

基于最优 DCT 频段嵌入的 JPEG 图像可逆信息隐藏方法

周子扬, 谭云, 秦姣华, 向旭宇

(中南林业科技大学, 湖南 长沙 410004)

摘要: JPEG (joint photographic experts group) 图像不仅能够保证良好的画质, 且所需存储空间较小, 是目前互联网应用最广泛的图像格式。JPEG 图像可逆信息隐藏 (RDH, reversible data hiding) 方法可以隐藏和提取秘密信息, 并无损恢复原始图像, 被广泛用于文件管理和图像认证, 具有非常重要的意义。现有的大多数 RDH 方法在嵌入秘密信息后会明显增加载密图像的存储空间, 对基于离散余弦变换 (DCT, discrete cosine transform) 系数嵌入的方法来说, 如何选择频段位置是影响 JPEG 图像可逆信息隐藏性能的关键问题。提出一种基于最优 DCT 频段嵌入的 JPEG 图像可逆信息隐藏方法。将熵解码后的 JPEG 图像分割成大小为 8×8 非重叠的 DCT 块, 计算每个 DCT 块的平均纹理复杂度并进行升序排序, 并将相邻 DCT 块中相同频段的交流系数 (AC, alternating current) 进行两两配对, 在满足待嵌入信息容量的条件下, 根据 AC 系数频段的失真代价函数求出最优 AC 系数频段位置集合。根据所设计的二维直方图映射策略嵌入秘密信息。实验结果表明, 与现有方法相比, 所提方法不仅降低了载密图像文件存储大小的扩展, 且载密图像能够保持良好的视觉质量。

关键词: JPEG 图像; 可逆信息隐藏; 二维直方图; 平均纹理复杂度

中图分类号: TP393

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.2096-109x.2023061

JPEG reversible data hiding method based on optimal DCT frequency embedding

ZHOU Ziyang, TAN Yun, QIN Jiaohua, XIANG Xuyu

Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

Abstract: Joint photographic experts group (JPEG) images are widely used on the Internet due to their ability to maintain good picture quality while requiring less storage space. Reversible data hiding (RDH) techniques for JPEG images enable the hiding and extraction of secret information while allowing for lossless restoration of the original image. RDH is of great significance in file management and image authentication. However, many existing RDH

收稿日期: 2022-11-28; 修回日期: 2023-01-30

通信作者: 谭云, tantanyun@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金 (62002392); 湖南省自然科学基金 (2020JJ4140, 2020JJ4141, 2022JJ31019)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62002392), The Natural Science Foundation of Hunan Province (2020JJ4140, 2020JJ4141, 2022JJ31019)

引用格式: 周子扬, 谭云, 秦姣华, 等. 基于最优 DCT 频段嵌入的 JPEG 图像可逆信息隐藏方法[J]. 网络与信息安全学报, 2023, 9(4): 166-177.

Citation Format: ZHOU Z Y, TAN Y, QIN J H, et al. JPEG reversible data hiding method based on optimal DCT frequency embedding[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2023, 9(4): 166-177.

methods result in a significant increase in the storage space of the encoded image after embedding secret information. For methods based on discrete cosine transform (DCT) coefficient embedding, the key issue that affects the performance of reversible information hiding in JPEG images is how to select the frequency band position. A reversible information hiding method for JPEG images was proposed, based on optimal DCT frequency embedding. The entropy decoded JPEG image was divided into 8×8 non-overlapping DCT blocks. The average texture complexity of each DCT block was calculated and ordered in ascending order. Then the alternating current (AC) in adjacent DCT blocks was paired pairwise. By satisfying the capacity of the information to be embedded, the optimal AC coefficient frequency position set was obtained from the distortion cost function of the AC coefficient frequency. The secret information was embedded according to the designed two-dimensional histogram mapping strategy. Experimental results demonstrate that the proposed method can reduce the expansion of the loaded image file's storage size compared to existing methods, while maintaining good visual quality of the cover image.

Keywords: JPEG image, reversible data hiding, two-dimensional histogram, average texture complexity

0 引言

可逆信息隐藏^[1]是信息隐藏领域中一个非常重要的分支。1997 年, Barton^[2]首次在一项专利中提出, 可逆信息隐藏方法可以将秘密信息嵌入载体中(如图像、视频、文本等), 目标用户可以从嵌入信息后的载体中提取信息。近年来, 研究者开发了许多可逆信息隐藏技术的新型应用, 如可逆对抗样本、可逆视觉转换和可逆图像处理等, 由此可见, 可逆信息隐藏已经成为信息隐藏领域非常热门的研究方向。

JPEG 是一种压缩图像格式, 在压缩率和图像视觉质量之间提供了一个很好的权衡, 被广泛用于数码相机和其他摄影设备。图像压缩的原理是通过压缩原始图像中存在的冗余空间来降低存储大小。JPEG 图像的可逆信息隐藏技术在对内容敏感的医学、法律、军事等领域中得到了广泛应用。除此之外, JPEG 图像嵌入秘密信息后, 不仅会降低图像的视觉质量, 而且会造成文件存储大小的增长。因此, 与空域可逆信息隐藏相比, 压缩域可逆信息隐藏的评价标准除了视觉质量和嵌入容量之外, 还有载密图像的文件存储大小。然而, 这 3 个方面是互斥的, 提高某个方面的性能, 会对其他两个方面的性能有负面影响, 如何平衡这 3 个方面的性能是目前研究者关注的方向。按照对 JPEG 图像修改位置的不同, 基于 JPEG 图像的可逆信息隐藏方法主要分 3 种: 第一种是基于修改量化表的可逆信息隐藏方法^[3-5], 第二种是基于修改哈夫曼表的可逆信息隐藏方法^[6-13], 第三

种是基于修改量化 DCT 系数的可逆信息隐藏(主要是修改 AC 系数)方法^[14-27]。

(1) 基于修改量化表的可逆信息隐藏

2002 年, Fridrich 等^[3]首次提出了修改量化表中的步长系数来实现 JPEG 图像的可逆信息隐藏, 将量化表中的步长系数修改为原来的 $1/2$, 并向下取整, 将 DCT 系数修改为原来的 2 倍, 然后通过最低有效位替换的方法将秘密信息嵌入 DCT 系数中来实现信息隐藏, 每个修改后的 DCT 系数都可以嵌入 1 bit 的信息。随后, Wang 等^[4]在此基础上进行了扩展, 将量化表修改为原来的 $1/K$, 以此来嵌入更多的秘密信息。Chen 等^[5]认为不同 DCT 频段的系数变化会因量化步长的不同对图像的失真产生不一样的效果, 因此将不同 DCT 频段的系数根据待嵌入的秘密信息和量化步长的不同来设置不同的缩放系数 K , 该方法能得到更好的视觉质量。但是不同质量因子的 JPEG 图像有标准的量化表, 修改量化表后相当于采用了非标准的量化表, 因此在嵌入数据后进行哈夫曼编码时压缩性能会变差, 导致载密图像的文件大小显著增加。

(2) 基于修改哈夫曼表的可逆信息隐藏

2010 年, Mobasseri 等^[6]首次提出了变长编码(VLC, variable length code)映射, 他们通过建立已使用的变长编码和未使用的变长编码的映射来嵌入秘密信息, 此类方法可以使载密图像的文件大小不变, 但是嵌入的容量较少。随后, Qian 等^[7]和 Du 等^[8-9]在此方向上做出了改进, Du 等^[9]通过建立通用 VLC 映射模型并且使用非等长 VLC 映射提高嵌入容量。Qiu 等^[10]提出了一种根

