

## 具有对比度增强效果的可逆信息隐藏研究进展与展望

杨杨<sup>1,2</sup>, 张卫明<sup>1</sup>, 侯冬冬<sup>1</sup>, 王辉<sup>1</sup>, 俞能海<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学中国科学院电磁空间信息重点实验室, 安徽 合肥 230027;

2. 安徽大学电子信息工程学院, 安徽 合肥 230039)

**摘要:** 可逆信息隐藏技术可以确保提取信息后无损恢复载体, 该技术可用于军事、司法、医学等图像的认证或标注, 在这些应用中图像很敏感, 轻微的修改也是不允许的。尤其在医学图像中, 可逆信息隐藏可用来保护病人隐私。主要介绍了具有对比度增强效果的可逆信息隐藏, 根据运用的载体类型将其分为基于像素直方图的方法和基于预测误差直方图的对比度增强的方法。该系列方法的主要目的是从主观上提高载密图像的质量, 并同时实现可逆信息嵌入, 这类方法适用于医学图像隐私保护。最后, 通过分析现有工作的优势与不足, 对未来的发展方向做了展望。

**关键词:** 可逆信息隐藏; 隐私保护; 对比度增强; 直方图平移

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-109x.2016.00045

## Research and prospect of reversible data hiding method with contrast enhancement

YANG Yang<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei-ming<sup>1</sup>, HOU Dong-dong<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, YU Neng-hai<sup>1</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Electromagnetic Space Information, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Anhui University, School of Electronics and Information Engineering, Hefei 230039, China)

**Abstract:** Reversible data hiding methods can recover the cover image losslessly after extracting the secret message from the marked image. Such technology can be used in the certification or the label of military, justice and medical images, which are sensitive and slight modification are not allowed. Especially for the medical images, RDH technology can be used in protecting the privacy of the patient. A series of RDH methods with contrast enhancement effect were introduced and classified into pixel-based histogram methods and prediction-error-based histogram methods according to the type of carrier in RDH scheme. The main purpose of such algorithms was to improve the subjective visual quality of marked images and to embed secret data into cover image reversibly meanwhile. These series of algorithms were suitable for the research of privacy protection of medical image. Finally, future development in this direction is prospected through analyzing the advantages and disadvantages of the existing work.

**Key words:** reversible data hiding, privacy protection, contrast enhancement, histogram shifting

收稿日期: 2016-03-09; 修回日期: 2016-04-07. 通信作者: 俞能海, ynh@ustc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61572452, No.61502007); 中国科学院战略性先导科技专项子课题基金资助项目 (No.XDA06030601); 安徽省自然科学基金资助项目 (No.1608085MF125); 中国博士后科学基金资助项目 (No.2015M582015); 安徽大学博士科研基金资助项目 (No.J01001319)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61572452, No.61502007), The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No.XDA06030601), The Natural Science Foundation of Anhui Province (No.1608085MF125), China Postdoctoral Science Foundation (No.2015M582015), Doctoral Scientific Research Foundation of Anhui University (No.J01001319)

## 1 引言

可逆信息隐藏 (RDH, reversible data hiding) 是一种特殊的信息隐藏技术,它除了要保证嵌入信息的隐密性和可提取性以外,同时需要完全无损地恢复原始载体<sup>[1-8]</sup>。这一特性在一些特殊的场合显得尤为重要,如医疗图像标注、军事图像和法庭取证方面,原始载体图像不允许有任何修改,图像像素的微小变化就可能导致诊断结果出错或者法律诉讼失败<sup>[9-12]</sup>。同时,可逆信息隐藏在完成图像内容真实性与完整性认证的同时,还能完全恢复载体图像,也引起了不同应用场景下越来越多的关注。另外,可逆隐藏在隐私保护中也有着重要的作用,例如,某些存放在第三方存储服务器上的大量高敏感的医学图像,由于其包含大量病人的个人信息,经常会有某些恶意行为带来的接触或者变更图像的内容。为了保护病人医学图像的隐私,必须提供有效的安全机制。因此,在医学图像中,希望不仅能够将病人隐私可逆地隐藏到医学图像当中,又能够不妨碍医生对医学图像的正确诊断。

目前,传统的可逆信息隐藏方法的主要目的在于提高信息嵌入容量的同时最大程度上降低载密图像的失真度。研究者常用峰值信噪比 (PSNR, peak signal to noise ratio) 来评价载密图像的质量,即计算载体图像与隐藏信息后图像的统计误差。在同一嵌入率下,PSNR 越大说明图像质量越好,图像失真度越小,算法性能越好。传统的可逆信息隐藏方法都在相同嵌入率下追求高的 PSNR 参数值,因此,传统可逆信息隐藏的核心基本分为 2 步: 1) 产生一个具有较小熵的主序列,其具有尖锐的直方图<sup>[13-17]</sup>; 2) 再利用直方图平移 (HS, histogram shifting)<sup>[18,19]</sup>和基于差值扩展 (DE, difference expansion)<sup>[20,21]</sup>的方法通过修改直方图在主序列中嵌入隐藏信息。为达到此目的,近年来可逆信息隐藏方法基本都采用排序或像素选择,优先使用平滑区域,因为平滑区域预测准确,可以获得更尖锐的预测误差直方图,但是修改平滑区域恰恰更容易造成人眼视觉的感知。所以,目前的可逆信息隐藏的主流方法与自然的视觉质量评价有矛盾之处,究其原因在于目前的可逆信

