49	60.14	60.12	60.73
Airplane	62.13	62.98	63.34	61.98	63.20
Barbara	60.42	60.49	54.59	60.64	60.58
Boat	57.78	58.27	57.97	57.39	58.13
Elaine	56.87	57.38	57.28	56.62	57.40
Lake	58.18	58.81	59.41	57.43	58.79
平均	59.29	59.74	58.79	59.03	59.81

表 3 各方法的 PSNR 比较 (嵌入容量为 20 000 bits)

Tab.3 PSNR comparison of methods (embedded capacity 20 000 bits)

图像	方法[17]	方法[18]	方法[19]	方法[20]	本文方法
Lena	56.21	56.57	56.46	56.60	56.79
Airplane	58.22	59.08	59.38	59.50	59.32
Barbara	55.46	56.20	56.54	57.10	56.43
Boat	53.08	53.84	53.80	53.59	53.87
Elaine	52.15	52.65	52.76	52.21	52.90
Lake	53.42	53.54	54.33	53.16	53.83
平均	54.76	55.31	55.55	55.36	55.52

20], 并生成最高保真度的标记图像。

4 结 论

提出了一种基于双层像素值排序的可逆信息隐藏方法。全新的双层跨序列预测能够自适应确定生成直方图的像素数量, 有效利用了预测误差的局部相关性, 并提高了平滑像素的利用率。此外, 为双层嵌入所生成的两个直方图设计不同的修改规则, 进一步降低了嵌入失真。实验结果表明, 本方法优于一些经典的可逆隐藏方法。未来将尝试将该方法扩展到二维, 以期进一步提升可逆嵌入性能。

参考文献:

- [1] BARNI M, CAMPISI P, DELP E J, et al. Information forensics and security: a quarter-century-long journey[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2023, 40(5): 67–79.
- [2] SETIADI D R I M, RUSTAD S, ANDONO P N, et al. Digital image steganography survey and investigation (goal, assessment, method, development, and dataset)[J]. *Signal Processing*, 2023, 206: 108908.
- [3] EVSUTIN O, DZHANASHIA K. Watermarking schemes for digital images: robustness overview[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2022, 100: 116523.
- [4] SHI Y Q, LI X L, ZHANG X P, et al. Reversible data hiding: advances in the past two decades[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 3210–3237.
- [5] DZWONKOWSKI M, CZAPLEWSKI B. Reversible data hiding in encrypted DICOM images using sorted binary sequences of pixels[J]. *Signal Processing*, 2022, 199: 108621.
- [6] DIWAKAR M, KUMAR P, SINGH P, et al. An efficient reversible data hiding using SVD over a novel weighted iterative anisotropic total variation based denoised medical images[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2023, 82: 104563.
- [7] FRIDRICH J, GOLJAN M, DU R. Invertible authentication[C]//Proceedings of SPIE 4314, Security and Watermarking of Multimedia Contents III. San Jose: SPIE, 2001: 197–208.
- [8] TIAN J. Reversible data embedding using a difference expansion[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 13(8): 890–896.
- [9] 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.
- [10] ZHANG T, LI X L, QI W F, et al. Location-based PVO and adaptive pairwise modification for efficient reversible data hiding[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2020, 15: 2306–2319.
- [11] HE W G, CAI Z C. An insight into pixel value ordering prediction based prediction-error expansion[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2020, 15: 3859–3871.
- [12] YANG X, HUANG F J. New CNN-based predictor for reversible data hiding[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2022, 29: 2627–2631.
- [13] HU R W, XIANG S J. Reversible data hiding by using CNN prediction and adaptive embedding[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, 44(12): 10196–10208.
- [14] WENG S W, ZHOU Y, ZHANG T C, et al. Reversible data hiding for JPEG images with adaptive multiple two-dimensional histogram and mapping generation[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2023, 25: 8738–8752.
- [15] XIAO M Y, LI X L, ZHAO Y, et al. A novel reversible data hiding scheme based on pixel-residual histogram[J]. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, 2023, 19(1s): 46.
- [16] KAUR G, SINGH S, RANI R, et al. A comprehensive study of reversible data hiding (RDH) schemes based on pixel value ordering (PVO)[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021, 28(5): 3517–3568.
- [17] 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.
- [18] PENG F, LI X L, YANG B. Improved PVO-based reversible data hiding[J]. *Digital Signal Processing*, 2014, 25: 255–265.
- [19] 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.
- [20] WANG J X, NI J Q, ZHANG X, et al. Rate and distortion optimization for reversible data hiding using multiple histogram shifting[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(2): 315–326.