



采用相邻像素预测的可逆信息隐藏算法

李亚翔¹, 张显全^{1,2,3}, 俞春强¹, 唐振军^{1,2}

(1. 广西师范大学 计算机科学与信息工程学院, 广西 桂林 541004;
2. 广西师范大学 广西多源信息挖掘与安全重点实验室, 广西 桂林 541004;
3. 桂林电子科技大学 广西高校云计算与复杂系统重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了提高图像信息隐藏算法的信息嵌入容量和载密图像的保真度, 提出一种采用相邻像素预测的可逆信息隐藏算法。构建局部线性预测模型, 以待预测像素的3个相邻像素为目标像素, 通过目标像素的相邻像素建立线性方程组, 求解预测模型参数。应用预测模型进行预测, 计算预测误差, 绘制预测误差直方图, 通过直方图平移实现可逆信息隐藏。实验结果表明: 文中算法可通过较少的预测像素进行预测, 比其他算法具有更高的预测精度和更大的信息嵌入容量。

关键词: 可逆信息隐藏; 相邻像素; 预测误差; 局部线性预测

中图分类号: TP 391 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2020)02-0223-07

Reversible Data Hiding Algorithm Using Adjacent Pixels Prediction

LI Yaxiang¹, ZHANG Xianquan^{1,2,3},
YU Chunqiang¹, TANG Zhenjun^{1,2}

(1. College of Computer Science and Information Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China;
2. Guangxi Key Lab of Multi-source Information Mining and Security,
Guangxi Normal University, Guilin 541004, China;
3. Guangxi Colleges and Universities Key Lab of Cloud Computing and Complex Systems,
Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to improve the data embedding capacity of the image data hiding algorithm and the fidelity of the masked image, this paper propose a reversible data hiding algorithm based on adjacent pixels prediction. Building local linear prediction model and taking the three adjacent predicted pixels as the target pixel, the linear equations are established with the adjacent pixels of the target pixel, and the parameters of the prediction model are solved. Using the prediction model to predict, calculate prediction error and plot prediction error histograms, then implement reversible date hiding algorithm by histogram shift. The experimental results show that the proposed algorithm in this paper can predict with fewer prediction pixels, and has higher prediction accuracy and larger data embedding capacity than that of other algorithms.

Keywords: reversible data hiding; adjacent pixels; prediction error; local linear prediction

随着互联网的发展, 保障信息安全的信息隐藏技术^[1]日益受到研究者们的关注。信息隐藏技术在不

收稿日期: 2019-11-16

通信作者: 张显全(1964-), 男, 副教授, 主要从事计算机图形图像处理的研究. E-mail: zxq6622@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61562007, 61762017); 广西自然科学基金资助项目(2017GXNSFAA198222); 广西师范大学计算机科学与信息工程学院创新项目(JXYJSKT-2019-001)

影响载体文件正常使用的前提下,将秘密信息隐藏于载体文件中,具有隐秘通信、版权保护等功能。可逆信息隐藏技术(RDH)不仅能够无损提取嵌入的秘密信息,还可以实现载体的无损恢复。因此, RDH 被广泛地应用于军事、医学、司法鉴定等领域。常见的可逆信息隐藏技术有基于无损压缩算法、基于差值扩展算法和基于直方图平移算法。基于无损压缩算法通过压缩载体图像的冗余信息腾出空间,实现秘密信息的嵌入^[2-4]。基于差值扩展算法通过扩展相邻像素获得空间,实现可逆信息的嵌入^[5-6]。基于直方图平移算法对直方图进行移位,实现信息的可逆嵌入,该算法主要有基于原始像素直方图平移、像素差值直方图平移和预测误差直方图平移 3 类^[7-10]。文献[11]采用图像奇偶像素列交错预测方法提高像素的预测精度,进一步提高嵌入容量和载密图像的保真度。文献[12]对每个像素相邻的 4 个像素进行预测,其预测精度较文献[11]有了进一步提高。文献[13]采用基于多元线性回归预测方法,通过待预测像素 3 px×5 px 邻域中的 10 个像素构建多元线性回归函数矩阵进行预测,但由于训练样本像素方向及需学习的特征维度过多,且训练数据较少,出现过拟合问题,故预测效果不佳。文献[14]采用固定权重的相邻像素预测方法。

为了提高图像信息隐藏算法的信息隐藏容量和载密图像的保真度,本文提出一种采用相邻像素预测的可逆信息隐藏算法。

1 基于局部线性的预测方法

1.1 多元线性回归

多元线性回归^[15]通过已知数据找到一个线性方程来描述两个及两个以上的自变量与因变量之间的关系,并以此预测数据。构建多组线性映射方程,其矩阵形式为

$$\mathbf{Y} = \boldsymbol{\beta}\mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (1)$$

