# 基于自适应特征区域提取和局部直方图移位的鲁棒数字水印方法

蒋子瑜[1], 潘志文[1]*、袁晓晨[1] 和刘彤[1]

[1]中国澳门特别行政区澳门大学计算机与信息科学系。

*通讯作者。电子邮件：cmpun@umac.mo；

**摘要**

本文提出了一种基于直方图移位的新型局部水印方法，以应对各种信号处理攻击（如中值滤波、JPEG压缩和高斯噪声添加）以及几何攻击（如旋转、缩放和裁剪）。该方法使用特征检测器选择用于嵌入的局部区域。随后，对每个局部区域进行平稳小波变换（SWT），并将相应的对角系数置零以实现去噪。通过直方图移位，将水印嵌入去噪后的局部区域。同时，嵌入过程中使用密钥，确保水印不易被破解，从而保障安全性。嵌入完成后，利用SWT对角系数重建含水印图像。采用所提出的水印方法，即使受到某些攻击，在解码过程中也能获得更高的图像质量和更低的误码率（BER）。与全局水印方法相比，所提出的基于局部直方图移位的水印方案具有更高的安全性和更大的容量。实验结果表明，与当前先进的水印方法相比，该方法具有更好的图像质量和更低的误码率。

**关键词：**局部直方图移位、自适应特征提取、平稳小波变换

# 1 引言

如今，通信网络的快速发展使版权保护成为一个重要问题[1–3]。音频、视频和图像等许多领域都需要数字水印来识别版权。数字水印技术实用且有用，正成为解决信息版权问题的一种颇具前景的方法[4–8]。为了适应各种情况，数字水印方法也多种多样。例如，[9] 中所示的音频水印采用了相位编码，以实现不可感知性和安全性。[10] 使用离散余弦变换（DCT）将原始音频转换到另一个域，以进行水印嵌入。[11] 分析了一种用于音频水印的回声核，旨在降低原始音频的失真并实现不可感知性。[12], 使用DCT进行水印嵌入，以获得良好的图像质量和鲁棒性，并将系数划分为不同的组以进行水印解码。实际需求也会影响相应水印方法的选择。[13] 使用的水印方法旨在为脑肿瘤图像中的患者信息添加标记。因此，该方法利用图像的位置图选择非重要区域作为水印区域，而图像中的重要区域——肿瘤部分——不会受到影响。[14], 将反向传播神经网络（BPNN）技术和恰可察觉差异（JND）模型融入基于分块离散余弦变换的方案，以实现有效的盲图像水印。该方法兼具不可感知性和鲁棒性，能够抵抗各种攻击；设计水印方案时还考虑了DCT系数以及相邻块中的系数。[15, 16] 使用离散小波变换（DWT）对灰度图像进行水印嵌入和提取。[15] 中的水印算法在水印嵌入过程中利用离散余弦变换域中的人类视觉系统（HVS）特性，表现出良好的不可感知性，并能抵抗许多常见的图像处理攻击。

过去几十年来，人们开发了各种图像水印方法。其中一些方法在整幅图像中进行水印嵌入；另一些则聚焦于图像的局部区域进行嵌入。水印嵌入方法也存在许多不同之处。优秀的图像水印方法应具备不可感知性、安全性和鲁棒性。不可感知性意味着水印在视觉上不可见。安全性意味着水印不会被黑客破解。鲁棒性则表示经过不同类型的攻击后，仍能正确提取水印。攻击分为两类：几何攻击，包括裁剪、缩放和旋转；信号处理攻击，例如压缩、噪声添加和滤波。不同的嵌入方法在不可感知性、安全性和鲁棒性方面各有特点。例如，[17, 18] 和[19] 中的方法能够抵抗 JPEG 压缩和中值滤波，但容易受到旋转影响。在

[20], 提出了一种在二维离散傅里叶变换（DFT）域中进行处理的圆对称水印嵌入方法。该方法将水印嵌入图像的中频范围，在计算过程复杂的情况下，既解决了低频区域出现可见变化的问题，也避免了高频区域受到压缩影响的问题。[21]也提出了圆形域嵌入方法。该方法利用泽尼克矩和伪泽尼克矩，能够抵抗图像旋转、缩放和翻转，但运行时间相对较长。因此，应采用快速算法进一步提高计算速度。[22] 使用了局部泽尼克矩，这些矩是在图像特征点周围的圆形图像块上计算的。由于图像失真后仍能检测到角点，本文采用 Harris 角点检测器提取图像的特征点。一些水印方法还使用平稳小波变换（SWT）实现嵌入过程，例如 [23] 和 [24]。这些方法选择平稳小波变换域中的系数进行水印嵌入，水印可以是小图像中的一组像素，也可以采用二进制位格式。此类方法的缺点是水印格式受到限制，尽管其不可感知性相对较高。[25] 中的研究通过应用傅里叶-梅林变换，在傅里叶-梅林域中嵌入水印。该方法能够抵抗缩放和旋转，但容易受到裁剪攻击的影响。[26], 采用奇异值分解（SVD）与离散余弦变换相结合的方法来应对裁剪攻击。相比之下，这种水印方法在应对压缩和噪声添加等信号处理攻击，以及旋转和缩放等几何攻击时表现不佳。[27] 提出了一种称为运输自然水印（TNW）的调制方法，通过选择不同的子带组合，在 JPEG 压缩下实现较低的误码率（BER）。然而，子带组合的选择过程较为复杂，而且较高的误码率会导致峰值信噪比（PSNR）下降。在某些情况下，整幅图像的全局尺度直方图平移水印方法颇受欢迎。[28] 和 [29], 提出了两种不同的直方图平移方法，它们不受旋转和缩放影响，但在某些情况下，这些水印方法在中值滤波和裁剪攻击下表现不佳。[30] 和 [31] 使用低频域嵌入水印，以实现对常见信号处理操作的鲁棒性。这些水印方法在应对几何变形和图像处理操作方面表现良好，包括低通滤波、JPEG 压缩和裁剪。 [32], 提出了一种局部直方图平移方法，将水印比特嵌入图像的每个圆形区域中。该方法能够抵抗随机弯曲和中值滤波，但对缩放和旋转非常敏感。 [33] 在离散傅里叶变换域中嵌入水印，使该方法能够抵抗旋转和剪切。不过，在 JPEG 攻击下，其检测率并不理想。

特征点提取方法有很多种[34–37]。在[38] 和[39], 中，采用局部二值模式（LBP）方法识别图像的特征

模式。两者都提出了一种新的旋转不变特征识别计算方法。然而，这两种方法都侧重于纹理图像的模式轨迹，追踪数字图像中特定的直方图分布部分，而不考虑分布情况及其包含的灰度级数量。Davarzani 等人[40] 提出了一种改进的局部二值模式特征选择方法，可在识别数字图像的纹理描述时实现尺度和旋转不变。不过，该方法在压缩、裁剪等攻击下可能不够鲁棒。[41] 和[42] 采用了尺度不变特征变换（SIFT）特征，结果表明，即使待搜索的模式尺寸和方向各不相同，该方法在模式识别方面仍表现良好。然而，提取出的特征点无法保持不变，因为图像遭受攻击时，像素会发生改变，SIFT计算结果也会因此变得不准确，难以找到相同的模式。此外，SIFT计算和识别一定数量的特征点耗时较长。 [43] 提出了一种旋转、缩放和平移不变（RST不变）特征提取方法，以提升对旋转、缩放和平移等攻击的特征识别性能。然而，由于空间域中用于抵御RST攻击的鲁棒特征有限，该方法必须同时在空间域和频域进行计算，因此要找到特定特征会比较复杂。梯度位置方向直方图（GLOH）是另一种特征提取方法，曾用于[44]。该方法利用对数极坐标位置网格生成多个位置分箱，并对其进行计算以提取特征。与SIFT相比，这种特征提取方法表现更佳，尤其是在光照变化下。然而，正如[45]所述，GLOH可能更加耗时且复杂。 [46] 提出了Daisy这一高效的特征识别方法，其特征检测效果良好。Daisy是一种改进的梯度计算方法，计算速度更快。由于该特征提取方法基于像素梯度计算，因此具有旋转不变性，并能在不同攻击下保持鲁棒性。本文提出一种局部直方图移位水印方法，将水印序列嵌入数字图像的若干局部方块中。通过将水印嵌入图像的局部区域，该方法能够实现较高的不可感知性，并获得相对较高的峰值信噪比。在局部区域嵌入也会增加破解难度。此外，在直方图移位过程中使用密钥指示直方图的嵌入区间，可提高抵御非法检测和篡改的安全性。本文提出一种基于Daisy描述子的自适应特征选择方法，用于提取特征点。该方法选择梯度变化相对较多且图像直方图灰度级较多的局部区域，以确保各局部区域具有较高的容量并实现嵌入过程。尽管基于SWT的噪声概念

