

文章编号: 1005-5630(2021)06-0019-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2021.06.004

基于多目标优化的明文域信息隐藏算法

蒋婵钰, 张紫欣, 秦 川

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 在传统的信息隐藏算法中, 嵌入率和图像视觉质量是互相制约的, 因而无法平衡两者之间的关系。为此, 提出了一种将可逆信息隐藏算法和不可逆信息隐藏算法相结合的高保真算法。利用不可逆信息隐藏算法的高嵌入率和可逆信息隐藏算法在图像视觉质量方面的高峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR), 在失真较小的情况下实现隐藏更多的秘密信息。此外, 该算法还能根据具体的应用场景找到相对最优的嵌入率、恢复图像的 PSNR 和含密图像的 PSNR 的平衡点, 从而适应不同的应用需求。实验结果表明, 与现有的其他算法相比, 该算法具有更高的嵌入容量和更好的图像视觉质量。

关键词: 信息隐藏; 多目标优化; 预测误差直方图; 矩阵编码

中图分类号: TN 253 **文献标志码:** A

Information hiding in plain-text images based on multi-objective optimization

JIANG Chanyu, ZHANG Zixin, QIN Chuan

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In traditional information hiding algorithms, embedding rate and image visual quality are mutually restricted, so the relationship between them cannot be balanced. Therefore, in this paper, a high fidelity scheme combining reversible information hiding method and irreversible information hiding method is proposed, which takes advantage of the high embedding rate of the irreversible information hiding method and the high peak signal-to-noise ratio (PSNR) of the reversible information hiding method in the aspect of image visual quality, so as to embed more secret information with less distortion. In addition, the scheme can also find the relative optimal embedding rate, the balance point between the restored image PSNR and the PSNR containing the dense image according to the specific application scene, so as to adapt to different application requirements. Experimental results show that the proposed scheme has higher embedding capacity and better image visual quality than the existing schemes.

Keywords: information hiding; multi-objective optimization; prediction error histogram shifting; matrix encoding

收稿日期: 2021-03-15

作者简介: 蒋婵钰(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为信息隐藏。E-mail: jcy13861629212@163.com

引 言

信息隐藏技术通常是将一个字符串的消息(如数字签名)嵌入到一个数字对象(如图像、音频或视频信号)^[1]中,且人们无法感知到数字对象的变化,因而被广泛应用于版权保护、指纹识别、身份验证和秘密通信等领域。近年来,研究人员提出了很多信息隐藏算法。Zhang 等^[2]提出了一种新的修改方向的(exploiting modification direction, EMD)方法,该方法利用魔术矩阵作为参考,修改载体图像的最低有效位(least significant bit, LSB)。Chang 等^[3]提出了一种基于(7, 4)汉明码的高嵌入率的信息隐藏方法,通过信息隐藏技术可以无损地提取出嵌入的秘密信息,但无法避免数字对象在恢复过程中遭到的破坏。因此,一种可逆信息隐藏(reversible dataing hiding, RDH)技术受到了人们的关注,该技术不仅可以提取嵌入的信息,而且可以无损地恢复原始的载体图像。到目前为止, RDH 算法主要采用 3 种技术,即无损压缩^[4-5]、差分扩展(DE)^[6-7]和直方图平移(HS)^[8-14]。Celik 等^[5]提出,通过无损压缩的方式来压缩载体图像,从而创建冗余空间来嵌入秘密信息。Tian^[6]提出了差分扩展法,该方法是将相邻像素之间的差异加倍,以生成新的最低有效位平面来嵌入秘密信息。Ni 等^[9]提出了直方图平移法,该方法用直方图呈现像素点出现的频率,将出现次数最多的像素点作为峰值点,将出现次数为 0 的像素点作为零值点,并通过修改直方图的峰值点对应的像素值来实现信息的隐藏。但是,以上这些方法也存在一些不足。

一方面,一些提出的可逆方法缺乏灵活性和便利性。例如,文献[12]是利用峰值点来嵌入数据,虽然此方法有效,但有时只需在水印区域嵌入很少的信息,这种以牺牲所有的误差值(在峰值点与其对应的零点之间移动)为代价来容纳这么少的数据是不可取的。这些方法一般都不能根据具体的应用场景找到最优的嵌入率、恢复图像的峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)和嵌入图像的 PSNR 的平衡点。