式(1)中: $\mathbf{Y}^T = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$; $\boldsymbol{\beta}^T = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n]^T$; $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & \cdots & x_{1,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{m,1} & \cdots & x_{m,n} \end{bmatrix}$; $\boldsymbol{\varepsilon}^T = [\varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_m]^T$ 。

多元线性回归方程组求解采用最小二乘法,构建函数 $F(\boldsymbol{\beta}) = \|\boldsymbol{\beta}\mathbf{X} - \mathbf{Y}\|^2$,当 $\text{sum}(\boldsymbol{\varepsilon}_i^2) (i=0, \dots, m)$ 和 $F(\boldsymbol{\beta})$ 取值最小时,得到回归系数 $\boldsymbol{\beta}$ 的值,实现对目标变量的预测。

1.2 局部线性预测模型

自然图像的局部像素间存在较强的相关性,故通过待预测像素的相邻像素建立局部线性预测模型,运用多元线性回归方法确定预测模型的参数,从而实现对待预测像素的预测。像素选择示意图,如图 1 所示。

设 $x_{m,n}$ 为待预测像素,3 个相邻像素为 $x_{m,n+1}$, $x_{m+1,n}$, $x_{m+1,n+1}$, 则预测值 $x'_{m,n}$ 为

$$x'_{m,n} = \beta_0 + \beta_1 x_{m,n+1} + \beta_2 x_{m+1,n} + \beta_3 x_{m+1,n+1}. \quad (2)$$

式(2)中: $\beta_0 \sim \beta_3$ 为 4 个未知参数。

将 $x_{m,n+1}$, $x_{m+1,n}$, $x_{m+1,n+1}$ 作为目标像素,分别建立线性方程组求解 $\beta_0 \sim \beta_3$ 。相邻像素预测的像素选择示意图,如图 2 所示。

目标像素 $x_{m,n+1}$, $x_{m+1,n}$, $x_{m+1,n+1}$ 的方程组矩阵为

$$\begin{bmatrix} x_{m,n+1} \\ x_{m+1,n} \\ x_{m+1,n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{m,n+2} & x_{m+1,n+1} & x_{m+1,n+2} \\ 1 & x_{m+1,n+1} & x_{m+2,n} & x_{m+2,n+1} \\ 1 & x_{m+1,n+2} & x_{m+2,n+1} & x_{m+2,n+2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

为了提高预测的准确性并训练收敛速度,参数的计算应与待预测像素 $x_{m,n}$ 高度相关,因此,建立与待预测像素 $x_{m,n}$ 及目标像素 $x_{m,n+1}$, $x_{m+1,n}$, $x_{m+1,n+1}$ 都相邻的像素的线性方程组,以增加约束条件,减少预测误差,有

