

## 基于整数变换的自适应图像可逆水印方法

邱应强<sup>\*①②</sup> 余 轮<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(福州大学数字媒体研究院 福州 360002)

<sup>②</sup>(华侨大学信息科学与工程学院 厦门 361021)

**摘要:** 为保证水印图像质量并提高嵌入水印数据量, 该文提出一种基于整数变换的自适应图像可逆水印方法。该方法定义了一种新的一般化整数变换算法, 对于任意像素点组成的图像块向量进行简单的整数变换后, 将产生一定的冗余数据可用于嵌入水印数据。该方法进一步根据图像块向量自身方差大小自适应选择参数  $m$  值进行整数变换, 在平滑图像块中嵌入更多数据, 同时避免复杂图像块中引入较大失真, 从而保证具有较高的嵌入容量和较好的水印图像质量。与同类算法对比的实验结果表明, 该方法增大了最大数据嵌入容量, 以 Lena 为宿主图像时有效载荷可达 2.36 bpp。该文整数变换算法运算简单, 通过自适应选择参数进行整数变换并嵌入数据可保证水印图像质量并实现较大的有效载荷。

**关键词:** 图像处理; 可逆水印; 整数变换; 有效载荷; 图像质量

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2014)06-1278-07

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2013.01528

## Adaptive Reversible Image Watermarking Method Based on Integer Transform

Qiu Ying-qiang<sup>①②</sup> Yu Lun<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Research Academy of Digital Media, Fuzhou University, Fuzhou 360002, China)

<sup>②</sup>(College of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** To ensure the quality of watermarked image and improve the embedding capacity of watermarks, an adaptive image reversible watermarking method based on interger transform is proposed in this paper, which defines a new generalized integer transform algorithm. Through the use of the method the image blocks of arbitrary sized are transformed, producing certain redundancy data that can be used for watermarking embedding. In addition, the parameter  $m$  used for integer transform is adaptively selected according to the variance of every image block, hence allowing for embedding more data bits into the smooth blocks while avoiding large distortion generated by complex ones, and thus the algorithm ensures a higher embedding capacity and better quality of watermarked image. Compared with similar algorithms, the experimental results show that the proposed method has larger maximal embedding capacity and taking Lena as a host image, the real payload can reach up to 2.36 bpp. The proposed integer transform algorithm is simple; through adaptively interger transforming and data embedding, the quality of watermarked image can be assured and the method offers a large real payload.

**Key words:** Image processing; Reversible watermarking; Integer transform; Real payload; Image quality

### 1 引言

图像水印可分为可逆水印和不可逆水印两类。与传统的不可逆水印相比, 可逆水印在提取宿主图像中嵌入的水印信息后还能无失真恢复原宿主图像。利用宿主图像可逆恢复的特性, 可逆水印技术可广泛应用于对图像质量要求较高的军事情报、医学诊断和法律论证等领域, 近年来得到了广泛的发展。

可逆水印算法性能一般采用有效载荷、水印图像质量和算法复杂度来评估。有效载荷指嵌入水印容量的大小, 由于嵌入水印信息后将导致图像质量的下降并降低水印的不可见性, 图像质量与有效载荷之间存在矛盾。对此, 国内外学者进行了深入研究并提出了一系列算法, 有基于压缩技术的算法<sup>[1]</sup>、基于差值扩展的算法<sup>[2-11]</sup>、基于直方图平移算法<sup>[12-16]</sup>和基于整数变换的算法<sup>[17-21]</sup>等。最早的可逆水印方法出自文献[1]提出的专利技术, 该方法通过无损压缩原始数据流来挤出一定的空间嵌入有用的认证信息。文献[2]首次提出了基于相邻两像素点