另一方面,在数据嵌入后,可逆信息隐藏的技术有助于提高图像质量但嵌入率较低,而不可逆信息隐藏方法能取得更高的嵌入率。如果只采

用传统的可逆信息隐藏算法,就不能对信息提供一个大范围的嵌入率选择,所以灵活性不够。

基于这些考虑,本文将可逆信息隐藏方法与不可逆信息隐藏方法相结合,以获得失真小、嵌入率高的效果,实现多目标优化。与其他方法相比,数据嵌入之前,我们可以调整嵌入率,嵌入图像的 PSNR,恢复图像的 PSNR 的权值,以获得不同的结果来适应不同的应用需求。

1 信息隐藏算法

1.1 算法框架

本文算法的框架如图 1 所示,由图像预处理、数据隐藏和数据提取/图像恢复 3 个阶段组成。在预处理阶段,先对原始图像进行块分类。在数据隐藏阶段,数据隐藏者利用数据隐藏密钥,采用预测误差直方图平移法和魔方矩阵编码法,将秘密数据嵌入到经过预处理后的图像块中。纹理平滑的图像块即为可逆信息隐藏图像块,对其用预测误差直方图平移法;纹理复杂的图像块即为不可逆信息隐藏图像块,对其用魔术矩阵编码法。在最后数据提取/图像恢复阶段,当拥有数据隐藏密钥时,接收者可以提取出嵌入的秘密数据并且恢复图像。

1.2 预处理

以 8 位灰度图像为例,假设原始未压缩图像 I_0 的大小为 $M \times N$ (高 \times 宽)。 I_0 的每个像素记为 $p_{i,j}$, 其中 i, j 表示像素的坐标位置,且 $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$ 。为了简化说明,假设 M 和 N 都是 2 的幂。为了评估不同图像块的复杂度,对原始图像进行如下处理。

首先,将原始图像 I_0 分成若干个大小为 $s \times s$ 的不重叠块。

其次,使用 Sobel 算子计算图像块 B_m ($m = 1, 2, \dots, (MN/s^2)$) 中每个像素的复杂度大小,将每个像素的复杂度累加得到图像块 B_m 的复杂度并且记为 G_m , 并设置阈值 G_T 。如果 $G_m \leq G_T$, 则将图像块 B_m 视为纹理平滑的图像块,归类为可逆信息隐藏图像块;如果 $G_m > G_T$, 则将图像块 B_m 视为纹理复杂的图像块,归类为不可逆

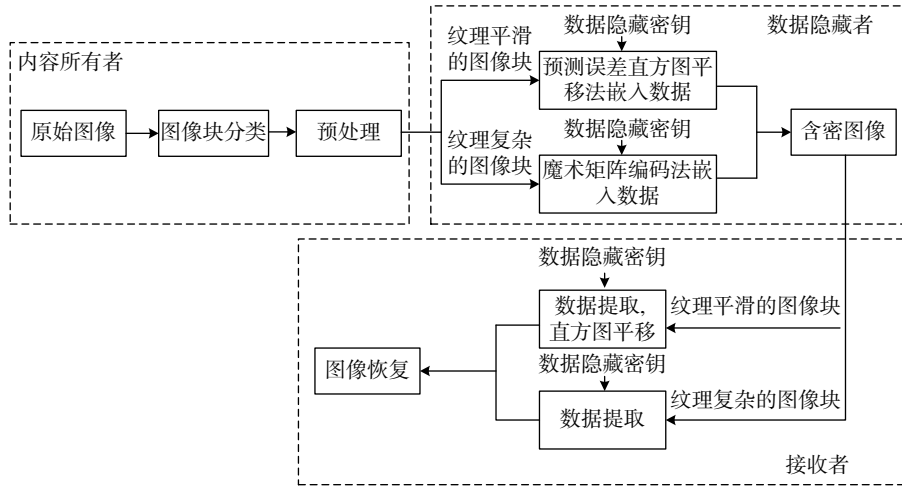


图 1 本文算法框架

Fig. 1 Framework of the proposed algorithm

信息隐藏图像块。

最后, 生成一个大小为 $(M/s^2) \times (N/s^2)$ 的矩阵 U , 用于区分当前块是可逆信息隐藏图像块还是不可逆信息隐藏图像块, 以便于后续提取数据和恢复图像。