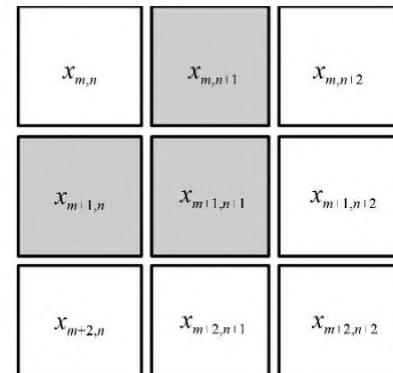


图 1 像素选择示意图

Fig. 1 Schematic diagram
of pixel selection

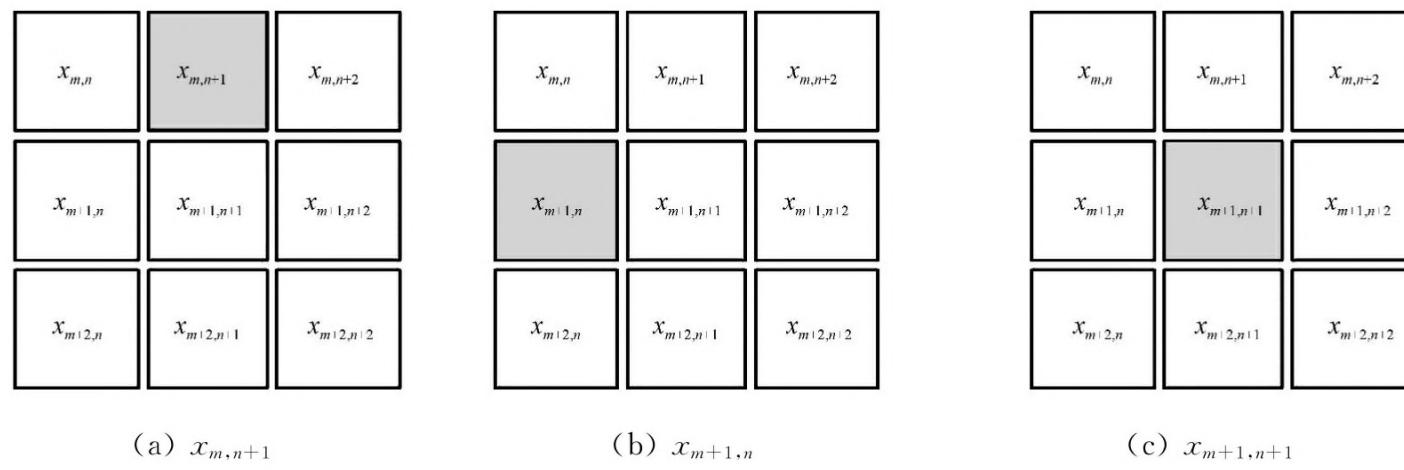


图2 相邻像素预测的像素选择示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pixel selection for adjacent pixels prediction

$$\begin{bmatrix} x_{m,n+1} \\ x_{m+1,n} \\ x_{m+1,n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_{m+1,n} & x_{m+1,n+1} \\ 1 & x_{m,n+1} & 0 & x_{m+1,n+1} \\ 1 & x_{m,n+1} & x_{m+1,n} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

将式(3),(4)合并,可得

$$\begin{bmatrix} x_{m,n+1} \\ x_{m,n+1} \\ x_{m+1,n} \\ x_{m+1,n} \\ x_{m+1,n+1} \\ x_{m+1,n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_{m+1,n} & x_{m+1,n+1} \\ 1 & x_{m,n+2} & x_{m+1,n+1} & x_{m+1,n+2} \\ 1 & x_{m,n+1} & 0 & x_{m+1,n+1} \\ 1 & x_{m+1,n+1} & x_{m+2,n} & x_{m+2,n+1} \\ 1 & x_{m,n+1} & x_{m+1,n} & 0 \\ 1 & x_{m+1,n+2} & x_{m+2,n+1} & x_{m+2,n+2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

求解式(5)可得 $\beta_0 \sim \beta_3$, 将其代入式(2), 可得到局部线性预测模型.

2 基于局部线性预测模型的可逆信息隐藏算法

2.1 信息的隐藏

在局部线性预测模型的待预测像素区域中, 为了保证像素预测的准确性, 图像右侧两列和下端两行的像素不进行预测和隐藏信息, 其余区域可作为预测区域.

在秘密信息嵌入的过程中, 对预测区域依次由上到下, 由左到右按行方式遍历像素. 通过预测模型对当前像素 $x_{i,j}$ 进行预测, 得到预测值 $x'_{i,j}$, 预测误差 $e_{i,j} = x_{i,j} - x'_{i,j}$, 并绘制预测误差直方图. 采用文献[12]的隐藏方法, 根据秘密信息量 S 选择直方图“0”值两侧的阈值 T_l 和 T_r , 将阈值对应的直方图两侧的像素进行平移, 并对载体像素进行加减操作, 从而将秘密信息嵌入载体图像.

设像素 $x_{i,j}$ 隐藏信息后的值为 $\hat{x}_{i,j}$, s 为秘密信息, 则有

$$\hat{x}_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j} - 1, & e_{i,j} < T_l, \\ x_{i,j} - s, & e_{i,j} = T_l, \\ x_{i,j}, & T_l < e_{i,j} < T_r, \\ x_{i,j} + s, & e_{i,j} = T_r, \\ x_{i,j} + 1, & e_{i,j} > T_r. \end{cases} \quad (6)$$

嵌入信息区域的像素依旧存在局部相关性, 改变图像遍历方式, 将上端和左侧两行作为保留区域, 对预测区域依次由下到上, 由右到左按行方式遍历像素, 并通过目标像素左上角像素对其进行预测, 实现图像所有区域的信息嵌入.

通过上述操作, 可实现秘密信息的可逆隐藏, 得到载密图像.

2.2 信息的提取与图像的恢复

秘密信息的提取和载体图像的恢复是嵌入过程的逆操作. 最后两行和最后两列像素保持不变, 通过由下到上, 由右到左按行方式依次处理载密区域像素. 首先, 通过预测模型对当前像素进行预测, 得到

$x'_{i,j}, e_{i,j}$. 然后, 通过 $e_{i,j}, T_1, T_r$ 提取秘密信息.