据待嵌入秘密信息的大小来合理选择嵌入方法的方法,将 VLC 重排列和 VLC 映射结合起来根据秘密信息的大小选择其中较好的方法。虽然此类方法能够保证载密图像的大小不变,但是能够嵌入的秘密信息非常有限。Du 等^[13]提出了一种自适应创建哈夫曼表来重新定义映射关系,而不是从原始哈夫曼表中未使用的代码中进行选择,该方法显著降低了载密图像文件大小的扩展。

(3) 基于修改量化 DCT 系数的可逆信息隐藏

2007 年, Xuan 等^[14]将对直方图修改的方式应用在 JPEG 图像的 RDH 中,对量化后的 DCT 系数直方图进行多轮嵌入。2016 年, Huang 等^[15]提出了一种非常经典的基于直方图平移的方法,该方法只将量化后的值为 ± 1 的 AC 系数嵌入秘密信息,而值为 0 的 AC 系数保持不变,剩余的 AC 系数为了确保可逆性进行相应的移动,该方法有效增加了图像的容量,在视觉质量上有不错的性能。随后, Wedaj 等^[16]求得 AC 系数频段的嵌入效率来嵌入秘密信息。Hou 等^[17]通过计算出每个 AC 系数频段的嵌入失真来选择合适的频段嵌入秘密信息。Yin 等^[18]提出了多目标优化的新方法,该方法同时考虑了载密图像的视觉质量和文件大小的扩展,进一步提高了载体图像的视觉质量并降低了载密图像文件大小的扩展。He 等^[19]建立了一种信息嵌入的负面影响模型,其中用参数 a 控制倾向程度。当 a 为 0 时,则只对载密图像的视觉质量进行优化,当 a 为 1 时,则只考虑对载密图像的存储大小的扩展进行优化。该方法找到嵌入失真较低位置的同时,计算复杂度明显提高。为了提高 JPEG 图像的嵌密容量, Di 等^[20]将值为 0 的 AC 系数嵌入秘密信息,而 Yao 等^[21]引入双重 JPEG 图像策略来提高容量。Lyu 等^[22]则通过在 DCT 系数域和熵编码域同时嵌入秘密信息,并通过优化载荷分配算法求得最优分配解。Zhan 等^[23]使用了类似方法,但只是将辅助信息嵌入熵编码域中。在空域图像中, Ou 等^[28]使用预测误差方法实现可逆信息隐藏时,为了更好地利用预测误差的相关性,将两个相邻的预测误差配对得到二维预测误差直方图,然后设计一种更有效的嵌入策略来嵌入信息,该方法取得了显著效果。随后,文献[25-27]将这种方法引入变换域图像中并进行

了改进,提出了各种基于二维直方图修改 JPEG 图像可逆信息隐藏的方法来提高性能。

综上所述,对于 JPEG 图像的 RDH,除了考虑载体图像的嵌入容量和图像质量之外,文件存储大小的扩展程度也是十分重要的评价指标之一。

因此,本文提出了一种新的基于最优 DCT 频段嵌入的 JPEG 图像可逆信息隐藏方法,根据 AC 系数频段的失真代价函数来构造最优 AC 系数频段位置集合,并设计了一种新的二维直方图映射策略来嵌入秘密信息。与现有方法相比^[15-19],所提方法不仅能够保持良好的视觉质量,而且明显降低了载密图像存储大小的扩展。

1 本文方法

1.1 块选择策略

目前提出的 RDH 方法大多根据零 AC 系数的数量进行块选择,零系数多的块优先嵌入秘密信息。但是一个具有更多零系数的 DCT 块并不意味着当前块在嵌入信息后能产生更小的失真^[17]且不能代表块之间有较强的相关性。考虑以上问题,本文提出一种根据 DCT 块的平均纹理复杂度进行块选择的方法,平均纹理复杂度越小的块,越先嵌入秘密信息,如式(1)、式(2)所示。

$$G_i = \frac{R_i}{X_i} \quad (1)$$

其中

$$R_i = Q_1^i + Q_2^i + Q_3^i + \cdots + Q_k^i (1 \leq k \leq 63) \quad (2)$$

式中, G_i 表示第 i 个块的平均纹理复杂度, R_i 表示第 i 个块的纹理复杂度, X_i 表示第 i 个块中非零 AC 系数的个数, Q_k^i 表示第 i 个块中第 k 个非零 AC 系数频段对应量化表中的量化步长。该块选择方法有以下优点。

1) 由于 R_i 和 X_i 在秘密信息嵌入过程和提取过程中不会改变,因此块选择时不需要辅助信息进行标记。

2) 通过计算块的平均纹理复杂度可以更好地体现 DCT 块之间的相关性,在排序过程中相关性越强的块越靠近。如图 1 所示,将每个 8×8 的 DCT 矩阵块通过 Zig-Zag 转化为 64×1 的向量,并去掉直流(DC, direct current)系数,蓝点表

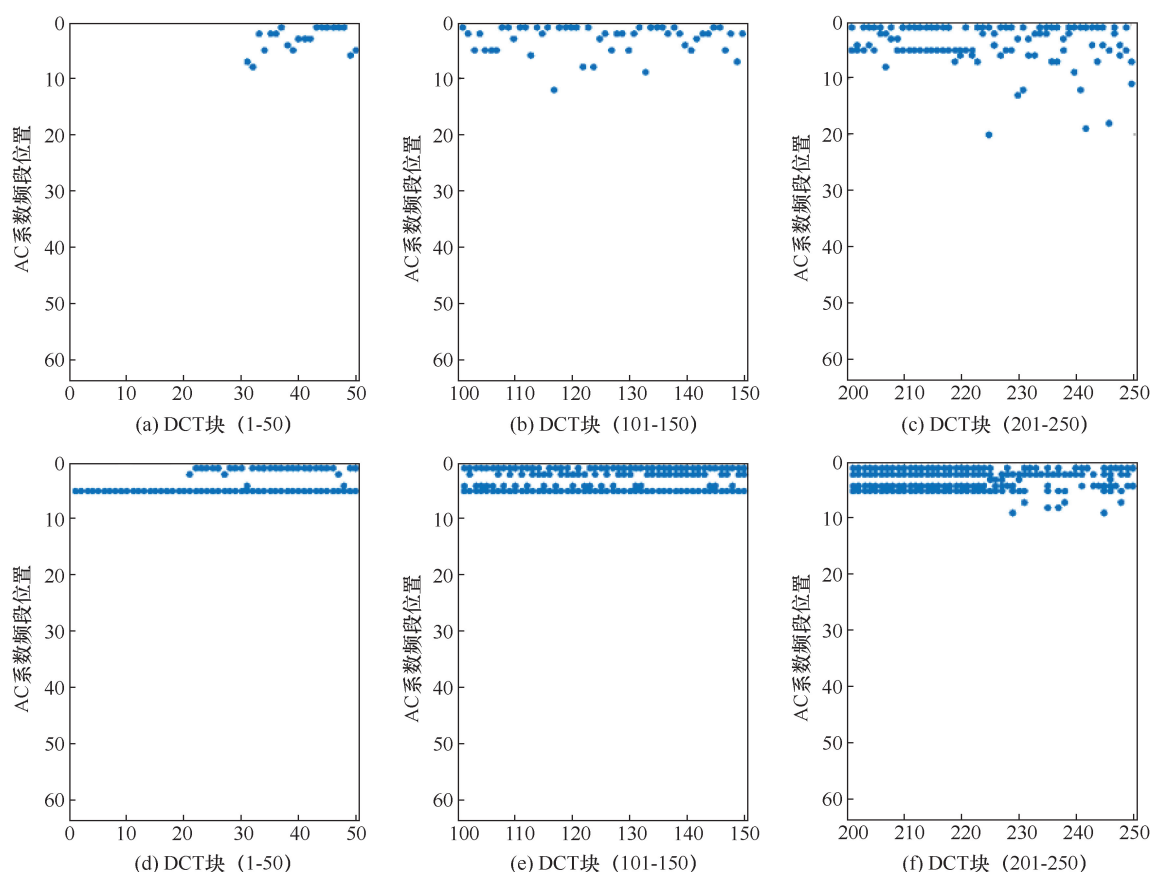


图 1 Lena 图像排序后的部分 DCT 块 (QF=70)
Figure 1 Partial DCT blocks of Lena after sorting (QF=70)

