基于极谐傅里叶矩和自适应归一化的高效鲁棒可逆水印方案

高光勇[1),2)] 袁澳奇[1),2)] 付章杰[1),2)]

[1)](南京信息工程大学数字取证教育部工程研究中心 南京 210044)

[2)](南京信息工程大学计算机学院、网络空间安全学院 南京 210044)

摘 要 现有的鲁棒可逆水印(Robust Reversible Watermarking, RRW)方案在抗攻击鲁棒性和可逆嵌入阶段所需辅助信息量两方面仍面临着挑战。针对这一问题,本文提出了一种新的高效鲁棒可逆水印(Efficient Robust Reversible Watermarking, ERRW)方案。本方案使用极谐傅里叶矩(Polar Harmonic Fourier Moments,PHFMs)作为载体嵌入水印,设计了自适应归一化策略以及新的量化索引调制技术和其对应提取公式,以提高嵌水印的鲁棒性并且可以有效减少可逆阶段的辅助信息。第一阶段,通过计算原始图像的 PHFMs,采用自适应归一化策略和设计的量化索引调制技术,将鲁棒水印嵌入到 PHFMs 幅度的整数部分。自适应归一化方法既实现了对像素幅度变化的不变性,又兼顾了鲁棒性和不可感知性,最大限度提高了方案的鲁棒性。第二阶段利用可逆嵌入技术将辅助信息嵌入到鲁棒水印图像中,从而得到最终的水印图像。其目的是实现无攻击下的可逆性,其中辅助信息由哈希值、嵌入误差和舍入误差三部分组成。实验结果表明,在不受攻击的情况下,该方案可以完全恢复原始图像和正确提取水印,并且相比于近年其他方案,本方案对常见图像攻击的鲁棒性性能是最优的。

关键词 鲁棒可逆水印;两阶段嵌入;极谐傅里叶矩;量化索引调制

中图法分类号 TP391 **DOI 号** 10.11897/SP.J.1016.2026.00179

An Efficient Robust Reversible Watermarking Scheme Using Adaptive Normalization with Polar Harmonic Fourier Moments

GAO Guang-Yong[1),2)] YUAN Ao-Qi[1),2)] FU Zhang-Jie[1),2)]

[1)](Engineering Research Center of Digital Forensics, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

[2)](School of Computer Science, Cyberspace Security, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract The widespread dissemination of digital images has made their copyright protection and content integrity verification critically important. Robust reversible watermarking (RRW) technology aims to play a key role in this field. It requires that the watermark can resist various attacks to prove copyright ownership while allowing lossless recovery of the original image for high-value applications when no attack has occurred. However, existing RRW schemes still face challenges in achieving this dual goal. To enhance the robustness of the watermark against common image attacks, the embedding process often necessitates substantial modifications to the host image. This not only affects the imperceptibility of the watermark, but, more importantly, drastically increases the amount of auxiliary information that must be recorded during the reversible embedding stage to restore the original image. Excessive auxiliary information can occupy effective payload space, degrade the quality of the watermarked image and poten-

收稿日期:2025-04-11;在线发布日期:2025-10-24。本课题得到国家自然科学基金面上项目(62572248)、国家自然科学联合基金重点项目(U22B2062)、南京市重大科技专项(202405002)、教育部人文社科规划基金(24YJA870002)资助。**高光勇**,博士,教授,中国计算机学会(CCF)高级会员,主要研究方向为鲁棒可逆水印、人工智能与安全、多媒体取证。E-mail:gaoguangyong@163.com。**袁澳奇**,硕士,主要研究领域为鲁棒可逆水印。**付章杰(通信作者)**,博士,教授,主要研究领域为信息隐藏、网络与信息安全。E-mail:fzj@nuist.edu.cn。

tially impact overall performance. Therefore, how to effectively control the amount of auxiliary information while ensuring high robustness remains a major challenge in current RRW research. Addressing this key issue, this paper innovatively proposes an efficient robust reversible watermarking (ERRW) scheme based on Polar Harmonic Fourier Moments (PHFMs). The core of this scheme lies in selecting PHFMs as the carrier for embedding watermark information. As a type of orthogonal image moment, PHFMs not only possess excellent image description capability and numerical stability, but their radial basis functions, lacking factorial terms, also result in significantly higher computational efficiency compared to traditional methods like Zernike moments. More importantly, PHFMs exhibit inherent robustness to common signal image processing and geometric attacks, providing an ideal foundation for building a robust watermarking system. Specifically, the core of the proposed scheme is a carefully designed two-stage embedding strategy. In the robust watermark embedding stage, we first compute the PHFMs of the original image. Considering the varying sensitivity of different orders of moments to attacks, we propose an adaptive normalization strategy. This strategy dynamically adjusts the normalization weights based on the order of the PHFMs, assigning greater embedding strength to higher-order moments. This maximizes the scheme′s robustness within the same visual distortion limit. Building upon this, we further propose an innovative Integer-Based Quantized Index Modulation (IB-QIM) technique. Unlike traditional QIM which embeds watermarks in the real number domain, this method, through clever mathematical construction, embeds watermark information solely into the integer part of the PHFMs magnitude, thereby constraining the embedding error to be an integer. This fundamental improvement greatly reduces the amount of auxiliary data that needs to be recorded and transmitted. In the reversible information embedding stage, the goal is to embed the necessary auxiliary information in a reversible manner into the robust watermarked image generated in the first stage, enabling perfect reversibility under attack-free conditions. This auxiliary information consists of three parts: a hash value for verifying image integrity, the embedding error generated from embedding the digital watermark, and the rounding error introduced during image reconstruction. Because the first stage effectively confines the embedding error to integers and leverages the excellent reconstruction performance of PHFMs themselves, the total amount of auxiliary information required by this scheme is significantly compressed. Subsequently, an efficient reversible data hiding algorithm is employed to embed this auxiliary information, resulting in a final watermarked image with superior visual quality. Extensive experimental evaluation and comparative analysis confirm the outstanding performance of the proposed scheme. In the absence of attacks, the scheme can losslessly recover the original image and accurately extract the watermark. Compared to other recent schemes, this proposal demonstrates superior robustness performance against common image attacks. Furthermore, the scheme shows significant advantages in both the amount of auxiliary information and computational efficiency. These advantages fully demonstrate that the proposed scheme is a practical, efficient, and secure solution for image copyright protection.

