

# 基于系数配对的自适应 JPEG 可逆信息隐藏方法\*

吴桃宇<sup>1,2</sup>, 黄方军<sup>1,2</sup>



<sup>1</sup>(中山大学 计算机学院, 广东 广州 510006)

<sup>2</sup>(广东省信息安全技术重点实验室, 广东 广州 510006)

通信作者: 黄方军, E-mail: huangfj@mail.sysu.edu.cn

**摘要:** JPEG(joint photographic experts group)是日常生活中运用最为广泛的图像压缩格式, 利用可逆信息隐藏(reversible data hiding, RDH)技术对其真实性和完整性进行认证, 具有非常重要的意义. 提出一种新的基于 JPEG 图像的可逆信息隐藏方法. 该算法首先根据幅值大小, 对 JPEG 图像 8×8 子块中小的非零 AC(alternating current)系数进行两两配对, 并在此基础上设计了一种新的二维可逆映射规则以嵌入信息, 而大的非零 AC 系数用于移位以腾出空间. 同时, 为了进一步减少 AC 系数的无效移动, 还提出了一种新的自适应频率选择策略, 在每个子块中自适应选择不同频段的系数用于嵌入信息. 实验结果表明: 该方法在视觉质量和文件储存大小增长两个指标上, 均优于目前最先进的方法.

**关键词:** JPEG 图像; 可逆信息隐藏(RDH); 小的非零 AC 系数配对; 自适应频率选择

**中图法分类号:** TP309

中文引用格式: 吴桃宇, 黄方军. 基于系数配对的自适应 JPEG 可逆信息隐藏方法. 软件学报, 2022, 33(2): 725-737. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6143.htm>

英文引用格式: Wu TY, Huang FJ. Adaptive JPEG Reversible Data Hiding Method Based on Pairwise Coefficients. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2022, 33(2): 725-737 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6143.htm>

## Adaptive JPEG Reversible Data Hiding Method Based on Pairwise Coefficients

WU Tao-Yu<sup>1,2</sup>, HUANG Fang-Jun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

<sup>2</sup>(Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Security Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Joint photographic experts group (JPEG) is the most widely used image compression format in daily life. Using reversible data hiding (RDH) technology to authenticate its facticity and integrity is of great significance. This study proposes a new RDH method based on JPEG image. In the proposed algorithm, the small non-zero alternating current (AC) coefficients in each 8×8 sub-block of the JPEG image are paired according to their amplitudes, and a new two-dimensional reversible mapping rule is designed for these paired AC coefficients to embed information, where the rest large non-zero AC coefficients are used for shifting to make room. Moreover, in order to further reduce the ineffective shifts of AC coefficients, a new adaptive frequency selection strategy is also proposed. In each sub-block, the coefficients belonging to different frequency bands are adaptively selected in the embedding process. The experimental results show that the proposed method is superior to the most advanced methods in terms of the visual quality and increase of file storage size.

**Key words:** JPEG image; reversible data hiding (RDH); small non-zero AC coefficient pairing; adaptive frequency selection

可逆信息隐藏技术是 21 世纪初发展起来的一门新的学科. 不同于传统的信息隐藏技术, 它可以在提取出所嵌入信息的同时, 完全无失真地恢复原始载体. 近年来, 随着手机和数码相机等各种便携式数字产品以及互联网的日益普及, 图像、视频和音频等多媒体数据呈现出爆炸性增长的趋势, 越来越多的用户开始将图像、

\* 基金项目: 国家自然科学基金(62072481, 61772572)

收稿时间: 2020-05-31; 修改时间: 2020-08-09; 采用时间: 2020-08-23

视频和音频等多媒体数据从个人电脑中分离出来, 迁移到个人微博、微信空间或公共云存储平台上进行管理. 为保护用户个人数据, 防止可能的篡改和攻击, 用户在将相关数据上传到个人微博、微信空间或云服务器端之前, 可以利用数字水印技术嵌入附加信息对图像、视频或音频等个人数据进行真实性和完整性认证<sup>[1,2]</sup>. 但由于信息嵌入所必然具有的入侵特性, 嵌入认证信息的过程本身也会破坏用户数据的真实性和完整性. 因此, 运用可逆信息隐藏技术解决上述矛盾, 已经越来越受到学术界和产业界的共同关注.

就前期可逆信息隐藏领域的研究而言, 主要着眼于保护军事、医学以及法律等领域的高精度非压缩格式图片, 如 BMP (bitmap)、TIFF (tag image file format) 格式图像等, 解决算法自身的嵌入容量以及载体图片的视觉保真等问题. 针对空域未压缩的高精度图像, 众多研究者提出了一系列可逆信息隐藏方案, 采取的策略主要有 3 种: 无损压缩(lossless compression)<sup>[3]</sup>、直方图平移(histogram shifting, HS)<sup>[4]</sup>以及差值扩展(difference expansion, DE)<sup>[5]</sup>. 基于无损压缩的方法由于其容量一般较低, 同时对图像质量影响较大, 目前受到的关注较少. 近年来, 在差值扩展和直方图平移方法的基础上, 众多研究者提出了一系列新的方法, 如基于整数变换的方法<sup>[6]</sup>、基于最优状态转移的直方图平移方法<sup>[7,8]</sup>、基于局部像素值排序预测的直方图平移方法<sup>[9,10]</sup>、基于非对称直方图平移的方法<sup>[11]</sup>、基于率失真优化的多直方图方法<sup>[12]</sup>等. 另外, 在一维直方图方法的基础上, Li 等人<sup>[13]</sup>提出可将一维直方图推广至高维, 提出了新的基于二维直方图的可逆信息隐藏方法. 该算法首先产生差值对, 然后利用精心设计的基于二维直方图的差值对映射进行嵌入信息. 随后, Ou 等人<sup>[14]</sup>提出了自适应像素配对和自适应映射策略, 只利用平滑区的像素进行配对用以嵌入信息, 同时对于不同图像自适应选择二维映射规则, 进一步提升了性能.

JPEG 图像是目前人们日常生活中最常见的用于存储和传输的图像格式之一, 但是目前, 大多数的图像可逆信息隐藏算法都是为空域图像设计的. 相对于空域图像, JPEG 图像存在信息冗余更少, 嵌入容量有限, 并且任何在压缩域中的修改都可能产生极大的视觉失真以及文件尺寸的显著增加等问题. 因此, 在 JPEG 图像上进行可逆信息隐藏更具挑战性. 针对 JPEG 图像, 目前的研究一方面是将空域相关方法扩展用于 JPEG 图像, 完成可逆信息隐藏操作; 另一方面针对 JPEG 文件格式自身的特点, 提出一些新的方法. 现有的基于 JPEG 图像的可逆信息隐藏方法大致可分为 3 类.

