

基于预测误差和直方图对的无损数据隐藏方法

张晓杰^{1*}, 童学锋¹, 宣国荣¹, 杨志强¹, 施云庆²

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 新泽西理工学院 电气工程与计算机系, 美国 新泽西 07102)

(* 通信作者电子邮箱 cherishzhang@126.com)

摘要:针对目前存在的大部分图像数据隐藏方法的嵌入量不大和视觉效果一般的问题,提出一种基于预测误差和直方图对的无损数据隐藏方法。在多灰度图像中,用某一像素点周围的八个像素点来预测中心像素点的灰度值,同时得到预测误差。再利用直方图对的方法,把数据嵌入到预测误差中。在嵌入过程中,以嵌入阈值和起伏阈值作为指导进行嵌入,通过调整这两个阈值,得到最佳的嵌入效果。实验表明,该方法在视觉效果和嵌入容量方面都取得很好的效果。

关键词:预测误差;直方图对;无损数据隐藏;嵌入阈值;起伏阈值

中图分类号: TP309.2 **文献标志码:** A

Reversible data hiding based on prediction-error and histogram pairs

ZHANG Xiao-jie^{1*}, TONG Xue-feng¹, XUAN Guo-rong¹, YANG Zhi-qiang¹, SHI Yun-qing²

(1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Department of Electrical and Computer Engineering, New Jersey Institute of Technology, New Jersey 07102, USA)

Abstract: Most of the existing image data hiding methods have little payload and the visual effect is usually not good enough. The paper proposed a reversible hiding technique based on prediction-error and histogram pair. The gray value of a pixel was predicted using eight pixels around it in a multi-gray image. Then the prediction-error could be calculated. The hiding data were embedded into the prediction-error with the technique of histogram pair. An embedded threshold and an undulating threshold were selected during embedding, and adjusting the pair of thresholds achieved the best performance. The experimental results have demonstrated the proposed method obtains good performance both in embedding payload and visual quality.

Key words: prediction-error; histogram pair; reversible data hiding; embedded threshold; undulating threshold

0 引言

无损数据隐藏是数据隐藏领域的一个分支,它不但能恢复嵌入的隐藏数据,而且数据提取后原始图像也能得到完全恢复。可以被应用在医学、法律和军事等敏感领域。最近几年来,各种无损数据隐藏方法被相继提出。Fridrich等^[1]对图像空域的最不重要位平面(Least Significant Bit, LSB)进行压缩,在压缩后腾出的空间中嵌入比较少的信息量。Tian^[2]提出的差分扩展方法,需要记录比较多的二维数据来防止嵌入前后矛盾。Thodi等^[3]利用图像中像素点的邻域来预测该像素点,再把数据嵌入在预测误差中。Sachnev等^[4]提出了一种利用预测误差和排序的思想进行数据嵌入的算法,取得了不错的嵌入效果。本文在研究上述方法和直方图对方法^[5-7]的基础上,提出了一种基于预测误差和直方图对的无损数据隐藏方法。

1 基于直方图对的无损数据隐藏方法

1.1 图像直方图对的定义

特征 x 出现的频度可以用直方图^[8]特征值 $h(x)$ 表示,两个相邻的特征值表示为 $[h(x), h(x+1)]$ 。如果相邻的两个特征值一个为零,另一个不为零,即 $[h(x) = m, h(x+1) = 0]$,

或 $[h(x) = 0, h(x+1) = m]$,则这两个特征表示的直方图构成一个直方图对^[5]。在多灰度图像空域中,特征指的是灰度(0~255)。

1.2 数据的嵌入和提取

设由特征值 $[a, b]$ 组成直方图对 $[h(a) = m, h(b) = 0]$,隐藏数据 D 是一串二进制序列。对图像的特征和待嵌入数据按照一定顺序进行扫描^[5],扫描过程中碰到特征值 $x = a$ 时,如果待嵌入数据为0,则该特征值保持不变,即 $x = a$;如果待嵌入数据为1,则该特征值改为其邻位特征值,即 $x = b$ 。因此,该直方图对 $[h(a) = m, h(b) = 0]$ 可提供的最大数据嵌入量就是图像中特征值 $x = a$ 的个数,即 $m \cdot b$ 。

数据的提取过程为:对图像的特征 x 按照相同顺序进行扫描,如果特征值 $x = a$,则提取出0作为隐藏数据;如果特征值 $x = b$,则提取出1作为隐藏数据,同时该特征恢复为邻近特征值,即 $x = a$ 。在隐藏数据被完整提取出的同时,图像的原始信息也被无损恢复^[9]。