示该频段 AC 系数不为 0。其中图 1(a)~图 1(c) 根据零系数的数量进行排序, 图 1(d)~图 1(f) 根据本方法进行排序。

1.2 二维直方图映射策略

量化操作导致每个 DCT 块内相邻 AC 系数的

相关性较弱, 而每个块相同频段的 AC 系数相关性较强。因此, 本文采用相邻 DCT 块中相同频段 AC 系数进行两两配对, 如图 2 所示。系数对记作 $(x_i^n, x_i^{n+1}) (1 < n < N, 1 \leq i \leq 63)$, N 表示 DCT 块的总数, 系数对中的一个 AC 系数可以为 0。本文提出

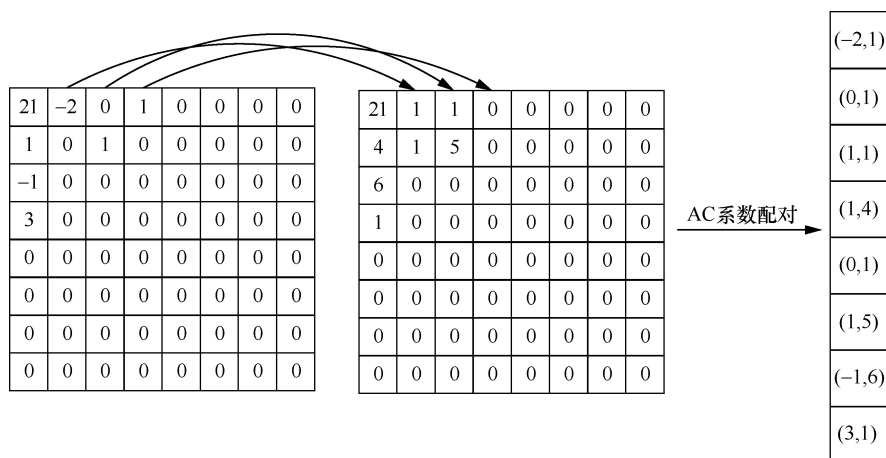


图 2 相邻 DCT 块系数配对过程
Figure 2 Matching process of adjacent DCT block coefficients

的 AC 系数配对策略中的系数对有 6 种类型, 如下。

类型 A: $(x_i^n, x_i^{n+1}) = \{(|x_i^n| = 1, |x_i^{n+1}| = 1)\}$

类型 B: $(x_i^n, x_i^{n+1}) = \{(|x_i^n| = 1, |x_i^{n+1}| \geq 2)\}$

类型 C: $(x_i^n, x_i^{n+1}) = \{(|x_i^n| \geq 2, |x_i^{n+1}| = 1)\}$

类型 D: $(x_i^n, x_i^{n+1}) = \{(|x_i^n| = 0, |x_i^{n+1}| = 1) \text{ 或 } (|x_i^n| = 1, |x_i^{n+1}| = 0)\}$

类型 E: $(x_i^n, x_i^{n+1}) = \{(|x_i^n| = 0, |x_i^{n+1}| > 1) \text{ 或 } (|x_i^n| > 1, |x_i^{n+1}| = 0)\}$

类型 F: $(x_i^n, x_i^{n+1}) = \{(|x_i^n| \geq 2, |x_i^{n+1}| \geq 2)\}$

其中, 属于类型 A、B、C、D 的系数对 (统称为嵌入系数对) 用于信息嵌入, 而属于类型 E、F 的系数对仅对其进行平移以保证可逆性 (统称为移位系数对)。与 Li 等^[26]的二维映射策略不同的是: ① 本文设计添加类型 D (注: 与 Li 等所设计的类型 D 不同) 来提高图像载密容量, 同时类型 A 的数量会减少 (注: 这里的提高载密容量只是相对基于二维直方图嵌入信息的方法), 相应地需要添加类型 E 进行平移来保证可逆性; ② 通过实验发现属于 $(x_i^n, x_i^{n+1}) = \{(|x_i^n| = 2, |x_i^{n+1}| = 2)\}$ 的系数对 (记作类型 B*) 明显小于类型 B 的系数对, 为了使属于类型 B 的系数对在嵌入秘密信息时减少位移, 本文将属于类型 B* 的系数对用作平移来保证可逆性。图 3 列举了质量因子 (QF) 分别为 70 和 90 的 Lena 和 Boat 图像在进行 AC 系数配对后这 6 种类型所占的比例。本文所提二维直方图映射策略如图 4 所示。 $m \in (0, 1)$ 表示秘密信息, 当 $m=1$ 时, 其中属于类型 D 系数对的信息

嵌入过程用式(3)和式(4)表示。

$$(x_i^n, x_i^{n+1})^* = \begin{cases} (x_i^n, x_i^{n+1} + \text{sign}(x_i^{n+1})), (x_i^n = 0, |x_i^{n+1}| = 1) \\ (x_i^n + \text{sign}(x_i^{n+1}), x_i^{n+1}), (|x_i^n| = 1, x_i^{n+1} = 0) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, x > 0 \\ 0, x = 0 \\ -1, x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

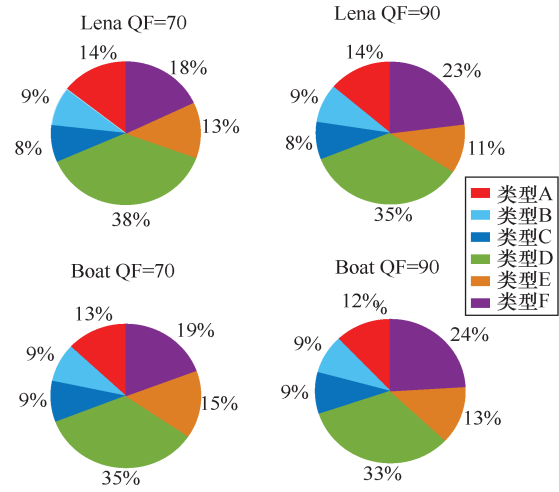


图 3 不同图像系数对类型的比例

Figure 3 The ratio of different image coefficients types

系数对恢复过程用式(5)表示。

$$(x_i^n, x_i^{n+1})' = \begin{cases} (x_i^n, x_i^{n+1} - \text{sign}(x_i^{n+1})), (x_i^n = 0, |x_i^{n+1}| = 2) \\ (x_i^n - \text{sign}(x_i^{n+1}), x_i^{n+1}), (|x_i^n| = 2, x_i^{n+1} = 0) \end{cases} \quad (5)$$