2013-10-08 收到, 2014-01-08 改回

国家自然科学基金(61372107, 61302094)资助课题

\*通信作者: 邱应强 yqiu@hqu.edu.cn

Harr 整数小波变换的差值扩展技术, 该方法在可逆数据嵌入领域得到了广泛的关注和发展。其中, 文献[3]将差值扩展技术拓展到多像素点组成的图像块中, 文献[4]给出了基于相邻两像素点差值扩展和直方图平移的可逆水印方法, 并进一步拓展为基于预测差值扩展和直方图平移的可逆水印方法, 取得了一定的效果。此后, 许多学者也提出了基于差值扩展的改进算法, 算法大多基于两像素点的差值扩展平移<sup>[5-7]</sup>和预测差值的扩展平移<sup>[8-11]</sup>。文献[12]首次提出基于直方图平移的可逆数据嵌入方法, 此后也出现了一些基于直方图平移的改进算法<sup>[13-16]</sup>, 这类算法数据嵌入量较少, 相应地图像质量较高。在基于整数变换的可逆水印算法上, 文献[17]通过可逆对比度映射的整数变换将相邻两像素点之间的差值扩展到3倍并在其中嵌入2 bit 数据。文献[18]将文献[2]中的差值扩展算法中的 Haar 整数小波变换、差值扩展嵌入数据和整数逆变换3个过程直接用一组整数变换并嵌入数据的表达式实现, 进而推广得到多像素点的一般化整数变换表达式, 实现了一种较为高效的可逆水印方法。以上方法单次嵌入时, 嵌入的最大有效载荷低于1.0 bpp, 数据嵌入量较小。文献[19]给出了一种通过对多像素点的图像块向量进行整数变换实现图像可逆水印的方法, 当整数变换表达式参数 $k > 2$ 时, 嵌入的最大有效载荷可高于1.0 bpp, 提高了数据嵌入容量, 但其整数变换表达式较为复杂, 算法复杂度较高。文献[20]在将复杂的文献[2]的差值扩展算法和文献[3]的差值扩展算法转换成一组整数变换表达式的基础上, 分析文献[19]整数变换表达式并提出通过预估整数变换引入的图像块失真自适应选择变换参数 $k$ 值, 在平滑图像块中嵌入更多的数据而在复杂图像块中避免大的失真, 从而保证图像质量的同时提高嵌入容量。文献[21]则将文献[20]中的自适应整数变换方法结合基于分块的压缩感知实现了一种基于分块自适应压缩感知的可逆水印算法。

本文针对图像质量与有效载荷之间的矛盾, 提出了一种基于图像块向量的一般化整数变换新算法, 可对任意大小的图像块向量进行整数变换并产生一定的冗余数据用于嵌入水印。为了保证水印图像质量并提高嵌入水印数据量, 可进一步根据各图像块向量方差的大小自适应选择整数变换参数 $m$ 值, 对方差值较小的平滑图像块选择较大的 $m$ 值进行整数变换并在其中嵌入较多的水印数据, 而对于方差值较大的复杂图像块则选择较小的 $m$ 值进行整数变换或者不进行整数变换避免其中引入较大失真。

## 2 自适应可逆水印算法

### 2.1 可逆整数变换算法

将大小为 $N_1 \times N_2$ 的 $k$ 级灰度值的宿主图像分块(一般 $k = 256$ ), 图像块大小为 $n = n_1 \times n_2$ , 图像块像素点组成 $n$ 维整数向量 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}^n$  ( $0 \leq x_i \leq k-1, 1 \leq i \leq n$ ), 计算向量平均值 $\bar{x}$ 。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

对 $\mathbf{x}$ 中各元素作如下线性变换:

$$\begin{aligned} y'_i &= T_1(x_i) = x_i + (2^m - 1)(x_i - \bar{x}) \\ &= 2^m x_i - (2^m - 1)\bar{x} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中 $m \geq 1$ ,  $2^m x_i$ 值为整数,  $(2^m - 1)\bar{x}$ 值可能带小数部分, 其小数部分可设为 $(n'/n)(n' \in [0, 1, \dots, n-1])$ , 为了得到整数结果, 可对 $T_1$ 线性变换结果再作如下变换:

$$y_i = T_2(y'_i) = 2^m x_i - [(2^m - 1) \cdot \bar{x}] \quad (3)$$

$\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整运算。经两次变换后, 得到 $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_i, \dots, y_n) \in \mathbb{Z}^n$ , 有

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n y_i &= 2^m \sum_{i=1}^n x_i - [(2^m - 1) \sum_{i=1}^n x_i - n'] \\ &= \sum_{i=1}^n x_i + n' \end{aligned} \quad (4)$$

由于经两次变换后满足

$$\begin{aligned} \frac{ny_i + (2^m - 1) \sum_{i=1}^n y_i}{2^m n} &= \left\{ n \left( 2^m x_i - \frac{(2^m - 1)}{n} \sum_{i=1}^n x_i + \frac{n'}{n} \right) + (2^m - 1) \cdot \left( \sum_{i=1}^n x_i + n' \right) \right\} / (2^m n) \\ &= \frac{n \cdot 2^m x_i + 2^m n'}{2^m n} = x_i + \frac{n'}{n} \end{aligned} \quad (5)$$

根据前面讨论可知 $x_i$ 为整数且 $0 \leq n'/n < 1$ , 因此对应的逆变换为

$$x_i = \left\lfloor \frac{ny_i + (2^m - 1) \sum_{i=1}^n y_i}{2^m n} \right\rfloor \quad (6)$$