1.3 直方图调整的溢出问题

如果直方图中原来没有直方图对,就需要通过扩展来形成直方图对。在形成直方图对的过程中,有可能会发生灰度值溢出问题,溢出的灰度值一般分布在直方图的两边。如果使这些像素点远离边界区,就能防止溢出问题,即对边界的直方图进行调整,使直方图的分布变窄。这样即使嵌入数据后,

收稿日期:2012-05-30;修回日期:2012-07-13。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61175014);上海市教委科研创新项目(12ZZ033)。

作者简介:张晓杰(1988-),男,安徽歙县人,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、模式识别;童学锋(1963-),男,湖北蕲春人,教授,博士,主要研究方向:图像处理、模式识别;宣国荣(1935-),男,上海人,教授,博士生导师,主要研究方向:图像处理、模式识别。

直方图扩展了,溢出也不会发生。

2 基于预测误差和直方图对的无损数据隐藏

2.1 预测误差

设某个像素点的灰度值为 x ,它的八邻域是一个 3×3 的窗口,如式(1)所示。用 x 周围的八个像素点来预测它。因为四邻域像素与中心像素的相关性要相对大一些,而斜对角的像素与中心像素的相关性要相对小一些。因此,给四邻域像素更大的权值,而斜对角的像素小一些的权值^[10]。

$$x_0 = \begin{bmatrix} x_1 & x_4 & x_6 \\ x_2 & x & x_7 \\ x_3 & x_5 & x_8 \end{bmatrix} \quad (1)$$

预测值 \bar{x} :

$$\bar{x} = \left\lfloor \frac{(2(x_2 + x_4 + x_5 + x_7) + (x_1 + x_3 + x_6 + x_8))}{12} \right\rfloor \quad (2)$$

对预测值的计算结果要进行取整运算,以确保修改后的灰度值为整数。

预测误差 p_e : $p_e = x - \bar{x}$ 即被预测值与预测值之差称为预测误差。

起伏值 F :表示窗口中心灰度值 x 的上下左右以及斜角邻域灰度值与预测值之差的加权平均,如式(3):

$$F = \frac{2}{3} \times [(x_2 - \bar{x})^2 + (x_4 - \bar{x})^2 + (x_5 - \bar{x})^2 + (x_7 - \bar{x})^2] + \frac{1}{3} \times [(x_1 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2 + (x_6 - \bar{x})^2 + (x_8 - \bar{x})^2] \quad (3)$$