尽管已有基于噪声去除和直方图平移的水印嵌入方法被提出，本文提出的方法仍不同于现有方案。在 [23] 和 [24], 中，采用 SWT 对输入图像进行分解，并在重建之前使用相应的低频系数嵌入和提取水印；而在我们的方法中，则在嵌入和提取之前应用 SWT 去除噪声并重建图像。在 [30], 中，嵌入之前采用高斯滤波去除噪声，但这种方法需要在水印嵌入之前加入高频补偿，以确保成功提取水印；而我们的方法不需要计算补偿量。对于基于直方图平移的水印方法，在现有方法（例如 [30], ）中，嵌入一位仅使用不超过六个灰度级；而我们的方法选择 12 个灰度级来嵌入一位，这会降低直方图的修改强度，并使嵌入水印图像的直方图更加平滑。这一改进有助于增强对波弯曲、中值滤波和抖动等攻击的鲁棒性。

在以下章节2中，将详细介绍所提出水印方法的嵌入过程。完成嵌入过程后，我们将在第3节介绍解码过程。第4 节展示我们方法的实验结果，并将其与当前最先进的水印方法进行比较。在分析所提出方法的鲁棒性、容量和图像质量等性能后，我们将在第5节进行总结，并阐明所提出方法的优势。

## 2 所提出水印方法的嵌入过程

所提出的水印嵌入过程的流程图如图1所示。整个过程分为两个部分：自适应特征区域提取和基于直方图平移的水印嵌入。以下两个章节将详细描述这一过程。首先，使用 DAISY 描述子提取与像素梯度相关的自适应特征点。然后，根据特征点的分布确定特征区域。确定局部区域后，对每个局部区域实施平稳小波变换（SWT）和逆平稳小波变换（iSWT），以去除噪声，从而获得用于水印嵌入的平滑区域。随后，我们在局部区域中实施基于直方图平移的水印嵌入，并进行局部区域恢复和水印图像重建。整个过程旨在选取直方图梯度较大的局部区域，以提高容量；并通过直方图平移将水印嵌入局部区域的平滑部分，从而提高安全性和图像质量。

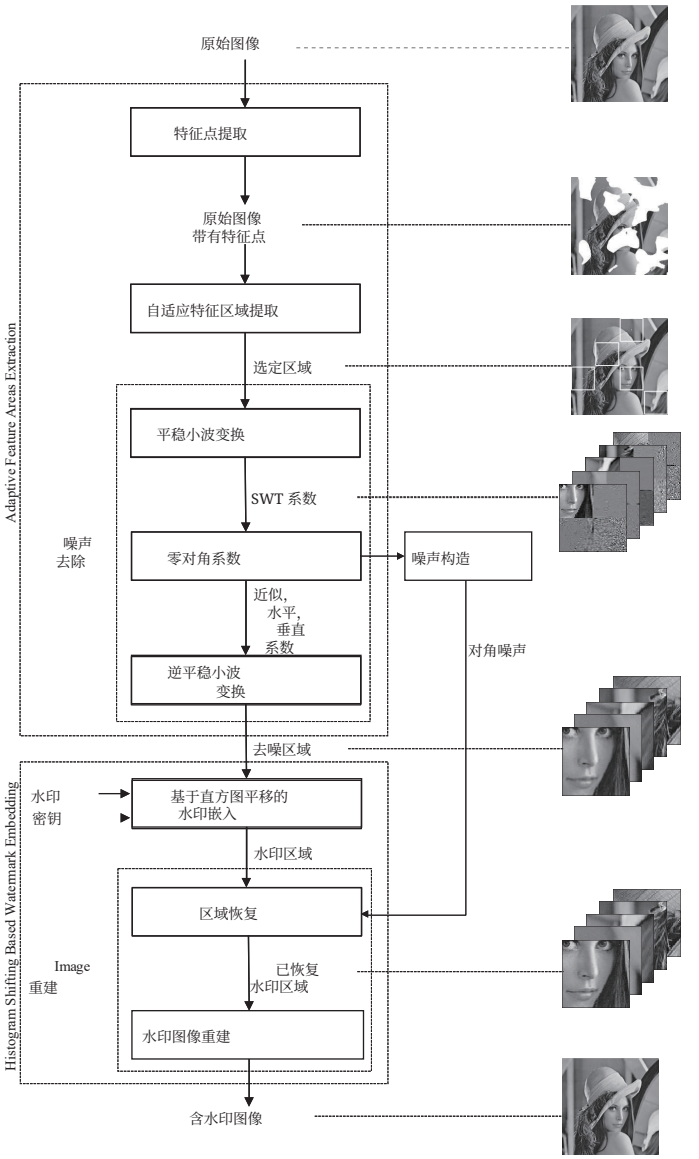



**图 1** 水印嵌入过程流程图

## 2.1 自适应特征区域提取

我们提出了一种自适应特征区域提取方法，用于自适应地选择嵌入水印的区域。该方法包括三个步骤：使用 Daisy 描述子的特征点提取、自适应特征区域提取，以及使用平稳小波变换的噪声去除。第一步

旨在选取梯度方差较大的特征点，以提升数字水印的容量。随后，根据特征点的分布提取自适应特征区域。最后，通过平稳小波变换去除选定区域中的噪声，并提取这些特征区域中的平滑部分，用于水印嵌入。

### 2.1.1 使用 Daisy 描述子的特征点提取

在所提出的水印方法中，我们使用 DAISY描述子作为特征提取方法，计算图像的特征点，以便选取用于水印嵌入的局部区域。Daisy 是一种非常快速、高效的整幅图像像素梯度计算方法。DAISY描述子的结构类似一朵具有多个层和方向的雏菊。与 SIFT 和 GLOH 描述子不同，后两者涉及三维直方图，对应图像空间维度以及图像梯度方向这一附加维度；Daisy 则通过使用多个高斯滤波器，在像素的特定方向上对梯度进行卷积，从而实现更快的计算 [46]。此外，DAISY描述子采用具有多个层和方向的圆形网格格式。如 [46], 所述，DAISY描述子中的每个圆都代表一个区域，其半径与高斯核的标准差成正比。在特征提取过程中，目标是在整幅图像中找到像素灰度方差较大的局部区域。使用 DAISY描述子计算图像中每个像素位置的图像梯度后，将在以特定像素位置为中心的每个区域内计算直方图。

给定一幅像素数为$I$、尺寸为$M \cdot N$的图像，则将计算$j$、$j = M \cdot N$ 个描述符。Daisy描述子的计算原理如下。首先，计算方向$o$ 上位置（$m, n$）处的图像梯度模，记为$G_o$（$m, n$）。然后，用于构建描述符的方向图可表示为

$$G_i = \left(\frac{\partial I}{\partial i}\right)^+ \tag{1}$$

其中 $i$ 表示方向偏差，而 $(.)^+$ 是算子，函数形式为 $(a)^+ = max(a, 0)$。在这种情况下，每个方向图都会与不同的高斯核进行多次卷积，以实现卷积运算并降低计算复杂度。该过程已在 [46] 中详细说明。如果我们计算一个具有 $i$ 个方向和 $L$

层的 DAISY描述子，则该描述子可形式化定义为

$$\begin{aligned} D_j(m_0, n_0) = [&d_{G_1^\sigma}(m_0, n_0), \\ &d_{G_1^\sigma}(m_0, n_0, R_{11}), \cdots, d_{G_1^\sigma}(m_0, n_0, R_{1i}), \\ &d_{G_2^\sigma}(m_0, n_0, R_{21}), \cdots, d_{G_2^\sigma}(m_0, n_0, R_{2i}), \\ &\cdots \\ &d_{G_L^\sigma}(m_0, n_0, R_{L1}), \cdots, d_{G_L^\sigma}(m_0, n_0, R_{Li})] \end{aligned} \tag{2}$$

其中，$d_{G_L^\sigma}(m_0, n_0, R_{Li})$表示在方向$i$上，距离$(m_0, n_0)$为$R_L$ 的位置处计算得到的图像梯度范数向量。高斯核为$G^\sigma$ $R_{(l+1)}$ $2L$ ，其中$l$ 表示描述符圆形网格中的第$lth$ 层，且$l=1:L$。我们得到一组数值，用于表示方向图 [47]中与给定像素邻域相关的各像素位置处的归一化直方图。