秘密信息 s 的提取过程为

$$s = \begin{cases} 0, & e_{i,j} = T_1 \text{ || } e_{i,j} = T_r, \\ 1, & e_{i,j} = T_1 - 1 \text{ || } e_{i,j} = T_r + 1. \end{cases} \quad (7)$$

原始图像像素 $x_{i,j}$ 为

$$\hat{x}_{i,j} = \begin{cases} \hat{x}_{i,j} + 1, & e_{i,j} < T_1, \\ \hat{x}_{i,j} + s, & e_{i,j} = T_1, \\ \hat{x}_{i,j}, & T_1 < e_{i,j} < T_r, \\ \hat{x}_{i,j} - s, & e_{i,j} = T_r, \\ \hat{x}_{i,j} - 1, & e_{i,j} > T_r. \end{cases} \quad (8)$$

因此, 通过式(7), (8)可以无损恢复载体图像和提取秘密信息.

3 实验结果与分析

3.1 评价指标

从 BOWS-2 标准图像库中选取 4 幅 512 px \times 512 px 的灰度图像 Airplane, Baboon, Lena 和 Sailboat 作为实验测试图像, 如图 3 所示.



(a) Airplane

(b) Baboon

(c) Lena

(d) Sailboat

图 3 实验测试图像

Fig. 3 Experimental test images

通过预测误差直方图在“0”值附近的高度(预测误差的个数)验证文中算法的预测效果.“0”值像素越多, 表明预测精度越高; 反之, 则预测精度越低.

此外, 采用峰值信噪比(PSNR)作为评价图像信息嵌入容量和保真度的指标. 峰值信噪比越大, 则图像的信息嵌入容量越大, 保真度越高, 失真越小; 峰值信噪比越小, 则图像的信息嵌入容量越小, 保真度越低, 失真越大.

峰值信噪比的计算公式为

$$R_{\text{PSN}} = 10 \times \lg \left(\frac{255^2 \times m \times n}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [I(i,j) - C(i,j)]^2} \right). \quad (9)$$

式(9)中: R_{PSN} 表示峰值信噪比; $I(i,j), C(i,j)$ 分别为原始图像和载密图像对应点的像素坐标值; m, n 分别为图像的宽和高.

3.2 结果与分析

对测试图像预测区域由上到下, 由左到右依次遍历像素, 并通过式(2)计算预测值. 为保证嵌入信息的正确提取, 图像进行信息隐藏的实际像素区域为 510 px \times 510 px.

测试图像的预测误差直方图, 如图 4 所示. 图 4 中: e 为预测误差; N 为预测误差的数量. 由图 4 可知: 预测误差直方图呈正态分布, 中间高, 两端逐渐下降; 在峰值点“0”处, 相较于纹理区域的图像(Baboon), 文中算法对平滑区域图像(Airplane)的预测效果更好. 这是因为纹理区域局部像素相关性较弱,

相邻像素点间的像素值变化较大, 不一定呈线性关系, 导致根据相邻像素预测的局部特征相对实际特征有一定偏差; 而平滑区域局部像素相关性较强, 相邻像素点间的像素值变化较小, 预测偏差较小.