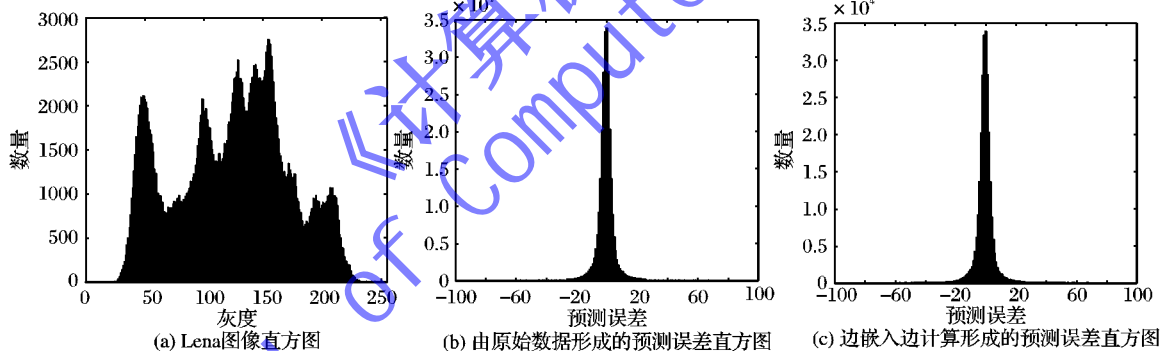


图1 两种方法形成的预测误差直方图对比

2.2 双阈值 T 和 T_F

在基于预测误差和直方图对的无损数据隐藏方法中,有两个阈值:嵌入阈值 T 和起伏阈值 T_F ,这两个值的选择会影响最终的嵌入效果。在直方图对的方法中,用一个嵌入阈值 T ^[12]来指导在何处开始形成直方图对进行数据嵌入。预测误差反映的是被测中心值和周围像素点的关系,嵌入阈值 T 用来在预测误差值所在的范围内($-255 \sim 255$),选择哪个区间适合数据嵌入。当用阈值 T 确定了某个灰度值进行嵌入后,同一个灰度值下还对应着许多像素点。需要在这些像素点中选择一些合适的点进行嵌入,以使得嵌入效果最佳。起伏值反映了某像素点周围的分布情况,起伏值越小,周围越平坦。而该起伏值本身分布在曲线(统计该灰度下的起伏值形成曲线)的尖锐处,对应的熵较小,比较适合嵌入,也就是在起伏值小于 T_F 的像素点上进行嵌入。在图像可嵌入空间充足的情况下,设置起伏阈值 T_F 来筛选掉起伏较大的嵌入位置,可以使嵌入数据后图像的视觉效果进一步提高。因此在相同图像和嵌入相同的数据信息时,存在阈值参数 $[T, T_F]$ 使得峰值信噪

比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)达到最大,如下式所示:

其中 F 表示图像某像素点周围的变化程度。起伏值 F 小表示平坦,起伏值 F 大表示尖锐。把数据尽量嵌入在平坦的区域中,这样人眼难以察觉。

用被测值减去预测值得到预测误差,再将待隐藏数据嵌入到预测误差中,这就是基于预测误差和直方图对的无损数据隐藏方法的本质。对于多灰度图像,灰度范围是 $0 \sim 255$,所以预测误差的取值范围是 $-255 \sim 255$ 。由于图像本身的连续性,绝大多数的预测误差值都分布在 0 附近,两端的预测误差值很少,因而形成一个中间非常尖锐的近似拉普拉斯分布。嵌入数据后,该直方图从尖锐变为平坦,图像的总熵也增加。

使用预测误差进行数据嵌入有两种方法:第一种方法是使用原始数据一次性计算出全部预测误差,再在预测误差上嵌入数据,这种方法需要大量的空间来存放预测值,以实现无损数据恢复,显然在实现上不可行;另一种方法是自左到右、自上到下,边预测、边嵌入。这种方法需要记录的数据较少,易于实现。但此时,在进行预测误差计算时,有4个像素点不是原始数据,而是在前面进行预测误差计算时修改过的数据。由于图像自身的光学性质,两种方法所得到的预测误差差别不大。如图1所示,图1(a)为Lena图像的灰度直方图,图1(b)为Lena图像采用原始数据计算得到的预测误差所形成的直方图,图1(c)为Lena图像采用边嵌入数据边计算预测误差所形成的直方图。从图中可以看出,两种预测误差的直方图分布都非常接近于拉普拉斯分布,没有大的区别^[11]。本文采用的是后一种方法。

比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)达到最大,如下式所示:

$$[T_F, T] = \underset{T_F, T}{\operatorname{argmax}} (PSNR)$$

在实验中,需要反复调整 T 和 T_F 的值,以使 $PSNR$ 达到最大。在调整 T 和 T_F 的过程中,有三个指导原则:

- 1) 能使待隐藏数据嵌入完毕;
- 2) 数据嵌入后不存在溢出;
- 3) 使得嵌入效果最佳。

当数据不能完全嵌入时,就要另外选择 T 和 T_F ,重新进行嵌入。当嵌入数据后回到空域,图像的灰度值有可能大于 255 或者小于 0 ,也就是在直方图的两边发生了溢出。通过对边界直方图进行调整,使这些点远离边界区,就可以解决溢出问题^[13]。在数据能够完全嵌入和不存在溢出的情况下,继续调整 T 和 T_F ,直到搜索到使 $PSNR$ 最大的 T 和 T_F 。如对Lena图像,嵌入量为 0.03 bpp,当 $T = 3$, $T_F = 21$ 时, $PSNR$ 达到最大。如表1所示。

表1 嵌入量为0.03 bpp, Lena 图像在不同 T 和 T_F 时 PSNR 值 dB

T	T_F				
	19	20	21	22	23
2	61.13	61.06	61.02	60.99	61.00
3	61.20	61.70	61.76	61.70	61.66
4	59.94	59.95	60.03	60.12	60.15
5	59.13	59.20	59.31	59.46	59.61
6	58.62	58.74	58.85	58.93	59.07

2.3 基于预测误差和直方图对的无损数据隐藏方法

基于预测误差和直方图对的无损数据隐藏方法的本质是在直方图对阈值 T 的基础上,加入起伏阈值 T_F 。通过阈值 T_F 来判断当前像素是否被选中,若选中则采用直方图对的方法进行数据嵌入,而未被选中的部分不作改动。当用2.2节所述的方法,找到最优的 T 和 T_F 后,就可按照如下流程进行数据嵌入:

1) 设定初始阈值:选择嵌入阈值 T 和起伏阈值 T_F ,令 $P = T$;计算嵌入数据长度 L ,图像像素数 N 。嵌入过程是在扫描中进行:从左往右,从上往下扫描整张图像。对于每一个像素,利用式(2)和式(3)计算当前点的预测误差 p_e 和起伏值 F 。

2) 按起伏阈值 T_F 判断:如果 $F > T_F$,跳过当前像素,否则该像素被选中。

3) 按嵌入阈值 P 判断:对于2)被选中的像素,确定是否嵌入、或不嵌入只扩展、或不变,取决于 P 的符号和数值。设待嵌入的二进制数据为 b_i ,取值 $\{0,1\}$ 。如果 $P \geq 0$,有三种情况:① $p_e = P$,嵌入数据, $p_e = p_e + b_i$;② $p_e > P$,只扩展, $p_e = p_e + 1$;③ p_e 为其他值,则不变, $p_e = p_e$ 。如果 $P < 0$,也有三种情况:① $p_e = P$,嵌入数据, $p_e = p_e - b_i$;② $p_e > P$,只扩展, $p_e = p_e - 1$;③ p_e 为其他值,则不变, $p_e = p_e$ 。同时更新当前像素值 $x' = \bar{x} + p_e$ 。

4) 判断数据是否嵌入完或本次扫描到达末尾。如果数据嵌入完成(嵌入数据长度 L),则记录终点阈值 $S = P$,并记录终点像素位置,以备作恢复图像的起点,嵌入过程结束。

5) 如果数据嵌入未完成,而本次扫描已到达末尾(图像像素数 N),则要修改阈值 P ,并从头开始另一次扫描。修改嵌入阈值 P 的方法是:如果 $P \geq 0$, $P = -P$ 。如果 $P < 0$, $P = -P - 1$ 。

数据的提取是嵌入的逆过程。在数据恢复时,要按照与嵌入数据相反的顺序进行提取,即自右向左、自下向上的顺序。对于图像中的最后一个 3×3 窗口,八邻域的灰度值在嵌入数据和提取数据时保持不变,所以可以算出预测值,进而得到预测误差和起伏值。通过阈值 T_F 可以知道哪些点在嵌入过程中被选中。得到被选中的点后,按照直方图对方法的数据提取算法就可以提取到嵌入的数据,并且可以无损恢复原始图像。

2.4 基于预测误差和直方图对的无损数据隐藏的例子

下面用一个简单的例子(图2)来说明基于预测误差和直方图对的无损数据隐藏方法。为了方便计算,下面仅仅利用四邻域进行预测,并使用简化公式。

154 158 160 158 160 162 162
158 158 159 160 160 159 162
153 158 157 159 161 162 162

图2 图像的一部分像素灰度值

以 3×3 图像窗口进行数据嵌入,预测值 $\bar{x} = \text{floor}\{(x_2 +$

$x_4 + x_5 + x_7)/4\}$,预测误差 $p_e = x - \bar{x}$,邻域起伏值 $F = (x_2 - \bar{x})^2 + (x_4 - \bar{x})^2 + (x_5 - \bar{x})^2 + (x_7 - \bar{x})^2$,起伏值阈值用 T_F 表示。

数据的嵌入过程如图3。按照从左往右、从上往下的顺序扫描图像。如果像素的起伏值 F 小于阈值 T_F ,那么表示这个像素被选中,按照直方图对方法进行嵌入;否则不作任何修改,窗口继续向前移动。

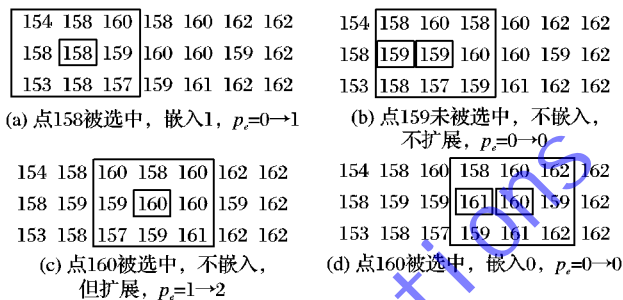


图3 数据的嵌入过程

假设直方图对嵌入位置阈值 $T = 0$,起伏值阈值 $T_F = 4$,待嵌入的数据为 $[1\ 0]$ 。

开始时 3×3 窗口在图像最左边。第一个点 $x = 158$ 的预测误差 $p_e = 0$,起伏值 $F = 1$, $F < T_F$,该点被选中。按照直方图对方法,嵌入数据1, $p_e \rightarrow 1$,所以修改 $158 \rightarrow 159$,如图3(a)、(b)所示。