由于 Daisy 描述符采用圆形网格格式和相应的计算方法，因此它对各种攻击和常见图像处理操作具有鲁棒性，例如噪声添加、JPEG压缩和旋转等。这意味着，即使图像经过模糊和旋转，仍可有效计算特定像素的描述符。基于这一特性，我们选择 DAISY描述子作为特征像素选择方法。因此，即使图像遭受攻击，我们仍能检测到对应像素，从而确保局部自适应特征区域提取的稳定性。

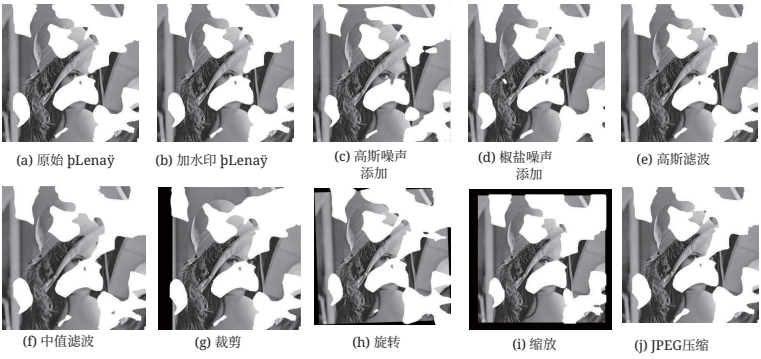



**图2** 使用 DAISY描述子选择特征点的不变属性

计算完 DAISY 描述子后，我们计算各方向上$D_j(m_0, n_0)$的累加值，以找出特定方向上梯度方差最大的点。

$$D_{sum_i}(m_0, n_0) = \sum_{l=1}^{L} d_{G_L^\sigma(m_0, n_0, R_{li})} \tag{3}$$

$$D_{sum}(m_0, n_0) = [D_{sum1}, D_{sum2}, \cdots, D_{sumi}] \quad (4)$$

其中，$D_{sumi}$ 表示位置（$m_0$, $n_0$）所对应方向上的梯度累加值。以灰度图像 Lena 为例，选取的特征点是图像上的白点，这些白点构成了图 2 所示的区域。在含水印图像以及受攻击的含水印图像中均可提取特征点，从而确保水印解码过程能够正确执行。水印容量与直方图分布有关。众所周知，图像直方图中的灰度级越多，容量越高，也就是说，可以在图像中嵌入更多二进制位。为使直方图中获得更多灰度级，我们选择梯度变化最大的局部区域。因此，通过在这些区域应用我们提出的水印嵌入方法，可以在数字图像中嵌入更多二进制位，并获得更高的图像质量。

### 2.1.2 自适应特征区域提取

本部分根据特征点 [48] 提取自适应特征区域。由于选取的特征点是在邻域内梯度较多的点，因此我们将这些特征像素区域扩展成正方形，形成直方图变化更丰富的特征区域。水印嵌入容量与图像直方图多样性有关，也就是说，直方图中的灰度级越多，可用容量就越大。为了获得更大的容量并向局部区域嵌入更多二进制位，我们提取包含更多特征点的区域。这些特征点经过选取后被分组到若干区域中。分组方法基于像素距离和局部嵌入区域半径。

如图3所示，选定的像素以黑色标出，并应用于原始图像。通过对像素区域进行形态学处理，我们得到一些特征区域。为确保区域选择的稳定性，按照最近原则将这些区域调整到默认图像网格中。然后得到选定的方形区域。之后，我们计算每个局部方形区域的熵，最终选择熵最大的方形区域进行水印嵌入。

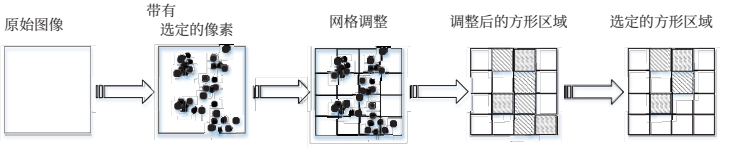



**图3** 自适应特征区域提取

假设原始图像$I$ 中的所有选定像素$P = \{p_1, p_2, \cdots, p_x\}$，则将它们分为$n$ 个区域

$$x_n = [p_{n1}, p_{n2}, \cdots, p_{nm}] \tag{5}$$

$$X_n = [x_1, x_2, \cdots, x_n] \tag{6}$$

其中，$n1, n2, \cdots, nm$ 表示第$m$ 个像素在第$n$ 个区域中的编号，$x_n$ 表示第$n$ 个区域。

最后，比较每组区域的熵后，选出的$s_n$ 个方形区域可写为

$$A_{s_n} = [p_{s_n 1}, p_{s_n 2}, \cdots, p_{s_n num}] \tag{7}$$

$$A = [A_{s_1}, A_{s_2}, \cdots, A_{s_n}] \tag{8}$$

其中，$num$ 表示所选特定方形区域中的像素总数，且每个选定区域的像素数相同。像素数取决于正方形的边长。并且$s_n = 1, 2, 3, \cdots, n$。

### 2.1.3 使用平稳小波变换的噪声去除

常见的信号攻击会对图像细节部分产生显著影响，但对图像的低频部分影响较小。因此，在图像相对平滑的分量中嵌入水印，可以增强水印的鲁棒性。在我们的方法中，使用去噪区域进行嵌入，以确保鲁棒性。完成噪声去除处理后，可以得到图像的平滑部分，用于水印嵌入。由于采用了噪声去除处理，即使遭受某些几何攻击以及常见的图像处理操作，嵌入的水印仍可被正确检测。完成局部区域选择后，我们对每个局部区域进行平稳小波变换，并在执行逆平稳小波变换时将对角系数置零。通过此过程可以生成去噪局部区域。一方面，去除对角系数可以消除图像中的噪声部分；另一方面，将该对角系数重新应用于嵌入水印的平滑图像，可以获得良好的图像质量，并减小嵌入过程的影响。与高斯滤波平滑过程相比，使用平稳小波变换进行去噪更便于实现，因为我们可以将噪声部分直接添加到嵌入水印的平滑部分，而无需对噪声部分进行任何修改。此外，在解码过程中，可以应用相同的去噪过程来获取嵌入水印的平滑部分。然而，需要根据嵌入水印的平滑部分的变化，对经高斯滤波处理的高频部分进行修改；否则，在解码端无法以相同方式获得嵌入水印的平滑部分。因此，在噪声去除步骤和水印区域恢复步骤中使用平稳小波变换和逆平稳小波变换，以确保鲁棒性和良好的图像质量。

提取选定的特征区域后，采用平稳小波变换将$s_n$ 区域分解为四个部分：近似分量、水平

分量、垂直分量和对角分量，如方程所示 n (9).

$$A_{s_n}^{SWT} = [A_{s_n}^{SWT}(app), A_{s_n}^{SWT}(hor), A_{s_n}^{SWT}(ver), A_{s_n}^{SWT}(dia)] \quad (9)$$

$$A^{SWT} = [A_{s_1}^{SWT}, A_{s_2}^{SWT}, \cdots, A_{s_n}^{SWT}] \quad (10)$$

其中 $A_{s_n}^{SWT}(app)$ 表示对局部区域 $A_{s_n}$ 执行 SWT 后得到的近似系数。符号 *hor*、*ver* 和 *dia* 分别表示水平、垂直和对角 SWT 系数。众所周知，对角分量可以视为噪声。因此，如公式（11）所示，选取近似分量、水平分量和垂直分量进行 iSWT，并将对角分量置零，从而形成去噪区域。

$$A_{s_n}^{SWT} = [A_{s_n}^{SWT}(app), A_{s_n}^{SWT}(hor), A_{s_n}^{SWT}(ver), 0] \quad (11)$$

$$A^{denoised} = iSWT[A_{s_1}^{SWT}, A_{s_2}^{SWT}, \cdots, A_{s_n}^{SWT}] \quad (12)$$

完成此过程后，去噪区域便可用于嵌入。同时保留对角系数，以便在后续过程中恢复局部嵌入区域。

## 2.2 基于直方图平移的水印嵌入

我们采用直方图移位方法实现水印嵌入，因为该方法可直接在空间域中实现，具有便捷且不可感知的优点。与频域等其他嵌入域相比，直方图移位方法效率更高，也更节省时间。水印容量取决于直方图中有效灰度级的数量。在整幅图像中进行全局嵌入时，只能使用一次图像的直方图来嵌入特定数量的二进制位作为水印。为克服全局嵌入方法容量受限的缺点，我们提出了局部嵌入方法，使多组二进制位能够嵌入图像的多个不同局部区域。因此，每个局部区域都可以生成独特的局部直方图，从而有效利用直方图。此外，将水印嵌入不同的局部区域也相应地提高了安全性，因为黑客无法确定具体的嵌入位置。