1.3 频段选择策略

在频段选择策略中, 本文使用 AC 系数频段

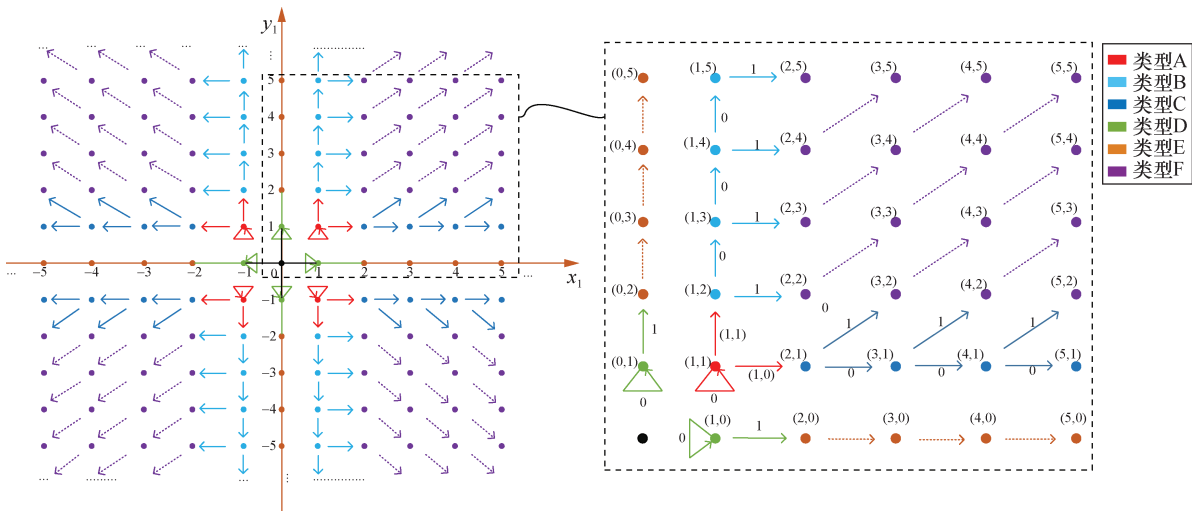


图 4 所提二维直方图映射策略

Figure 4 The proposed two-dimensional histogram mapping strategy

的嵌入失真代价函数^[17]计算出 63 个 AC 系数频段的单位失真来选择频段位置集合, 该方法同样适用基于二维直方图的 RDH。在满足待嵌入容量的条件下, 根据 AC 系数频段的单位失真求得频段位置集合 $T=(L_1, L_2, L_3, \dots, L_i)$, L_i 表示第 i 个 AC 系数频段位置, 则嵌入失真代价函数可以用式(6)表示。

$$M_i = (0.5 \times P_i + O_i) \times H_i \quad (6)$$

其中, M_i 表示频段位置为 i 的嵌入失真, P_i 表示 DCT 块中频段位置为 i 中类型对为嵌入系数对的总数, O_i 表示 DCT 块中频段位置为 i 中类型对为移位系数对的总数, H_i 表示只在频段位置为 i 中修改 AC 系数时所造成的平均失真。图 5(a)、图 5(b)分别给出了质量因子为 70 和 90 下 Lena 图各频段的系数对数量 (注: 不考虑 DC 频段)。不同于 Hou 等^[17]的方法, 由于存在类型 A, 为了更准确求得每个频段的单位失真, 计算如式(7)所示。

$$U_i = \frac{M_i}{S_i} \quad (7)$$

其中, S_i 表示频段位置为 i 中所提供的容量, U_i 表示频段位置为 i 的单位失真。最优频段集合 T^* 的计算如式(8)所示。

$$\begin{cases} T^* = \arg \min_T ED(T = (L_1, L_2, L_3, \dots, L_i)) \\ \text{subject to } EC(T = (L_1, L_2, L_3, \dots, L_i)) \geq P \end{cases} \quad (8)$$

该式表示所有块中频段位置集合 $T=(L_1, L_2, L_3, \dots, L_i)$ 所提供的嵌入容量 (EC, embedded capacity) 在满足待嵌入容量 P 的条件下求得造成嵌入失真 (ED, embedded distortion) 最低的 AC 系数频段位置集合 T^* 。图 6 给出了质量因子分别为 70、80、90 下 Lena 图分别嵌入 10 000 bit、16 000 bit、21 000 bit 时所选择的最优频段集合 (红色部分)。

1.4 信息嵌入与提取

为了能顺利提取嵌入的秘密信息, 保证提取

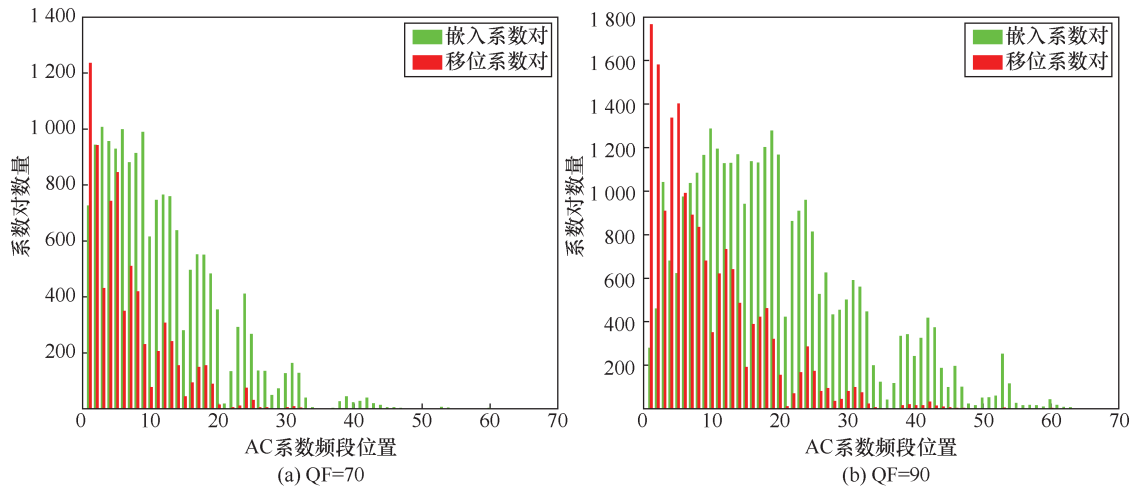


图5 不同质量因子下 Lena 图各频段的系数对数量

Figure 5 The number of coefficient pairs in each frequency band of Lena under different quality factors

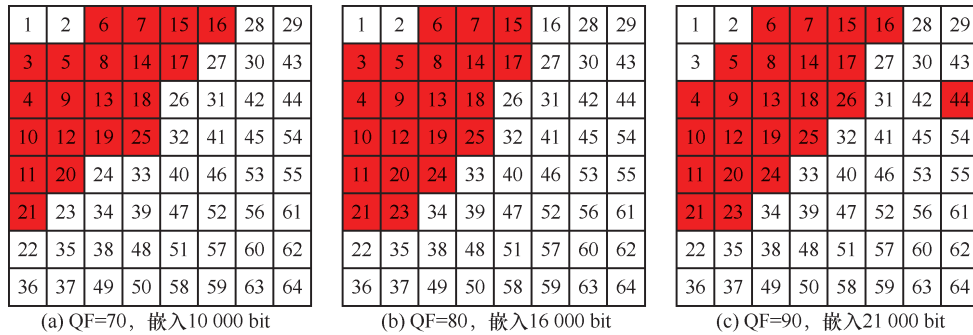


图6 不同质量因子下 Lena 图嵌入不同容量时所选择的最优频段集合

Figure 6 The set of selected optimal frequency bands when Lena is embedded with different capacities under different quality factor