Keywords robust reversible watermarking; two stage embedding; polar harmonic Fourier moments; quantization index modulation

1 引 言

随着信息技术的飞速革新,数字化存储与传播方式逐渐成为主流,极大提升了信息交互的效率。然而,这种技术便利性背后潜藏着显著的安全隐患,即数字载体固有的可复制性与易传播性,使得多媒体文件面临着未经授权的滥用风险。恶意攻击者利用技术漏洞实施内容篡改、非法复制等侵权行为,导致原创作品版权归属模糊化与数据完整性遭受双重威胁[1]。为应对这一数字时代的核心挑战,学者们迫切寻求方案来解决数字多媒体版权保护及其完整

性认证的问题。

为了保护数字多媒体不被攻击,学者们提出了鲁棒水印技术[2-6],鲁棒水印虽然可以很好地保护版权,但它会对原始图像造成不可逆转的失真,适应于永久保留水印的场景[7]。学者们还提出了可逆信息隐藏技术[8-11],虽然其能在嵌入的水印被提取后,完美地恢复原始图像,但即使是微弱的攻击,它也难以抵抗[12-13],只适应于需要恢复原始图像的场景。因此,两者都不能满足现实需要,为此,文献[14]中发展了鲁棒可逆水印技术。

为了满足高鲁棒性、不可见性和可逆性的要求,可以采用两阶段的策略,即鲁棒嵌入和可逆嵌入两个阶段[15-18]。这使得图像在传输过程中,若未受到攻击,则可以提取水印和完美恢复原始图像,若受到攻击,则直接提取水印。鲁棒可逆水印技术适用于需要版权保护以及需要恢复原始图像的场景[19-21]。第一阶段,在给定图像中嵌入用于版权保护的鲁棒水印,通过调整嵌入强度来实现鲁棒性和不可见性。第二阶段,将原始图像与鲁棒水印图像之间的差异作为恢复原始图像的辅助信息,并插入到鲁棒水印图像中,实现可逆性。由于增强第一阶段的鲁棒性会产生更大的差异,从而产生更多的辅助信息,因此,嵌入方法与鲁棒性、不可见性和可逆性高度相关[22-23]。从这个角度来看,鲁棒可逆水印(Robust Reversible Watermarking, RRW)并不是鲁棒水印技术和可逆信息隐藏技术的简单结合[24-25]。从本质上讲,这两个阶段是相互影响的,因此需要一个良好的两阶段水印嵌入设计。

由于极谐傅里叶矩(Polar Harmonic Fourier Moments,PHFMs)的径向基函数不含阶乘,其计算更为简单,且零点分布更均匀,相对于 Zernike 矩(Zernike moments,ZMs)和伪 Zernike 矩(Pseudo-Zernike moments,PZMs)来说具有更好的图像描述和数值稳定性[26-28]。因此,本文提出了一种基于 PHFMs 和自适应归一化的用于图像版权认证的高效鲁棒可逆水印方案。针对每个待加入水印的 PHFM,设计一种优化的嵌入策略,并设计了一种新的量化索引调制技术,可以有效减小可逆嵌入阶段辅助信息的数量。实验结果表明,该方案不仅可以保证图像在嵌入水印过程产生很少的辅助信息,而且在保持水印不可感知性的同时提高了水印的鲁棒性。本文的贡献如下:

(1) 在两阶段嵌入策略下,提出了一种基于 PHFMs 的高效鲁棒可逆水印方案,设计了优化嵌入的策略,以隐藏和保护数据,并根据嵌入部分设计了对应的水印提取公式,以准确提取水印。由于 PHFMs 的径向多项式中没有阶乘,因此减少了计算矩的时间,从而间接提高了本方案的嵌入效率;

(2) 针对不同待嵌入的 PHFMs,设计了一种自适应归一化权值的策略。对高阶 PHFMs 增大了嵌入强度,最大限度地增强了相同嵌入失真下的鲁棒性;

(3) 设计并且改进了传统的量化鲁棒水印策略,本方案仅将鲁棒水印信息嵌入到 PHFMs 的整数部分中,强制了嵌入误差为整数,以降低嵌入失真。

2　相关工作概述

2.1　PHFMs 的定义

$f(r,\theta)$ 是宿主图像,阶数为 $n(n\geqslant 0)$ 和重复次数为 $m(m\geqslant 0)$ 的 PHFM 表示如下:

$$P_{nm}=\frac{2}{\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^1 f(r,\theta)\overline{H_{nm}(r,\theta)}r\,\mathrm{d}r\,\mathrm{d}\theta \tag{1}$$

其中,$\overline{(\cdot)}$ 代表基函数 $H_{nm}(r,\theta)$ 的复数部分,由 $T_n(r)$ 和 $\exp(jm\theta)$ 组成,其被定义如下:

$$H_{nm}(r,\theta)=T_n(r)\exp(jm\theta) \tag{2}$$

其中,$\exp(jm\theta)$ 是角方向上的傅立叶因子,复数符号 $j=\sqrt{-1}$,径向基函数 $T_n(r)$ 由以下等式给出:

$$T_n(r)=\begin{cases}1/\sqrt{2}, & n=0\\ \sin[(n+1)\pi r^2], & \mathrm{bmod}(n,2)=1\\ \cos(n\pi r^2), & \mathrm{bmod}(n,2)=0\end{cases} \tag{3}$$

根据正交函数定理,可利用有限个 P_{nm} 重建原始图像 $f(r,\theta)$。如果已知最大阶数 $n_{\max}$ 和最大重复次数 $m_{\max}$,则重构图像的公式如下所示:

$$\begin{aligned}f(r,\theta)&=\mathrm{Re}(P_{nm},H_{nm}(r,\theta))\\&=\sum_{n=0}^{n_{\max}}\sum_{m=-m_{\max}}^{m_{\max}}P_{nm}H_{nm}(r,\theta)\end{aligned} \tag{4}$$