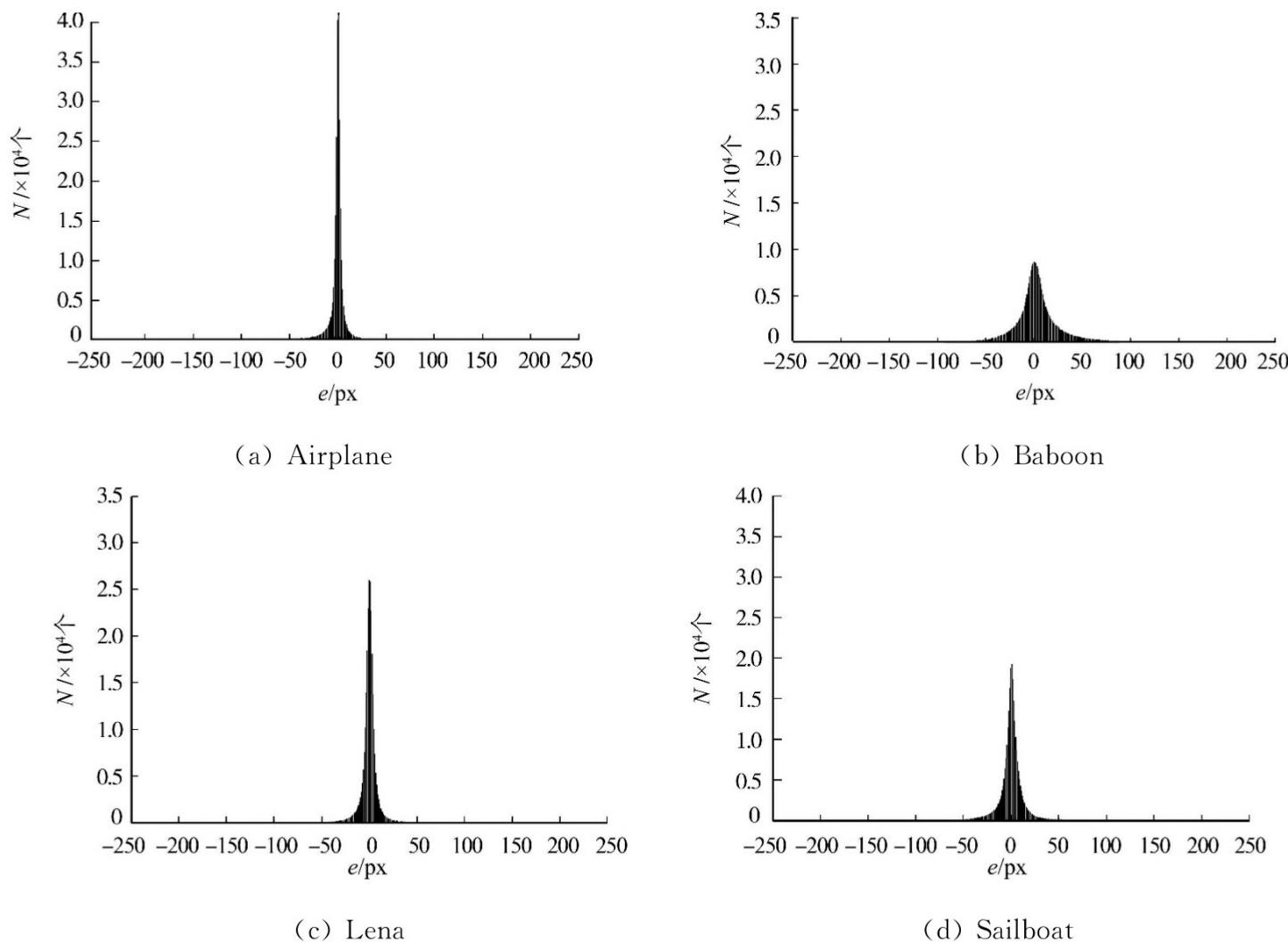


图4 测试图像的预测误差直方图

Fig. 4 Prediction error histogram of test images

为了确定文中算法的预测效果, 在 $[-10, 10]$ px 的预测误差区间内, 将文献[10]算法、文献[13]算法与文中算法进行比较. 不同算法的预测误差对比, 如图 5 所示. 由图 5 可知: 相较于文献[10]算法和文献[13]算法, 文中算法的预测精度皆有所提高.