- 第 1 类是基于修改 Huffman 码表的方法<sup>[15-17]</sup>, 它们将码表中使用过的变长码(variable length code, VLC)映射到未使用过的变长码以表示不同的嵌入信息. 该类方法在嵌入信息后的文件储存大小保持不变甚至可能减少, 但是由于 VLC 的映射数量十分有限, 其嵌入容量通常较小;
- 第 2 类是基于修改量化表的方法, 最早由 Fridrich 等人<sup>[18]</sup>提出. 该算法将量化步长除 2 取整, 同时将对应的量化 DCT 系数乘 2 以腾出空间, 最后把修改后的 DCT 系数最低有效位替换成所要嵌入的信息. 随后, Wang 等人<sup>[19]</sup>提出将 DCT 系数扩展至  $k$  倍以嵌入更多的信息. 虽然这类方案的嵌入容量非常高, 但由于不是使用标准量化表, 导致文件尺寸增长得很明显;
- 第 3 类是基于修改量化 DCT 系数的方法<sup>[20-28]</sup>, 该类方案目前受到的关注较多. 比较有代表性的方法包括 Huang 等人<sup>[21]</sup>提出的基于一维 DCT 系数直方图移位的方法, 该方法保持零 AC 系数不变, 只利用值为 1 和 -1 的 AC 系数进行扩展以嵌入信息, 其他的 AC 系数根据符号向左或向右平移以腾出空间, 并优先选择零系数较多的系数块嵌入信息. 该方法在嵌入容量较大的同时, 较好地保持了文件大小. Hou 等人<sup>[22]</sup>在 Huang 等人<sup>[21]</sup>方法的基础上考虑了量化步长和块模拟失真的影响, 引入新的块排序和频率选择等策略, 得到了更优的性能. 最近, Li 等人<sup>[28]</sup>提出了一种新的基于二维直方图修改的 JPEG 图像可逆信息隐藏方法. 该算法首先将相邻的非零 AC 系数配对, 并设计了有效的二维可逆映射规则对生成的系数对进行扩展以嵌入信息, 进一步提升了视觉质量, 并显著降低了文件储存大小增长.

本文提出一种新的基于 JPEG 图像 DCT 系数二维直方图的可逆信息隐藏方法. 不同于已有的方案<sup>[28]</sup>, 我们提出只利用小的非零 AC 系数进行配对用以嵌入信息, 而大的非零 AC 系数直接进行移位以腾出空间. 针对小的 AC 系数对的统计分布特性, 我们设计了一种新的二维可逆映射规则. 同时, 考虑到现有的基于全局的频率选择策略不能自适应地为每个子块选择不同频率系数进行信息嵌入, 我们还提出了一种新的自适应频率选

择策略, 即根据每个子块的纹理复杂度选择不同频段的系数, 从而可以确保在信息嵌入过程中能够更进一步地有效抑制 AC 系数的无效平移. 实验结果表明: 与现有最先进的方案<sup>[21,22,28]</sup>相比, 本文的方法在视觉质量和文件储存大小增长上有更好的性能.

本文第 1 节简要回顾 Li 等人<sup>[28]</sup>提出的基于二维直方图修改的 JPEG 可逆信息隐藏方法. 第 2 节详细介绍本文提出的算法. 第 3 节给出我们的实验结果及分析. 第 4 节对全文进行总结.

## 1 相关工作

在本节中, 我们简要回顾了 Li 等人<sup>[28]</sup>提出的基于二维直方图修改的 JPEG 可逆信息隐藏方法. 其主要嵌入流程如下: 1) 对原始 JPEG 图像进行熵解码, 得到量化后的 DCT 系数; 2) 依次对每一个 8×8 的系数块按照 zig-zag 顺序扫描, 得到非零的 AC 系数序列 $(c_1, c_2, \dots, c_n)$ , 并将相邻的两个非零 AC 系数 $(c_{2i-1}, c_{2i}) (1 \leq i \leq \lfloor n/2 \rfloor)$ 进行配对; 3) 针对 AC 系数对设计如图 1 所示的二维可逆映射, 结合频段选择完成信息的嵌入. 在 Li 等人<sup>[28]</sup>设计的二维映射中, AC 系数对被分成如下 4 类(注: Li 等人在文献[28]中用率失真(rate-distortion)来表示为平均嵌入容量与平均失真之比, 其值越大表示嵌入同等负载时图像失真越小).

- 类型 A:  $(c_{2i-1}, c_{2i}) = \{(1,1), (1,-1), (-1,1), (-1,-1)\}$ . 即图 1 中的红色点. 如果嵌入的信息是“0”, 则保持不变; 如果嵌入的信息为“10”, 则往水平方向移动; 如果嵌入的信息为“11”, 则往垂直方向移动. 该类点平均嵌入容量为 1.5 bit, 平均失真为 0.5, 率失真为 3;
- 类型 B:  $(c_{2i-1}, c_{2i}) = \{(2,2), (2,-2), (-2,2), (-2,-2)\}$ . 即图 1 中的紫色点. 如果嵌入的信息是“0”, 则保持不变; 如果嵌入的信息为“1”, 则往对角线方向移动. 该类点平均嵌入容量为 1 bit, 平均失真为 1, 率失真为 1;
- 类型 C:  $(c_{2i-1}, c_{2i}) = \{abs(c_{2i-1}) > 1, abs(c_{2i}) = 1 \text{ or } abs(c_{2i-1}) = 1, abs(c_{2i}) > 1\}$ . 即图中的绿色点. 如果嵌入的信息是“0”, 则沿水平或垂直方向移动; 如果嵌入的信息为“1”, 则往对角线方向移动. 该类点平均嵌入容量为 1 bit, 平均失真为 1.5, 率失真为 2/3.
- 类型 D:  $(c_{2i-1}, c_{2i}) = \{abs(c_{2i-1}) > 2 \text{ or } abs(c_{2i}) > 2\}$ . 即图 1 中的蓝色点. 该类点不嵌入信息, 只用于平移腾出空间.