2.2　PHFMs 的计算方法

PHFMs 常使用零阶近似(Zero-Order Approximation, ZOA)[29]计算方法来计算。该方法将一个 $M\times M$ 的数字图像 $f(s,t)$ 映射到一个单位磁盘上,映射公式如下:

$$x_p=\frac{2p-M-1}{M},y_q=\frac{2q-M-1}{M},\quad(p,q=1,2,\cdots,M) \tag{5}$$

公式(1)中的 PHFMs 是用连续函数计算得到的,其计算公式不能直接用于离散图像。因此,基于 ZOA 的计算方法将连续积分转换为离散求和的

形式。

$$P_{nm}=\frac{2}{\pi}\sum_{p=1}^{M}\sum_{q=1}^{M}f(r_{p,q},\theta_{p,q})\overline{H_{nm}(r,\theta)}\Delta x\Delta y \quad (6)$$

在公式(6)中，$M\times M$ 是图像 $f(r,\theta)$ 的大小，$\Delta x=\Delta y=\frac{2}{M}$，极坐标半径 $r_{p,q}=\sqrt{x_p{}^2+y_q{}^2}$，$r_{p,q}\leqslant 1$，角度 $\theta_{p,q}=\arctan\left(\frac{y_p}{x_q}\right)$。

3 基于极谐傅里叶矩和自适应归一化的高效鲁棒可逆水印方案

本章介绍了一种以 PHFMs 作为水印的载体，结合 PHFMs 和自适应归一化策略的高效、鲁棒可逆水印方案。所提方案的框架图如图 1 所示，其包括鲁棒水印嵌入阶段，辅助信息嵌入阶段和完整性认证阶段。首先，在传输图像前，从原始图像的内切圆中计算 PHFMs，并通过自适应归一化策略得到归一化后的 PHFMs。其次，根据本文所提出的量化索引调制技术，将鲁棒水印嵌入到 PHFMs 整数部分中，同时确保中间水印图像的像素为[0,255]，以得到鲁棒的水印图像，最后，将辅助信息全部嵌入到鲁棒的水印图像中。在图像输出的一端接收图像，从接收端提取嵌入的哈希值来判定在图像传输过程中是否受到攻击。如果图像未遭受攻击，则利用辅助信息提取水印并恢复原始图像，否则直接提取水印以验证版权。图 2 展示了两阶段方案具体嵌入过程。

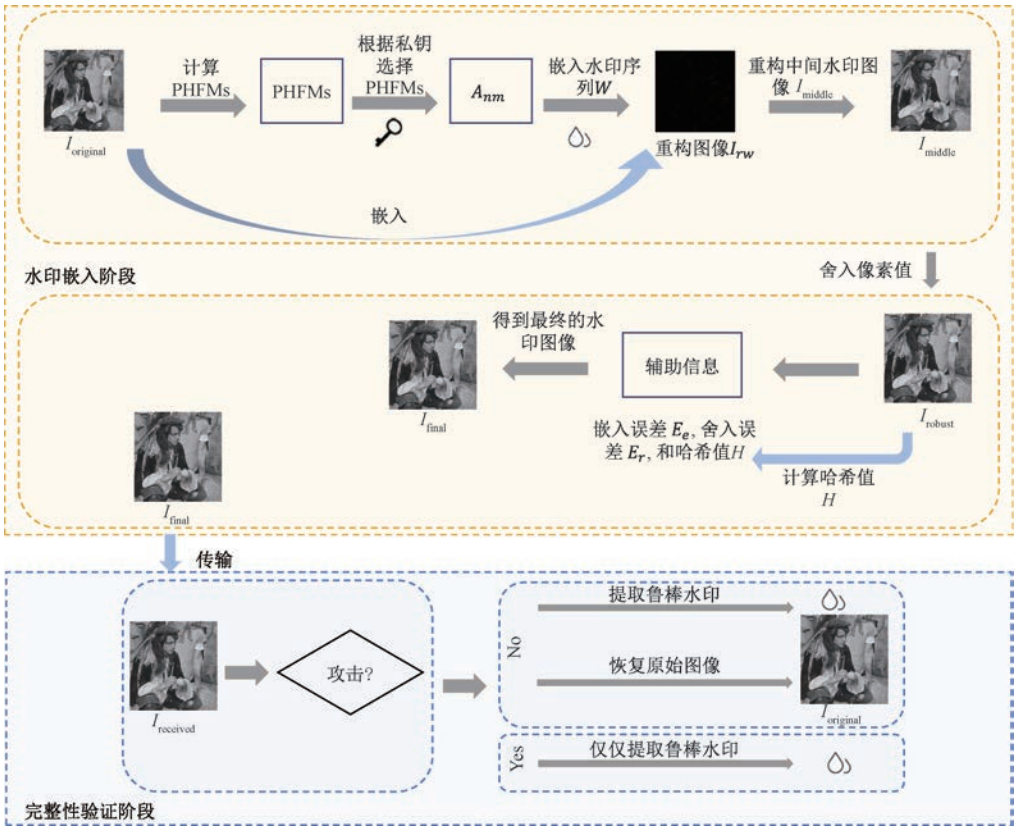


图 1 所提方案框架图

3.1 鲁棒水印嵌入

3.1.1 计算 PHFMs

根据 ZOA 方法，利用公式(1)求原始图像 $I_{original}$ 的矩 P_{nm}，P_{nm} 的最大阶数设为 N，其中 N 为正整数。离散图像阶数为 n 重复次数为 m 的 PHFM 由 P_{nm} 表示，n 和 m 需要满足如下条件：

$$0\leqslant n\leqslant N, m\geqslant 0 \quad (7)$$

根据 PHFMs 的定义可知，由于 $(n_{max}+1)(2m_{max}+1)$ 大小的 P_{nm} 是一个复数矩，且 P_{nm} 关于 $m=0$ 是对称的。因此，本文方案只选择 $m>0$ 的 P_{nm} 作为水印嵌入的集合 S。为了维持共轭关系，在鲁棒水印嵌入后将对称位置的 PHFMs 进行相应的修改。其中 $S=\{P_{nm},0\leqslant n\leqslant N,m>0\}$。