### 2.2.1 灰度级分组

为了将水印嵌入图像中，我们使用直方图移位方法来实现这一过程。通过将特定数量的像素从一个直方图区段转移到另一个直方图区段，使两个直方图区段中的像素数量具有可比性，从而嵌入水印位“0”或“1”；并通过比较两个直方图区段中的像素数量来提取水印位。我们在局部区域的每个直方图中进行灰度级分组，形成

用于水印嵌入的灰度级分箱和分组。灰度级分组过程如图 4。

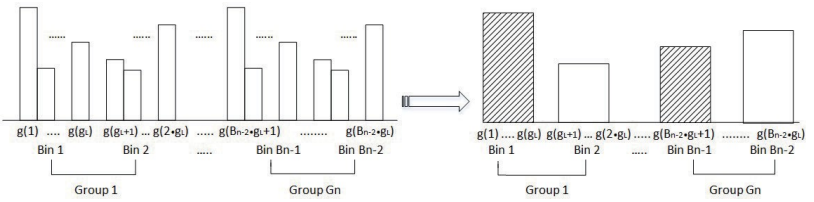



**图 4** 灰度级分组过程

首先，将所有灰度级依次每$B_n$ 个$g_l$ 灰度级分为一组，并将其合并为一个箱。假设去噪后的局部方形区域$I'$ 有$G$ 个灰度级，例如，8位灰度图像有$G = 256$ 个灰度级，范围从$g(1)$ 到$g(256)$。图像的直方图表示每个灰度级对应的像素数。在所提出的方法中，我们将$G$ 个灰度级划分为$B_n$ 个箱：

$$B_n = \lfloor \frac{G}{g_l} \rfloor \tag{13}$$

其中$g_l$ 表示每个箱中的灰度级数，$\lfloor . \rfloor$ 表示向下取整函数。在这种情况下，第$mth$ 个箱$Bin(m)$ 中的像素数可表示为

$$N_{bin}(m) = g((m-1)\cdot g_l + 1) + g((m-1)\cdot g_l + 2) + \cdots + g(m\cdot g_l) \tag{14}$$

其中$m = 1, 2, \cdots, B_n$，且$g(x)$ 表示灰度级$x$ 中的像素数，其中$x = ((m-1)\cdot g_l + 1) : (m\cdot g_l)$。其次，将所有箱依次两两合并为一组。形成的组数可表示为

$$G_n = [\frac{B_n}{2}] \tag{15}$$

其中，$G_n$ 表示形成的组的总数，[。] 为四舍五入函数。第$d$个组$Group(d)$ 中的像素数量可表示为

$$N_{group}(d) = g((d-1)\cdot g_l + 1) + g((d-1)\cdot g_l + 2) + \cdots + g((d+2)\cdot g_l \tag{16}$$

其中，$d = 1, 2, \cdots, G_n$，$g(x)$ 表示灰度级$x$ 中的像素数量，其中$x = ((d-1)\cdot g_l + 1) : ((d+2)\cdot g_l)$。显然，组中的像素越多，鲁棒性越高，因为可以在该组的直方图区间之间移动更多像素

此外，组数越多，容量越大，因为根据嵌入原理，一个组可提供一个二进制位的容量。

算法中的密钥是一个二进制序列，用于指示相应组是否嵌入了水印，如

(17)

$$K = [K(1), K(2), K(3), \cdots, K(G_n)] \tag{17}$$

密钥的长度等于一个局部区域所形成的组数。由于会选择多个局部区域进行嵌入，因此每个局部区域的密钥将在嵌入阶段通过置换函数生成。如果用“1”表示嵌入组，则密钥的总和等于嵌入的水印比特序列的长度$len_w$。用于水印嵌入的组可表示为：

$$\begin{aligned} Group_{embed}(emb) = &[Group(1), Group(2), \cdots, Group(G_n)] \\ &\cdot [K(1), K(2), K(3), \cdots, K(G_n)] \end{aligned} \tag{18}$$

其中 $emb = 1, 2, \cdots, len_w$。

### 2.2.2 通过直方图平移嵌入水印

基于直方图移位方法的水印嵌入具有视觉不可感知性好、图像质量高等优点。由于直方图平移是通过将像素从一个灰度级转换到另一个灰度级来实现的，因此可以直接在空间域中实施，是一种高效便捷的水印嵌入方法。在我们的方法中，我们将灰度级分组为多个箱，并将特定数量的像素从一个箱转换到另一个箱。像素修改的距离控制在较小范围内，从而确保视觉不可感知性和良好的图像质量。

在我们的嵌入方法中，我们将水印比特序列 $w$ 嵌入所选组中，并在每组中插入一位。

假设 $w_1, w_2, \cdots, w_{len_w}$ 是将要嵌入$len_w$ 个选定组中的水印比特序列。已知每组有两个直方图区间，允许我们将像素从一个区间转移到另一个区间。以第$dth$ 组为例，水印嵌入规则如下：

$$\begin{cases} \frac{N_{bin}(2d-1)}{N_{bin}(2d)} \geq S, w_d = 1 \\ \frac{N_{bin}(2d-1)}{2d} \leq \frac{1}{S}, w_d = 0 \end{cases} \tag{19}$$

其中 $S$ 是水印强度，它会影响发生变换的像素数量。而 $d$ 表示组号。上述嵌入规则表明，若 $w_d = 1$，特定组中有一定数量的像素 $N_1$ 将从箱2转移到箱1；若 $w_d = 0$，特定组中有一定数量的像素 $N_0$ 将从箱1转移到箱2，如图5所示。因此，我们可以计算每种情况下的像素转移数量。最小值 $N_1$ 和 $N_0$ 表示如下：

$$\begin{cases} N_1 = \frac{S \cdot N_{bin}(2d) - N_{bin}(2d-1)}{S+1} \\ N_0 = \frac{S \cdot N_{bin}(2d-1) - N_{bin}(2d)}{S+1} \end{cases} \tag{20}$$

其中 $N_1$ 和 $N_0$ 表示同一组中从一个箱转移到另一个箱的像素数量。$d$ 表示组号，而 $S$ 表示水印强度。$N_{bin}(2d-1)$ 表示组 $d$ 中箱1的像素数量，而 $N_{bin}(2d)$ 表示组 $d$中箱2的像素数量。

经过这样的嵌入过程，得到去噪水印正方形图像 $'_{wi=1:n}$ 局部直方图移位方法如图5所示。在这种情况下，选取六个灰度级构成一个箱，并选取两个箱构成一个嵌入组，其容量为一位。如果水印位等于 0，箱1中的像素将移入箱2；如果水印位等于 1，箱2中的像素则将移入箱1。

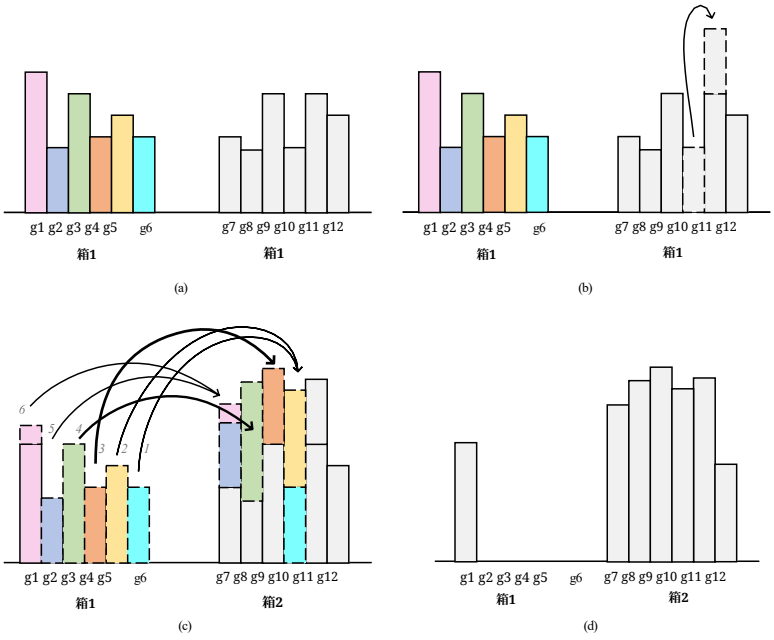



**图5** 箱1与箱2之间像素转移示意图

为了避免同一灰度级中像素过多，我们首先将若干像素从 g10 转移到 g11，如图 5 (b) 所示，因为 g10 将接收从 g5 和 g6 转移来的像素。对于 g11 中像素数量超出部分，我们不予考虑，因为两个直方图区间之间完成像素转移后，转换后区间的灰度级分布会较为均匀，不会出现可能在 iSWT 去噪过程中被削除的尖峰。