的秘密信息不会产生混乱,并恢复原始图像,通常需要在嵌入秘密信息时嵌入辅助信息 H 进行标记。辅助信息包括待嵌入秘密信息的容量大小 P (512×512 的 JPEG 图像能提供的嵌入容量一般不超过 2^{18} bit) 和最优 AC 系数频段的位置(需要用 63 bit 记录,被选择的 AC 系数频段位置用“1”表示,而没被选择的用“0”表示,这里不考虑 DC 系数),因此需要的辅助信息大小 H 为 $63+18=81$ bit,将辅助信息按 Wedaj 等^[16]的方法嵌入 DC 系数的最低有效位中。由于数量少,不会对载密图像有明显的负面影响,实际待嵌秘密信息大小为 $P^*=H+P$ 。

1.4.1 信息嵌入

步骤 1 对原始 JPEG 图像 I 熵解码得到其量化 DCT 系数,然后分割成 N 个 8×8 的非重叠 DCT 块。

步骤 2 对每个 DCT 块计算平均纹理复杂度,并根据平均纹理复杂度升序对 DCT 块进行排序。随机选取 81 个 DCT 块(由密钥确定),将其 DC 系数的最低有效位用来嵌入辅助信息 H ,与秘密信息 P 一起作为待嵌信息。

步骤 3 在满足待嵌秘密信息容量的条件下,根据频段的单位失真计算得到最优频段集合 T^* 。

步骤 4 根据图 4 的二维直方图映射策略嵌入秘密信息,将秘密信息的长度和最优频段的位置作为辅助信息 H 与 81 个 DCT 块的 DC 系数最低有效位进行替换,完成辅助信息的嵌入。

步骤 5 完成所有信息的嵌入过程后,对修改后的 DCT 系数进行熵编码,生成载密的 JPEG 图像 I^* 。

1.4.2 信息提取

步骤 1 将得到的载密 JPEG 图像 I^* 进行熵解码,得到其量化 DCT 系数,分割成 N 个 8×8 非重叠的 DCT 块。

步骤 2 对每个 DCT 块计算平均纹理复杂度,并根据平均纹理复杂度升序对 DCT 块进行排序。找到嵌入时随机选取的 81 个 DCT 块(由密钥确定),从每个 DCT 块中的 DC 系数最低有效位提取辅助信息 H 。

步骤 3 基于得到的辅助信息 H ,按照图 4

的二维直方图映射策略,在已经排序的 DCT 块中提取秘密信息 P ,并将系数对还原。

步骤 4 完成信息提取后,对还原后的 DCT 系数进行熵编码,最终恢复到原始 JPEG 图像 I 。

2 实验结果

为验证所提方法性能,将本文方法与现有 JPEG 图像可逆信息隐藏方法^[15-19]在峰值信噪比(PSNR, peak signal to noise ratio)和文件存储大小扩展两方面进行比较。其中,文献[15]是该领域经典的算法,文献[16-19]是目前流行的算法,测试中文献[18]采用的是 Hou 等^[17]提出的多目标优化的方法,文献[19]中 a 设置为 0,代表该算法仅考虑载密图像的视觉质量。从 USC-SIPI 数据集中选取 5 张标准的 512×512 的灰度图像作为测试图像,分别为 Lena、Peppers、Tiffany、Baboon、Airplane,如图 7 所示。所有的测试图像都使用 IJG 工具标准的哈夫曼表将其压缩成质量因子(QF)为 70、80、90 的 JPEG 图像,并根据实验结果得出平均值。为了不失一般性,秘密信息都是随机生成的二进制信息,并且是均匀分布的。实验在 Windows 10 64 位操作系统下进行,使用 Intel Core i5-10400F,内存大小为 16 GB,算法采用 Matlab R2016a 实现。



图 7 测试图像
Figure 7 The test images

表 1 和图 8 分别给出了质量因子为 70、80、90 时测试图像在不同嵌入容量下的平均文件大小扩展值。从图 8 可以看出,本文方法在该指标上相对其他 5 种方法有明显优势。从表 1 可以得到,当 QF=90、嵌入容量为 21 000 bit 时,本文方法在该指标上分别比其他 5 种方法减少 4 236 bit、2 701 bit、2 735 bit、2 613 bit、1 877 bit。表 2 和图 9 分别给出了质量因子为 70、80、90 时测试图像在不同嵌入容量下的平均 PSNR 值。从图 9 可以看出,本文方法能维持良好的视觉质量,在 PSNR 指标上优于文献[15-18],略差于文献[19]。从表 2 可以得到,在 QF=70、嵌入容量为 5 000 bit 时,

表 1 不同质量因子时，6 种不同方法下文件大小扩展值的比较
Table 1 Comparison of file storage size growth under six different methods with different quality factors

图像	方法	嵌入容量/bit (QF = 70)			嵌入容量/bit (QF = 80)			嵌入容量/bit (QF = 90)		
		5 000	8000	11 000	10 000	13 000	16 000	15 000	18 000	21 000
Lena	文献[15]	6 904	11 272	15 416	13 960	18 440	22 736	21 904	25 000	30 464
	文献[16]	6 512	10 504	14 512	12 936	17 400	21 736	19 904	24 440	28 864
	文献[17]	6 712	10 904	15 288	14 088	18 424	22 288	18 712	25 376	29 160
	文献[18]	6 496	10 304	14 760	12 848	17 384	21 576	19 792	23 928	28 768
	文献[19]	6 992	10 688	15 104	12 392	16 984	21 552	18 416	23 312	27 960
	本文	5 904	9 760	13 896	12 152	16 688	20 760	17 488	21 080	25 472
Peppers	文献[15]	7 416	11 600	15 568	14 304	18 648	23 072	22 656	27 000	31 256
	文献[16]	6 304	10 080	14 168	14 064	16 896	19 768	20 024	23 432	28 376
	文献[17]	7 080	11 296	15 184	13 808	17 896	21 056	18 968	23 360	28 392
	文献[18]	5 824	9 928	14 144	12 448	16 536	20 168	20 448	24 856	30 240
	文献[19]	6 216	10 192	14 168	11 232	15 896	20 344	18 872	22 248	27 208
	本文	5 616	9 272	12 984	11 904	15 224	19 136	17 216	20 608	25 432
Tiffany	文献[15]	7 368	11 600	15 952	14 312	18 352	22 976	21 120	25 024	29 984
	文献[16]	6 096	10 760	14 320	12 456	16 832	21 592	19 688	23 152	27 808
	文献[17]	7 112	11 496	15 440	13 352	17 488	22 544	18 920	23 152	28 152
	文献[18]	6 256	10 584	14 496	12 912	16 952	21 816	19 104	24 536	28 504
	文献[19]	6 992	10 688	15 104	12 208	17 576	21 648	18 408	23 120	28 640
	本文	6 080	9 720	14 400	11 848	16 496	21 176	17 032	21 376	26 368
Baboon	文献[15]	7 632	11 928	16 592	14 632	20 144	25 168	25 840	30 824	35 960
	文献[16]	7 824	11 400	17 952	17 072	21 728	26 528	30 240	34 720	38 640
	文献[17]	6 992	10 984	15 752	14 472	19 880	25 056	25 552	30 808	35 504
	文献[18]	6 408	10 832	15 648	14 120	18 600	23 360	24 056	29 240	34 360
	文献[19]	6 856	11 312	15 328	13 184	18 648	24 192	24 200	29 720	35 224
	本文	6 512	10 024	14 160	12 544	16 856	21 104	24 208	29 240	33 760
Airplane	文献[15]	7 696	11 288	14 440	13 400	17 480	20 624	21 312	24 720	28 776
	文献[16]	6 840	9 112	13 872	11 504	15 000	19 496	17 096	22 144	25 080
	文献[17]	7 000	10 504	14 912	12 472	15 352	20 936	19 128	23 656	27 728
	文献[18]	5 920	9 848	14 224	11 408	15 928	20 616	18 616	22 336	26 456
	文献[19]	6 304	9 864	14 944	11 432	15 112	20 288	18 240	21 632	25 616
	本文	5 120	8 928	13 400	10 216	14 632	19 016	15 168	19 800	24 232
平均值	文献[15]	7 403	11 537	15 593	14 121	18 612	22 915	22 566	26 513	31 288
	文献[16]	6 627	10 371	14 964	13 605	17 571	21 616	21 390	24 936	29 753
	文献[17]	6 979	11 036	15 315	13 638	17 808	22 376	20 256	25 270	29 787
	文献[18]	6 180	10 299	14 654	12 747	17 080	21 507	20 403	24 979	29 665
	文献[19]	6 672	10 548	14 929	12 089	16 843	21 604	19 627	24 006	28 929
	本文	5 846	9 540	13 768	11 732	15 979	20 238	18 222	22 420	27 052