3.1.2 选择和归一化 PHFMs

本方案使用密钥 Key 从集合 S 中随机选择矩

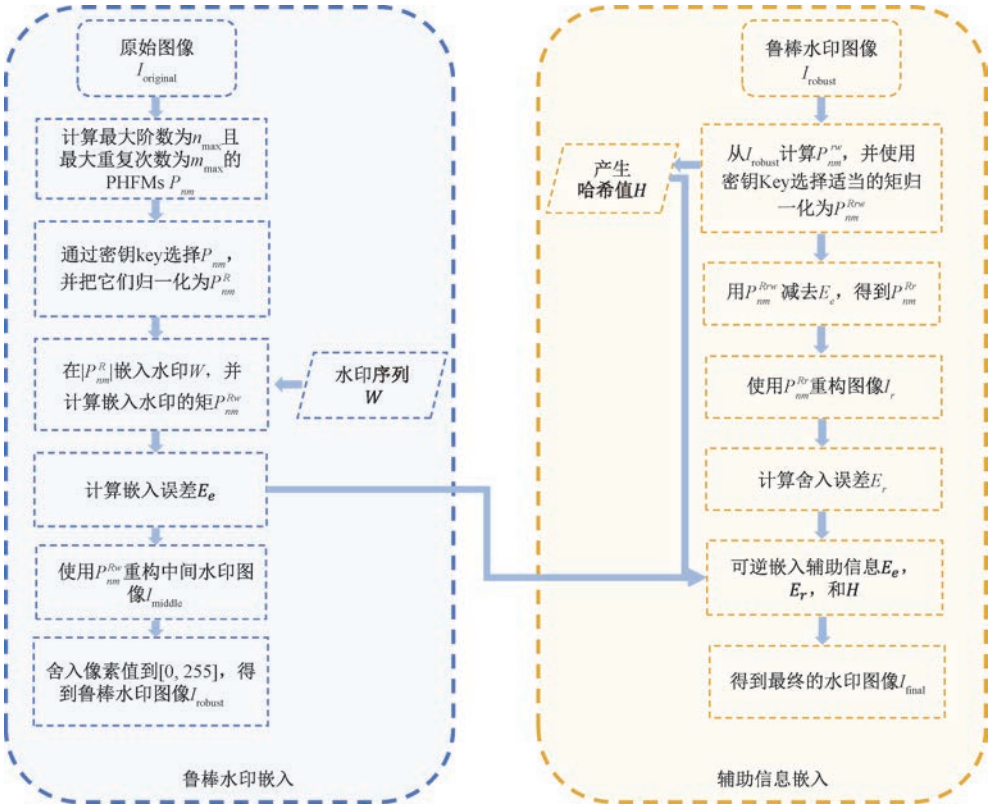


图 2　所提方案嵌入阶段流程图

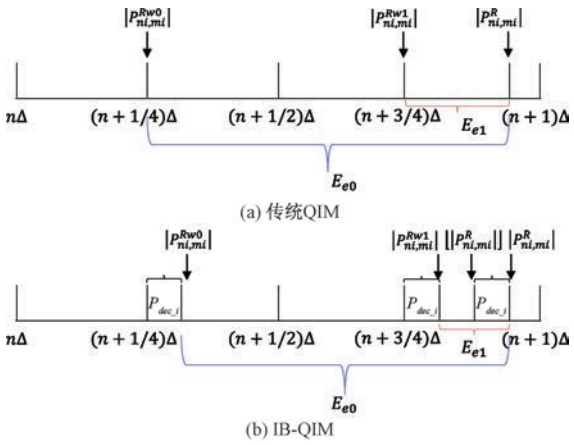


图 3　一种基于整数量化索引调制的数字水印方法原理图
(a)传统 QIM;(b)强制嵌入误差 E_e 为整数的 IB-QIM

序列 $P_{nm}=\{P_{n1,m1},P_{n2,m2},\ldots,P_{nl,ml}\}$ 以提高水印方案的安全性。然后将随机产生的水印序列 $W=\{w(i),1\leqslant i\leqslant L\}$ 嵌入到所选矩的整数部分中。在此之前对选取的 P_{nm} 进行归一化,并将 P_{nm} 预处理为

$$P^R_{ni,mi}=P_{ni,mi}\times T_{ni} \tag{8}$$

由于高阶 PHFMs 对噪声攻击的鲁棒性普遍比低阶 PHFMs 弱,因此高阶 PHFMs 需要比低阶 PHFMs 具有更大的嵌入强度,以在相同嵌入失真下最大限度地提高鲁棒性。鉴于此,本方案设计了一种自适应归一化策略。如公式(8)和(9)所示。

其中 T_{ni} 是一个大于 0 的自适应归一化权值,且随着 PHFM 的阶数变化而变化。由于很难从理论上推导其最佳值,因此在本文的工作中,将其设为

$$T_{ni}=T_{\text{initial}}-(\alpha+n_i/\beta) \tag{9}$$

其中,T_{initial}表示自适应归一化权值的起始值,n_i 是对应 PHFMs 的阶数,$\alpha,\beta(\alpha\geqslant 0,\beta>0)$ 是控制嵌入鲁棒水印强度的两个全局参数,通过参数 T_{initial} 和全局参数 α,β 来控制鲁棒水印图像的不可见性和鲁棒性之间的一个平衡,参数的具体值可以通过大量的实验模拟来实际确定。

3.1.3　嵌入水印

为了进一步实现旋转不变性,本方案利用 PHFMs 的特性,以归一化后 PHFMs 的幅度 $|P^R_{ni,mi}|$ 为载体,将鲁棒水印嵌入进去。

具体来说,本方案将 $|P^R_{ni,mi}|$ 作为嵌入水印的对象,使用量化索引调制技术来插入水印位 $w(i)$,公式如下:

$$|P^{Rw}_{ni,mi}|=\begin{cases}Q(|P^R_{ni,mi}|,\Delta)\times\Delta+\gamma(0) & \text{if } w_i=0\\ Q(|P^R_{ni,mi}|,\Delta)\times\Delta+\gamma(1) & \text{if } w_i=1\end{cases} \tag{10}$$

公式中 $|P^{Rw}_{ni,mi}|$ 是 $|P^{R}_{ni,mi}|$ 嵌入比特 0 或比特 1 后的版本，量化步长 Δ 为大于 0 的偶数。并且 $\gamma(1)=\gamma(0)+\Delta/2,\gamma(0)=\Delta/4$，量化公式如下：

$$Q(|P^{R}_{ni,mi}|,\Delta)\times\Delta=\left\lfloor\frac{|P^{R}_{ni,mi}|}{\Delta}\right\rfloor\times\Delta \quad (11)$$