息隐藏方法过于追求峰值信噪比。

实际上,图像质量评价研究领域早已表明,由于图像的最终受体是人,目前评价结果较为准确的是主观图像质量评价方法<sup>[22]</sup>。另外,峰值信噪比作为评价图像质量的标准早已被证实与主观视觉感受不够吻合,这是因为传统的峰值信噪比仅仅是计算 2 幅图像间的像素差,未能考虑图像的自身结构信息以及人眼视觉特性,并不适合作为图像质量的判断标准<sup>[22,23]</sup>。因此,在最新的可逆信息隐藏研究中,已有学者从主观视觉的角度提出了具有对比度增强效果的可逆信息隐藏<sup>[24-27]</sup>,该系列方法与传统可逆信息隐藏追求高 PSNR 值的不同的目的,其目的在于通过增强载体图像的对比度来提高嵌入信息后的载密图像的主观视觉质量。该系列方法在实现可逆信息嵌入的同时提高了图像的视觉质量,从而适用于医学图像的隐私保护研究。

本文按照不同方法依据不同的载体,将该系列工作划分为基于像素直方图的<sup>[24,25]</sup>以及基于预测误差直方图的对比度增强的可逆信息隐藏方法<sup>[26,27]</sup>。其中,基于像素直方图的对比度增强的可逆信息隐藏方法主要描述了 Wu 等<sup>[24]</sup>提出的实现对比度增强的可逆信息隐藏方法,以及在 Gao 等<sup>[25]</sup>提出的改进的时域与频域相结合的实现对比度增强的可逆信息隐藏方法。这 2 种方法主要实现了大面积相同灰度参数的对比度增强效果,对于针对纹理区域增强要求的医学图像来说,有其一定的局限性。而基于预测误差直方图的对比度增强的可逆信息隐藏方法提出了基于复杂区域对比度增强的医学图像可逆信息隐藏方法<sup>[26,27]</sup>,其目的在于通过增强纹理复杂区域的对比度提高图像的边缘变化感兴趣区域的分辨率,同时实现可逆信息隐藏方法。在文献[26]的基础上,文献[27]根据预测误差直方图的 bin 存在一定的冗余量的信息,利用改进的 IRZL 编码方法预处理秘密信息,降低了隐藏图像的失真度。该系列工作在增强了载密图像对比度的同时还实现了秘密信息的可逆嵌入。

## 2 具有对比度增强效果的可逆信息隐藏方法

### 2.1 基于像素直方图的方法

基于像素直方图的方法主要是指在灰度直方

图上实现的可逆信息隐藏方法，这里主要介绍近期的 2 种方法：一是 Wu 等<sup>[24]</sup>首先提出的实现对比度增强的可逆信息隐藏方法，二是在 Wu 等基础上，Gao 等<sup>[25]</sup>改进的时域与频域相结合的可逆信息隐藏方法。

### 2.1.1 实现对比度增强的可逆信息隐藏方法

传统的可逆信息隐藏方法大多以 PSNR 作为评价载密图像质量的评价标准，而该方法与传统的可逆信息隐藏方法最大的不同在于，它并不是以追求高 PSNR 为目标，而是旨在实现载体图像的对比度增强效果。正如人们所知，图像均衡化方法可以实现图像的对比度增强方法。本文通过修改像素直方图来同时实现信息隐藏和对比度增强效果。该方法的优势在于操作简便，但是缺点在于容易产生细节遗失的情况以及出现过度增强等问题。下面介绍具体的信息嵌入和信息提取步骤。

信息嵌入部分主要包括以下 4 步。

1) 计算载体图像  $I$  的像素直方图  $h_I$ ，并用  $h_I(j)$  表示灰度值为  $j$  时的像素个数，其中， $j \in \{0, 1, \dots, 254, 255\}$ 。

2) 找到具有最大 2 个像素个数的灰度值，分别定义为  $I_S$  和  $I_R$ ，其中  $I_S < I_R$ 。

3) 对载体图像中的每个像素  $i$  进行如下嵌入和平移操作

$$i' = \begin{cases} i-1 & , i < I_S \\ I_S - b_K & , i = I_S \\ i & , I_S < i < I_R \\ I_R + b_K & , i = I_R \\ i+1 & , i > I_R \end{cases} \quad (1)$$

其中， $b_K \in (0, 1)$  表示需要隐藏的信息， $i'$  表示修改后的像素值。由此，共可以嵌入  $h_I(I_S) + h_I(I_R)$  个比特信息。

4) 假设嵌入信息需要嵌入  $L$  轮，则需要重复执行第 2)~3)步。

在嵌入部分，需要通过预理解决溢出问题以及隐藏一些附加信息以方便提取。这里，预处理是指当载体图像的像素在  $i \in [0, L-1]$  时，可以将其加  $L$ ，并且当  $i \in [256-L, 255]$  时，可以将其减去  $L$  来防止  $L$  轮嵌入后导致的溢出问题，并用位置图中的“1”表示预处理的像素位置，“0”表示原始的像素位置。所以，位置图的大小等于整

幅图像的大小，需要对位置图进行 JBIG2 标准压缩以减小嵌入量<sup>[28]</sup>。嵌入时，首先嵌入压缩的位置图，然后再嵌入隐秘信息，在最后一轮嵌入操作时，需要将  $L$  参数、压缩后的位置图尺寸、最后一行开始的 16 个像素的 LSB 位以及所有的  $I_S$  和  $I_R$  都嵌入。另外，最后一行开始的 16 个像素的 LSB 位则直接被替换为最后一轮的  $I_S$  和  $I_R$ 。