我们用符号$N$ (g)表示灰度级 g$th$ 中的像素数量。以嵌入水印位“0”为例，像素转移方法可描述如下：

情况 1：如果 $N$ (g10)≥ $N_0$, 更多 $N_0$ 个像素从箱2中的灰度级 g10 转移到灰度级 g11。然后，按如下方式从箱1中选取 $N_0$ 个像素。移位过程如图 5 (c)所示。

1) 若 N (g6)≥ $N_0$, , 则从箱1中灰度级 g6 选取全部 $N_0$ 个像素，将其移至箱2中的灰度级 g10。至此，直方图移位过程完成。2) 若 N (g6)< $N_0$, , 则从箱1中灰度级 g6 选取 N (g6) 个像素，将其移至箱2中的灰度级 g10。然后，若 N (g5)≥ ($N_0$-N (g6))，则从箱1中灰度级 g5 选取 $N_0$-N (g6) 个像素，将其移至箱2中的灰度级 g10。直方图移位过程完成。3) 若 N (g5)< ($N_0$-N (g6))，则从箱1中灰度级 g5 选取 N (g5) 个像素，将其移至箱2中的灰度级 g10。然后，若 N (g4)≥ ($N_0$-N (g6)-N (g5))，则从箱1中灰度级 g4 选取 $N_0$-N (g6)–N (g5) 个像素，将其移至箱2中的灰度级 g9。至此，直方图移位过程完成。4) 若 N (g4)< ($N_0$-N (g6)-N (g5))，则从箱1中灰度级 g4 选取 N (g4) 个像素，将其移至箱2中的灰度级 g9。然后，若 N (g3)≥ ($N_0$-N (g6)-N (g5)- N (g4))，则从箱1中灰度级 g3 选取 $N_0$-N (g6)-N (g5)-N (g4) 个像素，将其移至箱2中的灰度级 g8。至此，直方图移位过程完成。5) 若 N (g3)< ($N_0$-N (g6)-N ( g5)-N (g4))，则从箱1中灰度级 g3 选取 N (g3) 个像素，将其移至箱2中的灰度级 g8。然后，若 N (g2)≥ ($N_0$- N (g6)-N (g5)-N (g4)-N (g3))，则从箱1中灰度级 g2 选取 $N_0$-N (g6)-N (g5)-N (g4)-N (g3) 个像素，将其移至箱2中的灰度级 g7。至此，直方图移位过程完成。6) 若 N (g2)< ($N_0$-N (g6)-N (g5)-N (g4)-N (g3))，则从箱1中灰度级 g3 选取 N (g2) 个像素，将其移至箱2中的灰度级 g7。然后，若 N (g1)≥ ($N_0$- N (g6)-N (g5)-N (g4)-N (g3)-N (g2))，则从箱1中灰度级 g1 选取 $N_0$-N (g6)-N (g5)-N (g4)-N (g3)- N (g2) 个像素，将其移至箱2中的灰度级 g7。至此，直方图移位过程完成。7) 若 N (g1)< ($N_0$-N (g6)-N (g5)-N (g4)-N (g3)-N (g2))，则从箱1中灰度级 g1 选取 N (g1) 个像素，将其移至箱2中的灰度级 g7。然后，直方图移位过程完成。

情况 2：如果$N$ (g10)< $N_0$, , 则将箱2中所有$N$ (g10)个像素从灰度级 g10 移至灰度级 g11。随后，从箱1中选取$N_0$ 个像素并将其转换到箱2的过程与情况 1 相同。

采用此方法时，大多数选定像素会转换到同一组内相近的灰度级。这意味着像素值的修改幅度较小，从而能使水印区域获得良好的感知质量和峰值信噪比。此外，将像素分散地从一个箱转换到另一个箱，可以形成较为平滑的直方图，使其不易受到去噪函数及图像攻击的破坏。

### 2.2.3 水印图像重建

为了提高含水印图像的图像质量，通过将 SWT 函数的对角系数重新放回含水印局部区域来实现重构过程。

随后，我们将原始图像上的局部区域替换为水印局部区域，从而生成经过局部嵌入修改的含水印图像。

经过水印处理过程后，我们得到去噪水印区域$A^w$。

$$A^w = \{A^w_1, A^w_2, \cdots, A^w_n\} \tag{21}$$

其中$A^w_n$是第$n$个去噪水印区域。为了提高图像质量并避免峰值信噪比劣化，应在每个水印局部区域上重新添加平稳小波变换对角系数中的噪声部分。只需用原始区域减去去噪区域，即可轻松实现这一过程，得到区域中的噪声部分$A^{Nois}$。然后将这些噪声部分与水印区域相加，得到构造区域$A_{construct_n}$。

$$A_{construct} = \{A^w_1 + A^{Nois}_1, A^w_2 + A^{Nois}_2, \cdots, A^w_n + A^{Nois}_n\} \tag{22}$$

最后，将每个水印方形图像重新放回整幅图像的原始位置$I$，即可得到含水印图像$I_w$。此过程如图所示。6。

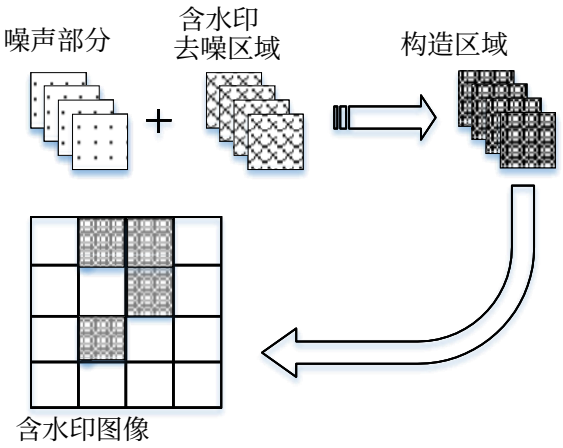



**图6** 含水印图像重建过程

# 3 水印解码过程

在水印提取过程之前，为应对旋转攻击，引入了旋转角度估计过程。由于所提出的方法中，

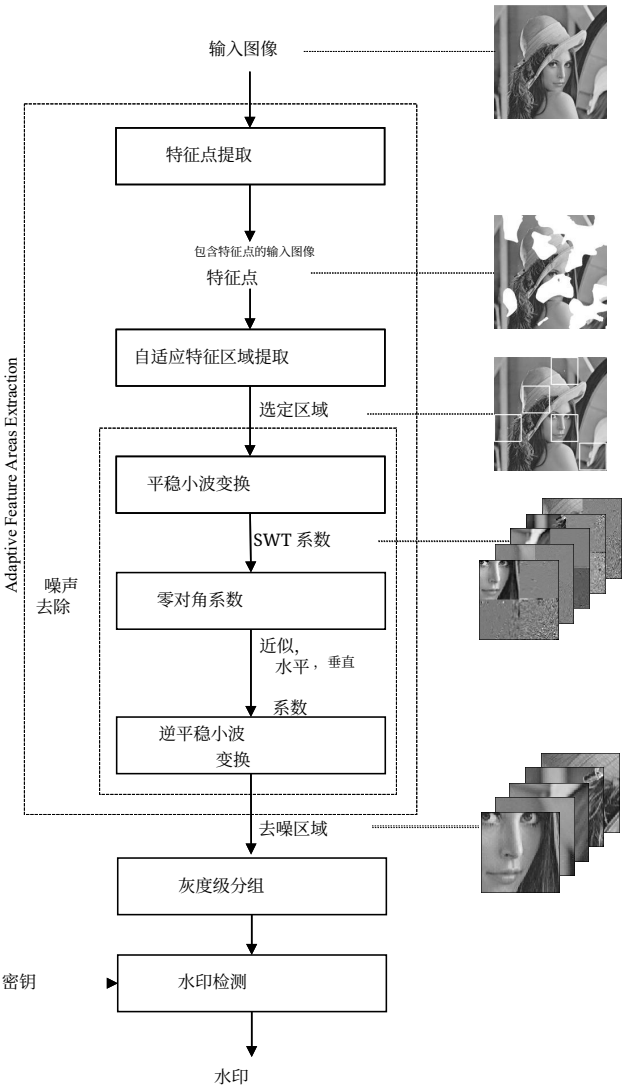



**图 7** 水印提取过程流程图

用于嵌入的局部区域为正方形，因此需要通过角度调整使解码图像恢复到正常位置。在角度估计过程中，首先对接收图像进行二值化处理；随后，根据图像边缘点的偏移距离计算所得图像的旋转角度。利用估计出的角度，可以将接收图像反向旋转至正常位置。