1.3 理论推导

假设有 Q 块的复杂度满足 $G_m \leq G_T$, 即可逆信息隐藏图像块的数量为 Q 。对于每个可逆图像块 B_m , 第一行和第一列的像素都不做修改, 剩下的像素按照光栅扫描顺序进行预测。 B_m 中所有预测误差 $e_{u,v}^{(m)}$ 可以收集起来生成一个块预测误差直方图(block prediction error histogram, BPEH)。为了能便于正确提取数据和恢复图像, 第一行和第一列的像素都不用于嵌入数据。假设块 B_m 由 N_m 个不同的预测误差值组成, 即 BPEH 中有 N_m 个非空柱。然后, 找出两个最高的峰值柱, 并将它们分别记为左峰值 V_{pl} 和右峰值 V_{pr} , 同时将所有预测误差值大于 V_{pr} 的直方柱向右移动一个单位, 将所有预测误差值小于 V_{pl} 的直方柱向左移动一个单位。整个嵌入规则可以表示为

$$e'_{u,v}{}^{(m)} = \begin{cases} e_{u,v}^{(m)} + 1, & \text{if } e_{u,v}^{(m)} > V_{pr} \\ e_{u,v}^{(m)} + b, & \text{if } e_{u,v}^{(m)} = V_{pr} \\ e_{u,v}^{(m)}, & \text{if } V_{pl} < e_{u,v}^{(m)} < V_{pr} \\ e_{u,v}^{(m)} - b, & \text{if } e_{u,v}^{(m)} = V_{pl} \\ e_{u,v}^{(m)} - 1, & \text{if } e_{u,v}^{(m)} < V_{pl} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $e'_{u,v}{}^{(m)}$ 为修正的预测误差值; $b \in \{0, 1\}$ 为要嵌入的秘密数据。假设我们嵌入相同数量的数据 (即 p 比特) 到每个块中, 则可以计算图像的嵌入容量 C_1 为

$$C_1 = Qp \quad (2)$$

式中 Q 为可逆信息隐藏图像块的数量。同时, 将块 B_m 中满足 $V_{pl} < e_{u,v}^{(m)} < V_{pr}$ 的 $e_{u,v}^{(m)}$ 的总数表示为 x , 并假设秘密数据具有相等的概率, 即为 0 和 1。那么, 所有可逆信息隐藏图像块的含密图像块总失真 D_1 可以表示为

$$D_1 = Q \times \left(s^2 - x - \frac{p}{2} \right) \quad (3)$$

魔术矩阵编码方法的嵌入率为 $R = \frac{\log_2(2n+1)}{n}$, n 为 ≥ 2 的正整数。由于 R 表示每个原始像素中嵌入的秘密比特数, 因此, 每个不可逆信息隐藏图像块 B_m 的数据嵌入容量 C_m 可以记为

$$C_m = s^2 \times \frac{\log_2(2n+1)}{n} \quad (4)$$

由于有 Q 个可逆信息隐藏图像块, 其中 MN/s^4 块用于记录原始 LSB 值, 所以剩余的 $\left(\frac{MN}{s^2} - Q - \frac{MN}{s^4} \right)$ 块用于不可逆信息隐藏。所有不可逆信息隐藏图像块的数据嵌入容量 C_2 记为

$$C_2 = \left(\frac{MN}{s^2} - Q - \frac{MN}{s^4} \right) \times s^2 \times \frac{\log_2(2n+1)}{n} \quad (5)$$

嵌入效率 $E_\delta = [(2n+1) \times \log_2(2n+1)] / 2n$ 表示

值修改为数据 $D(a-1, b)$ 。

1.5 数据提取与图像恢复

数据提取和图像恢复过程由以下 4 个步骤组成。

(1) 如果接收方拥有数据隐藏密钥, 则接收方可以获得关于图像被划分为 HW/s^2 块的非重叠块的信息。然后, 在前 HW/s^4 块中可以得到矩阵 U 的信息, 于是可以知道纹理平滑的图像块和纹理复杂的图像块的位置。

(2) 可逆信息隐藏块数据提取。首先, 可以通过计算得到预测误差 $e'_{u,v}$; 然后, 在预测误差直方图中, 可以找到用于在原始图像中嵌入信息的两个点 V_{pl}, V_{pr} 。

如果 $e'_{u,v} > V_{pr} + 1$, 则在数据嵌入过程中已经对像素进行了移位, 其原始像素应为 $e'_{u,v} - 1$ 。

如果 $e'_{u,v} \in [V_{pr}, V_{pr} + 1]$, 则在数据嵌入过程中已经对像素进行扩展并携带隐藏数据。此时, 嵌入的数据 $b = e'_{u,v} - V_{pr}$, 原始像素为 V_{pr} 。