信息提取和载体图像恢复部分主要包括以下 4 步。

1) 读取最后一行开始的 16 个像素的 LSB 位，则得到最后一轮的  $I_S$  和  $I_R$ 。

2) 根据最后一轮的  $I_S$  和  $I_R$ ，可以提取信息

$$b'_k = \begin{cases} 1, & i' = I_S - 1 \\ 0, & i' = I_S \\ 0, & i' = I_R \\ 1, & i' = I_R + 1 \end{cases} \quad (2)$$

恢复原始像素

$$i = \begin{cases} i'+1, & i' < I_S - 1 \\ I_S, & i' = I_S - 1 \text{ 或 } i' = I_S \\ I_R, & i' = I_R \text{ 或 } i' = I_R + 1 \\ i'-1, & i' > I_R + 1 \end{cases} \quad (3)$$

由此，可以得到嵌入时的  $L$  参数、压缩后的位置图尺寸，最后一行开始的 16 个像素的 LSB 位以及所有的  $I_S$  和  $I_R$ 。

3) 根据第 2) 步得到所有的  $I_S$  和  $I_R$ ，重复  $L-1$  次式(2)和式(3)可以得到所有的嵌入信息以及恢复原始图像。

4) 通过得到压缩后的位置图尺寸，可以在嵌入信息中提取压缩后的位置图，并对其进行解压缩。另外，根据提取出的最后一行开始的 16 个像素的 LSB 位，替换载密图像的相对位置，从而完全恢复出原始图像。

### 2.1.2 改进的时域与频域相结合的对比度增强可逆信息隐藏方法

针对 Wu 等<sup>[24]</sup>的可逆信息隐藏方法中在大嵌入率时存在对比度过度增强的问题，从而产生视觉失真的现象，Gao 等<sup>[25]</sup>提出了一种控制对比度增强效果并且结合小波域嵌入的可逆信息隐藏方法。该方法的特点在于解决对比度过度增强的同时可以扩大嵌入容量，然而该方法的缺点在于嵌入量较小时，难以实现对比度增强效果。

在时域嵌入部分，具体步骤和 Wu 等的嵌入方法一样，具体过程参见上一节，这里不再赘述。本文主要通过计算相对对比度误差 (RCE, relative contrast error) 来防止对比度过度增强问题。一般来说，对比度增强效果可以通过计算 RCE 来判断

$$RCE = \frac{Std_e - Std_o}{R - 1} + 0.5 \quad (4)$$

其中， $Std_e$ 、 $Std_o$  分别表示原始图像和增强图像的标准差，对于一个 8 位的灰度图像  $R = 256$ 。

RCE 表示原始图像和增强图像的对比度增强程度，其区间在  $[0, 1]$ <sup>[29]</sup>。

设定阈值  $T_{rce}$  的经验值为 0.55。初始假定需要嵌入  $L$  轮消息，然后根据 2.1.1 节的嵌入过程可以得到对比度增强后的结果，再计算该结果和原始图像的 RCE。若  $RCE < T_{rce}$ ，参数  $L$  就加 1；否则就减 1。其目的就是为了使最终的 RCE 临近于  $T_{rce}$ ，从而控制实现较好的对比度增强效果。

在频域嵌入部分，主要是对经过时域嵌入后的隐密图像进行 Haar 小波变换，从而得到 4 组子带系数（近似系数  $LL$ 、水平系数  $LH$ 、垂直系数  $HL$  和对角系数  $HH$ ），并将剩余的秘密信息嵌入到对视觉影响较小的水平系数，垂直系数和对角系数中。具体嵌入步骤如下。

1) 对经过时域嵌入后的隐密图像进行 Haar 小波变换，得到 4 组子带系数

$$\begin{aligned} A_{p,q} &= \left[ \frac{r_{2p,2q} + r_{2p,2q+1}}{2} + \frac{r_{2p+1,2q} + r_{2p+1,2q+1}}{2} \right] \\ V_{p,q} &= \left[ \frac{r_{2p,2q+1} - r_{2p,2q} + r_{2p+1,2q+1} - r_{2p+1,2q}}{2} \right] \\ H_{p,q} &= \left[ \frac{r_{2p+1,2q} + r_{2p+1,2q+1}}{2} - \frac{r_{2p,2q} + r_{2p,2q+1}}{2} \right] \\ D_{p,q} &= (r_{2p+1,2q+1} - r_{2p+1,2q}) - (r_{2p,2q+1} - r_{2p,2q}) \end{aligned} \quad (5)$$

其中， $r_{i,j}$  表示时域嵌入后的隐密图像的像素值， $i \in [0, M - 1]$ ， $j \in [0, N - 1]$ 。 $A_{p,q}$  表示近似子带系数， $V_{p,q}$  表示垂直子带系数， $H_{p,q}$  表示平行子带系数， $D_{p,q}$  表示对角线子带系数， $p \in \left[ 0, \frac{M}{2} - 1 \right]$ ， $q \in \left[ 0, \frac{N}{2} - 1 \right]$ 。

2) 由于水平子带系数，垂直子带系数和对角子带系数对视觉影响较小，故将剩余秘密信息  $b$  嵌入到扩展的子带系数  $x \in \{LH, HL, HH\}$  中。为了防止子带系数  $x$  扩展造成像素值改变较大的问题，首先对子带系数进行压缩

$$x_c = f_c(x) = \begin{cases} x & , |x| < T \\ \rho(x) \left( \left\lfloor \frac{|x| - T}{2} \right\rfloor + T \right) & , |x| \geq T \end{cases} \quad (6)$$

其中， $x_c$  表示压缩后的子带系数，阈值  $T$  是个正整数，且  $\rho(x) = \begin{cases} 1, & x \geq T \\ -1, & x < -T \end{cases}$ 。