其中，$\lfloor\cdot\rfloor$ 表示向下取整函数。从图 3(a)的量化方法可以看出，量化公式将 $|P^{R}_{ni,mi}|$ 量化到 $n\Delta$ 的位置，因为 $|P^{R}_{ni,mi}|$ 为实数，而 $n\Delta$ 为整数，从而得知量化后的变化值 $|P^{R}_{ni,mi}|-Q(|P^{R}_{ni,mi}|,\Delta)\times\Delta$ 是一个实数，嵌入水印后的变化值也是一个实数，保存这些实数就需要用大量比特表示。显然若直接将水印嵌入到 $|P^{R}_{ni,mi}|$ 中，会产生大量比特，这使得可逆阶段无法将这些信息嵌入到鲁棒水印图像。因此，本方案改进了传统的量化索引调制(Quantized Index Modulation，QIM)为整数量化索引调制(Integer-Based Quantized Index Modulation，IB-QIM)来嵌入鲁棒水印 w_i，对应公式如下所示：

$$|P^{Rw}_{ni,mi}|=\begin{cases}Q(\lfloor|P^{R}_{ni,mi}|\rfloor,\Delta)\times\Delta+\gamma(0)+P_{dec\_i} & \text{if } w_i=0\\ Q(\lfloor|P^{R}_{ni,mi}|\rfloor,\Delta)\times\Delta+\gamma(1)+P_{dec\_i} & \text{if } w_i=1\end{cases} \quad (12)$$

$$E_{ei}=|P^{Rw}_{ni,mi}|-|P^{R}_{ni,mi}|,i=1,2,\cdots,L \quad (13)$$

公式 (13)为嵌入误差的计算。在传统方法中需要分别计算并记录量化后的变化值与嵌入水印的具体值，而在本方案中，对于矩幅度 $|P^{R}_{ni,mi}|$ 来说，仅仅需要计算和记录嵌入水印前后的变化值 E_e 这一个误差，并将此信息用于恢复原始图像。

图 3(b)展示了基于 IB-QIM 的嵌入策略。该方案用这种改进的策略强制嵌入误差为整数，具体来说，水印部分被嵌入到 PHFMs 的整数部分中，在此之前仅仅量化 $|P^{R}_{ni,mi}|$ 的整数部分并记录 $|P^{R}_{ni,mi}|$ 的小数部分 $P_{dec\_i}=|P^{R}_{ni,mi}|-\lfloor|P^{R}_{ni,mi}|\rfloor$，嵌入水印的同时也嵌入记录的小数部分。公式(12)给出了具体嵌入公式，为了能在无攻击下准确提取水印，本方案设计了对应的提取水印公式(27)。

嵌入鲁棒水印后，归一化的水印 PHFMs 被生成，通过逆向的归一化后就可以产生带水印的 PHFMs，具体如下所示：

$$P^{w}_{ni,mi}=\frac{|P^{Rw}_{ni,mi}|}{|P^{R}_{ni,mi}|}\times P_{ni,mi} \quad (14)$$

本方案在得到水印矩 $P^{w}_{ni,mi}$ 后，对应修改其共轭位置的矩 $P^{w}_{ni,-mi}$，利用修改后的矩与修改前的矩重构水印图像 I_{rw}，如公式 (15)：

$$I_{rw}=\sum_{i=1}^{L}[(P^{w}_{ni,mi}-P_{ni,mi})H_{ni,mi}+(P^{w}_{ni,-mi}-P_{ni,-mi})\overline{H_{ni,-mi}}] \quad (15)$$

中间水印图像 I_{middle} 由图像 I_{rw} 与原始图像 I_{original} 相加得到。

$$I_{\text{middle}}=I_{rw}+I_{\text{original}} \quad (16)$$

图像 I_{middle} 的像素值可能会是一个实数甚至超过[0,255]这个范围，为了便于其在互联网上传输，图像的像素值需要被调整为[0,255]范围内的整数。因此图像 I_{middle} 的像素值需要进行舍入操作，并且将向上或者向下溢出的像素值处理到 0 或者 255。之后便生成了可逆嵌入阶段用于嵌入辅助信息的鲁棒水印图像 I_{robust}。

3.2 辅助信息嵌入

为了确保最终的传输图像在无攻击的情况下可以准确地恢复其原始图像，在嵌入鲁棒水印后，需要保存原始图像到鲁棒水印图像之间的差值。可逆嵌入阶段的辅助信息主要有三部分组成，分别是嵌入误差 E_e、舍入误差 E_r 和哈希值 H，并采用[30-31]的方法将辅助信息进行无损压缩和可逆嵌入。因此，接收端可以通过保存的误差 E_e 和 E_r 来计算未嵌入水印的矩并重建原始图像。

上述所提到的舍入误差 E_r 是由于归一化水印图像造成的，可以通过所提到的方法进行计算。同样地，基于 ZOA 方法，利用公式 (5)和 (6)计算出图像 I_{robust} 的矩 $P^{rw}_{ni,mi}$。进一步重构出与原始图像相近的预恢复图像，进而得到舍入误差 E_r。

首先根据 ZOA 方法计算出鲁棒水印图像 I_{robust} 的矩 $P^{rw}_{ni,mi}$，并根据相同的密钥 Key 选择矩序列，把它们归一化后得到 $P^{Rrw}_{ni,mi}$。通过计算 $|P^{Rw}_{ni,mi}|$ 与嵌入误差 E_e 的差值得到 $|P^{Rr}_{ni,mi}|$。

$$|P^{Rr}_{ni,mi}|=|P^{Rrw}_{ni,mi}|-E_{ei} \quad (17)$$

预恢复的 PHFMs$P^{r}_{ni,mi}$ 可以通过公式 (18)计算。由于对图像 I_{middle} 进行了舍入操作，因此图像 I_{middle} 和图像 I_{robust} 并不完全一样，从而计算得到的 $P^{r}_{ni,mi}$ 与 $P^{R}_{ni,mi}$ 不完全相等。

$$P^{r}_{ni,mi}=\frac{|P^{Rr}_{ni,mi}|}{|P^{Rrw}_{ni,mi}|}\times P^{rw}_{ni,mi} \quad (18)$$