如果 $e'_{u,v} \in [V_{pl}, V_{pr}]$, 则在数据嵌入过程中像素不变。

如果 $e'_{u,v} \in [V_{pl} - 1, V_{pl}]$, 则在数据嵌入过程中已经对像素进行扩展并携带隐藏数据。嵌入的数据 $b = V_{pl} - e'_{u,v}$, 原始像素为 V_{pl} 。

如果 $e'_{u,v} < V_{pl} - 1$, 则在数据嵌入过程中已经对像素进行了移位, 其原始像素为 $e'_{u,v} + 1$ 。

(3) 不可逆信息隐藏图像块中数据提取。假设 $n = 2$, 从第一列和第一行开始提取数据。通过查找像素对坐标 (a, b) 对应的秘密数据 $D(a, b)$ 来提取秘密信息, 但不可逆信息隐藏图像块中的原始像素无法恢复。

(4) 图像恢复。将前 HW/s^4 块中像素的 LSB 替换为步骤 2 和步骤 3 中提取的前 MN/s^2 位秘密数据, 同时恢复可逆信息隐藏图像块。

2 实验结果和比较

本文选取 USC-SIPI 图像库中的 5 个常用的标准图像 Lena、Baboon、Lake、House、Man 作为测试图像, 每幅图像的大小均为 512 像素 \times 512 像素, 如图 3 所示。

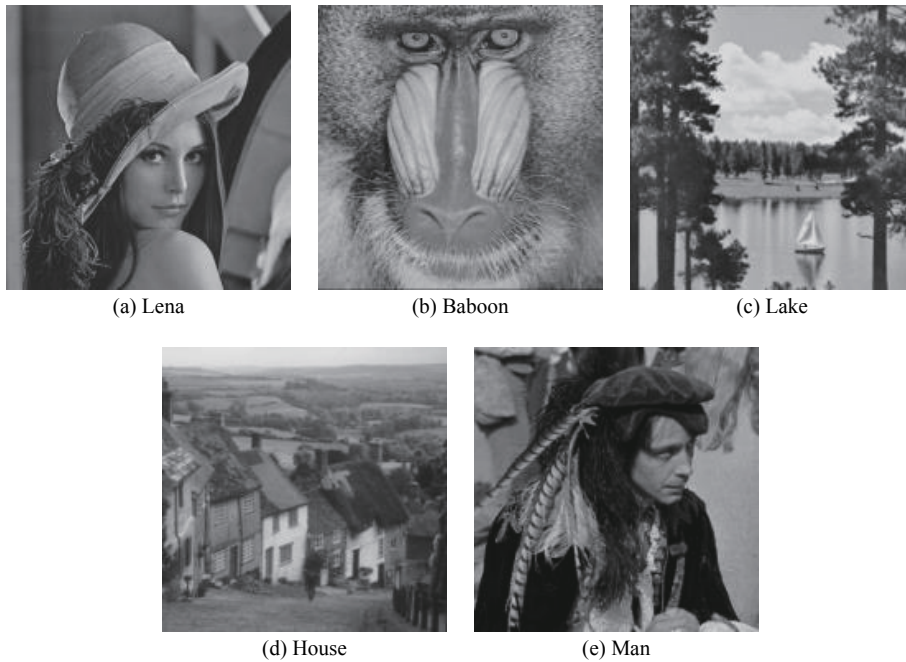


图 3 标准测试图像

Fig. 3 Standard test images

研究嵌入率 R 、含密图像的峰值信噪比 PSNR、恢复图像的峰值信噪比 PSNR 的权重

ω_1 、 ω_2 、 ω_3 对于实验结果的影响, 即 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 的大小对可逆信息隐藏图像块 Q 值的影响。

图 3 是可逆信息隐藏图像块的嵌入率 $m_1 = 0.2$ 时的实验结果, 每个可逆信息隐藏图像块预期能容纳 51 位秘密数据。分别给 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 设置不同的权重, 测试 ω_1 的权重显著上升是否会直接影响嵌入容量, 同理, ω_2 的权重变化是否会直

接影响含密图像的 PSNR, ω_3 的权重变化是否会直接影响恢复图像的 PSNR, 实验结果如表 1 所示。从表 1 可以很明显地看出, 当 ω_1 很大, ω_2 、 ω_3 则会相对较小, 此时的嵌入率会高于 ω_1 较小的时候。同理也可以应用到 ω_2 、 ω_3 中。

表 1 不同 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 情况下 Lena 的性能
Tab. 1 Performance for Lena with different emphasis on weights of $\omega_1, \omega_2, \omega_3$