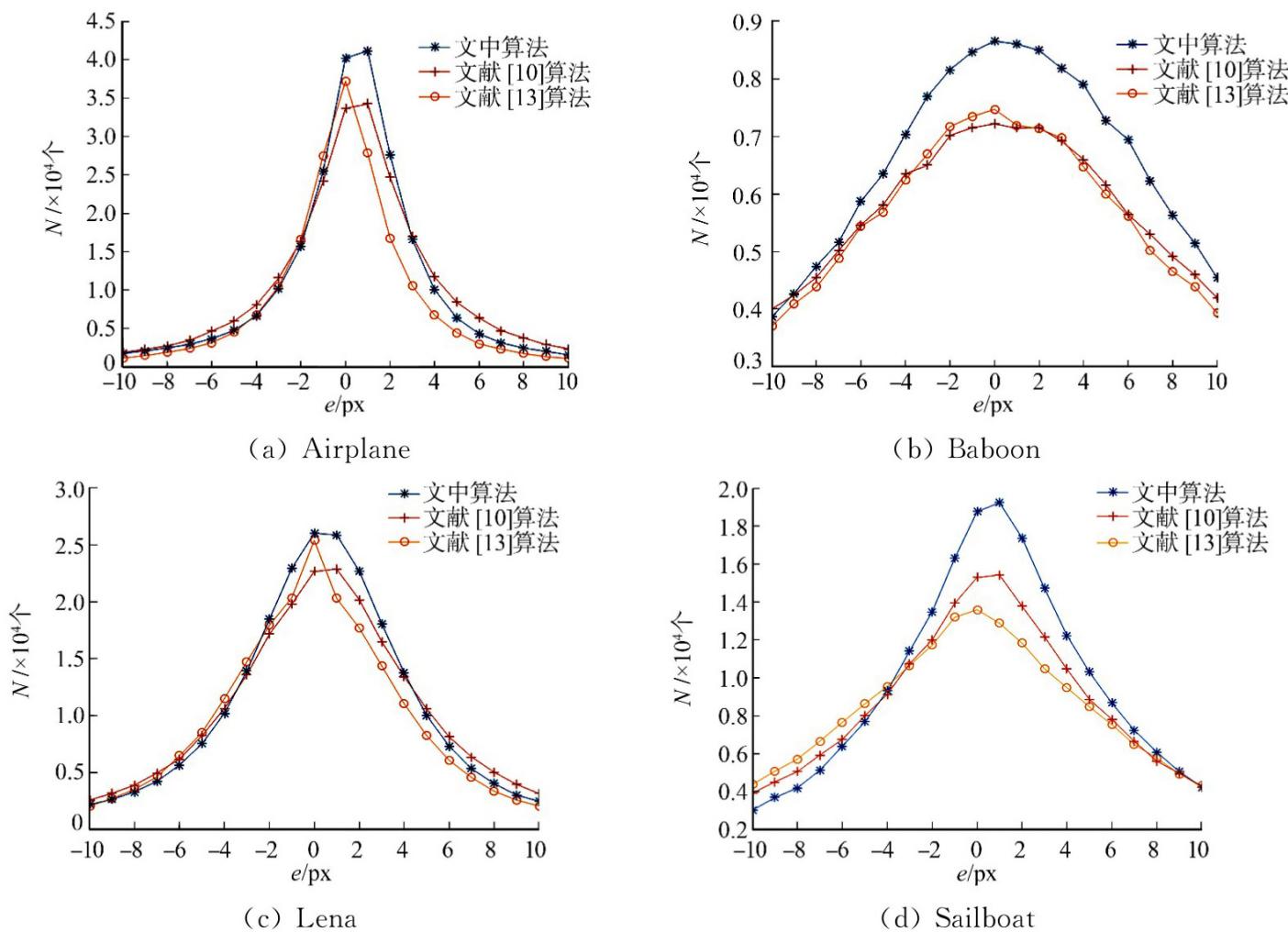


图5 不同算法的预测误差对比

Fig. 5 Comparison of prediction errors of different algorithms

为进一步对比预测算法效果的一般性,从 BOWS-2 标准图像库中随机选取 100 幅图像作为测试样本,将文中算法与文献[13]算法进行比较。不同算法的预测误差直方图的峰值对比,如图 6 所示。图 6 中: n 为峰值点的个数; d 为图片数量。由图 6 可知:相较于文献[13]算法,文中算法有较高的预测精度,且具有一般性。

为了进一步验证信息嵌入容量和图像的保真度,将文献[10]算法、文献[13]算法和文中算法的峰值信噪比进行比较。根据嵌入信息容量 S 自适应选择直方图的平移位并向外侧移一位,腾出嵌入位以实现可逆嵌入。不同算法的峰值信噪比的对比,如图 7 所示。由图 7 可知:嵌入秘密信息量越大,载密图像的峰值信噪比越小;在信息嵌入容量一定的情况下,文中算法的峰值信噪比大于文献[10]算法和文献[13]算法。