由式(3)可知, 任意向量 $\mathbf{x}$ 经整数变换后所有元素对 $2^m$ 模运算同余, 因为结果都是能被 $2^m$ 整除的数减去一个相同的数 $[(2^m - 1)\bar{x}]$ , 有

$$y_i \bmod 2^m \equiv y_j \bmod 2^m, \quad 1 \leq i, j \leq n \quad (7)$$

将变换后 $\mathbf{y}$ 中所有元素转换成二进制数, 则所有元素最低 $m$ 个比特有效位数完全相同, 只需要保存其

中一个元素最低  $m$  个比特有效位数, 其余元素中共有  $m \cdot (n-1)$  个比特有效位数可看作冗余数据用于数据嵌入。

整数变换不可避免地会对整数向量引入误差, 误差大小可用整数变换前后的  $l^2$  误差来衡量:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2 &= \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \\ &= \sum_{i=1}^n ((2^m - 1)x_i - [(2^m - 1)\bar{x}])^2 \\ &\approx (2^m - 1)nV(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中  $V(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n$  代表宿主图像块向量  $\mathbf{x}$  的方差, 该值由宿主图像块决定。为了减少整数变换引入误差, 一方面可选择方差值较小的图像块向量进行整数变换并嵌入数据; 另一方面由式(8)可知  $\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2 \propto (2^m - 1)$ ,  $m$  值越大将产生越多的冗余数据用于数据嵌入, 相应地整数变换引入的误差也越大。进一步地, 可用整数变换前后图像块向量峰值信噪比  $\text{PSNR}_{(y,x)}$  来客观评价整数变换引入的图像块误差

$$\begin{aligned} \text{PSNR}_{(y,x)} &= 10 \lg \frac{(k-1)^2}{\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2 / n} \\ &= 10 \lg \frac{1}{(2^m - 1)^2} + 10 \lg \frac{n(k-1)^2}{V(\mathbf{x})} \end{aligned} \quad (9)$$

取  $k = 256$  时, 对于同一个图像块向量  $\mathbf{x}$  以  $m = 1$  为基准,  $m = 2$  时图像块向量峰值信噪比  $\text{PSNR}_{(y,x)}$  将降低 9.54 dB,  $m = 3$  时图像块向量峰值信噪比  $\text{PSNR}_{(y,x)}$  将降低 16.90 dB, 相应地嵌入数据量为  $(n-1)$  bit 的  $m$  倍。若  $\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2$  值较小时,  $m$  增大导致  $\text{PSNR}_{(y,x)}$  降低对图像块质量影响较小, 可选择较大  $m$  值提高数据嵌入容量; 若  $\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2$  值较大时,  $m$  增大  $\text{PSNR}_{(y,x)}$  降低将较严重地影响图像块质量,  $m$  值不能选择太大以保证图像质量。由于  $\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2 \propto V(\mathbf{x})$ , 可根据图像块向量方差值  $V(\mathbf{x})$  的大小自适应选择  $m$  值以提高数据嵌入容量并保证图像质量。

## 2.2 自适应数据嵌入

由于  $k$  级灰度值范围为  $[0, k-1]$ , 要求整数变换结果向量  $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_i, \dots, y_n)$  中所有元素必须在灰度值的有效范围内, 否则将出现像素值溢出引入极大的误差并造成无法无失真恢复原向量  $\mathbf{x}$  的后果。为了更好讨论整数变换引起像素值溢出问题, 定义集合  $A = \{\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}^n : 0 \leq x_i \leq k-1\}$ ,  $A$  代表了  $n$  维图像块向量所有可能的像素值组合。定义  $A$  的系列子集  $A_m = \{\mathbf{x} \in A : 0 \leq 2^m \cdot x_i - [(2^m - 1) \cdot \bar{x}] \leq k-1, \mathbf{x} \in A_m\}$  表明向量  $\mathbf{x}$  可通过式(3)进行整数变换并在其中嵌入  $m \cdot (n-1)$  bit 不会造成像素值溢出。对于任意向量  $\mathbf{x} \in A$ , 需要根据预先设

定的阈值  $T$  和向量方差  $V(\mathbf{x})$  自适应选择  $m$  值的大小进行整数变换并在其中嵌入不同大小的数据, 为了控制整数变换误差  $\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2 \leq n \cdot T$ ,  $m$  最大值为 3 时的具体选择方法分以下 4 种情况实现。

(1) 当  $V(\mathbf{x}) > T$  时, 归为集合  $\bar{E}$ , 该向量不作整数变换处理, 避免整数变换误差  $\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2 \geq n \cdot T$ 。

(2) 当  $T/9 < V(\mathbf{x}) \leq T$  时, 若  $\mathbf{x} \in A_1$ , 该向量归为集合  $E_1$ , 对该向量取  $m = 1$  进行整数变换, 根据式(8)可控制  $n \cdot T/9 < \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2 \leq n \cdot T$ ; 否则, 将该向量归为集合  $\bar{E}$ , 对该向量不作整数变换处理。