与公式 (15)的计算类似，通过公式 (19)重构差异图像 I_r，并通过公式 (20)计算得到预恢复图像 I_{rt}。

$$I_{r}=\sum_{i=1}^{L}[(P^{rw}_{ni,mi}-P^{r}_{ni,mi})H_{ni,mi}+(P^{rw}_{ni,-mi}-P^{r}_{ni,-mi})\overline{H_{ni,-mi}}] \quad (19)$$

由于舍入操作的存在,导致预恢复图像 I_{rt} 与原始图像 I_{original} 存在一定差异,这种差异记作舍入误差 E_r。为了保证在接受端可以恢复原始图像,误差 E_r 需要被计算,并保存为辅助信息的一部分。

$$I_{rt}=I_{\text{robust}}-I_r \tag{20}$$

$$E_r=I_{\text{original}}-I_{rt} \tag{21}$$

嵌入误差和舍入误差被获得后,计算图像 I_{robust} 的哈希值。采用[31]所述的可逆嵌入法,将由误差和哈希值组成的辅助信息嵌入到 I_{robust} 中得到最终可传输的图像 I_{final}。为了保证图像的质量,辅助信息被嵌入到图像内切圆圆外区域,如图 4 所示黑色区域。

图 4　辅助信息嵌入区域的图示

3.3　完整性验证

接收端会得到在互联网传输后的图像 I_{received},提取其辅助信息后可以得到发送端嵌入的哈希值 H,同时图像会恢复为未嵌入辅助信息的图像 $I_{\text{robust\_}r}$,然后就可以通过计算得到 $I_{\text{robust\_}r}$ 的哈希值 H^r。接收端通过比对 H 与 H^r 的一致性,来判定图像是否在传输过程中受到攻击。完整性认证流程图如图 5 所示,接收端可以通过计算接收图像的 PHFMs 提取水印甚至恢复原始图像。

3.4　水印提取和图像恢复

接收端在接收到图像后需要进行完整性验证,其通过[31]中的方法提取辅助信息后得到图像 $I_{\text{robust\_}r}$,所提取的辅助信息中包括嵌入误差 E_e、舍入误差 E_r 和哈希值 H 三部分。如果接收到的图像未受到攻击,则可完全恢复原始图像和准确提取水印。当图像未受到攻击时,首先需要计算接收图像 $I_{\text{robust\_}r}$ 的矩 $P^{a}_{ni,mi}$,通过采用与嵌入时同样的密钥 Key,来选择相同的矩序列。与嵌入过程类似,这些矩经过归一化后得到矩 $P^{aR}_{ni,mi}$,然后分别将 0 和 1 水印嵌入到矩 $P^{aR}_{ni,mi}$ 的幅度中,如公式(22)所示。得到嵌入水印的矩幅度 $|P^{aRwj}_{ni,mi}|$ 后,通过公式(27)提取水印。

$$|P^{aRwj}_{ni,mi}|=Q(|P^{aR}_{ni,mi}|,\Delta)\times\Delta+\gamma(j),j\in\{0,1\} \tag{22}$$

接收端在提取水印后,利用 $|P^{a}_{ni,mi}|$ 减去嵌入误差 E_e 得到去水印的矩幅度 $|\hat{P}^{r}_{ni,mi}|$。

$$|\hat{P}^{r}_{ni,mi}|=|P^{a}_{ni,mi}|-E_e \tag{23}$$

去水印的矩 $|\hat{P}^{r}_{ni,mi}|$ 经过逆向归一化后得到 $|\hat{P}_{ni,mi}|$,然后利用类似于公式(15)方法重构出去

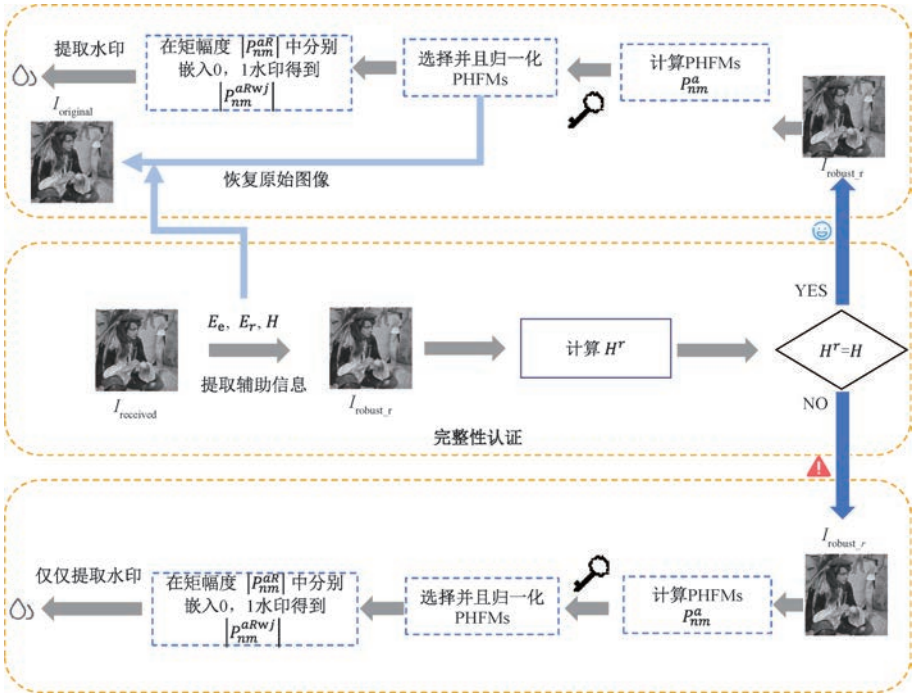


图 5　所提方案完整性认证流程图

水印图像 $\widetilde{I}$ 。

$$\hat{P}_{ni,mi}=\frac{|\hat{P}^{r}_{ni,mi}|}{|P^{aR}_{ni,mi}|}\times P^{a}_{ni,mi} \tag{24}$$

$$\widetilde{I}=I_{\text{robust\_}r}+\sum_{i=1}^{L}[(\hat{P}_{ni,mi}-P^{a}_{ni,mi})H_{ni,mi}+(\hat{P}_{ni,-mi}-P^{a}_{ni,-mi})\overline{H_{ni,-mi}}] \tag{25}$$