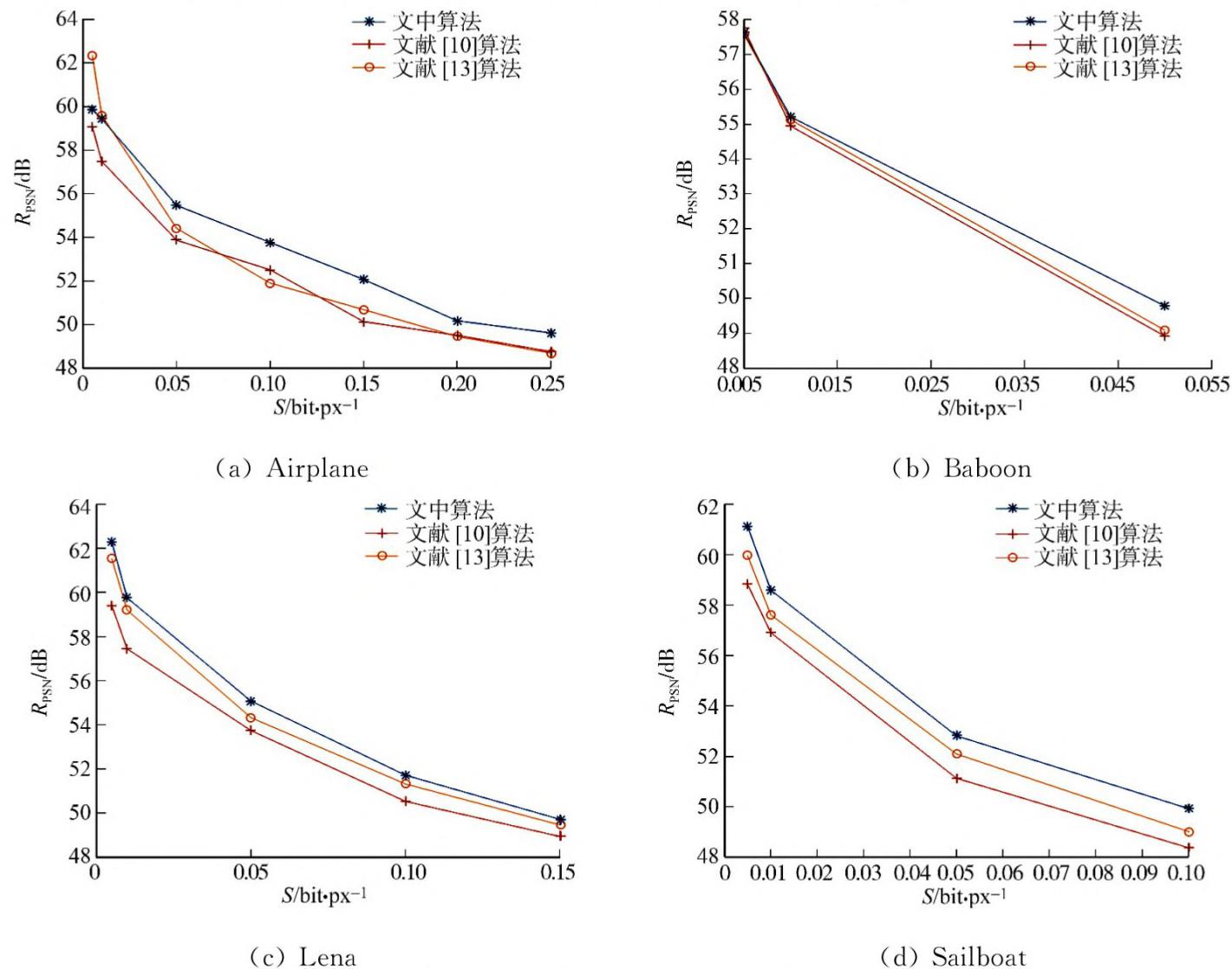


图 6 不同算法的预测误差直方图的峰值对比

Fig. 6 Comparison of peak value of prediction error histogram in different algorithms