(3) 当  $T/49 < V(\mathbf{x}) \leq T/9$  时, 若  $\mathbf{x} \in A_2$ , 该向量归为集合  $E_2$ , 对该向量取  $m = 2$  进行整数变换, 根据式(8)可控制  $9n \cdot T/49 < \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2 \leq n \cdot T$ ; 若  $\mathbf{x} \notin A_2, \mathbf{x} \in A_1$ , 则该向量归为集合  $E_1$ , 对该向量取  $m = 1$  进行整数变换, 相应地  $n \cdot T/49 < \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2 \leq n \cdot T/9$ ; 否则, 将该向量归为集合  $\bar{E}$ , 对该向量不作整数变换处理。

(4) 当  $V(\mathbf{x}) \leq T/49$  时, 若  $\mathbf{x} \in A_3$ , 该向量归为集合  $E_3$ , 对该向量取  $m = 3$  进行整数变换, 根据式(8)可控制  $\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2 \leq n \cdot T$ ; 若  $\mathbf{x} \notin A_3, \mathbf{x} \in A_2$ , 该向量归为集合  $E_2$ , 对该向量取  $m = 2$  进行整数变换, 相应地  $\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2 \leq 9n \cdot T/49$ ; 若  $\mathbf{x} \notin A_3, \mathbf{x} \notin A_2, \mathbf{x} \in A_1$ , 则该向量归为集合  $E_1$ , 对该向量取  $m = 1$  进行整数变换, 对应的整数变换误差  $\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_2^2 \leq n \cdot T/49$ ; 否则, 将该向量归为集合  $\bar{E}$ , 对该向量不作整数变换处理。

集合  $\bar{E}$  为未变换向量集合, 集合  $E = E_1 \cup E_2 \cup E_3$  为变换向量集合。为了保证能够正确盲提取嵌入数据并无损恢复图像块向量, 接收端需要明确图像块向量为未变换向量还是变换向量以及变换向量整数变换所使用参数  $m$  的大小。本文采用多层二值位置图 LM 来进行区分: 第 1 层位置图  $\text{LM}_1$ , 集合  $\bar{E}$  中的向量在  $\text{LM}_1$  用“0”值标记, 集合  $E$  中的向量在  $\text{LM}_1$  用“1”值标记; 第 2 层位置图  $\text{LM}_2$  只需进一步区分  $E_1$  和  $E_2 \cup E_3$ , 集合  $E_1$  中的向量用“0”值标记, 集合  $E_2 \cup E_3$  中的向量用“1”值标记; 第 3 层位置图  $\text{LM}_3$  最终用来区分  $E_2$  和  $E_3$ , 集合  $E_2$  中的向量用“0”值标记, 集合  $E_3$  中的向量用“1”值标记。位置图  $\text{LM} = \text{LM}_1 + \text{LM}_2 + \text{LM}_3$  采用 JBIG 无损压缩算法进行压缩得到数据 CLM, 需作为待嵌入数据的一部分。

集合  $E$  中的变换向量自适应选择  $m$  值并进行整数变换后不会造成像素值溢出, 产生的  $m \cdot (n-1)$  个比特冗余数据用待嵌入数据直接替代同样不会出现像素值溢出, 而集合  $\bar{E}$  中的未变换向量则保留不变。为了保证接收端能够盲提取嵌入数据和无失真恢复

原图像，还需要嵌入少量的辅助信息 AI，发送端自适应数据嵌入具体实现步骤为：

步骤 1 发送端将大小为  $N_1 \times N_2$  的  $k$  级灰度宿主图像分成  $N$  个大小为  $n = n_1 \times n_2$  的图像块并组成  $n$  维向量  $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_i, \dots, \mathbf{x}_N\}$ ,  $\mathbf{x}_i = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_n)$ ，并计算向量的方差值  $V(\mathbf{x}_i)$ ；

步骤 2 各向量根据方差  $V(\mathbf{x}_i)$  与设定  $T$  之间的大小关系按前文所述自适应  $m$  值选择方法选择合适的  $m$  值并对各向量进行分类，变换图像块用选择的  $m$  值进行整数变换，未变换图像块保留不变；

步骤 3 根据向量分类结果建立多层二值位置图 LM，并采用 JBIG 无损压缩算法压缩得到数据 CLM；水印数据  $W$  进行加密得到数据 SW。AI, CLM 与 SW 组成待嵌入数据；

步骤 4 根据部分辅助信息长度  $l_{AI}$  和压缩位置图长度  $l_{CLM}$ ，计算  $M = \lceil (l_{CLM} + l_{AI})/n \rceil$  ( $\lceil \cdot \rceil$  表示向上取整运算)，将  $\mathbf{X}$  分成  $\mathbf{X}_1 = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_M\}$  和  $\mathbf{X}_2 = \{\mathbf{x}_{M+1}, \dots, \mathbf{x}_N\}$  两部分，将 SW 中的部分数据  $SW_1$  根据步骤 2 确定  $m$  值直接替代集合  $\mathbf{X}_1$  中的变换向量经整数变换后除特定元素外的最低  $m$  个比特有效位数，得到  $\mathbf{Y}_1$ ；