去水印图像 $\widetilde{I}$ 与辅助信息中的舍入误差 E_r 相加后便得到原始图像，如公式（26）所示。

$$I_{\text{original}}=\widetilde{I}+E_r \tag{26}$$

如果接收到的图像 I_{received} 在传输过程中受到攻击，则直接通过公式（22）和（27）来计算 I_{received} 的 PHFMs 和提取鲁棒水印 $W_{\text{ext\_}i}$ 。公式（27）通过比较 $P^{aR}_{ni,mi}$ 及其两组的量化式距离来提取水印。

$$W_{\text{ext\_}i}=\text{argmin}(\|P^{aR}_{ni,mi}|-|P^{aRwj}_{ni,mi}\|) \tag{27}$$

在公式（27）中，设置量化式距离 $dis0=|P^{aR}_{ni,mi}|-|P^{aRw0}_{ni,mi}|$，$dis1=|P^{aR}_{ni,mi}|-|P^{aRw1}_{ni,mi}|$，它们是 $P^{aR}_{ni,mi}$ 的两组量化式距离。然后计算两个距离的差值，记为 $t=dis0-dis1$。如果 $t<0$，则有 $W_{\text{ext\_}i}=0$；否则 $W_{\text{ext\_}i}=1$。

4 实验及结果分析

本章研究了基于极谐傅里叶矩和自适应归一化的高效鲁棒可逆水印方案的性能。所有的实验都是基于 http://dde.binghamton.edu 下载的六张标准测试图像和 http://www.imageprocessingplace.com 随机选择的 200 张灰度图像进行评估的，其中六张标准测试图像如图 6 所示。通过大量实验模拟设置好本方案的参数，然后证明所提方案在各方面的性能。本章通过将本方案与本领域的四个先进方案[32-35]作对比，评估了使用内切圆嵌入的各方案[32-34]，其嵌入效率和可逆阶段的辅助信息量，并且比较了所有方案[32-35]的鲁棒性性能。实验结果表明，该方案的最终水印图像与原始图像 I_{original} 的平均 PSNR 控制在 38 dB 左右，此时水印图像的不可见性能满足视觉质量要求，这是完全可以接受的。同时，所提方案在无攻击下可以恢复原始图像和准确提取水印，并且对几何攻击和普通信号攻击具有较强的鲁棒性。

(a) Pirate (b) Lake (c) Peppers (d) Baboon (e) Walkbridge (f) Woman

图 6 六幅标准图像

如上一章所述，所提出的方案中共有五个参数，分别是量化步长 Δ、最大阶数 N、初始归一化权值 T_{initial}、调节嵌入强度的全局参数 α 和 β。为了平衡鲁棒性和不可感知性，本文方案主要参数设置为 $\Delta=84$、$N=26$、$T_{\text{initial}}=100$、$\alpha=1$ 和 $\beta=3$。为了实验获得更好的说服力与实验的公平性，所有实验均采用了 512×512 的灰度图像，嵌入水印比特个数为 128，并将所有方案保证在相近 PSNR(38dB)下比较各方案的鲁棒性，结果如 4.5 节所示。

4.1 辅助信息

如第三章所述，本方案选择了 PHFMs 作为嵌入水印的载体并将水印嵌入到 PHFMs 的整数部分，强制了嵌入误差为整数。由于 PHFMs 的重构能力优于 ZMs 和 PZMs，因此最终的舍入误差 E_r 会相应减小。这使得在 RRW 类的方案中，使用 PHFMs 作为载体可以有效降低可逆阶段的辅助信息，少量辅助信息的可逆嵌入不影响后续对已嵌入水印的提取。此外，当嵌入水印时量化步长会影响嵌入误差的大小和水印的不可见性，因此选择合适的量化步长很重要。

表 1 是本方案在不同步长下的辅助信息大小，表 2 比较了不同方案各图像在 PSNR 为 38 dB 左右时的辅助信息大小，包括本方案在内的这四个方案均在图像内切圆下计算的正交矩。从表 1 中可以看出，所提方案的平均辅助信息量随着步长的增加而增加，当步长为 84 时，本方案的辅助信息不超过

表 1 不同步长下本方案的辅助信息量 （单位：比特）

步长	图像						
	Lake	Peppers	Baboon	Pirate	Walkbridge	Woman	Average
60	5472	16720	15648	9816	20504	24240	12668
68	6744	13632	14408	8512	18008	24496	13928
76	8144	12000	8144	11216	11352	13616	16593
84	13656	18496	16328	13024	20368	25688	19480
92	12880	15688	15928	16064	33208	19968	23812
100	13712	8288	17032	10448	42160	14464	25281

表 2　不同方案各图像在相近 PSNR 下的辅助信息大小　（单位:比特）

步长	图像						
	Lake	Peppers	Baboon	Pirate	Walkbridge	Woman	Average
XIANG[32]	39440	45136	34928	49832	58864	54568	44565
GAO[33]	28000	26592	20744	28832	34736	24296	26722
TANG[34]	20736	23992	20552	16816	23888	**26024**	24380
本方案	**13656**	**18496**	**16328**	**13024**	**20368**	25688	**19480**

30000,并且平均值也在 20000 左右。从表 2 可以看出,本方案的平均辅助信息量远小于其他方案。

4.2　计算效率

现有的 RRW 方案中并没有考虑到计算效率问题这一点,在不考虑其他因素的影响下,基于正交矩类的水印方案中,正交矩的计算效率会直接影响到水印嵌入图像时的效率。在这种背景下,本文选用极谐傅里叶矩作为载体,因为 PHFMs 相对于 ZMs 和 PZMs 来说,PHFMs 的径向多项式没有阶乘,这就使得其在计算 PHFMs 时会更快速,进而提高嵌入效率。

更具体地说,在同一实验环境下,本节测试了包括本方案在内的四个方案其平均每张图像嵌入水印所需的时间,这四个方案均将水印嵌入到图像内切圆中。如表 3 所示,本方案仅仅需要 4.2 s 就可以将水印嵌入到每张图像,而使用 ZMs 的 XIANG[32] 和使用 PZMs 的 TANG[34],却分别需要 14.08 s 与 31.34 s。GAO[33] 的耗时较少,但其高效率归功于他们所用于计算 ZMs 部分是整数小波变换(Integer Wavelet Transformation, IWT)后的低频系数,其仅为原始图像尺寸的四分之一,这大大节省了水印嵌入图像时所需的时间。因此,相比 ZMs 和 PZMs 来说,使用 PHFMs 作为嵌入水印的载体会提高其嵌入效率。