然后，将消息  $b$  嵌入到压缩的子带系数中  $x_{cb} = 2x_c + b$ 。

嵌入部分完成后，该方法的数据提取和图像恢复部分与嵌入顺序相反。先对小波域进行提取，再在时域进行提取，时域的提取和恢复过程同上节。这里主要介绍小波域的提取步骤。

1) 对载密图像进行 Haar 小波变换，根据式 (5) 得到 4 组子带系数。

2) 提取  $x_{cb} \in \{LH, HL, HH\}$  系数的 LSB 位，从而得到秘密信息

$$b = LSB(x_{cb}) \quad (7)$$

以及压缩的子带系数

$$x_c = \frac{x_{cb} - b}{2} \quad (8)$$

3) 对压缩的子带系数进行解压缩操作，得到恢复的扩展子带系数  $x'$

$$x' = f_e(x_c) = \begin{cases} x_c & , |x_c| < T \\ \rho(x_c)(2|x_c| - T) & , |x_c| \geq T \end{cases} \quad (9)$$

4) 进而恢复原始子带系数  $x$

$$x = \begin{cases} x' + 1, & x' > 0 \ \& \ e = 1 \\ x', & e = 0 \\ x' - 1, & x' < 0 \ \& \ e = 1 \end{cases} \quad (10)$$

其中， $e$  表示原始子带系数  $x$  与扩展子带系数  $x'$  之间的差值，即  $e = x - f_e(f_c(x))$ 。需要注意的是，在嵌入部分扩展误差参数  $e$  也需要作为附加信息与秘密信息一起嵌入到载体图像中。

5) 利用 IWT 反变换，可以得到时域嵌入后的隐密图像

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{2p,2q} = A_{p,q} - \left\lfloor \frac{H_{p,q}}{2} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{V_{p,q} - \left\lfloor \frac{D_{p,q}}{2} \right\rfloor}{2} \right\rfloor \\ r_{2p+1,2q} = A_{p,q} + \left\lfloor \frac{H_{p,q} + 1}{2} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{V_{p,q} + \left\lfloor \frac{D_{p,q} + 1}{2} \right\rfloor}{2} \right\rfloor \\ r_{2p,2q+1} = A_{p,q} - \left\lfloor \frac{H_{p,q}}{2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{V_{p,q} - \left\lfloor \frac{D_{p,q}}{2} \right\rfloor + 1}{2} \right\rfloor \\ r_{2p+1,2q+1} = A_{p,q} + \left\lfloor \frac{H_{p,q} + 1}{2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{V_{p,q} + \left\lfloor \frac{D_{p,q} + 1}{2} \right\rfloor + 1}{2} \right\rfloor \end{array} \right. \quad (11)$$

6) 时域部分嵌入的秘密数据的提取和原始图像的恢复过程按照上节介绍的提取和恢复步骤进行操作<sup>[24]</sup>, 此处不再赘述。

## 2.2 基于预测误差直方图的方法

基于预测误差直方图的方法主要是在预测误差直方图上实现的可逆信息隐藏方法, 该方法的主要目的也是为了在嵌入秘密信息的同时增强载体图像的对比度。2.1 节介绍的基于像素直方图的方法主要针对的是全局区域的均衡化操作, 它并不能实现局部纹理区域的对比度增强效果。例如, 对于医学图像大部分包括的都是灰度背景来说, 2.1 节介绍的基于像素直方图的方法显然不适用。因为基于像素直方图的方法优先修改的是频数最高的 2 个灰度值, 从而不会实现局部纹理区域的对比度增强效果。为此, Yang 等<sup>[26]</sup>提出了可提高医学图像纹理区域对比度的可逆信息隐藏方法, 以及在此基础上 Yang 等<sup>[27]</sup>提出了在提高医学图像纹理区域对比度的同时降低图像失真度的可逆信息隐藏方法。

### 2.2.1 增强医学图像纹理区域对比度的可逆信息隐藏方法

传统的可逆信息隐藏方法为了追求较高的 PSNR 值, 往往优先将像素嵌在平滑区域。然而, 为了增强医学图像纹理区域的对比度, 文献<sup>[26]</sup>利用预测误差直方图中间区域表示平滑区域, 两侧区域表示纹理区域的特性, 将信息优先嵌入在两侧区域, 以期实现纹理区域的对比度增强效果。该方法采用的预测误差直方图方法是利用文献<sup>[14]</sup>提出的棋盘格式两次预测和嵌入模型, 其优

势在于预测较准以及优先选择纹理像素。下面本文介绍一次的嵌入过程, 另一次嵌入是在修改后的载密图像基础上再次嵌入。

信息嵌入部分主要包括以下 7 个步骤。

1) 计算载体图像中像素  $u_{i,j}$  的预测值  $\hat{u}_{i,j}$

$$\hat{u}_{i,j} = \left\lfloor \frac{v_{i,j-1} + v_{i+1,j} + v_{i,j+1} + v_{i-1,j}}{4} \right\rfloor \quad (12)$$

其中,  $(v_{i,j-1}, v_{i+1,j}, v_{i,j+1}, v_{i-1,j})$  表示原始像素  $u_{i,j}$  的上下左右 4 个像素点。