步骤 5 提取  $\mathbf{Y}_1$  中所有向量元素最低有效位数，得到 LSB 序列，将 LSB 和 SW 中的剩余数据  $SW_2$  同样根据步骤 2 确定  $m$  值直接替代集合  $\mathbf{X}_2$  中的变换向量经整数变换后除特定元素外的最低  $m$  个比特有效位数，得到  $\mathbf{Y}_2$ 。将 AI 和 CLM 数据依次取代  $\mathbf{Y}_1$  中向量元素最低有效位完成数据嵌入，得到  $\mathbf{Y}'_1$ ；

步骤 6 所有向量代表的图像块重组最终得到水印图像。

### 2.3 提取数据及无失真恢复宿主图像

接收端提取水印并无失真恢复原宿主图像过程是发送端水印嵌入的逆过程，具体实现步骤为：

步骤 1 按发送端相同的方式对水印图像进行分块并组成图像块向量  $\mathbf{Y} = \{\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_N\}$ ；

步骤 2 通过读取图像块的最低有效位，得到辅助信息 AI 和压缩位置图 CLM，CLM 用 JBIG 无损压缩算法解压得到多层二值位置图 LM，进一步

分解得到各层位置图  $LM_1, LM_2$  和  $LM_3$ ；

步骤 3 根据辅助信息 AI 和压缩位置图 CLM 的大小  $l_{AI}, l_{CLM}$ ，可确定  $m$  值并将  $\mathbf{Y}$  分成  $\mathbf{Y}'_1 = \{\mathbf{y}'_1, \dots, \mathbf{y}'_M\}$  和  $\mathbf{Y}_2 = \{\mathbf{y}_{M+1}, \dots, \mathbf{y}_N\}$  两个集合。根据位置图  $LM_1, LM_2$  和  $LM_3$ ，依次确定  $\mathbf{Y}_2$  中已变换向量所用  $m$  值大小，从已变换图像块中提取除特定元素外其余元素最低  $m$  个比特有效位数。已变换向量用特定元素最低  $m$  个比特有效位数恢复其余元素最低  $m$  个比特有效位数，用式(6)无失真恢复；

步骤 4 从步骤 3 提取的数据中分离出 LSB 和  $SW_2$ ，用 LSB 依次  $\mathbf{Y}'_1$  中向量元素最低有效位恢复  $\mathbf{Y}_1$ 。根据位置图  $LM_1, LM_2$  和  $LM_3$ ，依次确定  $\mathbf{Y}_1$  中已变换向量所用  $m$  值大小，对已变换图像块向量，提取除特定元素外其余元素最低  $m$  个比特有效位数，得到  $SW_1$ 。已变换向量同样用特定元素最低  $m$  个比特有效位数恢复其余元素最低  $m$  个比特有效位数，再用式(6)无失真恢复；

步骤 5 组合  $SW_1$  和  $SW_2$  并解密得到水印数据 SW。所有恢复向量代表的图像块重组无失真得到原宿主图像。

## 3 实验与结果分析

为了验证上述可逆水印方法，本文在配备 Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU, 4 G 内存, Windows 7 操作系统联想笔记本电脑上，以 Visual C++6.0 和 Matlab 2010a 为实验软件平台进行了仿真实验。实验选用 Lena, Barbara, Baboon, Airplane (F-16), Goldhill 和 Lake 6 幅大小为  $512 \times 512$  的 8 bit 灰度图像作为宿主图像，如图 1 所示。实验采用单位像素有效载荷 (Payload(bpp)) 和峰值信噪比 (PSNR(dB)) 分别衡量水印数据嵌入量和水印图像质量。

### 3.1 不同图像块大小的算法性能比较

对于特定大小为  $n$  的图像块向量，根据向量方差确定整数变换参数  $m$  值，整数变换后该图像块的单位像素有效载荷为  $(n-1) \cdot m/n$  bpp。一方面，若  $n$  变化  $m$  值保持不变，则  $n$  越大相应地数据嵌入容量越大；另一方面，随着  $n$  值增大，图像块中的像