将窗口移动到第二个点159上面,求得预测误差 $p_e = 0$,起伏值 $F = 6 > T_F$,所以该点没有被选中,不嵌入数据也不改变当前点,窗口继续移动,如图3(b)、(c)所示。

将窗口移动到第三个点160上面,求得预测误差 $p_e = 1$,起伏值 $F = 2 < T_F$,该点被选中。按照直方图对方法 $p_e \rightarrow 2$, $160 \rightarrow 161$,如图3(c)、(d)所示。

将窗口移动到第四个点160上面,重复上面的计算,求得预测误差 $p_e = 0$ 起伏值 $F = 3 < T_F$,该点被选中。按照直方图对方法,嵌入数据0, $p_e \rightarrow 0$,所以修改 $160 \rightarrow 160$,如图3(d)所示。至此,数据已全部嵌入完毕,算法停止,该点为嵌入截止点。

数据的提取过程如图4。数据的提取和嵌入过程相反。从嵌入截止点开始,采用和嵌入过程相反的方向对图像进行扫描和恢复,也就是采用从右往左,从下往上的方向扫描嵌入后的图像。首先计算当前像素点的起伏值 F ,如果 $F < T_F$,表示该点被选中,采用直方图对方法恢复这个点,并且提取数据;否则,当前点不作任何改变,窗口继续移动到下一个点。

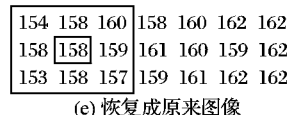
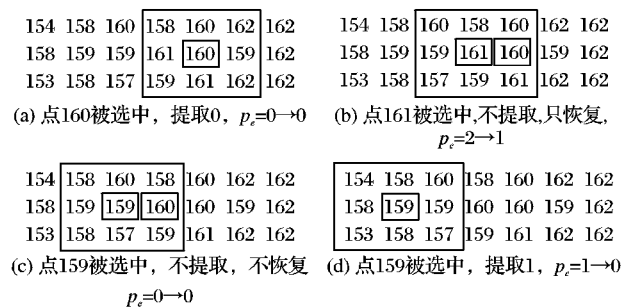


图4 数据的提取过程

将窗口移动到截止点160上面,求得预测误差 $p_e = 0$,起

伏值 $F = 3 < T_F$, 该点被选中, 按照直方图对方法, 提取数据 0, 同时恢复图像 $160 \rightarrow 160$, 如图 4(a)、(b) 所示。

窗口移动到下一个点 161 上, 计算 $F = 2 < T_F$, 表示该点被选中, $p_e = 2$, 根据直方图对方法, $p_e \rightarrow 1$, $161 \rightarrow 160$, 如图 4(b)、(c) 所示。

接下来窗口移动到下一个点 159 上, 计算 $F = 6 > T_F$, 不做变动, 移动窗口, 如图 4(c)、(d) 所示。

最后窗口移动到下一个点 159 上, 计算 $F = 1 < T_F$, 表示该点被选中, $p_e = 1$, 根据直方图对方法, $p_e \rightarrow 0$, $159 \rightarrow 158$, 提取数据 1, 如图 4(d)、(e) 所示。至此数据已经被全部提取出来, 图像也被完全恢复出来。

从上述这个简单的例子可以看出, 在嵌入前和逐步恢复的过程中, 像素的起伏值 F 在嵌入前后没有发生变化, 也就意味着恢复的过程中, 可以知道哪些点被选中用于嵌入过程, 哪些点没有被选中。因此, 图像总是可以无损恢复的。

3 实验结果及对比

在实验中, 主要选择 512×512 的 Lena、Barbara、Baboon 图像为主 (图 5), 进行结果对比, 其他图像作为辅助测试。把本文方法对这三幅图像的实验结果与当前较好的几种无损数据隐藏方法进行比较: Tian method^[2]、Thodi method^[3]、Sachnev method^[4] 和基于整数小波的最优直方图对方法 (Optimum Histogram Pair)^[7], 如图 6~8 所示。通过比较, 可以看到在嵌入相同容量数据的情况下, 本文提出的方法能取得更出色的视觉效果。