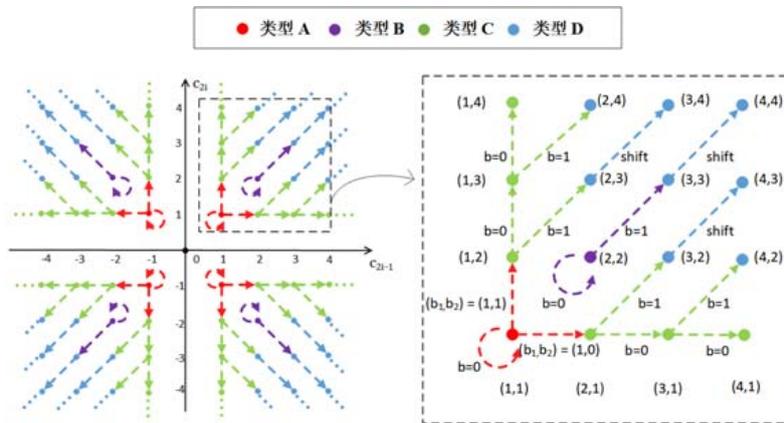


图 1 Li 等人的二维直方图映射

## 2 提出的方法

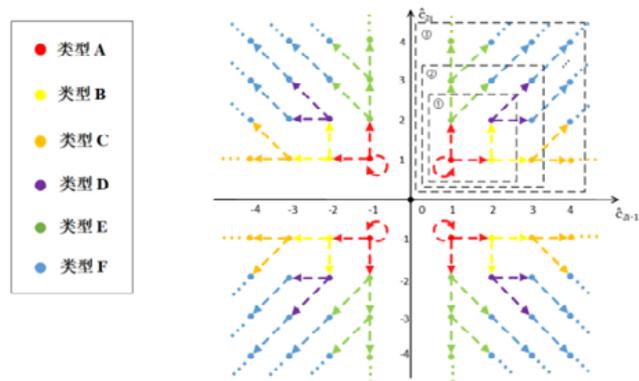
### 2.1 新的非零 AC 系数配对策略

由上文可知: 在 Li 等人<sup>[28]</sup>的方法中, 幅值较小的系数配对生成的系数对所对应的率失真性能要优于幅值

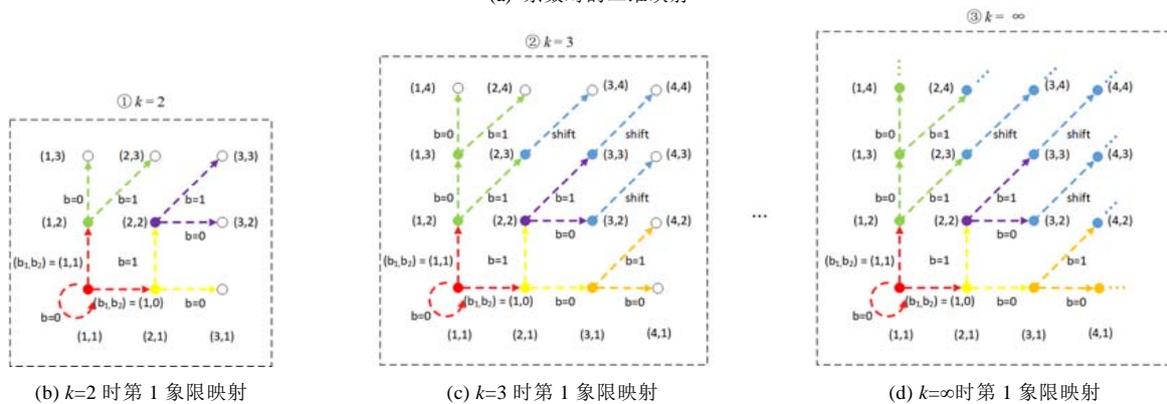


图中的非实心点表示的是当前的  $k$  值下不存在该系数对, 但有系数对映射到该点上. 为了方便解释, 我们以取  $k=\infty$  为例, 将系数对  $(\hat{c}_{2i-1}, \hat{c}_{2i})$  分成 6 种不同的类型, 分别说明如何嵌入信息.

- 类型 A:  $(\hat{c}_{2i-1}, \hat{c}_{2i}) = \{abs(\hat{c}_{2i-1})=1, abs(\hat{c}_{2i})=1\}$ , 即图中的红色点. 如果嵌入的信息比特是“0”, 则保持不变; 如果嵌入的信息是“10”, 则往水平方向移动; 如果嵌入的信息比特是“11”, 则往垂直方向移动;
- 类型 B:  $(\hat{c}_{2i-1}, \hat{c}_{2i}) = \{abs(\hat{c}_{2i-1})=2, abs(\hat{c}_{2i})=1\}$ , 即图 4 中的黄色点. 如果嵌入的信息是“0”, 则往水平方向移动; 如果嵌入的信息比特是“1”, 则往垂直方向移动;
- 类型 C:  $(\hat{c}_{2i-1}, \hat{c}_{2i}) = \{abs(\hat{c}_{2i-1}) > 2, abs(\hat{c}_{2i})=1\}$ , 即图 4 中的橙色点. 如果嵌入的信息是“0”, 则往水平方向移动; 如果嵌入的信息比特是“1”, 则往对角线方向移动;
- 类型 D:  $(\hat{c}_{2i-1}, \hat{c}_{2i}) = \{abs(\hat{c}_{2i-1})=2, abs(\hat{c}_{2i})=2\}$ , 即图 4 中的紫色点. 如果嵌入的信息是“0”, 则往水平方向移动; 如果嵌入的信息比特是“1”, 则往对角线方向移动;
- 类型 E:  $(\hat{c}_{2i-1}, \hat{c}_{2i}) = \{abs(\hat{c}_{2i-1})=1, abs(\hat{c}_{2i}) \geq 2\}$ , 即图 4 中的绿色点. 如果嵌入的信息是“0”, 则往垂直方向移动; 如果嵌入的信息比特是“1”, 则往对角线方向移动;
- 类型 F:  $(\hat{c}_{2i-1}, \hat{c}_{2i}) = \{abs(\hat{c}_{2i-1}) > 2 \text{ or } abs(\hat{c}_{2i}) > 2\}$ , 即图 4 中的蓝色点. 该类点不嵌入信息, 往对角线方向移动.



(a) 系数对的二维映射



(b)  $k=2$  时第 1 象限映射

(c)  $k=3$  时第 1 象限映射

(d)  $k=\infty$  时第 1 象限映射

图 4 该方案的二维直方图映射

该方案除了类型 F 系数对不用于嵌入信息外, 其他 5 种类型的系数对均用于嵌入信息. 随着  $k$  值的增大, 类型 C 和类型 E 系数对的数量增多(此时更多值  $\pm 1$ 、 $\pm 2$  的 AC 系数与幅值大于 2 的 AC 系数进行配对), 类型 A、类型 B 和类型 D 系数对的数量则相应减少, 具体变化趋势如图 3 所展示. 该方法与 Li 等人<sup>[28]</sup>的方法不同点在于: (1) 二维映射规则会随着  $k$  值的不同而发生改变; (2) 类型 B 和类型 D 系数对的映射方式不同. 由于 JPEG 图像中值为  $\pm 1$  的 AC 系数远多于值为  $\pm 2$  的 AC 系数, 因此配对得到的类型 B 系数对通常会远多于类型

D 的数量. 为了进一步降低图像失真, 数量多的类型 B 系数对的平均失真由原来的 1.5 降至 1, 而数量少的类型 D 系数对的平均失真由原来的 1 提升至 1.5, 因此, 理论上图像整体失真会比 Li 等人<sup>[28]</sup>的方法更低.