2) 计算预测误差直方图 PEH。根据预测值和原始值可以得到预测误差

$$e_{i,j} = u_{i,j} - \hat{u}_{i,j} \quad (13)$$

3) 在预测误差直方图 PEH 中选择初始参数  $T_m$ 。由于 PEH 两侧的预测误差值  $e_{i,j}$  不相同, 因此这里选择绝对值较小的参数为初始参数

$$T_m = \min(|\min(e_{i,j})|, \max(e_{i,j})) \quad (14)$$

4) 在预测误差直方图 PEH 中选择截止参数  $T_p$ 。截止参数的选择需要满足嵌入容量的需求, 即

$$\begin{aligned} & \text{maximize } T_p \in (0, 1, 2, \dots, T_m) \\ & \text{subject to } \left( \sum_{E=-T_p}^{-T_m} \text{hist}(E) + \sum_{E=T_m}^{T_p} \text{hist}(E) \right) > \text{Capacity} \end{aligned} \quad (15)$$

这里,  $\text{hist}(E)$  表示预测误差为  $E$  的像素频数,  $\text{Capacity}$  为需要嵌入的信息容量。

5) 对像素进行纹理度排序。预测误差直方图的嵌入范围为  $\pm E \in [\pm T_p, \pm T_m]$ , 在该范围内为了优先嵌入纹理区域, 还对每个原始像素计算了纹理复杂度参数

$$LV(u_{i,j}) = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (\Delta v_k - \Delta \bar{v}_k)^2 \quad (16)$$

其中,  $\Delta v_1 = |v_{i,j-1} - v_{i-1,j}|$ ,  $\Delta v_2 = |v_{i-1,j} - v_{i,j+1}|$ ,  $\Delta v_3 = |v_{i,j+1} - v_{i+1,j}|$ ,  $\Delta v_4 = |v_{i+1,j} - v_{i,j-1}|$ ,  $\Delta \bar{v}_k = \frac{\Delta v_1 + \Delta v_2 + \Delta v_3 + \Delta v_4}{4}$ 。已知  $LV$  越大表示纹理度

越大, 因此, 这里对嵌入范围的像素进行逆排。

6) 嵌入秘密信息  $d \in (0,1)$ 。将预测误差直方图的嵌入范围两侧的像素, 即  $e_{i,j} > E$  或者  $e_{i,j} < -E$  向两侧平移距离  $s$ , 然后将像素嵌入到  $\pm E$  上, 即

$$D_{i,j} = \begin{cases} e_{i,j} + s & , e_{i,j} > E \\ e_{i,j} - s & , e_{i,j} < -E \\ e_{i,j} + d & , e_{i,j} = E \\ e_{i,j} - d & , e_{i,j} = -E \\ e_{i,j} & , \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

其中，平移距离  $s$  一般经验值选为 1 和 2， $D_{i,j}$  为修改后的预测误差。

7) 计算载密图像  $U_{i,j} = D_{i,j} + \hat{u}_{i,j}$ 。

这里需要注意，由于采用的是棋盘格式的预测计算方法，因此嵌入部分需要在对“cross”点完成一次嵌入过程后，再次对“dot”点进行一次嵌入。而对于秘密信息提取和原始图像恢复过程，却是嵌入的相反次序。下面介绍对“dot”点的信息提取和像素恢复过程（“cross”点的操作过程相同）。

1) 读取开始的  $55 + N_{\text{flow}}$  个像素的 LSB 位，从而得到附加信息：初始参数  $T_m$ 、截止参数  $T_p$ 、最大平移次数  $f_{\text{max}}$ 、平移距离  $s$ 、嵌入容量、压缩的位置图的尺寸  $N_{\text{flow}}$  和压缩的位置图。

2) 再次计算预测参数  $\hat{u}_{i,j}$  和纹理度参数  $LV$ ，此处参考式(12)和式(16)，并对  $LV$  进行逆排。

3) 计算修改的预测误差  $D_{i,j} = U_{i,j} - \hat{u}_{i,j}$ ，并从截止参数  $T_p$  开始一直搜索到初始参数  $T_m$ ，共寻找  $f_{\text{max}}$  次，这里可以用计数器  $f_i$  来表示从 0 到  $f_{\text{max}} - 1$  次的变化。从而可以用式(18)提取出隐藏信息  $d$  和恢复原始预测误差  $e'_{i,j}$ 。

$$e'_{i,j} = \begin{cases} D_{i,j} - f_i s, (d=0), (D_{i,j} = H_i + f_i s) \\ D_{i,j} + f_i s, (d=0), (D_{i,j} = -H_i - f_i s) \\ D_{i,j} - f_i s - 1, (d=1), (D_{i,j} = H_i + f_i s + 1) \\ D_{i,j} + f_i s + 1, (d=1), (D_{i,j} = -H_i - f_i s - 1) \\ D_{i,j}, ((D_{i,j} < H_i + f_i s) \& (D_{i,j} > -H_i - f_i s)) \end{cases} \quad (18)$$

其中，修改的预测误差  $H_i$  从  $T_p$  变化到  $T_m$ 。

4) 为了无损地恢复原始的预测误差，大于  $T_m$  或者小于  $-T_m$  的像素也需要恢复，如

$$e'_{i,j} = \begin{cases} D_{i,j} - f_{\text{max}} s & , (D_{i,j} > e_m + (f_{\text{max}} - 1)s + 1) \\ -D_{i,j} + f_{\text{max}} s & , (D_{i,j} < -e_m - (f_{\text{max}} - 1)s - 1) \end{cases} \quad (19)$$

5) 恢复载体图像  $u_{i,j} = \hat{u}_{i,j} + e'_{i,j}$ 。

6) 利用第 3) 步提取的秘密信息中所包含的  $S_{\text{LSB}}$ ，替换前  $55 + N_{\text{flow}}$  个像素的 LSB 位，从而实