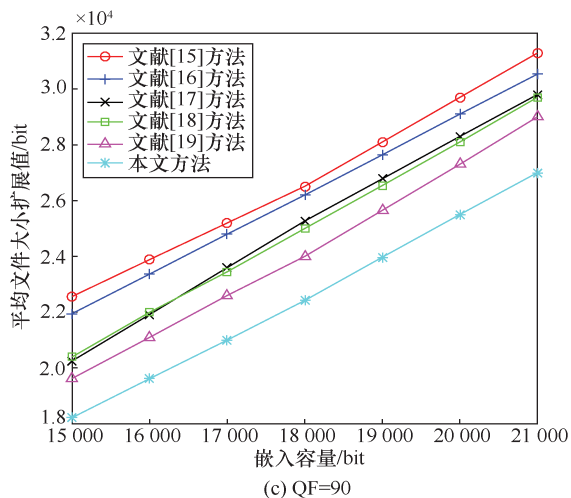
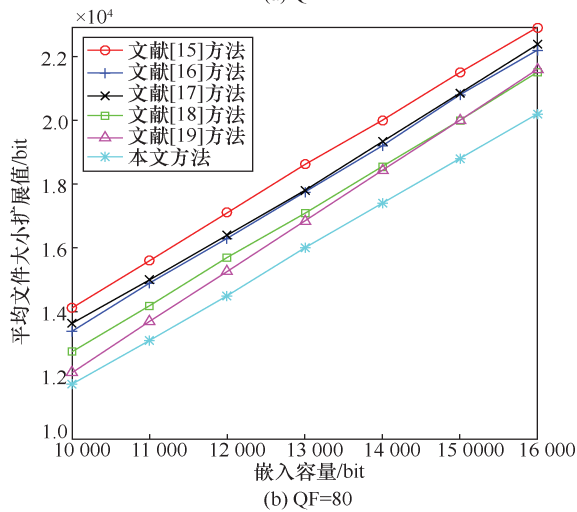
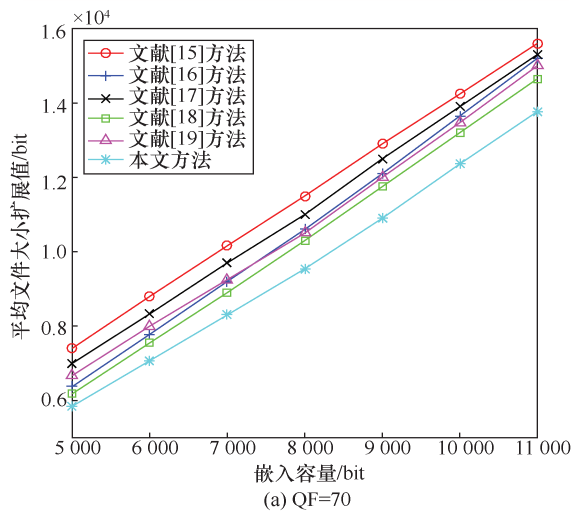


图8 测试图像的平均文件大小扩展值
Figure 8 The average file size extension of the test images

本文方法在该指标上分别比文献[15-17]提高 0.627 dB、1.687 1 dB、0.018 5 dB。在 QF=90、嵌入容量为 21 000 bit 时,本文方法在该指标上分

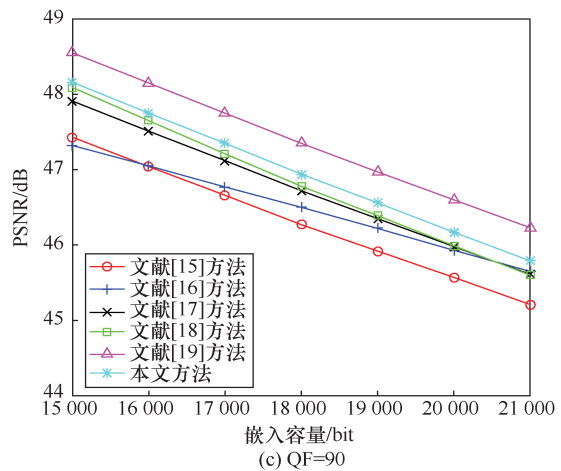
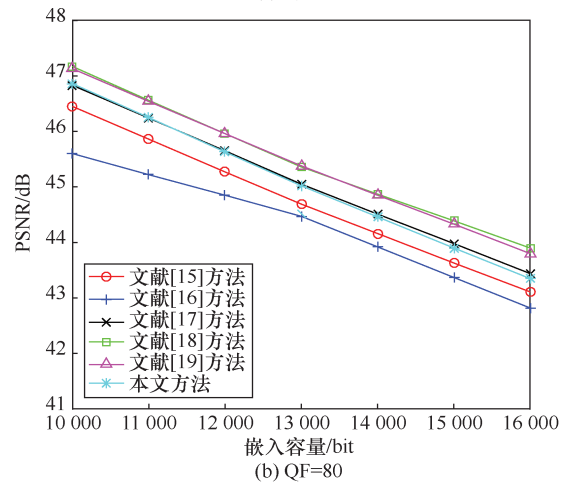
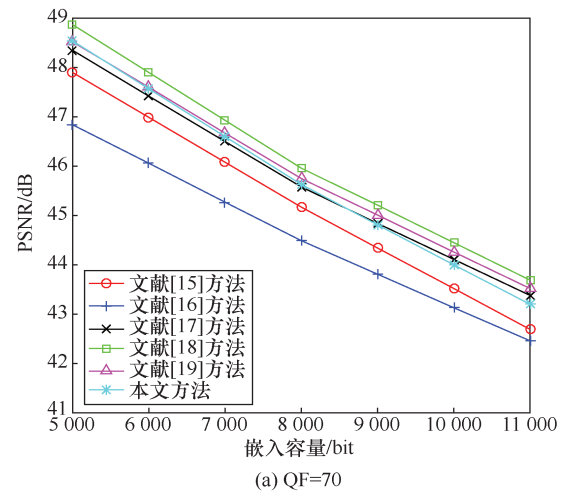