由图 4 可知, 绝对值不大于  $k$  的非零 AC 系数的修改可能为 0、-1 或 1. 为了保证图像的可逆性, 绝对值大于  $k$  的非零 AC 系数  $\hat{d}_j$  ( $1 \leq j \leq m$ ) 不用于嵌入信息, 但要进行移位以腾出空间, 公式表示如下:

$$\hat{d}'_j = \begin{cases} \hat{d}_j + 1, & \text{if } \hat{d}_j > k \\ \hat{d}_j - 1, & \text{if } \hat{d}_j < -k \end{cases} \quad (1)$$

表 1 对比了本文方法与 Li 等人<sup>[28]</sup>的方法在 6 幅  $QF=90$  标准测试图像的率失真性能. 从表 1 可以看到: (1) 本文方法在率失真方面表现更优, 并且随着  $k$  值的减小, 率失真性能越优,  $k=2$  时率失真是最佳的; (2) 当  $k=\infty$  时, 本文方法的率失真亦略优于 Li 等人的方法(注: 此时, 我们的方法与 Li 等人的方法采取了相同的系数配对方式), 表明了本文所提出的二维可逆映射的有效性. 因此, 在本文实验部分, 我们将取  $k=2$ , 即利用值为  $\pm 1$  和  $\pm 2$  的 AC 系数进行配对, 并按照图 4 设计的二维映射规则嵌入信息, 而幅值大于 2 的 AC 系数根据公式 (1) 进行移位.

表 1 本文方法与 Li 等人<sup>[28]</sup>的方法在  $QF=90$  不同图像下的率失真对比

图像	本文方法					Li 等人方法 <sup>[28]</sup>
	$k=2$	$k=3$	$k=5$	$k=10$	$k=\infty$	
Lena	<b>0.736</b>	0.727	0.723	0.72	0.719	0.705
House	<b>0.547</b>	0.54	0.536	0.533	0.533	0.526
Peppers	<b>0.798</b>	0.789	0.783	0.78	0.78	0.763
Splash	<b>0.801</b>	0.792	0.786	0.783	0.783	0.765
Bridge	<b>0.56</b>	0.553	0.548	0.546	0.544	0.536
Boat	<b>0.67</b>	0.663	0.659	0.655	0.654	0.642

### 2.3 块排序和自适应频率选择策略

如前所述, 我们只利用绝对值不大于  $k$  的非零 AC 系数进行配对, 并按照图 4 的映射规则嵌入信息. 以  $k=2$  为例, 即只有值为 1、-1 和 -2 的 AC 系数用于扩展, 而幅值大于 2 的 AC 系数直接进行移位. 其中, 移位操作主要为信息嵌入腾出空间, 该操作本身并不能有效嵌入信息, 所以有时亦称为无效移动. 自适应嵌入的一个重要目的就是尽可能地减少无效移动的次數. 根据 Huang 等人<sup>[21]</sup>所述, 平滑块通常比纹理块含有更多的零系数, 且平滑块含有小的 AC 系数的比例更高. Hou 等人<sup>[22]</sup>考虑了系数块不同频率的系数有不同的嵌入失真, 优先选择单位失真小的频率嵌入信息. 但是, 上述并没有考虑到图像中平滑块和纹理块的 AC 系数分布的差异, 因此我们提出了一种新的自适应频率选择策略, 即: 根据每个子块的纹理复杂度, 自适应地选择不同频段的系数用来嵌入信息.

为了更直观地展示平滑块和纹理块的 AC 系数分布差异, 我们首先按照零系数个数对系数块进行降序排序, 得到系数块序列  $(B_1, B_2, \dots, B_N)$ . 其中,  $N$  表示为 JPEG 图像  $8 \times 8$  系数块的数量,  $B_1$  为最平滑的块, 而  $B_N$  为最粗糙的块. 我们把排序后的系数块  $(B_1, B_2, \dots, B_N)$  均等划分为 4 个不同纹理复杂度的部分, 分别为  $R_1 = \{B_1, \dots, B_{\lfloor N/4 \rfloor}\}$ ,  $R_2 = \{B_{\lfloor N/4 \rfloor + 1}, \dots, B_{\lfloor N/2 \rfloor}\}$ ,  $R_3 = \{B_{\lfloor N/2 \rfloor + 1}, \dots, B_{\lfloor 3N/4 \rfloor}\}$  和  $R_4 = \{B_{\lfloor 3N/4 \rfloor + 1}, \dots, B_N\}$ . 其中,  $R_1$  主要由平滑块构成, 而  $R_4$  主要由纹理块构成. 图 5(a)–图 5(d) 分别展示了在  $512 \times 512$  的 Lena 图像 ( $QF=90$ ) 中取  $k=2$  时, 不同纹理复杂度系数块中小的非零 AC 系数 (即幅值不大于 2 的所有 AC 系数) 和大的非零 AC 系数 (即幅值大于 2 的所有 AC 系数) 的分布情况. 其中, 横坐标表示的是频率位置, 具体位置根据如图 2 所示的 zig-zag 扫描顺序来确定; 纵坐标表示的是对应频率上 AC 系数的数量.

从图 5 中可以看到: (1) 平滑块绝大部分的系数幅值较小, 随着纹理复杂度的增加, 小的非零 AC 系数的比例呈现递减趋势, 而大的非零 AC 系数的比例呈现递增趋势; (2) 在平滑子块中, 如图 5(a) 所对应的  $R_1$  部分, 小的非零 AC 系数主要分布在低频段, 而随着纹理复杂度的增加, 小的非零 AC 系数分布逐渐由低频段扩展至中高频部分, 具体可如图 5(b)–图 5(d) 所示. 由此可见: 对于平滑块, 选择低频段的系数作为信息嵌入是合适的. 而对于纹理块, 低频系数几乎是大的非零 AC 系数, 虽然优先修改低频系数会导致更小的图像失真<sup>[22]</sup>, 但

大多是无效平移. 因此对于纹理块, 跳过部分低频系数, 选择次低频和中频系数嵌入信息更合适.