完成角度调整后，我们进行水印解码。水印解码过程如图7所示。此过程与水印嵌入过程相似。首先，从接收图像中提取局部嵌入区域。然后，对每个区域应用平稳小波变换（SWT），并通过逆平稳小波变换（iSWT）过程获得去噪区域。之后，按照第 2.2.1 节所述的相同灰度级分组规则，对这些去噪区域直方图的灰度级进行分组。最后，使用密钥从形成的去噪区域灰度级组中提取水印比特。

我们计算所选各组中每个箱的像素数，并通过（23）提取水印比特。然后即可解码水印。

$$\begin{cases} w' = 1, \text{ if } \frac{N_{bin}(2d-1)}{N_{bin}(2d)} \geq 1 \\ w' = 0, \text{ if } \frac{N_{bin}(2d-1)}{N_{bin}(2d)} \leq 1 \end{cases} \tag{23}$$

其中，$w$ 表示解码得到的二进制位，其值为 1 或 0。$N_{bin}(2d-1)$表示组$d$ 中箱1的像素数，而$N_{bin}(2d)$表示组$d$中箱2的像素数。

# 4 实验结果

在本节中，我们将评估含水印图像在不同攻击下的感知质量和鲁棒性，并与几种先进的数字水印方法进行比较。此外，我们还将比较本方法与其他数字水印方法的容量。我们从标准灰度测试图像数据库（http://decsai.ugr.es/cvg/CG/base.htm 和 http://decsai.ugr.es/cvg/dbimagenes/g256.php）中选取了许多数字图像进行测试，其中部分图像如图8所示。在配备64位操作系统和 Intel(R) Xeon(R) E5-2630 v3 @ 2.40GHz CPU 的个人计算机上，水印嵌入和提取的平均执行时间分别为45.071850秒和40.181407秒。所提方法的实验结果如表 1 和表2所示，并与先进的数字水印方法进行了比较。

最大容量$C = L_w * S_n$，其中$L_w$ 表示每个局部区域中水印的最大长度，$S_n$ 表示局部区域的最大数量。在所提出的方案中，为了减少直方图平移期间对直方图的修改，并使修改后的直方图分布更加平滑，将六个灰度级归为一个箱，并将两个箱组成一组，以嵌入一个水印数据位，如图5所示。总共选取 12 个灰度级来嵌入一位，因此，对于灰度图像，最多可嵌入$\lfloor 256/12 \rfloor = 21$ 位；这意味着每个局部区域的最大水印容量为 21。利用所提出的特征区域提取方法，局部区域的最大数量为 16。因此，$L_w = 21$，$S_n = 16$，因此 $C = 336$。在我们的实验中，我们将每个局部区域嵌入的水印比特数定义为$N_L < \lfloor L_w/2 \rfloor$，因此，




**图8** 来自标准灰度图像数据库的测试图像。(a1-n1)为原始图像，(a2-n2)为(a1-n1)对应的含水印图像

$N_L = 9$。为了使所提出的方法能够与现有方法进行比较，水印比特总数应介于35~50 位之间。为此，选取五个局部区域进行数字水印，水印长度为$N_W$，取 = 45。图 9 展示了不同攻击下的含水印图像。在我们的实验中，我们测试了含水印图像在不同攻击下的性能。由于采用了局部嵌入区域，含水印图像无法抵抗高比例的裁剪攻击，因为这可能导致局部嵌入区域完全丢失。因此，我们在实验中测试了 10% 和 20% 的裁剪攻击，这会导致含水印图像中的条带丢失。

在不对含水印图像进行任何攻击的情况下，可以正确检测出水印。对含水印图像施加不同攻击后，统计误码率。从图 9 可以看出，在常见的图像处理和噪声攻击下，误码率非常低。对含水印图像进行裁剪和中值滤波后，误码率甚至可以达到零。

图 10 展示了所提出的水印方法在不同攻击参数和水印强度下的误码率折线图。所有折线图都显示了在特定攻击范围内性能的渐变趋势。尽管随着攻击强度的增加，误码率会升高，但在这些攻击下的整体性能仍然良好。误码率也与水印强度有关。如折线图所示，水印强度越高，误码率会略有降低，尤其是




**图9** 攻击示例：（a）含水印图像；（b）椒盐噪声添加；（c）高斯噪声添加；（d）裁剪；（e）缩放；（f）旋转；（g）中值滤波；（h）高斯滤波；（i）JPEG压缩；（j）波弯曲；（k）全局随机弯曲；（l）抖动

在旋转和 JPEG压缩攻击下。但在高斯噪声和缩放攻击下，这一现象并不明显。并且，在攻击强度范围内，不同水印强度对应的曲线几乎显示出相同的误码率。

所提出的方法在抵抗常见图像攻击方面表现良好，例如中值滤波、高斯滤波、椒盐噪声以及

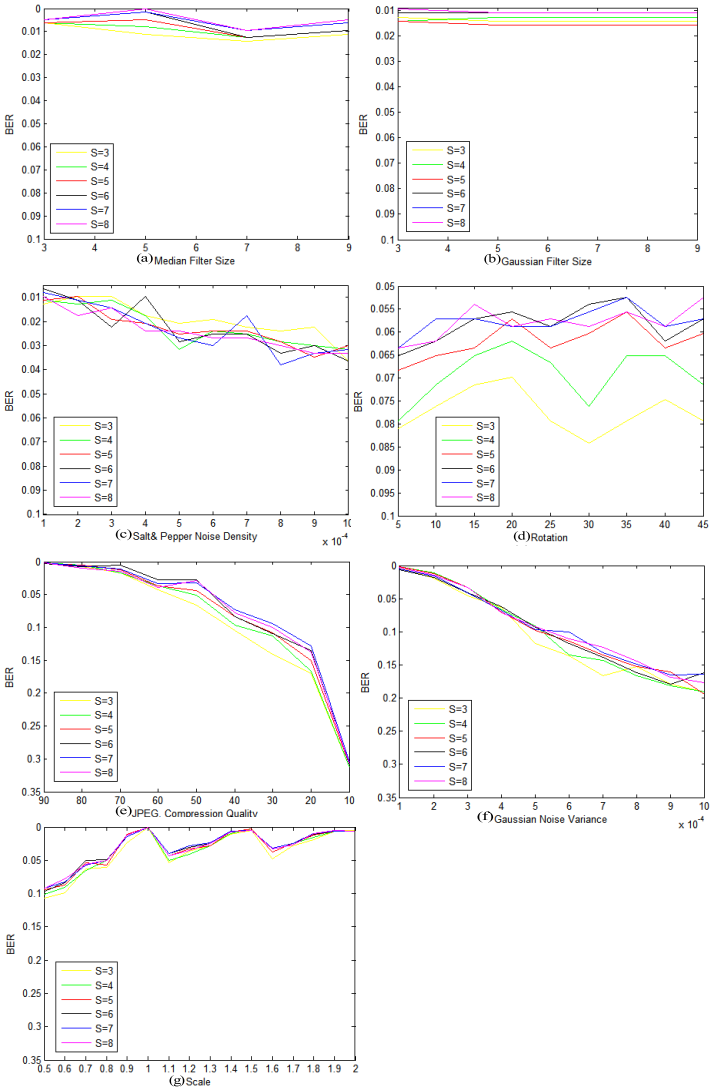



**图10** 所提方法在不同攻击下的比特错误率：(a) 中值滤波；(b) 高斯滤波；(c) 椒盐噪声；(d) 旋转；(e) JPEG压缩；(f) 高斯噪声；(g) 缩放。

旋转，即使攻击强度较高，误码率也不超过 0.09。所提出的方法在 JPEG压缩下也表现出良好的鲁棒性，即使压缩质量降至 20%，误码率也不超过 0.2。图 11 展示了不同水印强度下的水印图像质量。两条折线图显示，随着水印强度增加，数值呈下降趋势。然而，峰值信噪比和