现了完整的信息提取和无损载体图像恢复。

### 2.2.2 增强医学图像纹理区域对比度并降低图像失真度的可逆信息隐藏方法

文献[26]主要介绍了通过计算载体图像的预测误差直方图来判断像素的纹理和平滑区域，从而将信息嵌入到图像的纹理区域，以期实现医学图像纹理区域的对比度增强效果。然而，正如开始所言，具有对比度增强的可逆信息隐藏方法不适用于传统的 PSNR 评价指标。这是因为 PSNR 计算载体图像与隐藏信息后图像的统计误差，因此在平滑区域的修改会带来较高的 PSNR 结果。可见，该结论与提高纹理区域的对比度增强效果的目的相矛盾，那是否有方法能够在提高纹理区域对比度增强效果的同时适当提高 PSNR 结果，即降低图像失真度呢？

文献[27]和文献[26]使用了相同的提高纹理区域对比度的可逆信息隐藏方法的同时，通过利用改进的 IRZL 编码方法预处理秘密信息，使该秘密信息出现更多的“0”比特和更少的“1”比特，从而降低“1”比特所带来的失真问题<sup>[30]</sup>。下面将着重介绍降低图像失真度的方法。文中已经证明，嵌入失真主要是由失真率决定，而失真率主要是由信息中的比特“1”所造成的。一般来说，失真率  $0 \leq \Delta \leq \frac{1}{2}$ 。当然，该编码所带来的

代价是要扩大秘密信息的比特数，由此可能会带来预测误差直方图初始位置  $\pm T_m$  两侧像素扩展平移所带来的失真。为此，假定编码的扩展率为  $R_0 = \frac{L}{CL}$ ，这里  $L$  表示原始的信息长度， $CL$  表示编码扩展后的信息长度。为了避免多余平移带来的多余失真问题， $CL$  可以选择为预测误差直方图的嵌入范围在  $[-T_m, -T_p] \cup [T_m, T_p]$  之内，即

$$CL = \sum_{E=-T_m}^{-T_p} \text{hist}(E) + \sum_{E=T_m}^{T_p} \text{hist}(E) \quad (20)$$

其中， $T_m$  为初始参数， $T_p$  为截止参数。

IRZL 编码的原始思想就是将  $L$  长度的信息嵌入到  $CL$  长度的全零载体中<sup>[30]</sup>。它主要利用双层编码结构，在外层嵌入 1 个比特信息，根据外层比特决定是否在内层使用 RZL 编码嵌入信息。假设载体序列  $x = (x_1, x_2, \dots, x_{CL})$  是一个全 0 序列，将嵌入信息序列  $m = (m_1, m_2, \dots, m_L)$ ，得到载密序

列  $y = (y_1, y_2, \dots, y_{CL})$ 。下面将描述 IRZL 编码的信息嵌入过程。

- 1) 令  $P1 = 0, P2 = 0$ 。
- 2) 若  $m_{P2+1} = 0$ , 令  $P1 = P1 + 2^k, P2 = P2 + 1$ 。

下文中, 下标  $P1$  表示上一个被修改的载体码元的位置, 下标  $P2$  表示上一个被嵌入载体的信息比特的位置。  $k$  是编码参数 ( $k > 0$ ), 即通过在载体中跳过  $2^k$  个码元来嵌入一比特信息“0”; 否则, 读取接下来的  $k$  个信息比特  $(m_{P2+2}, \dots, m_{P2+k+1})$ , 将其看作一个  $k$  位二进制数, 计算它对应的十进制数  $(m_{P2+2}, \dots, m_{P2+k+1})_{int}$ , 令  $P1 = P1 + (m_{P2+2}, \dots, m_{P2+k+1})_{int} + 1, P2 = P2 + k + 1$ , 并将  $x_{P1}$  置为 1, 这样嵌入了  $k + 1$  个比特信息。

- 3) 反复执行步骤 2), 直到  $P1 > CL - 2^k$ 。

文中分析表明该方法可实现编码的扩展率为  $R = \frac{2k + 4}{3 \times 2^k + 1}$ , 即意味着扩展率由参数  $k$  所决定。当  $k = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots]$  时, 对应的编码扩展率为  $R = [1.0000, 0.8571, 0.6154, 0.4000, 0.2449, 0.1443, \dots]$ 。因此, 为了实现要求的编码扩展率  $R_0$ , 需要选择 2 个编码率  $R_1(k_1)$  和  $R_2(k_2)$ , 且  $R_1(k_1) < R_0, R_2(k_2) > R_0$ 。将原始信息根据系数  $\alpha$  和  $\beta$  分为两组, 且  $\alpha$  和  $\beta$  满足

$$\begin{cases} \alpha R_1(k_1) + \beta R_2(k_2) = R_0 \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases} \quad (21)$$

从而原始像素分为两部分  $m_1$  和  $m_2$ , 其中一部分长度  $L_1 = \alpha L$ , 另一部分长度  $L_2 = \beta L$ , 这里  $L$  为原始信息长度。通过编码, 得到两部分扩展信息  $dm_1$  和  $dm_2$ , 其长度总合为  $CL$ 。

在信息提取和原始图像恢复过程中, 首先得到的也是编码后的扩展秘密信息  $dm_1$  和  $dm_2$ , 下面介绍解码原始的秘密信息  $m$  的步骤。

- 1) 令  $P1 = 0, P2 = 0$ 。
- 2) 读取  $(dm_{P1+1}, \dots, dm_{P1+2^k})$ , 如果这  $2^k$  个码元全是 0, 则提取 1 bit 信息“0”, 置  $m_{P2+1} = 0$ , 并令  $P1 = P1 + 2^k, P2 = P2 + 1$ ; 否则, 置  $m_{P2+1} = 1$ , 并从  $P1$  开始找到下一个值为 1 的码元的位置  $p$ , 则  $l = p - P1 - 1$  表示中间连续 0 的个数, 把  $l$  表示为  $k$  位二进制数的形式  $(l_1, \dots, l_k)$ , 然后提取这  $k$  个比特信息  $(m_{P2+2}, \dots, m_{P2+k+1}) = (l_1, \dots, l_k)$ , 然后令  $P1 = p, P2 = P2 + k + 1$ 。