图9 测试图像的平均 PSNR 值
Figure 9 The average PSNR value of the test images

别比文献[15-18]提高 0.566 9 dB、0.131 7 dB、0.173 3 dB、0.179 9 dB。另外,计算复杂度也能体现算法的优越性,一个优异的算法能够在消耗较少时间的同时得到较好的结果。本文从 BossBase-1.01 数据集中随机选取 100 张图片,分

表 2 不同质量因子时, 6 种方法下峰值信噪比的比较
Table 2 Comparison of peak signal-to-noise ratio under six methods with different quality factors

图像	方法	嵌入容量/bit (QF = 70)			嵌入容量/bit (QF = 80)			嵌入容量/bit (QF = 90)		
		5 000	8 000	11 000	10 000	13 000	16 000	15 000	18 000	21 000
Lena	文献[15]	48.186 1	45.336 4	43.165 4	47.141 8	45.313 3	43.613 0	48.616 3	47.527 4	46.321 1
	文献[16]	46.880 4	44.571 8	42.484 4	45.828 2	44.493 6	43.175 8	47.808 1	47.137 1	46.386 6
	文献[17]	48.581 0	45.628 9	43.435 3	47.320 8	45.498 6	43.807 9	48.853 8	47.607 3	46.390 1
	文献[18]	49.046 6	45.910 6	43.737 1	47.665 2	45.763 5	44.071 1	49.144 3	47.829 1	46.640 3
	文献[19]	48.720 8	45.781 6	43.485 0	47.491 9	45.638 8	44.070 1	49.615 4	48.321 7	47.061 7
	本文	48.502 1	45.573 2	43.164 6	47.216 4	45.290 5	43.581 1	49.137 0	47.818 7	46.539 4
Peppers	文献[15]	48.005 5	45.514 7	43.453 0	46.714 3	45.138 5	43.647 1	46.693 0	45.587 4	44.570 0
	文献[16]	47.658 9	44.934 6	43.161 9	45.905 3	45.345 3	43.912 2	48.070 2	47.177 3	46.210 1
	文献[17]	48.654 6	46.043 6	44.053 9	47.270 2	45.649 6	44.269 1	47.943 0	46.771 0	45.695 7
	文献[18]	49.384 9	46.610 6	44.486 9	47.676 2	45.974 6	44.589 7	47.716 0	46.398 4	45.175 1
	文献[19]	49.044 7	46.217 9	44.217 9	47.622 8	45.973 4	44.537 1	48.998 3	47.847 9	46.755 7
	本文	48.967 2	46.168 8	44.053 8	47.375 9	45.809 3	44.322 1	48.418 2	47.330 9	46.278 0
Tiffany	文献[15]	48.142 0	44.949 2	42.632 8	46.717 3	44.817 4	43.206 4	48.703 6	47.421 7	46.197 0
	文献[16]	47.143 4	45.047 0	43.053 5	46.647 1	45.105 5	43.653 9	48.632 8	47.568 1	46.513 7
	文献[17]	48.719 9	45.747 6	43.620 1	47.551 5	45.613 1	43.805 7	49.215 8	47.943 0	46.631 4
	文献[18]	49.302 2	46.211 0	43.928 9	47.815 7	45.929 0	44.028 7	49.435 6	47.957 3	46.591 7
	文献[19]	48.821 4	45.865 3	43.683 8	47.720 3	45.865 8	44.265 6	49.702 0	48.408 3	47.169 4
	本文	48.943 8	45.765 1	43.439 5	47.511 3	45.453 2	43.811 6	49.544 4	48.143 4	46.696 0
Baboon	文献[15]	45.384 2	42.547 2	40.107 5	42.689 6	40.654 5	39.033 7	42.729 6	41.404 4	40.332 2
	文献[16]	42.886 5	40.899 0	38.903 6	41.139 2	39.997 0	38.861 6	41.942 3	40.869 5	40.199 2
	文献[17]	45.765 4	42.851 2	40.584 2	42.861 6	40.770 8	39.165 4	42.717 2	41.474 5	40.373 1
	文献[18]	46.132 1	43.163 6	40.846 1	43.104 5	41.159 6	39.574 7	43.046 3	41.725 6	40.603 9
	文献[19]	46.007 7	43.191 9	41.059 0	43.481 0	41.570 4	39.911 7	43.428 5	42.117 3	40.987 1
	本文	45.795 2	42.865 9	40.603 9	42.779 8	40.771 9	39.228 5	42.661 2	41.392 5	40.307 7
平均值	文献[15]	49.826 2	47.525 2	44.137 4	48.993 7	47.532 1	46.069 2	50.429 9	49.448 2	48.678 5
	文献[16]	49.674 4	47.001 2	44.708 5	48.999 3	47.455 7	45.336 1	50.174 5	49.780 9	48.965 3
	文献[17]	50.032 9	47.629 7	45.209 7	49.188 0	47.750 9	46.175 5	50.839 7	49.838 8	48.976 3
	文献[18]	50.527 8	47.945 2	45.471 5	49.594 7	47.988 7	46.282 7	51.125 0	50.012 8	49.022 6
	文献[19]	50.073 5	47.726 8	45.159 1	49.344 6	47.873 6	46.242 9	51.048 6	50.058 1	49.194 7
	本文	50.471 0	47.753 9	44.676 6	49.430 8	47.797 1	45.809 8	51.049 6	50.014 6	49.111 9
Average	文献[15]	47.908 8	45.174 5	42.699 2	46.451 3	44.691 1	43.113 8	47.434 4	46.277 8	45.219 7
	文献[16]	46.848 7	44.490 7	42.462 3	45.703 8	44.479 4	42.987 9	47.325 5	46.506 5	45.654 9
	文献[17]	48.350 7	45.580 2	43.380 6	46.838 4	45.056 6	43.444 7	47.913 9	46.726 9	45.613 3
	文献[18]	48.878 7	45.968 2	43.694 1	47.171 2	45.363 0	43.909 3	48.093 4	46.782 6	45.606 7
	文献[19]	48.525 9	45.756 7	43.520 9	47.132 1	45.384 4	43.805 4	48.558 5	47.350 6	46.233 7
	本文	48.535 8	45.625 3	43.187 6	46.862 8	45.024 4	43.350 6	48.162 0	46.940 0	45.786 6

别压缩成质量因子为 70、80、90 的 JPEG 图像, 分别嵌入 5 000 bit、10 000 bit、15 000 bit 时所消耗的平均嵌入时间, 如表 3 所示。可以看出, 文献[15,16]的平均嵌入时间较短, 主要原因是这两种算法没有对选择的信息嵌入位置进行优化, 而文献[17-19]的平均嵌入时间较长。本文方法在选择嵌入失真最低的位置集合时花费了一定时间, 但是相比文献[17-19]仍是可接受的。

表 3 不同质量因子时, 在 BossBase-1.01 数据集中各方法的平均嵌入时间对比

Table 3 Comparison of average embedding time of algorithms in BossBase-1.01 data set with different quality factors

QF	平均嵌入时间/s				
	文献[15]	文献[16]	文献[17]	文献[18]	文献[19]
70	0.08	0.19	18.65	27.03	43.70
80	0.10	0.22	21.37	25.59	55.55
90	0.12	0.21	19.67	36.72	65.21