图 5 测试图像

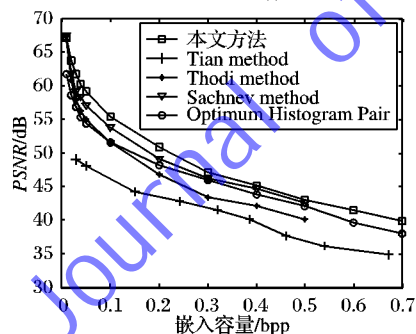


图 6 Lena 图像实验结果比较

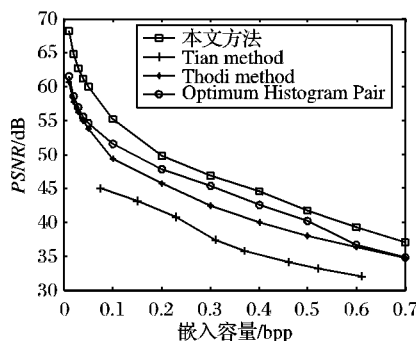


图 7 Barbara 图像实验结果比较

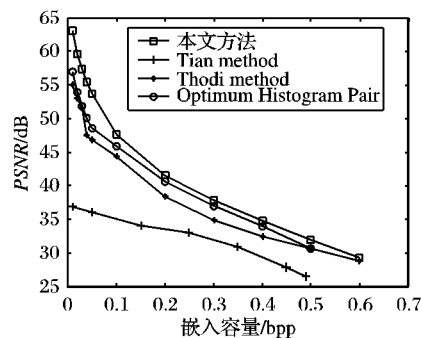


图 8 Baboon 图像实验结果比较

4 结语

本文基于 Thodi 等提出的在预测误差上嵌入数据的思想, 对直方图对方法进行了改进, 提出了基于预测误差和直方图对的无损数据隐藏方法, 通过嵌入阈值 T 和起伏阈值 T_F 对嵌入位置的调整, 得到了比“直方图对”方法更好的嵌入效果。

该方法所能嵌入的最大数据量跟原始图像像素的凹凸程度有关, 用起伏阈值 T_F 进行调节, 选择周围起伏值小于 T_F 的像素点上嵌入, 如果某个像素点周围不够平, 就不适宜嵌入数据, 这样的点越多, 整张图像所能嵌入的信息量就越少。

参考文献

- [1] FRIDRICH J, COLJAN M, DU R. Invertible authentication watermark for JPEG images[C]// International Conference on Information Technology. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2001: 223-227.
- [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] THODI D M, RODRIQUEZ J J. Prediction-error based reversible watermarking[C]// International Conference on Image Processing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 1549-1552.
- [4] SACHNEV V, KIM H J, NAN J, et al. Reversible watermarking algorithm using sorting and prediction[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2009, 19(7): 989-999.
- [5] XUAN GUORONG, SHI YUNQ, CHAI PEIQI, et al. Optimum histogram pair based image lossless data embedding[C]// IWDW07 Proceedings of the 6th International Workshop on Digital Watermarking, LNCS 5510. Berlin: Springer, 2007: 264-278.
- [6] 徐德智, 童学锋, 宣国荣, 等. 基于直方图调整的二值图像无损数据隐藏[J]. 计算机应用, 2009, 29(6): 1651-1653.
- [7] 温相君, 童学锋, 宣国荣, 等. 基于整数小波最优直方图对的图像无损数据隐藏[J]. 计算机应用, 2010, 30(10): 2679-2683.
- [8] 陶奉芝, 杨厚俊, 范延滨. 基于直方图技术的无损数据隐藏[J]. 计算机工程, 2008, 34(16): 235-237.
- [9] 曲欣, 童学锋, 宣国荣, 等. 基于直方图对的 JPEG 图像无损数据隐藏[J]. 计算机工程, 2010, 36(1): 218-220.
- [10] XUAN GUORONG, SHI Y Q, TENG JIANZHONG, et al. Double-threshold reversible data hiding[C]// ISCAS: Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 1129-1132.
- [11] 熊志勇, 蒋天发. 基于预测误差差值扩展的彩色图像无损数据隐藏[J]. 计算机应用, 2010, 30(1): 186-203.
- [12] XUAN GUORONG, YAO QIUMING, YANG CHENGYUN, et al. Lossless data hiding using histogram shifting method based on integer wavelets[C]// International Workshop on Digital Watermarking. Berlin: Springer, 2006: 323-332.
- [13] 宣国荣, 姚秋明, 柴佩琪, 等. 基于整数小波阈值嵌入的无损数据隐藏[J]. 计算机应用, 2006, 26(12): 2890-2893.