- 3) 反复执行步骤 2), 直到  $P1 > CL - 2^k$  且  $(dm_{P1+1}, \dots, dm_{CL})$  全是 0。

### 3 未来展望

#### 3.1 优化对比度增强方法的可逆信息隐藏

从前面的分析可以看出, 目前, 具有对比度增强效果的可逆信息隐藏方法是在不同的载体直方图上进行类似直方图均衡化的对比度增强操作。该方法的优势在于操作简便, 但是缺点在于无法实现最优的对比度增强效果, 且会容易产生细节遗失的情况以及出现过度增强等问题。实际上, 目前, 在图像处理研究领域中对比度增强算法已有较多优化的算法。例如, 针对传统直方图均衡化后图像过度增强问题, Kim 等<sup>[31]</sup>提出了均值分割的 BBHE 算法, Chen 等<sup>[32]</sup>提出了递归均值分割直方图的 RMSHE 算法, Wang 等<sup>[33]</sup>提出了等面积的双子图像的 DSIHE 算法, Sim 等<sup>[34]</sup>提出了递归的 RSIHE 算法, Chen 等<sup>[35]</sup>提出了最小均值误差的 MMBEBHE 算法; 针对有些图像部分灰度级, 特别是图像细节的灰度级被过度合并, 而导致图像部分细节信息丢失的问题, 有学者提出了一种均衡化处理后再增加图像灰度级的算法。应该说目前的对比度增强算法也是期望与主观视觉相一致的, 从主观上真正实现自然的对比度增强效果。接下来, 可以考虑将进一步优化的对比度增强算法有机地融合到可逆信息隐藏算法中, 实现自适应的具有自然对比度增强效果的可逆信息隐藏算法。

#### 3.2 完善适用于对比度增强算法的评价体系

目前, 讨论的具有对比度增强效果的可逆信息隐藏方法虽然众多, 但是当评价各自方法性能优劣的时候, 除了用传统的峰值信噪比作为其中一个指标外, 一般还使用  $RCE = \frac{Std_e - Std_o}{255} + 0.5$

来判断原始图像和增强图像的对比度增强程度。这里,  $Std_e$ 、 $Std_o$  分别表示原始图像和增强图像的标准差。从公式可以看出它也是针对点信息的计算结果, 难以从主观视觉的角度给出一个准确的评价结果。目前, 图像质量评价研究领域也鲜有针对对比度增强效果的图像质量评价标准<sup>[36]</sup>, 下一步可以考虑设计适用于具有对比度增强效果的可逆信息隐藏方法的图像质量评价体系, 从而完善现有可逆信息隐藏方法的比较, 真正找到具

备优化对比度增强效果的可逆信息隐藏。

### 3.3 具备其他图像处理操作的可逆信息隐藏

随着图像处理技术的快速发展,各种图像处理技术层出不穷。例如,常见的美图软件等,除了实现简单的类似提高对比度等操作外,还可以进行大量的图像处理操作。那么,是否可以考虑将这种图像处理操作与可逆信息隐藏技术相融合,实现一种图像行为艺术的信息隐藏技术呢?例如,可以在对图片进行PS操作的同时实现信息的可逆性隐藏,从某种程度上来说,该操作本身也提高了图片的安全性,实现了隐私保护的目的。

## 4 结束语

传统的可逆信息隐藏技术往往是以峰值信噪比作为评价载密图像质量的主要标准,从而传统的可逆信息隐藏方法都在相同的嵌入率下追求高的PSNR参数值。为了达到此目的,近年来,可逆信息隐藏方法基本都采用排序或像素选择,优先使用平滑区域,因为平滑区域预测准确,可以获得更尖锐的预测误差直方图,但是修改平滑区域恰恰更容易造成人眼视觉的感知。所以,目前的可逆信息隐藏方法的主流方法与自然的视觉质量评价有矛盾之处,究其原因在于目前可逆信息隐藏方法过于追求峰值信噪比。在最新的可逆信息隐藏研究中,已有学者从主观视觉的角度提出了具有对比度增强效果的可逆信息隐藏方法<sup>[24~27]</sup>,该系列方法与传统可逆信息隐藏追求高PSNR值的目的不同,其目的在于通过增强载体图像的对比度来提高嵌入信息后的载密图像的主观视觉质量。