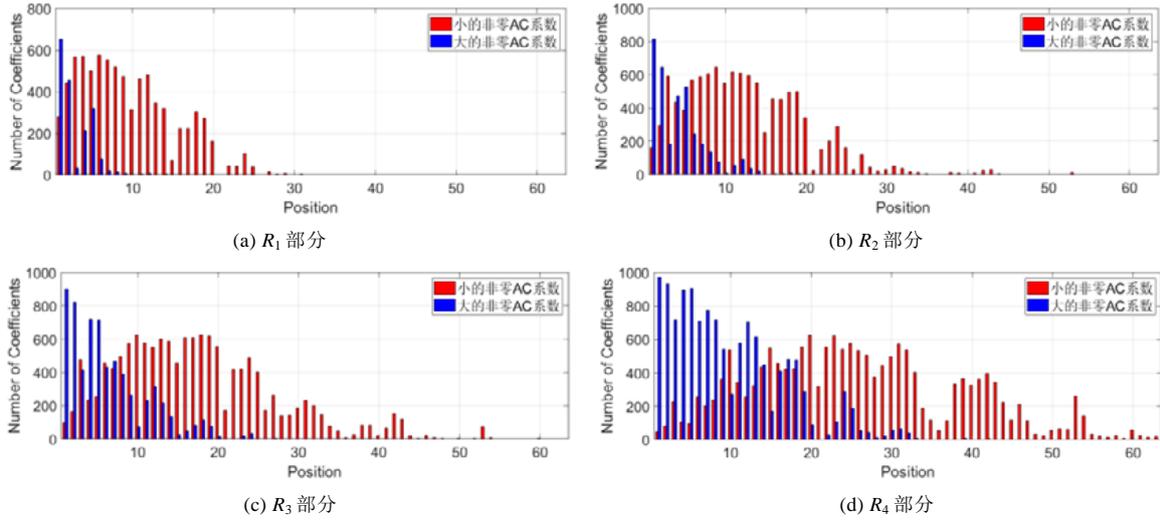


图 5  $QF=90$  时 Lena 图像不同纹理复杂度系数块的 AC 系数分布

根据前面的分析, 本文提出一种新的自适应频率选择策略. 对于平滑块, 我们选择低频的系数进行配对并嵌入信息; 而对于纹理块, 选择次低频和中频的系数进行配对并嵌入信息. 对于任意给定的子块  $B_i(1 \leq i \leq N)$ , 根据 zig-zag 扫描顺序(忽略 DC 系数), 其对应于的系数序列为  $(ac_1^i, ac_2^i, \dots, ac_{63}^i)$ , 选择的用于配对并用于信息嵌入的系数序列为  $(ac_{s_i}^i, \dots, ac_{e_i}^i)$ , 其中,  $1 \leq s_i \leq e_i \leq 63$ ,  $s_i$  和  $e_i$  分别表示对于与该系数块的起始频率和截止频率, 它们分别由以下公式得到:

$$\begin{cases} s_i = \text{ceil}\left(\frac{i}{N} \times T_1\right) \\ e_i = T_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\text{ceil}(\cdot)$  表示向上取整函数. 参数  $T_1$  和  $T_2(1 \leq T_1, T_2 \leq 63)$  分别用于控制不同类型子块中用于配对和信息嵌入的系数所对应的起始频率和截止频率. 如  $i=1$ , 可计算得到  $s_i=1$ , 即对于图像中最平滑子块, 起始频率从 1 开始; 如  $i = \frac{3}{4}N$ , 可计算得到  $s_i = \text{ceil}\left(\frac{3}{4} \times T_1\right)$ , 即对于图像中纹理较复杂子块, 其起始频率将从第  $\text{ceil}\left(\frac{3}{4} \times T_1\right)$  个频率开始. 对于每个系数块, 纹理复杂度越高, 起始频率越大. 最优的参数  $(T_1^*, T_2^*)$  可通过最小化标记图像相较于原始图像失真的均方误差(mean squared error, MSE)得到, 公式表示如下:

$$\begin{cases} (T_1^*, T_2^*) = \arg \min_{T_1, T_2} ED(T_1, T_2) \\ \text{subject to } EC(T_1, T_2) \geq P \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $P$  表示为给定嵌入负载的大小,  $ED(T_1, T_2)$  和  $EC(T_1, T_2)$  分别表示为失真和嵌入容量. 最优的参数  $T_1^*$  和  $T_2^*$  可以通过穷举搜索的方法得到. 已知  $1 \leq T_1, T_2 \leq 63$ , 因此针对每一幅图像, 只需进行  $63 \times 63$  次搜索即可. 表 2 给出了 6 幅  $QF=90$  标准图像在不同嵌入负载时, 最优参数  $(T_1^*, T_2^*)$  的取值. 注: 穷举搜索得到的最优参数  $T_1^*$  和  $T_2^*$  取值范围都在 1-63 之间, 但针对某些具体的子块, 根据最优参数  $T_1^*$  和  $T_2^*$  可能得到  $s_i > e_i$  的情况. 实际中如出现该情况, 则该系数块中所有系数都不用于嵌入信息.

接下来, 给出一个例子说明本文提出的自适应频率选择策略的有效性. 以  $512 \times 512$  的 Lena 图像( $QF=90$ ) 为例, 对系数块进行块排序后, 假设在给定的嵌入负载下, 计算得到最优参数  $T_1^* = 8$  和  $T_2^* = 25$ . 根据公式(2), 第 1 块、第 2 048 块和第 4 096 块所选择的系数分别为  $(ac_1^1, \dots, ac_{25}^1)$ ,  $(ac_4^{2048}, \dots, ac_{25}^{2048})$  和  $(ac_8^{4096}, \dots, ac_{25}^{4096})$ . 图 6 展

示了块排序后的第 1 个、第 2 048 个和第 4 096 个系数块的频率选择. 其中的红色部分为选定频率的系数, 蓝色部分为跳过的低频系数. 可以看到: 运用我们的方案, 可有效避免部分幅值较大的系数被用于平移操作, 从而得到更优的视觉质量和更小的文件尺寸.

表 2  $QF=90$  不同图像在不同嵌入负载时最优的  $(T_1^*, T_2^*)$  的取值

图像	嵌入负载(bits)		
	5 000	10 000	15 000
Lena	(14,19)	(7,20)	(5,24)
House	(12,19)	(3,24)	(2,25)
Peppers	(21,20)	(11,20)	(6,20)
Splash	(11,13)	(10,20)	(5,20)
Bridge	(26,25)	(11,33)	(10,33)
Boat	(13,21)	(14,25)	(9,25)

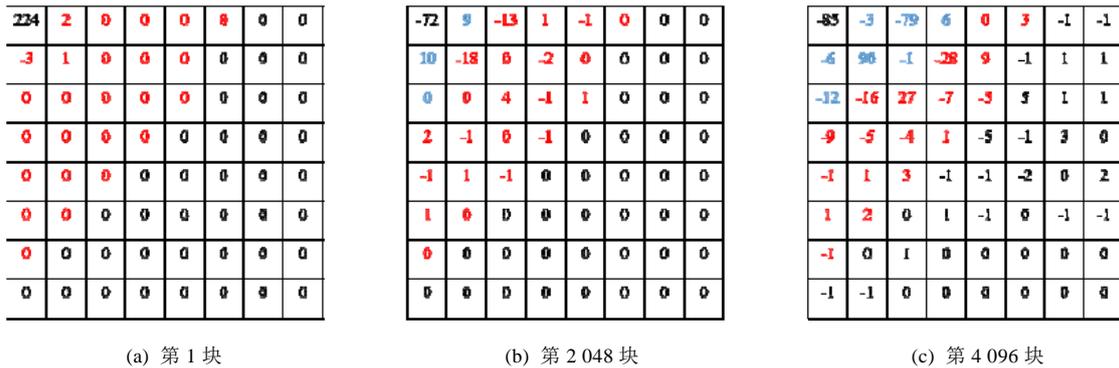


图 6 系数块的频率选择

## 2.4 信息嵌入和提取

为了能够完整恢复原始载体图像并提取出正确的信息, 我们需要记录的辅助信息包括  $k$  值、嵌入负载的大小  $P$  以及最优参数  $T_1^*$  和  $T_2^*$ . 嵌入负载的大小  $P$  通常不超过 65 536 bits, 需要 16 bits 储存; 最优参数  $T_1^*$  和  $T_2^*$  分别需要 6 bits 储存; 而  $k$  的取值通常不需要超过 16, 需要 4 bits 储存. 因此, 总的辅助信息大小为 32 bits. 具体的信息嵌入和信息提取步骤如下.