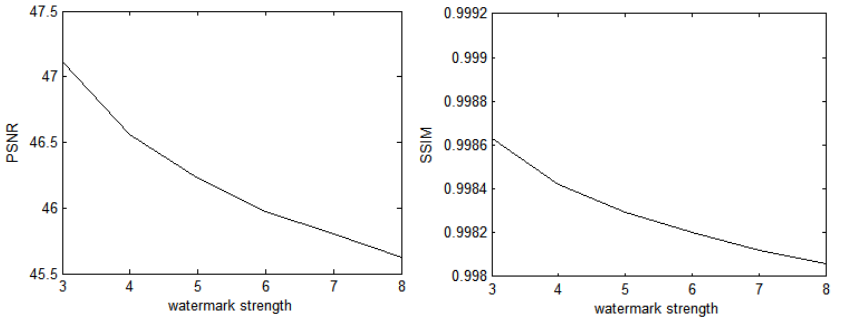



**图 11** 不同水印强度下的峰值信噪比和结构相似性值

结构相似性仍处于良好范围内，分别不低于 45.5 和 0.998，这表明我们所提出的方法性能良好，并且具有较高的图像质量。

表。1 展示了水印强度为六时所提出方法的实验结果，以及与其他水印方法的误码率比较。

**表 1** 所提出方法与 [28, 30–32] 中方法的比特错误率

| 攻击误码率 | Xiang [31] | Li [28] | Deng [32] | Zong [30] | 所提出的方法 |
|---|---|---|---|---|---|
| 高斯噪声 | 0.096 | 0.476 | 0.189 | 0.011 | 0 |
| 中值滤波 | 0.112 | 0 | 0.121 | 0.032 | 0.004 |
| 椒盐噪声 | 0.066 | 0 | 0.086 | 0.004 | 0.022 |
| 高斯滤波 | N | N | 0.516 | N | 0.011 |
| 裁剪10% | 0.080 | 0 | 0.073 | 0.004 | 0 |
| 裁剪20% | 0.160 | 0 | 0.083 | 0.005 | 0 |
| 缩放80% | 0.093 | 0.297 | 0.249 | 0.023 | 0.052 |
| 缩放120% | 0.080 | 0.241 | 0.226 | 0.013 | 0.033 |
| 缩放150% | 0.010 | 0.137 | 0.322 | N | 0.004 |
| 旋转2° | 0.140 | N | N | N | 0.060 |
| 旋转5° | 0.180 | 0.150 | 0.483 | N | 0.063 |
| 旋转10° | 0.091 | 0.268 | 0.237 | 0.021 | 0.060 |
| 旋转25° | 0.106 | 0.310 | 0.251 | 0.025 | 0.055 |
| 旋转30° | 0.090 | 0.100 | 0.548 | N | 0.052 |
| 旋转 45° | N | 0.112 | N | N | 0.055 |
| JPEG 90% | 0.050 | N | 0.064 | N | 0.003 |
| JPEG 70% | N | N | 0.080 | N | 0.004 |
| JPEG 50% | N | N | 0.129 | N | 0.026 |
| JPEG 30% | N | N | 0.147 | 0.012 | 0.103 |
| 波弯曲 | N | N | N | 0.057 | 0.026 |
| 全局随机弯曲 | 0.054 | N | N | 0.035 | 0.046 |
| 抖动 | 0.021 | N | N | 0.039 | 0.009 |

*N 表示此类实验中未进行测试。

从表中可以看出，我们提出的水印方法总体上优于 Li [28], Xiang [31] 和 Deng [32] 提出的方法。该方法对图像攻击表现出良好的鲁棒性，尤其是在高斯噪声、中值滤波、裁剪和 JPEG压缩攻击下，误码率较低。与 Zong [30], 提出的全局水印方法相比，我们的局部嵌入方法在抵御高斯噪声和中值滤波等攻击方面更具优势。根据实验结果，与 Xiang [31] 相比，所提出的方法在全局随机弯曲和抖动攻击下能够达到更低的误码率；与 Zong [30]相比，在波弯曲和抖动攻击下表现更佳。比较结果表明，该方法在抵御 RBA攻击和抖动攻击方面具有良好的鲁棒性。由于采用了所提出的直方图移位方法，直方图中更多灰度级可用于水印嵌入，从而增强修改后的直方图的鲁棒性，并使水印在弯曲和抖动攻击后仍能以较低的误码率解码。由于局部嵌入区域包含在整幅图像中，如果裁剪区域未影响局部区域，则含水印图像在裁剪攻击下的误码率为零。即使裁剪区域影响了局部嵌入区域，但未将其完全裁掉，我们的方法仍能在此类攻击下保持良好性能。根据实验，我们测试了最高达 20% 的裁剪比例（从左上角开始裁剪，测试图像的 20% 被裁掉），在这些测试场景中均能成功提取水印。这是因为在提取特征区域时，靠近角点和边缘的特征区域会被滤除。当裁剪比例较大，导致特征区域无法提取时，水印提取也会相应失败。由于采用局部方法，与全局嵌入方法相比，嵌入区域较小，这在抵御某些攻击（如缩放和旋转）并正确保留信息方面会处于劣势。表1 中的误码率表明，所提出方法的误码率总体较低，处于可检测性良好的范围内。因此，我们的方法能够有效抵御多种攻击。

**表2** 所提方法与[28, 30–32]中方法的属性

| 方法属性 | Xiang [31] | Li [28] | Deng [32] | Zong [30] | 提出的方法 |
|---|---|---|---|---|---|
| 容量<br>PSNR | 25 位<br>48 dB | 40 位<br>46.5 dB | 20 位<br>55 dB | 30 比特<br>47 dB | 45 比特<br>46 分贝 |

表。2 展示了所提方法与其他数字水印方法的容量和图像质量。可以看出，总体趋势是嵌入图像中的二进制位越多，所能获得的峰值信噪比就越低。与 [28], [30], [31] 和[32], 中提出的水印方法相比，我们的方法凭借局部嵌入区域选择，具有更大的容量。选取的局部

用于水印嵌入的区域越多，整幅图像的容量就越大，因为每个局部区域都能够容纳一组水印二进制位。就图像质量而言，根据水印强度和容量，我们的方法可达到不低于 45.5 的峰值信噪比。这意味着，在保持较大容量和鲁棒性的同时，也能获得良好的感知质量。

## 5 结论

局部水印嵌入方法已在许多数字图像认证场景中得到应用。然而，直接在空间域中嵌入水印，对于各种图像处理攻击而言相对脆弱。本文提出的方法通过特征提取和去噪方法，将水印嵌入图像局部区域的平滑部分，从而确保水印的安全性和鲁棒性。由于采用了直方图移位方法、密钥和平稳小波变换去噪过程，该方法提升了不可感知性、安全性和鲁棒性。实验结果表明，与其他数字水印方法相比，本文提出的方法对高斯噪声、中值滤波和抖动等攻击具有更好的鲁棒性。误码率折线图还表明，本文提出的方法在不同攻击下具有良好的数字水印性能，并且在此类攻击强度范围内表现出较好的鲁棒性。由于本方法在整幅图像的局部区域中实施，并采用了重建过程，即使在较高的水印嵌入强度下，也能够提高含水印图像的峰值信噪比。因此，所提出的数字水印方法不仅在鲁棒性方面具有良好表现，而且能够保持含水印图像良好的图像质量。

## 参考文献

[1] Xia, Z., Wang, X., Wang, C., Wang, C., Ma, B., Li, Q., Wang, M., Zhao, T.：一种用于医学图像无损版权保护的鲁棒零水印算法。Applied Intelligence **52**(1), 607–621 (2022)[2] Xue, M., Sun, S., Zhang, Y., Wang, J., Liu, W.：通过隐蔽后门和用户身份认证实现深度神经网络的主动知识产权保护。Applied Intelligence, 1–15 (2022)[3] Bi, X.-L., Pun, C.-M.：用于复制-移动篡改检测的快速反射偏移引导搜索方法。信息科学 **418**, 531–545 (2017)[4] Wang, X., Yao, Y., Yu, Y., Niu, P., Yang, H.：通过二元加权威布尔分布对局部冗余离散小波变换差分域奇异值建模的统计图像水印解码器。Applied Intelligence, 1–25 (2022)