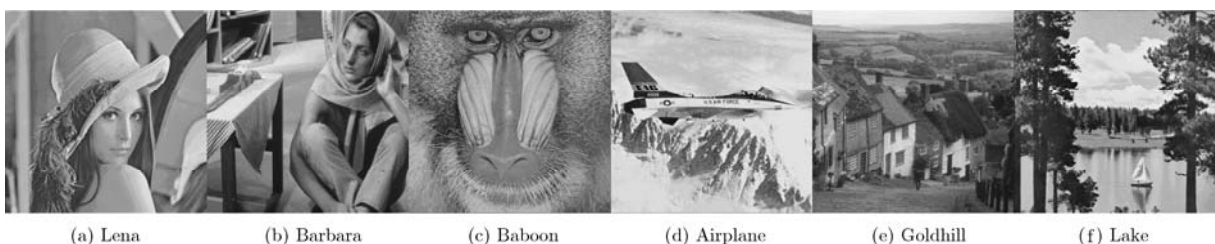


图 1 实验测试图像

素点相似性降低，向量方差值增大将导致  $m$  变小或引入图像块失真增大，会导致数据嵌入容量变小或图像质量下降。因此，需要选取合适的图像块大小  $n$ 。

图 2 给出了 Lena 作为宿主图像， $m$  最大取值为 3，分别选用  $n = 2 \times 2, n = 4 \times 4, n = 8 \times 8$  和  $n = 16 \times 16$  时算法性能曲线。从图 2 中可以看出当嵌入少量数据时， $n = 8 \times 8$  对应的水印图像质量最好，随着嵌入数据量的增大，在嵌入相同数据量的情况下， $n = 4 \times 4$  对应的水印图像质量全面优于其余 3 种图像块参数的水印图像质量。表 1 给出了 6 幅测试图像分别取上述 4 种图像块大小参数情况下最大数据嵌入容量，很明显对于这几幅测试图像  $n = 4 \times 4$  时能嵌入更多的水印数据。

### 3.2 最大 $m$ 取值不同时的算法性能比较

本文方法定义了一般化的可逆整数变换算法，设  $m$  最大取值为  $\max(m)$ ，理论上讲对于 8 bit 灰度图像  $1 \leq \max(m) \leq 8$ 。图 3 给出了 Lena 作为宿主图像， $n = 4 \times 4, \max(m)$  分别为 1, 2, 3 和 4 时算法性能曲线。从图 3 中可以看出当嵌入数据量较小时， $\max(m)$  取值对图像质量影响不大。但随着嵌入数据量增大，设定的阈值  $T$  也增大，当  $\max(m)$  取较大值时将产生更多图像块可在引入失真较小情况下嵌入更多的水印数据。因此，从图 3 中明显可以看到单位像素有效载荷大于 1.0 bpp 时， $\max(m)=4$  对应的图像质量明显优于其余  $\max(m)$  取值；在相同图像质量情况下， $\max(m)=4$  对应的嵌入数据量也明显高于其余  $\max(m)$  取值； $\max(m)$  取值增大时，相应地宿主图像的最大数据嵌入容量也明显增大。

### 3.3 与其他文献方法的性能比较

本节进一步采用  $n = 4 \times 4$ ，对 6 幅测试图像与文献[3]、文献[17]，文献[18]和文献[20]方法进行对比实验，图 4 给出了对比实验结果。从性能曲线图可以看出本文方法与文献[20]方法不论在嵌入容量还是在图像质量上明显优于其余几种方法。图 5 进一步将宿主图像 Lena 和 Barbara 的性能曲线放大，可看出在相同数据嵌入量时，本文方法图像质量略优于文献[20]方法。文献[20]定义的整数变换可描述为

$$y_0 = 2^m x_0 - \left\lfloor \frac{2(2^m - 1) \sum_{i=0}^{n-1} x_i + (2^m - 1)(n - 1)}{2n} \right\rfloor$$

$$y_j = 2^m x_j - \left\lfloor \frac{2(2^m - 1) \sum_{i=0}^{n-1} x_i + (2^m - 1)(n - 1)}{2n} \right\rfloor + w_j$$

$$0 \leq j \leq n - 1, w_j \in [0, 2^m - 1]$$

与本文整数变换公式：

$$y_i = 2^m x_i - \left\lfloor (2^m - 1) \sum_{i=1}^n x_i / n \right\rfloor, 0 \leq i \leq n - 1$$

对比可得两种方法整数变换结果相差不大，文献[20]直接将数据嵌入包含在整数变换表达式中，而本文方法利用整数变换产生的冗余数据用于数据嵌入并采用了多层二值位置图方式，最大数据嵌入容量也略高于文献[20]方法。本文方法在 Lena, Barbara, Baboon, Airplane(F-16), Goldhill 和 Lake 图像中的最大单位像素有效载荷依次为 2.36, 1.65, 1.49, 2.21,

表 1 不同宿主图像在不同图像块参数情况下最大单位像素有效载荷(bpp)

$n$	Lena	Barbara	Baboon	F-16	Goldhill	Lake
$2 \times 2$	2.05	1.54	1.45	1.95	1.86	1.60
$4 \times 4$	2.36	1.65	1.49	2.21	1.95	1.64
$8 \times 8$	2.09	1.22	1.11	1.91	1.47	1.19
$16 \times 16$	1.55	0.70	0.68	1.43	0.98	0.69