### 2.4.1 信息嵌入

步骤 1: 对原始 JPEG 图像进行熵解码, 得到量化的 DCT 系数.

步骤 2: 根据密钥选取 32 个 DC 系数, 将其最低 LSB 替换为上述 32 比特的辅助信息, 并保存 DC 系数的最低有效位, 作为嵌入负载的一部分.

步骤 3: 按照第 2.3 节自适应频率选择策略确定每个  $8 \times 8$  子块参与信息嵌入的起始频率  $s_i$  和截止频率  $e_i$ . 在所选定的频段部分取绝对值不大于  $k$  的非零 AC 系数进行配对, 根据图 4 的二维映射规则嵌入信息, 而绝对值大于  $k$  的非零 AC 系数按照公式(1)移位, 直至所有信息嵌入完毕.

步骤 4: 对嵌入信息后的 DCT 系数进行熵编码, 得到标记的 JPEG 图像.

### 2.4.2 信息提取和图像恢复

步骤 1: 对标记的 JPEG 图像进行熵解码, 得到量化的 DCT 系数.

步骤 2: 根据密钥找到嵌入辅助信息的 32 个 DC 系数, 在其最低有效位提取  $k$  值、嵌入负载的大小  $P$  和最优参数  $T_1^*$  和  $T_2^*$ .

步骤 3: 根据  $k$  值、嵌入负载的大小  $P$  和最优参数  $T_1^*$  和  $T_2^*$ , 依次对系数块进行 zig-zag 扫描, 确定每一个子块的起始频率  $s_i$  和截止频率  $e_i$ , 在选定的频段中取绝对值不大于  $k+1$  非零 AC 系数进行配对, 按照图 4 的逆映射提取秘密信息并恢复至原始的 DCT 系数, 而绝对值大于  $k+1$  的非零 AC 系数直接移位恢复至原始的 DCT

系数, 直至所有嵌入信息提取完毕. 最后, 根据提取到的秘密信息(前 32 位), 替换步骤 2 选取的 32 个 DC 系数的最低有效位, 完成对 DC 系数的恢复.

步骤 4: 对所有 DCT 系数进行熵编码, 恢复至原始的 JPEG 图像.

### 3 实验结果及分析

在本节中, 我们选取了 USC-SIPI 数据集(<http://sipi.usc.edu/database/>)中 6 幅  $512 \times 512$  标准测试图像对本文算法的性能进行测试. 该系列图像亦是可逆信息隐藏领域的 6 幅基准测试图像, 具体如图 7 所示. 实验中, 我们利用 IJG 工具(<http://www.ijg.org/>)将其转化到 QF 分别为 70、80、90 和 100 的 JPEG 图像, 并利用峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)和文件储存大小增长两个指标来衡量算法的有效性. 为了评估我们提出算法的性能, 与 Huang 等人<sup>[21]</sup>、Hou 等人<sup>[22]</sup>和 Li 等人<sup>[28]</sup>的算法进行了对比.

- 1) Huang 等人<sup>[21]</sup>的算法是一种经典的基于量化 DCT 系数修改的 JPEG 可逆信息隐藏方法;
- 2) Hou 等人<sup>[22]</sup>的算法是 Huang 等人<sup>[21]</sup>方法的改进, 有先进的块排序和频率选择策略的 JPEG 可逆信息隐藏方法;
- 3) Li 等人<sup>[28]</sup>的算法是目前性能最优的基于二维直方图的 JPEG 可逆信息隐藏方法, 其性能普遍比一维直方图的方法要优.

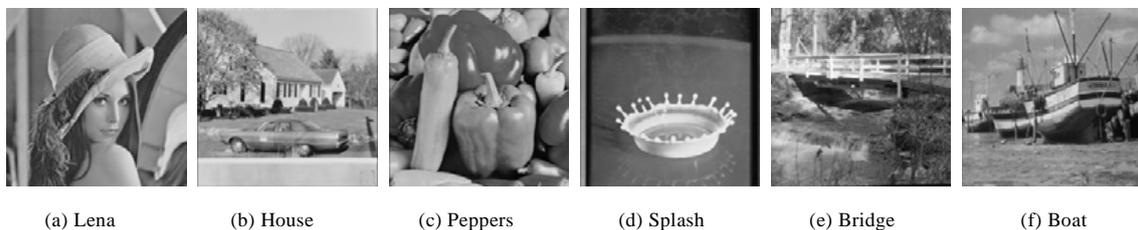


图 7  $512 \times 512$  大小的标准测试图像

图 8 和图 9 分别展示了不同 QF 的 6 幅测试图像在不同嵌入负载下的平均 PSNR 值和平均文件储存大小增长. 与此同时, 我们也通过实验验证了本文提出的自适应频率选择策略的有效性. 图中“Proposed”表示采用了提出的自适应的频率选择策略, 而“Proposed-NonAda”表示没有采用自适应频率选择策略. 从图 8 和图 9 可以看到: 无论是否采用自适应频率选择策略, 本文提出的算法对于  $QF=70, 80, 90, 100$  图像在不同嵌入负载下的视觉质量和文件储存大小增长都普遍优于 Huang 等人<sup>[21]</sup>、Hou 等人<sup>[22]</sup>和 Li 等人<sup>[28]</sup>的算法, 而采用了自适应频率选择策略也比没有采用自适应频率选择策略的方法效果要好. 这是因为, 本文提出的自适应频率选择策略能够跳过一部分幅值大的低频 AC 系数, 从而减少了无效平移, 提升了视觉质量并减少了文件储存大小增长. 同时, 我们也可以看到: 采用自适应策略对于 QF 值较小(如  $QF=70, 80$ )的图像, 在视觉质量和文件储存大小增长两个指标的提升上更为明显; 而对于 QF 值较大(如  $QF=90, 100$ )的图像性能的提升相对有限. 其主要原因在于: QF 值较大的图像中, DCT 系数所对应的量化步长较小, 绝大部分 AC 系数为非零系数, 该部分系数在进行游程编码过程中所对应的游程长度一般也为 0, 而修改这些零游程非零 AC 系数通常不会明显降低后续霍夫曼编码的效率, 因此, 本文所提出的自适应策略对于 QF 值较低的 JPEG 载体图像通常能取得更好的效果.

表 3 和表 4 分别展示了 6 幅  $QF=80$  标准测试图像在嵌入 10 000 bits 信息时的 PSNR 值和文件储存大小增长. 从表中可以看到: 我们提出的算法在嵌入负载为 10 000 bits 时, PSNR 值平均比 Huang 等人<sup>[21]</sup>、Hou 等人<sup>[22]</sup>和 Li 等人<sup>[28]</sup>的方法分别提升 1.29、0.68、0.44(dB), 平均文件储存大小增长分别减少 2 573、2 441 和 1 044(bits).