[5] Ahmadi, S.B.B., Zhang, G., Rabbani, M., Boukela, L., Jelodar, H.：一种用于身份验证和版权保护的智能盲双彩色图像水印方法。Applied Intelligence **51**(3), 1701–1732 (2021)[6] Liu, Z., Huang, Y., Huang, J.：可抵抗去同步和重新采集攻击的基于Patchwork的音频水印。IEEE Transactions on Information Forensics and Security **14**(5), 1171–1180 (2018)[7] Hu, R., Xiang, S.：一种可抵抗几何变形的无载体损失鲁棒图像水印方法。IEEE Transactions on Image Processing **30**, 318–331 (2020)[8] Wang, X., Li, X., Pei, Q.：基于独立嵌入域的两阶段鲁棒可逆水印。IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology **30**(8), 2406–2417 (2019)[9] Ngo, N.M., Unoki, M.：基于相位编码的鲁棒可靠音频水印。载于：2015年IEEE国际声学、语音与信号处理会议（ICASSP），第345–349页（2015）。IEEE[10] Hu, H.-T., Hsu, L.-Y.：离散余弦变换域中鲁棒、透明且高容量的音频水印。信号处理 **109**, 226–235 (2015)[11] Xiang, Y., Peng, D., Natgunanathan, I., Zhou, W.：用于提升不可感知性和鲁棒性的时扩展回声音频水印有效伪噪声序列与解码函数。IEEE Transactions on Multimedia **13**(1), 2–13 (2010)[12] Dethe, S., Anagha Kale, M.G., Jadhav, M.：基于压缩感知矩阵的水印嵌入与隐私保护框架。International Jo urnal of Engineering Science **3428** (2016)[13] Amudha, K., Babu, C.N.K., Balu, S.：一种在脑肿瘤图像中隐藏患者信息的有效可逆水印方法。International Journal of Computer and Information Engineering **9**(7), 1762–1766 (2016)[14] Hsu, L.-Y., Hu, H.-T.：通过利用离散余弦变换域中的块间预测和可见性阈值实现盲图像水印。Journal of Visual Communication and Image Representation **32**, 130–143 (2015)[15] Agarwal, C., Mishra, A., Sharma, A.：使用遗传算法-反向传播神经网络混合网络的灰度图像水印。Journal of Visual Communication and Image Representation **24**(7), 1135–1146 (2013)[16] Yuan, X.-C., Pun, C.-M., Chen, C.L.P.：鲁棒梅尔频率倒谱系数特征检测与双树复小波变换，用于

数字音频水印。信息科学**298**，159–179（2015）[17] Sadreazami, H., Amini, M.：一种基于扩频的脊波域鲁棒图像水印方法。AEU-国际电子与通信期刊**66**(5)，364–371（2012）[18] Yuan, X.-C., Pun, C.-M., Chen, C.L.P.：利用二值图像块的局部泽尼克矩实现几何不变水印。信号处理**93**，2087–2095（2013）[19] Nezhadarya, E., Wang, Z.J., Ward, R.K.：基于多尺度梯度方向量化的鲁棒图像水印。IEEE信息取证与安全汇刊**6**(4)，1200–1213（2011）[20] Solachidis, V., Pitas, L.：二维离散傅里叶变换域中的圆对称水印嵌入。IEEE Transactions on Image Processing**10**(11)，1741–1753（2001）[21] Xin, Y., Liao, S., Pawlak, M.：通过伪泽尼克矩实现几何鲁棒图像水印。载于：2004年加拿大电气与计算机工程会议（IEEE目录号04CH37513），第2卷，第939–942页（2004）。IEEE[22] Singhal, N., Lee, Y.-Y., Kim, C.-S., Lee, S.-U.：利用局部泽尼克矩实现鲁棒图像水印。Journal of Visual Communication and Image Representation**20**(6)，408–419（2009）[23] Saiyyad, M.A.M., Patil, N.N.：采用平稳小波变换技术和脆弱水印方法对压缩图像进行水印处理。载于：2014年IEEE全球无线计算与网络会议（GCWCN），第254–257页（2014）。IEEE[24] Nagarjuna, P., Ranjeet, K.：基于平稳小波变换的鲁棒盲数字图像水印方案。载于：2013年第六届当代计算国际会议（IC3），第451–454页（2013）。IEEE[25] Lin, C.-Y., Wu, M., Bloom, J.A., Cox, I.J., Miller, M.L., Lui, Y.M.：适用于图像的抗旋转、缩放和平移水印。IEEE Transactions on Image Processing**10**(5)，767–782（2001）[26] Rosiyadi, D., Horng, S.-J., Fan, P., Wang, X., Khan, M.K., Pan, Y.：电子政务文档图像的版权保护。IEEE多媒体**19**(3)，62–73（2011）[27] Mathon, B., Cayre, F., Bas, P., Macq, B.：用于静态图像安全扩频水印的最优传输。IEEE Transactions on Image Processing**23**(4)，1694–1705（2014）

[28] Li, X.-W., Guo, B.-L., Li, L.-D., Shen, H.-X.：一种可抵抗几何攻击的新型基于直方图的图像水印方案。载于：2009年第五届信息保障与安全国际会议，第1卷，第239–242页（2009）。IEEE[29] Coatrieux, G., Pan, W., Cuppens-Boulahia, N., Cuppens, F., Roux, C.：基于不变图像分类和动态直方图移位的可逆水印。IEEE信息取证与安全汇刊**8**(1)，111–120（2012）[30] Zong, T., Xiang, Y., Natgunanathan, I., Guo, S., Zhou, W., Beliakov, G.：用于图像水印的鲁棒直方图形状方法。IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**25**(5)，717–729（2014）[31] Xiang, S., Kim, H.J., Huang, J.：基于低频域统计特征的不变图像水印。IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**18**(6)，777–790（2008）[32] Deng, C., Gao, X., Li, X., Tao, D.：基于局部直方图的几何不变图像水印。信号处理**90**(12)，3256–3264（2010）[33] Urvoy, M., Goudia, D., Autrusseau, F.：改进检测性能且对几何失真具有更强鲁棒性的感知型离散傅里叶变换水印。IEEE信息取证与安全汇刊**9**(7)，1108–1119（2014）[34] An, N.Y., Pun, C.M.：采用自适应颜色量化和多分辨率纹理表征的彩色图像分割。信号、图像与视频处理**8**，943–954（2014）[35] Shi, C., Pun, C.-M.：面向全色图像和多光谱图像分类的带感知损失自适应多尺度深度神经网络。信息科学**490**，1–17（2019）[36] Shi, C., Pun, C.-M.：利用堆叠自编码器循环神经网络进行基于多尺度超像素的高光谱图像分类。IEEE Transactions on Multimedia**22**，487–501（2020）[37] Bi, X.-L., Pun, C.-M., Yuan, X.-C.：用于复制-移动篡改检测的多尺度特征提取与自适应匹配。多媒体工具与应用**77**，363–385（2018）[38] Ojala, T., Pietikainen, M., Maenpaa, T.：利用局部二值模式进行多分辨率灰度与旋转不变纹理分类。IEEE模式分析与机器智能汇刊**24**(7)，971–987

(2002)[39] Zhao, G., Ahonen, T., Matas, J., Pietikainen, M.: 基于局部二值模式特征的旋转不变图像和视频描述。IEEE 图像处理汇刊 **21**(4), 1465–1477 (2011)[40] Davarzani, R., Mozaffari, S., Yaghmaie, K.: 基于改进局部二值模式特征的尺度和旋转不变纹理描述。信号处理 **111**, 274–293 (2015)[41] Huang, F.-C., Huang, S.-Y., Ker, J.-W., Chen, Y.-C.: 用于实时图像特征提取的高性能 SIFT 硬件加速器。IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology **22**(3), 340– 351 (2011)[42] Lowe, D.G.: 基于尺度不变关键点的独特图像特征。国际计算机视觉杂志 **60**(2), 91–110 (2004)[43] Lin, Y.-T., Huang, C.-Y., Lee, G.C.: 面向图像的抗旋转、缩放和平移水印。IET 图像处理 **5**(4), 328–340 (2011)[44] Liang, Y., Liu, L., Xu, Y., Xiang, Y., Zou, B.: 用于人体年龄估计的多任务 GLOH 特征选择。载于：2011 年第 18 届 IEEE 国际图像处理会议，页 565–568 (2011)。IEEE[45] Awad, A.I., Hassaballah, M.: 图像特征检测器和描述符。计算智能研究。施普林格国际出版，沙姆 (2016)[46] Tola, E., Lepetit, V., Fua, P.: Daisy：一种应用于宽基线立体视觉的高效密集描述符。IEEE模式分析与机器智能汇刊 **32**(5), 815–830 (2009)[47] Velardo, C., Dugelay, J.-L.: 基于 DAISY 描述子的人脸识别。载于：第 12 届 ACM 多媒体与安全研讨会论文集，页 95–100 (2010)[48] Shi, C., Pun, C.-M.: 用于高光谱图像分类的 3D 多分辨率小波卷积神经网络。信息科学 **420**, 49 65 2017– ( )