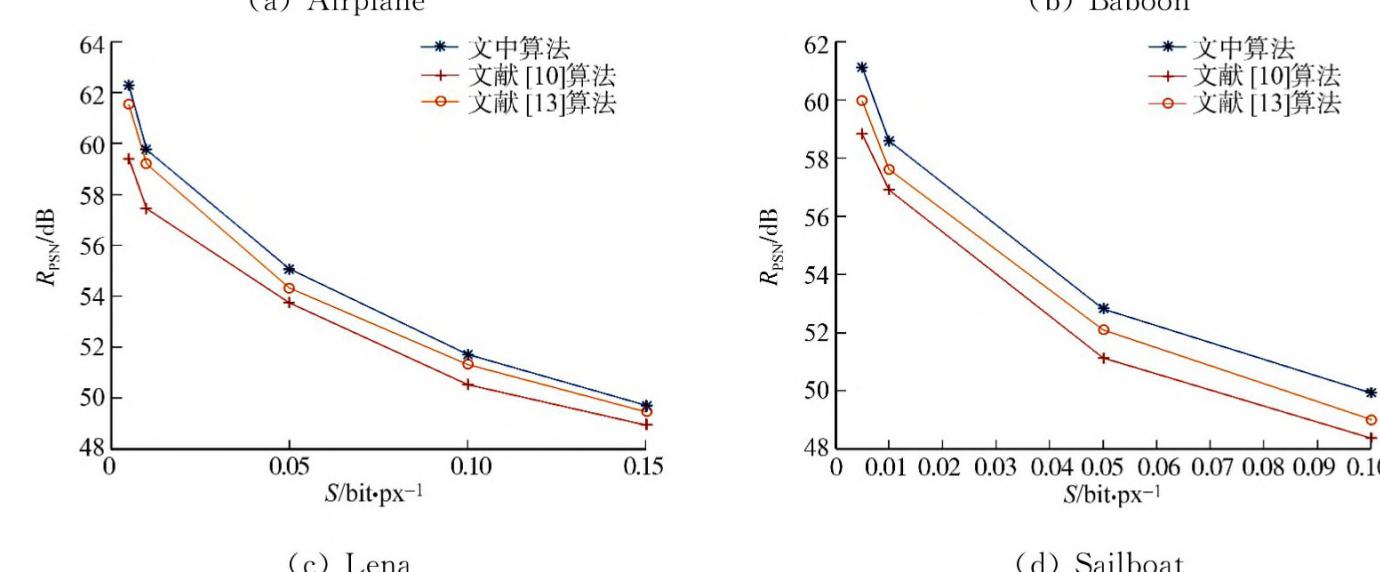


图 7 不同算法的峰值信噪比的对比

Fig. 7 Comparison of peak signal-to-noise ratio in different algorithms

实验结果表明,文中算法不仅能提高信息嵌入容量,还能提高载密图像的保真度。因此,文中算法可以提高预测精度,降低载密图像的失真度,从而有效地提升图像可逆信息隐藏的能力。

4 结束语

提出一种局部线性预测模型对待预测像素进行预测,经预测误差直方图的平移实现可逆信息隐藏。通过该预测模型可以确定线性预测关系,提升预测算法的预测精度,提高可逆信息的嵌入能力。在相同嵌入容量的情况下,文中算法比文献[10]算法、文献[13]算法具有更高的图像保真度。

参考文献:

- [1] ZHANG Xinpeng, WANG Shuozhong. Efficient steganographic embedding by exploiting modification direction[J].

- IEEE Communications Letters, 2006, 10(11): 781-783. DOI: 10.1109/LCOMM.2006.060863.
- [2] FRIDRICH J, GOLJAN M, DU Rui. Invertible authentication[C]// Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. San Jose:[s. n.], 2001: 197-208. DOI: 10.1117/12.435400.
- [3] XUAN Guorong, CHEN Jidong, ZHU Jiang, et al. Lossless data hiding based on integer wavelet transform[C]// IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing. Miami: IEEE Press, 2002: 312-315. DOI: 10.1109/MMSP.2002.1203308.
- [4] CELIK M U, SHARMA G, TEKALP A M, et al. Reversible data hiding[C]// International Conference on Image Processing. Rochester: IEEE Press, 2002: 157-160. DOI: 10.1109/ICIP.2002.1039911.
- [5] TIAN Jun. Reversible data embedding using a difference expansion[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(8): 890-896. DOI: 10.1109/TCSVT.2003.815962.
- [6] 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. DOI: 10.1109/TIP.2004.828418.
- [7] HUANG Fangjun, HUANG Jiwu, SHI Yunqing. New framework for reversible data hiding in encrypted domain[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2016, 11(12): 2777-2789. DOI: 10.1109/TIFS.2016.2598528.
- [8] SHI Yunqing. Reversible data hiding[C]// International Workshop on Digital Watermarking. Berlin: Springer, 2004: 1-12. DOI: 10.1007/978-3-540-31805-7_1.
- [9] LEE S K, SUH Y H, HO Y S. Reversible image authentication based on watermarking[C]// Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Toronto: IEEE Press, 2006: 1321-1324. DOI: 10.1109/ICME.2006.262782.
- [10] THODI D M, RODRIGUEZ J J. Expansion embedding techniques for reversible watermarking[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(3): 721-730. DOI: 10.1109/TIP.2006.891046.
- [11] YANG C H, YANG M H. Improving histogram-based reversible data hiding by interleaving predictions[J]. IET Image Processing, 2010, 4(4): 223-234. DOI: 10.1049/iet-ipr.2009.0316.
- [12] SACHNEV V, KIM H J, NAM J. Reversible watermarking algorithm using sorting and prediction[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2009, 19(7): 989-999. DOI: 10.1109/TCSVT.2009.2020257.
- [13] 王晓雨, 马宾, 李健, 等. 基于多元线性回归的自适应图像可逆信息隐藏误差预测算法[J]. 应用科学学报, 2018, 36(2): 362-370. DOI: 10.3969/j.issn.0255-8297.2018.02.014.
- [14] YI Shuang, ZHOU Yicong, HUA Zhongyun. Reversible data hiding in encrypted images using adaptive block-level prediction-error expansion[J]. Signal Processing: Image Communication, 2018, 64: 78-88. DOI: 10.1016/j.image.2018.03.001.
- [15] 盛驥, 謝式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)