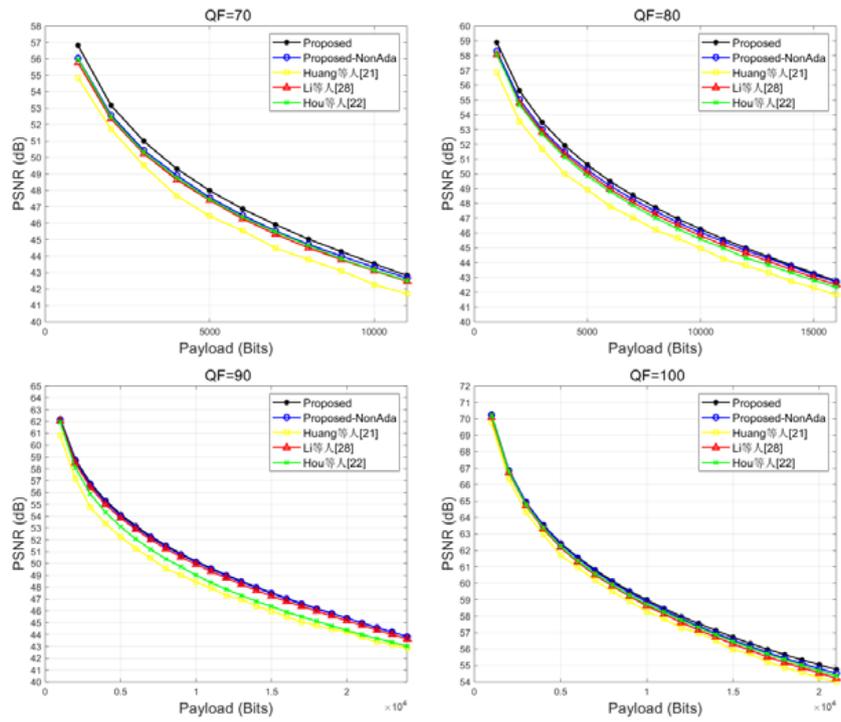


图 8 测试图像在不同嵌入负载下的平均 PSNR 值

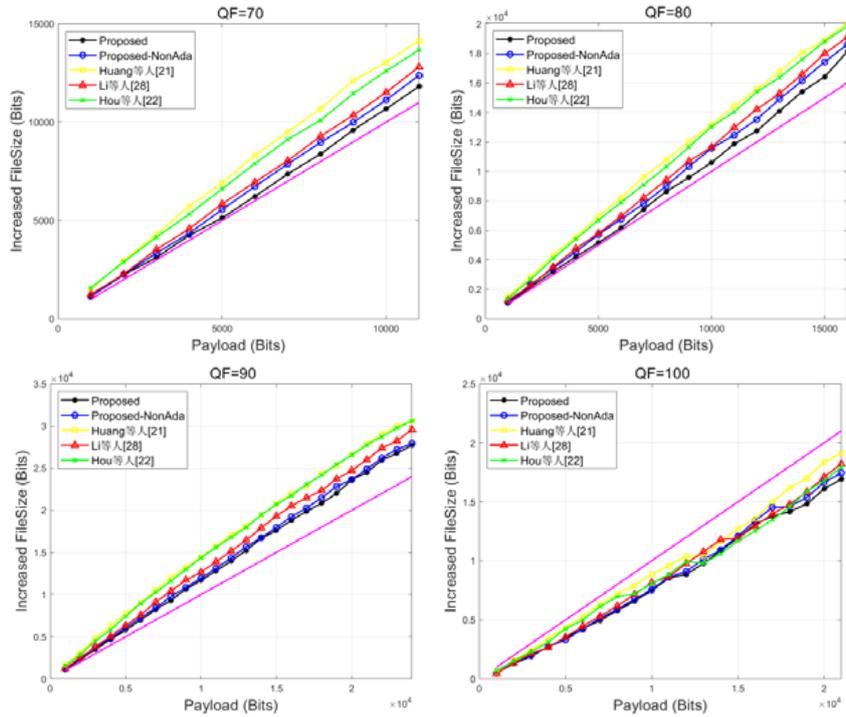


图 9 测试图像在不同嵌入负载下的平均文件储存大小增长

表 3 不同算法在嵌入负载为 10 000bits 时 PSNR 值(dB)的对比( $QF=80$ )

图像	Huang 等人 <sup>[21]</sup>	Hou 等人 <sup>[22]</sup>	Li 等人 <sup>[28]</sup>	Proposed-NonAda	Proposed
Lena	46.76	47.13	47.07	47.32	<b>47.52</b>
House	43.73	44.38	44.32	44.47	<b>44.52</b>
Peppers	46.64	47.08	47.18	47.40	<b>47.85</b>
Splash	46.13	47.53	47.81	48.03	<b>48.29</b>
Bridge	42.10	42.43	42.91	43.13	<b>43.33</b>
Boat	44.50	45.00	45.72	45.89	<b>46.14</b>
<b>Average</b>	44.98	45.59	45.83	46.04	<b>46.27</b>

表 4 不同算法在嵌入负载为 10 000bits 时文件储存大小增长(bits)的对比( $QF=80$ )

图像	Huang 等人 <sup>[21]</sup>	Hou 等人 <sup>[22]</sup>	Li 等人 <sup>[28]</sup>	Proposed-NonAda	Proposed
Lena	12 544	12 168	11 544	11 248	<b>10 392</b>
House	12 136	12 736	11 680	11 704	<b>11 360</b>
Peppers	13 032	12 672	11 496	11 032	<b>10 352</b>
Splash	14 344	13 312	11 632	11 432	<b>10 272</b>
Bridge	14 128	14 136	12 600	13 200	<b>11 416</b>
Boat	12 856	13 224	10 912	10 832	<b>9 808</b>
<b>Average</b>	13 173	13 041	11 644	11 574	<b>10 600</b>

## 4 结 论

在本文中,我们提出了一种新的 JPEG 可逆信息隐藏方法.该算法通过利用小的 AC 系数进行两两配对来构造二维可逆映射规则,并结合一种新的自适应策略在每个子块选择不同频率系数嵌入信息.实验结果表明,该方案在视觉质量和文件储存大小增长两个指标上均优于现有最先进的算法.但该方法无论在二维可逆映射还是自适应选择策略方面均还存在不足.如在二维可逆映射构造方面,我们目前还主要根据已有的经验选择固定的二维可逆映射,后期可以通过考虑率失真函数,根据给定载体图像的统计分布特点自适应选择最优的二维直方可逆映射规则以嵌入信息.另外,在自适应选择策略方面,我们目前的方法在针对一些纹理复杂的子块还存在一定的局限性,仍然无法避免一些幅值较大的 AC 系数的无效平移.接下来可考虑进一步挖掘图像不同纹理复杂度子块间的联系,设计一种更优的自适应频率选择或系数选择策略,以提升我们方案的性能.