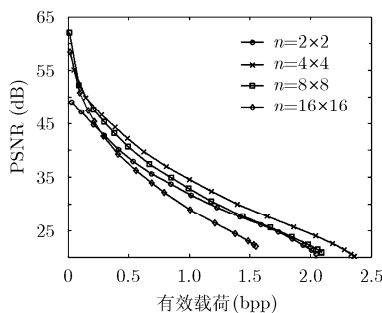


图 2 不同大小图像块时 Lena 的性能曲线

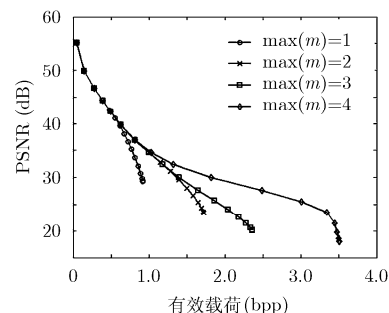


图 3 不同  $\max(m)$  取值时 Lena 的性能曲线

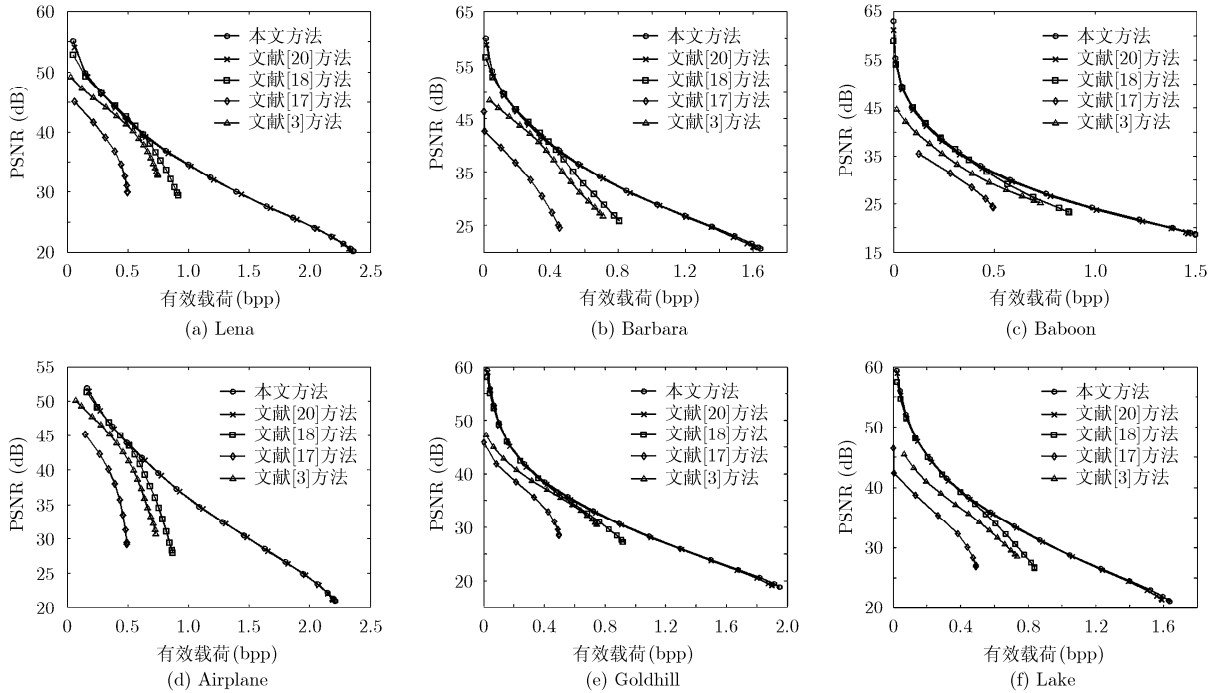


图 4 不同算法的性能比较

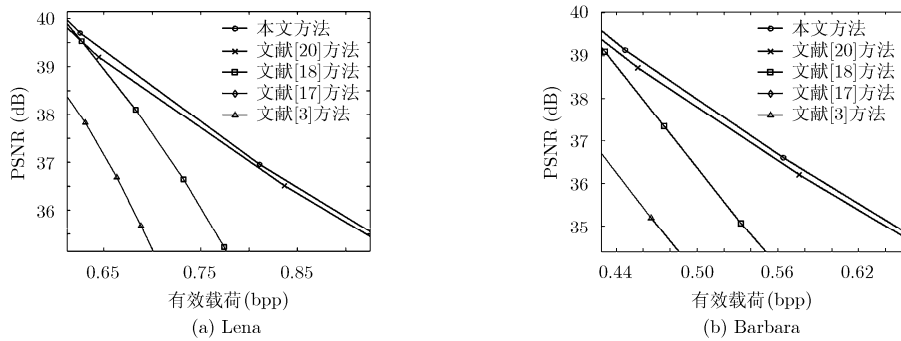


图 5 部分测试图像性能曲线放大图

1.95 和 1.64 bpp, 而文献[20]方法依次为 2.34, 1.61, 1.46, 2.19, 1.90 和 1.59 bpp。

### 4 结束语

本文提出一种基于整数变换的自适应图像可逆水印方法。定义基于图像块向量的一般化整数变换新算法, 该算法可对任意大小的图像块向量进行整数变换并产生一定的冗余数据用于水印数据嵌入。方法还进一步根据图像块向量的方差大小自适应选择参数  $m$  值进行整数变换, 方差较小的平滑图像块选择较大  $m$  值可嵌入较多数据以提高数据嵌入容量, 同时方差较大的复杂图像块选择较小  $m$  值进行整数变换或者不进行变换以避免其中引入较大失真保证图像质量。实验结果表明该方法具有较高的数据嵌入容量和较好的水印图像质量, 提取水印信息后可无失真恢复原宿主图像。