除此之外, 针对目前基于二维直方图嵌入信息容量低的问题, 本文设计的二维直方图映射策略能够提高 JPEG 图像的嵌入容量, 与文献[26]进行测试图像嵌入容量的对比, 如图 10 所示。

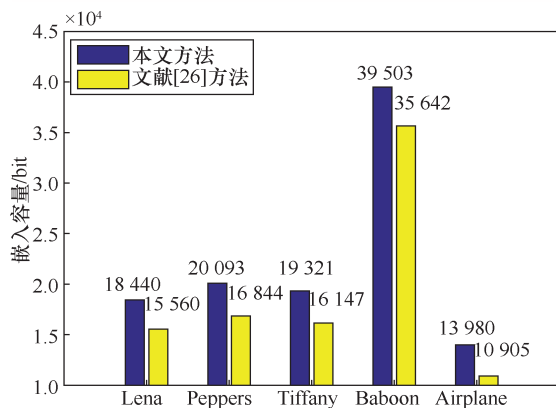


图 10 测试图像嵌入容量的对比 (QF=70)

Figure 10 The average file size extension of the test images(QF=70)

综上, 本文方法有效降低了载密图像文件大小的扩展, 同时在嵌入容量、载密图像的视觉质量以及算法复杂度方面具有良好的性能。

3 结束语

本文提出了一种新的基于最优 DCT 频段嵌入的 JPEG 图像可逆信息隐藏方法, 该方法首先

将 DCT 块根据平均纹理复杂度进行升序排序; 其次将相邻 DCT 块的相同 AC 系数频段进行系数配对; 然后求出每个 AC 系数频段的单位失真; 最后通过本文设计的二维直方图映射进行秘密信息嵌入。实验结果表明, 与现有方法相比, 该方法在保证较好的峰值信噪比的同时, 能有效降低嵌入信息后文件存储大小的扩展。在以后的研究中, 将继续挖掘频段 AC 系数的相关性, 进一步提高嵌入性能。

参考文献:

- [1] 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(1): 3210-3237.
- [2] BARTON J M. Method and apparatus for embedding authentication information within digital data[P]. United States Patent, No: 5646997, 1997.
- [3] FRIDRICH J, GOLJAN M, DU R. Lossless data embedding for all image formats[J]. Security and Watermarking of Multimedia Contents IV, 2002, 4675(1): 572-583.
- [4] WANG K, LU Z M, HU Y J. A high capacity lossless data hiding scheme for JPEG images[J]. Journal of Systems and Software, 2013, 86(7): 1965-1975.
- [5] CHEN L S T, LIN S J, LIN J C. Reversible JPEG-based hiding method with high hiding-ratio[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2010, 24(3): 433-456.
- [6] MOBASSERI B G, BERGER R J, MARCINAK M P, et al. Data embedding in JPEG bitstream by code mapping[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 19(4): 958-966.
- [7] QIAN Z X, ZHANG X PENG. Lossless data hiding in JPEG bitstream[J]. Journal of Systems and Software. 2012, 85(2): 309-313.
- [8] DU Y, YIN Z X, ZHANG X P. Improved lossless data hiding for JPEG images based on histogram modification[J]. Comput Mater Cont, 2018, 55(3): 495-507.
- [9] DU Y, YIN Z X, ZHANG X P. High capacity lossless data hiding in JPEG bitstream based on general VLC mapping[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2020, 55(3): 1420-1433.
- [10] QIU Y Q, HE H, QIAN Z X, et al. Lossless data hiding in JPEG bitstream using alternative embedding[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2018, 52: 86-91.
- [11] QIU Y Q, QIAN Z X, HE H, et al. Optimized lossless data hiding in JPEG bitstream and relay transfer-based extension[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2020, 31(4): 1380-1394.
- [12] ZHANG C, OU B, TIAN H W, et al. Reversible data hiding in JPEG bitstream using optimal VLC mapping[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2020, 71: 102821.
- [13] DU Y, YIN Z X. New framework for code-mapping-based reversible data hiding in JPEG images[J]. Information Sciences, 2022, 609: 319-338.

- [14] XUAN G R, SHI Y Q, NI Z C, et al. Reversible data hiding for JPEG images based on histogram pairs[C]//Proceeding of the International Conference Image Analysis and Recognition. 2007: 715-727.
- [15] HUANG F J, QU X C, KIM H J, et al. Reversible data hiding in JPEG images[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016, 26(9): 1610-1621.
- [16] WEDAJ F T, KIM S, KIM H J, et al. Improved reversible data hiding in JPEG images based on new coefficient selection strategy[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2017, 2017: 1-11.
- [17] HOU D D, WANG H Q, ZHANG W M, et al. Reversible data hiding in JPEG image based on DCT frequency and block selection[J]. Signal Processing, 2018, 148: 41-47.
- [18] YIN Z X, JI Y, LUO B. Reversible data hiding in JPEG images with multi-objective optimization[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2020, 30(8): 2343-2352.
- [19] HE J H, CHEN J X, TANG S H. Reversible data hiding in JPEG images based on negative influence models[J]. IEEE Transaction Security, 2020, 15: 2121-2133.
- [20] DI F Q, ZHANG M Q, HUANG F J, et al. Reversible data hiding in JPEG images based on zero coefficients and distortion cost function[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(24): 34541-34561.
- [21] YAO H, MAO F Y, QIN C, et al. Dual-JPEG-image reversible data hiding[J]. Information Sciences, 2021, 563: 130-149.
- [22] LYU W, GUO H N, DU Y, et al. Multi-domain reversible data hiding in JPEG images[C]//ACM Turing Award Celebration Conference. 2021: 241-247.
- [23] ZHAN W Y, YAO H. Reversible data hiding for JPEG images with a cascaded structure[J]. IET Image Processing, 2022, 16(5): 1486-1499.
- [24] CHEN K J, ZHOU H, HOU D D, et al. Reversible data hiding in JPEG images under multi-distortion metric[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2020, 31(10): 3942-3953.
- [25] 陆兴, 黄方军. 基于二维直方图修改的 JPEG 图像可逆信息隐藏[J]. 网络空间安全, 2019, 10(8): 55-64.
LU X, HUANG F J. Reversible information hiding in JPEG images based on two-dimensional histogram modification[J]. Security in Cyberspace, 2019, 10(8): 55-64.
- [26] LI N, HUANG F J. Reversible data hiding for JPEG images based on pairwise nonzero AC coefficient expansion[J]. Signal Processing, 2020, 171: 107476.
- [27] HE B, Chen Y, Zhou Y, et al. A novel two-dimensional reversible data hiding scheme based on high-efficiency histogram shifting for JPEG images[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2022, 18(3).
- [28] OU B, LI X L, ZHAO Y, et al. Pairwise prediction-error expansion for efficient reversible data hiding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(12): 5010-5021.

[作者简介]



周子扬（1999—），男，湖南益阳人，中南林业科技大学硕士生，主要研究方向为可逆信息隐藏。



谭云（1980—），女，湖南浏阳人，中南林业科技大学副教授，主要研究方向为信息安全、图像处理。



秦姣华（1973—），女，湖南沅江人，中南林业科技大学教授，主要研究方向为网络信息安全、图像检索、模式识别。



向旭宇（1972—），男，湖南沅江人，中南林业科技大学教授，主要研究方向为网络信息安全、图像检索、模式识别。