### 参考文献:

- [1] SHI Y Q, NI Z, ZOU D, et al. Lossless data hiding: fundamentals, algorithms and applications[C]//IEEE ISCAS. c2004: 33-36.
- [2] ZHANG W M, MA K D, YU N H. Reversibility improved data hiding in encrypted images[J]. Signal Processing, 2014, 94(1): 118-127.
- [3] ZHANG W M, HU X C, YU N H, et al. Recursive histogram modification: establishing equivalency between reversible data hiding and lossless data compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(7): 2775-2785.
- [4] HU X C, ZHANG W M, YU N H, et al. Fast estimation of optimal marked-signal distribution for reversible data hiding[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2013, 8(5): 779-788.
- [5] ZHANG W M, CHEN B, YU N H. Improving various reversible data hiding schemes via optimal codes for binary covers[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(6): 2991-3003.
- [6] LI X, ZHANG W, GUI X, et al. A novel reversible data hiding scheme based on two-dimensional difference histogram modification[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2013, 8(7): 1091-1100.
- [7] ZHANG X, QIAN Z, FENG G. Efficient reversible data hiding in encrypted images[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2014, 25(2): 322-328.
- [8] QIN C, CHANG C C, CHIU Y P. A novel joint data-hiding and compression scheme based on SMVQ and image inpainting[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(3): 49-55.
- [9] FENG J, LIN I, TSAI C, et al. Reversible watermarking: current status and key issues[J]. International Journal of Network Security, 2016, 2(3): 161-171.
- [10] CHUNG K, HUANG Y, CHANG P, et al. Reversible data hiding-based approach for intra-frame error concealment in H.264/AVC[J]. IEEE Transactions on Circuits System and Video Technology, 2010, 20(11): 1643-1647.
- [11] BAO F, DENG R H, OOI B C, et al. Tailored reversible watermarking schemes for authentication of electronic clinical atlas[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2005, 9(4): 554-563.
- [12] BRAR A S, KAUR M. "Reversible watermarking techniques for medical images with ROI-temper detection and recovery-a survey[J]. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2012, 2(1): 32-36.
- [13] THODI D, RODRIGUEZ J. Expansion embedding techniques for reversible watermarking[J]. IEEE Transactions Image Processing, 2017, 16(3): 721-730.
- [14] SACHNEV V, KIM H J, NAM 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.
- [15] LI X B, ZHAO Y, NI R, et al. Pairwise prediction-error expansion for efficient reversible data hiding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(12): 5010-5012.
- [16] DRAGOI I C, COLTUC D. Local-prediction-based difference expansion reversible watermarking[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(4): 1779-1790.
- [17] LI X, YANG B, ZENG T. Efficient reversible watermarking based on adaptive prediction-error expansion and pixel selection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(12): 3524-3533.
- [18] NI Z, SHI Y, ANSARI N, et al. Reversible data hiding[J]. IEEE Transactions Circuits Systems for Video Technology, 2006, 16(3): 354-362.
- [19] QIN C, CHANG C C, HUANG Y H, et al. An inpainting-assisted reversible steganographic scheme using a histogram shifting mechanism[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2013, 23(7): 1109-1118.
- [20] TIAN J. Reversible data embedding using a difference expansion[J]. IEEE Transactions on Circuits System and Video Technology, 2003, 13(8): 890-896.
- [21] QIN C, CHANG C C, LIAO L T. An adaptive prediction-error expansion oriented reversible information hiding scheme[J]. Pattern Recognition Letters, 2012, 33(16): 2166-2172.
- [22] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Process, 2004, 13(4): 600-612.

[23] YANG Y, MING J. Image quality assessment based on the space similarity decomposition model[J]. Signal Processing, 2016, 120(3): 797-805.

[24] WU H T, DUGELAY J L, SHI Y Q. Reversible image data hiding with contrast enhancement[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(1): 81-85.

[25] GAO G Y, SHI Y Q. Reversible data hiding using controlled contrast enhancement and integer wavelet transform[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(11): 2078-2082.

[26] YANG Y, ZHANG W M, YU N H. Improving visual quality of reversible data hiding in medical image by texture-based contrast enhancement[C]//The 11th International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, Adelaide, Australia, c2015: 81-84.

[27] YANG Y, ZHANG W M, DONG L, et al. Reversible data hiding in medical images with improving texture area resolution and using message sparse representation[J]. Digital Signal Processing, 2016, 52: 13-24.

[28] HOWARD P G, KOSENTINI F, MARTINS B, et al. The emerging JBIG2 standard[J]. IEEE Transactions Circuits Systems for Video Technol, 1998, 8(7): 838-848.

[29] GAO M, WANG L. Comprehensive evaluation for HE based contrast enhancement[M]. Berlin:Springer. 2013: 331-338.

[30] ZHANG W M, CHEN B, YU N H. Improving various reversible data hiding schemes via optimal codes for binary covers[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(6): 2991-3003.

[31] KIM Y T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1997, 43(1): 1-8.

[32] CHEN S D, RAMLI A R. Contrast enhancement using recursive mean-separate histogram equalization for scalable brightness preservation[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(4) : 1301-1309.

[33] WANG Y, CHEN Q, ZHANG B. Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1999, 45(1): 68-75.

[34] SIM K S, TSO C P, TAN Y Y. Recursive sub-image histogram equalization applied to gray scale images[J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(10) : 1209-1221.

[35] CHEN S D, RAMLI A R. Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(4) : 1310-1319.

[36] GU K, ZHAI G T, LIN W S, et al. The analysis of image contrast: from quality assessment to automatic enhancement[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(1): 1.

作者简介：



杨杨 (1980-), 女, 安徽合肥人, 博士, 中国科学技术大学博士后, 安徽大学讲师, 主要研究方向为信息隐藏、图像质量评价。



张卫明 (1976-), 男, 河北定州人, 博士, 中国科学技术大学副教授, 主要研究方向为信息隐藏、密码学和媒体内容安全。



侯冬冬 (1991-), 男, 安徽淮南人, 中国科学技术大学硕士生, 主要研究方向为信息隐藏、图像处理等。



王辉 (1992-), 男, 浙江嘉兴人, 中国科学技术大学硕士生, 主要研究方向为密文域可逆信息隐藏、图像处理等。



俞能海 (1964-), 男, 安徽无为, 博士, 中国科学技术大学教授、博士生导师, 主要研究方向为图像处理与媒体内容安全、互联网信息检索与数据挖掘。