### 参考文献

- [1] Barton J M. Method and apparatus for embedding authentication information within digital data[P]. USA, Patent, 5646997, 1997.
- [2] Tian J. Reversible data embedding using a difference expansion[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 13(8): 890-896.
- [3] Alattar A M. Reversible watermark using the difference expansion of a generalized integer transform[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(8): 1147-1156.
- [4] Thodi D M and Rodriguez J J. Expansion embedding techniques for reversible watermarking[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(3): 721-730.
- [5] Kim H J, Sachnev V, Shi Y Q, et al.. A novel difference expansion transform for reversible data embedding[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2008,

- 3(3): 456-465.
- [6] 孙鸿睿, 李光强, 朱建军, 等. 改进的差值扩张和平移矢量地图可逆水印算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(8): 1004-1007.  
Sun Hong-rui, Li Guang-qiang, Zhu Jian-jun, *et al.*. Improved reversible watermarking algorithm for vector map based on difference expansion and shifting[J]. *Geomatics and Informaiton Science of Wuhan University*, 2012, 37(8): 1004-1007.
- [7] Weng S W, Pan J S, and Gao X. Reversible watermarking combining pre-processing operation and histogram shifting[J]. *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, 2012, 3(4): 320-326.
- [8] Hu Y J, Lee H K, and Li J W. DE-based reversible data hiding with improved overflow location map[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, 19(2): 250-260.
- [9] Li Xiao-long, Yang Bin, and Zeng Tie-yong. Efficient reversible watermarking based on adaptive prediction-error expansion and pixel selection[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(12): 3524-3533.
- [10] Coltuc D. Low distortion transform for reversible watermarking[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(1): 412-417.
- [11] 刘芳, 汪玉凯. 基于插值预测和块分类低失真可逆数据隐藏[J]. 光电子·激光, 2013, 24(7): 1392-1398.  
Liu Fang and Wang Yu-kai. Reversible data hiding with low distortion based on interpolation prediction and dividing blocks model[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2013, 24(7): 1392-1398.
- [12] 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.
- [13] Tai W L, Yeh C M, and Chang C C. Reversible data hiding based on histogram modifaciton of pixel differences[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, 19(6): 906-910.
- [14] Hong W. Adaptive reversible data hiding method based on error energy control and histogram shifting[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(2): 101-108.
- [15] 王俊祥, 倪江群, 潘金伟. 一种基于直方图平移的高性能可逆水印算法[J]. 自动化学报, 2012, 38(1): 88-96.  
Wang Jun-xiang, Ni Jiang-qun, and Pan Jin-wei. A high performance reversible watermarking scheme based on histogram shifting[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(1): 88-96.
- [16] Li Xiao-long, Zhang Wei-ming, Gui Xin-lu, *et al.*. A novel reversible data hiding scheme based on two-dimensional difference-histogram modification[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Sercurity*, 2013, 8(7): 1091-1100.
- [17] Coltuc D and Chassery J M. Very fast watermarking by reversible contrast mapping[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2007, 14(4): 255-258.
- [18] Wang Xiang, Li Xiao-long, Yang Bin, *et al.*. Efficient generalized integer transform for reversible watermarking[J]. *IEEE Signal Processing Letter*, 2010, 17(6): 567-570.
- [19] Wang Chao, Li Xiao-long, and Yang Bin. High capacity reversible image watermarking based on integer transform[C]. Proceeding of 2010 IEEE 17th International Conference on Image Processing, Hong Kong, China, Sept. 26-29, 2010: 217-220.
- [20] Peng Fei, Li Xiao-long, and Yang Bin. Adaptive reversible data hiding scheme based on integer transform[J]. *Signal Processing*, 2012, 92(1): 54-62.
- [21] 张秋余, 孙媛, 晏燕. 基于分块自适应压缩感知的可逆水印算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 797-804.  
Zhang Qiu-yu, Sun Yuan, and Yan Yan. A reversible watermarking algorithm based on block adaptive compressed sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(4): 797-804.
- 邱应强: 男, 1981年生, 博士生, 讲师, 研究方向为信息隐藏、数字水印和图像处理等.
- 余 轮: 男, 1952年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为通信与信息系统、图像处理等.