权重	ω_1	ω_2	ω_3	Q	嵌入率/(bit/像素)	含密图像的PSNR/dB	恢复图像的PSNR/dB
ω_1	0.799999	0.299999	0.000001	114	1.03615	52.10323	52.64217
	0.699999	0.399999	0.000001	56	1.09554	52.05778	52.36152
ω_2	0.300000	0.699996	0.000004	550	0.59237	51.40668	55.45762
	0.200000	0.799996	0.000004	605	0.53274	51.29203	55.98313
ω_3	0.178500	0.178500	0.648400	1022	0.08503	50.55541	79.21990
	0.178500	0.078500	0.748400	1023	0.08391	50.55326	82.14587

我们在嵌入率 R_r 、含密图像的 PSNR 以及恢复图像的 PSNR 方面与文献 [8]、文献 [9]、文献 [10] 和文献 [11] 中提出的方法进行了比较,

结果如表 2 所示。从表 2 中可以清晰地看出, 对于含密图像, 本文的方法具有更高的平均 PSNR 值以及更高的嵌入率。

表 2 本文提出方法与 [8]、[9]、[10]、[11] 的总体比较
Tab. 2 Overall comparison between [8], [9], [10], [11] and our proposed method

方法	嵌入率/(bit/像素)	嵌入容量/bit	含密图像PSNR/dB
文献[8]	0.0854	22377	48.32
文献[9]	0.0208	5460	48.2
文献[10]	0.0546	14313	50.13
文献[11]	0.0529	13868	47.29
本文方法	0.0828~1.1509	21710~129952	50.55~52.13

3 结 论

本文将可逆信息隐藏算法和不可逆信息隐藏算法相结合, 提出了一种嵌入容量大、图像视觉质量高的明文域信息隐藏算法。在数据嵌入之前, 预先设置不同的嵌入率、含密图像的 PSNR 和恢复图像的 PSNR 的权重, 得到相应的采用可逆信息隐藏算法的可逆块和采用不可逆信息隐藏方法的不可逆块的比例。在嵌入阶段, 采用 2 种算法进行信息隐藏。最后, 提取出秘密数据, 恢复图像。与其他传统算法相比, 本文算法在嵌入

率和含密图像的视觉质量方面都有较好的性能。未来我们希望能采用不同的信息隐藏算法来优化多目标优化的信息隐藏算法。此外, 我们还将对该算法从明文域拓展到密文域, 从而进一步增强信息隐藏算法的安全性。

参考文献:

[1] 吴国华, 龚礼春, 袁理锋, 等. 中文文本信息隐藏研究进展[J]. 通信学报, 2019, 40(9): 145 – 156.
[2] ZHANG X P, WANG S Z. Efficient steganographic embedding by exploiting modification direction[J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(11): 781 –

- 783.
- [3] CHANG C C, KIEU T D, CHOU Y C. A high payload steganographic scheme based on (7, 4) Hamming Code for digital images[C]//Proceedings of 2008 International Symposium on Electronic Commerce and Security. Guangzhou: IEEE, 2008: 16-21.
- [4] FRIDRICH J, GOLJAN M, DU R. Lossless data embedding—new paradigm in digital watermarking[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2002, 2002(2): 185 – 196.
- [5] 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.
- [6] TIAN J. Reversible data embedding using a difference expansion[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(8): 890 – 896.
- [7] 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.
- [8] TAI W L, YEH C M, CHANG C C. Reversible data hiding based on histogram modification of pixel differences[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2009, 19(6): 906 – 910.
- [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] HUANG H C, FANG W C. Authenticity preservation with histogram-based reversible data hiding and quadtree concepts[J]. Sensors, 2011, 11(10): 9717 – 9731.
- [11] FALLAHPOUR M, SEDAAGHI M H. High capacity lossless data hiding based on histogram modification[J]. IEICE Electronics Express, 2007, 4(7): 205 – 210.
- [12] CHANG C C, TAI W L, CHEN K N. Lossless data hiding based on histogram modification for image authentication[C]//Proceedings of 2008 IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing. Shanghai: IEEE, 2008: 506 – 511.
- [13] WANG D W, ZHANG X Q, YU C Q, et al. Reversible data hiding by using adaptive pixel value prediction and adaptive embedding bin selection[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2019, 26(11): 1713 – 1717.
- [14] 孙刘杰, 庄松林. 印刷图像中隐藏水印的菲涅耳变换方法 [J]. 上海理工大学学报, 2008, 30(5): 475 – 478.

(编辑: 刘铁英)