## References:

- [1] Zhang CT, Su YT, Guan XK. Digital multimedia watermarking techniques. *Journal of China Institute of Communications*, 2000, 21(9): 46–52 (in Chinese with English abstract).
- [2] Xiang SJ, Luo XR. Reversible data hiding in encrypted image based on homomorphic public key cryptosystem. *Ruan Jian Xue Bao/ Journal of Software*, 2016, 27(6): 1592–1601 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5007.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005007]
- [3] Celik MU, Sharma G, Tekalp AM, Saber E. Lossless generalized-LSB data embedding. *IEEE Trans. on Image Process*, 2005, 14(2): 253–266. [doi: 10.1109/TIP.2004.840686]
- [4] Ni ZC, Shi YQ, Ansari N, Su W. Reversible data hiding. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2006, 16(3): 354–362. [doi: 10.1109/TCSVT.2006.869964]
- [5] Tian J. Reversible data embedding using a difference expansion. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 13(8): 890–896. [doi: 10.1109/TCSVT.2003.815962]
- [6] Qiu YQ, Yu L. Adaptive reversible image watermarking method based on integer transform. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1278–1284 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01528]
- [7] Zhang XP. Reversible data hiding with optimal value transfer. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2013, 15(2): 316–325. [doi: 10.1109/TMM.2012.2229262]
- [8] Zhang WM, Hu XC, Li XL, Yu NH. Optimal transition probability of reversible data hiding for general distortion metrics and its applications. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2015, 24(1): 294–304. [doi: 10.1109/TIP.2014.2358881]

- [9] Li XL, Li J, Li B, Yang B. High-fidelity reversible data hiding scheme based on pixel-value-ordering and prediction-error expansion. *Signal Processing*, 2013, 93: 198–205. [doi: 10.1016/j.sigpro.2012.07.025]
- [10] Qu XC, Kim HJ. Pixel-based pixel value ordering predictor for high-fidelity reversible data hiding. *Signal Processing*, 2015, 111: 249–260. [doi: 10.1016/j.sigpro.2015.01.002]
- [11] Lu TC, Tseng CY, Wu JH. Asymmetric-histogram based reversible information hiding scheme using edge sensitivity detection. *The Journal of Systems and Software*, 2016, 116: 2–21. [doi: 10.1016/j.jss.2015.04.085]
- [12] Wang JX, Ni JQ, Zhang X, Shi YQ. Rate and distortion optimization for reversible data hiding using multiple histogram shifting. *IEEE Trans. on Cybernetics*, 2017, 47(2): 315–326. [doi: 10.1109/TCYB.2015.2514110]
- [13] Li XL, Zhang WM, Gui XL, Yang B. A novel reversible data hiding scheme based on two-dimensional difference-histogram modification. *IEEE Trans. on Information Forensics and Security*, 2013, 8(7): 1091–1100. [doi: 10.1109/TIFS.2013.2261062]
- [14] Ou B, Li XL, Zhang WM, Zhao Y. Improving pairwise PEE via hybrid-dimensional histogram generation and adaptive mapping selection. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2019, 29(7): 2176–2190. [doi: 10.1109/TCSVT.2018.2859792]
- [15] Mobasseri BG, Berger, II RJ, Marcinak MP, NaikRaikar YJ. Data embedding in JPEG bitstream by code mapping. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2010, 19(4): 958–966. [doi: 10.1109/TIP.2009.2035227]
- [16] Qian ZX, Zhang XP. Lossless data hiding in JPEG bitstream. *Journal of Systems and Software*, 2012, 85(2): 309–313. [doi: 10.1016/j.jss.2011.08.015]
- [17] Hu YJ, Wang K, Lu ZM. An improved VLC-based lossless data hiding scheme for JPEG images. *Journal of Systems and Software*, 2013, 86(8): 2166–2173. [doi: 10.1016/j.jss.2013.03.102]
- [18] Fridrich J, Goljan M, Du R. Lossless data embedding for all image formats. In: *Proc. of the SPIE Security and Watermarking of Multimedia Contents IV*. 2002, 4075: 572–583. [doi: 10.1117/12.465317]
- [19] Wang K, Lu ZM, Hu YJ. A high capacity lossless data hiding scheme for JPEG images. *Journal of Systems and Software*, 2013, 86(7): 1965–1975. [doi: 10.1016/j.jss.2013.03.083]
- [20] Xuan GR, Shi YQ, Ni ZC, Chai PQ, Cui X, Tong XF. Reversible data hiding for JPEG images based on histogram pairs. In: *Proc. of the 4th Int'l Conf. on Image Analysis and Recognition*, Vol. 4633. 2007. 715–727. [doi: 10.1007/978-3-540-74260-9\_64]
- [21] Huang FJ, Qu XC, Kim HJ, Huang JW. Reversible data hiding in JPEG images. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2016, 26(9): 1610–1621. [doi: 10.1109/TCSVT.2015.2473235]
- [22] Hou DD, Wang HQ, Zhang WM, Yu NH. Reversible data hiding in JPEG image based on DCT frequency and block selection. *Signal Processing*, 2018, 148: 41–47. [doi: 10.1016/j.sigpro.2018.02.002]
- [23] Lu X, Huang FJ. Reversible data hiding in JPEG images based on two-dimensional histogram modification. *Cyberspace Security*, 2019, 10(8): 55–64 (in Chinese with English abstract).
- [24] Xuan GR, Li XL, Shi YQ. Minimum entropy and histogram pair based JPEG image reversible data hiding. *Journal of Information Security and Applications*, 2019, 45: 1–9 [doi: 10.1016/j.jisa.2018.12.007]
- [25] Kim S, Huang FJ, Kim HJ. Reversible data hiding in JPEG images using quantized DC. *Entropy*, 2019, 21(9): 835. [doi: 10.3390/e21090835]
- [26] Di FQ, Zhang MQ, Huang FJ, Liu J, Kong YJ. Reversible data hiding in JPEG images based on zero coefficients and distortion cost function. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(24): 34541–34561. [doi: 10.1007/s11042-018-6469-4]
- [27] He JH, Chen JX, Tang SH. Reversible data hiding in JPEG images based on negative influence models. *IEEE Trans. on Information Forensics and Security*, 2020, 15: 2121–2133. [doi: 10.1109/tifs.2019.2958758]
- [28] Li N, Huang FJ. Reversible data hiding for JPEG images based on pairwise nonzero AC coefficient expansion. *Signal Processing*, 2020, 171: 107476. [doi: 10.1016/j.sigpro.2020.107476]

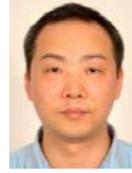
#### 附中文参考文献:

- [1] 张春田, 苏育挺, 管晓康. 多媒体数字水印技术. *通信学报*, 2000, 21(9): 46–52.
- [2] 项世军, 罗欣荣. 同态公钥加密系统的图像可逆信息隐藏算法. *软件学报*, 2016, 27(6): 1592–1601. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5007.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005007]

- [6] 邱应强, 余轮. 基于整数变换的自适应图像可逆水印方法. 电子与信息学报, 2014, 36(6): 1278-1284.
- [23] 陆兴, 黄方军. 基于二维直方图修改的 JPEG 图像可逆信息隐藏. 网络空间安全, 2019, 10(8): 55-64.



吴桃宇(1996—), 男, 硕士, 主要研究领域为可逆信息隐藏, 图像处理.



黄方军(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 主要研究领域为多媒体内容安全, AI 安全.