表 3　不同方案下水印序列嵌入的平均耗时　（单位:s）

方案	嵌入时间
XIANG[32]	14.08
TANG[34]	31.34
GAO[33]	3.76
本文方案	4.2

4.3　自适应归一化的有效性消融实验

如第三章所述,本文方案设计了自适应归一化的策略,即针对不同待嵌入的 PHFMs,实施不同的嵌入强度,相比低阶 PHFMs,高阶 PHFMs 的嵌入强度更大。这最大限度地增强了相同嵌入失真下的鲁棒性。同时也使得方案鲁棒性和不可见性之间达到一种良好的平衡。为了证明其有效性,本节分别采用了自适应归一化策略,命名为 T_a,和固定归一化策略,命名为 T_f,并在相近的 PSNR 条件下,比较了他们对高斯噪声和椒盐噪声的鲁棒性。高斯噪声的方差值在 0.005 到 0.03 之间,间隔为 0.004,椒盐噪声的噪声密度选择在 0.005 到 0.03 之间,间隔为 0.004。

表 4 展示了标准测试图像 Pirate 和 200 个测试图像的平均误码率(Bit Error Rate,BER)。研究表明,在 PSNR 几乎相同的情况下,本方案所提自适应归一化的 BER(%)小于固定归一化策略的 BER,因此证明了本方案所提自适应归一化策略的有效性。

表 4　固定归一化和自适应归一化策略下抵抗高斯噪声和椒盐噪声的鲁棒性表现　（单位:BER(%)）

攻击策略		高斯噪声							椒盐噪声							PSNR
		0.005	0.009	0.013	0.017	0.021	0.025	0.029	0.005	0.009	0.013	0.017	0.021	0.025	0.029	
T_f	Pirate	0	0	0.78	2.34	3.91	6.25	10.16	0	0	0.78	1.56	3.13	2.34	3.91	37.38
	Avg.	1.04	4.04	6.12	10.68	14.45	16.41	21.09	0	0.39	0.81	1.43	2.08	3.13	3.91	38.22
T_a	Pirate	0	0	0.78	2.34	3.14	5.47	9.38	0	0	0.78	1.56	3.13	2.34	2.34	37.47
	Avg.	**1.04**	**3.39**	**5.99**	**10.29**	**14.06**	**15.63**	**20.57**	**0**	**0.26**	**0.78**	**1.30**	**1.82**	**2.86**	**3.52**	38.3

注:其中 Avg. 表示平均值。

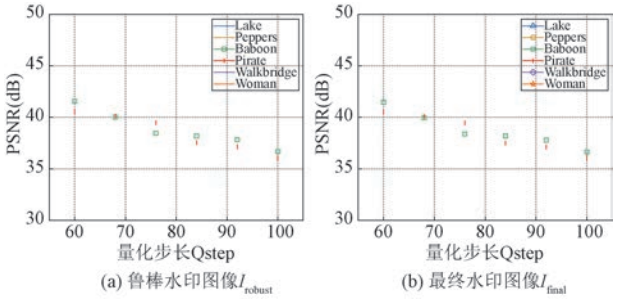
4.4　图像水印的不可感知性

图 7(a)是原始图像,图 7(b)是最终水印图像,图 7(c)是原始图像 I_{original} 和最终水印图像 I_{final} 之间的差异。为了更好地观察,差异图像被放大了 10 倍,可以看出原始图像与嵌入水印和辅助信息后获得的图像在视觉上没有太大差异。

(a) 原始图像　(b) 最终水印图像　(c) (a)和(b)的差异放大10倍

图 7　水印图像的视觉质量和差异

图 8 显示了嵌入鲁棒水印和嵌入辅助信息后的 PSNR 值随着步长增大而减小。当量化步长为 68 和 84 时，I_{robust} 和 $I_{original}$ 之间的平均 PSNR 分别是 40 dB 左右和 38 dB 左右。即使在鲁棒水印图像中嵌入了辅助信息，PSNR 的变化也很小。此时水印图像的不可见性满足了视觉质量要求，这是完全可以接受的。



(a) 鲁棒水印图像I_{robust} (b) 最终水印图像I_{final}

图 8 不同量化步长下水印图像和原始图像之间的平均 PSNR 值

4.5 可逆性

为了验证本文方案在无攻击情况下，图像恢复和水印提取情况，本节在标准测试图像 Pirate 和 200 幅测试图像上，进行了可逆性实验。图 9 为 Pirate 的原始图像、恢复图像以及它们之间的差异。从图 9(c)可以明显看出，图像的全部像素值为 0，这表明图像被完美地恢复。从表 5 可以看出，所有图像在无攻击时水印可以被完全提取，而且恢复图像和原始图像之间的 PSNR 为无穷大，SSIM 为 1，这说明所有被恢复的图像和其原始图像完全一样。因此，实验验证了本方案在无攻击下的可逆性。

(a) 原始图像 (b) 恢复图像 (c) (a)和(b)的差异图像

图 9 Pirate 图像恢复示例

表 5 200 幅图像的可逆性测试结果

指标	结果
BER	0
PSNR	∞
SSIM	1

4.6 鲁棒性

本节使用 BER 作为水印提取的衡量标准，其表示错误比特数量与嵌入总比特数量的比例，当 BER 低于 20%时，代表水印是可以被检测的。本节与其他四个方案比较了六种常见攻击的鲁棒性，实验结果表明所提方案对常见图像攻击具有较强的鲁棒性。

4.6.1 对几何攻击的鲁棒性比较

图 10 为最终水印图像遭受旋转攻击时的鲁棒性测试结果。旋转攻击的角度范围为 0 到 360 度，间隔为 20 度。从图 10 可以看出，本文所提方案和 XIANG[32]、GAO[33]以及 TANG[34]这四种方案都可以准确地提取出水印。这是由于这些方案都将图像归一化到图像内接圆中，只利用内接圆内的像素点来计算正交矩。虽然将数字图像旋转后，图像内接圆圆外位置上的信息会有所改变，但是图像在内接圆内部的信息是不会改变的，而且连续正交矩的模具有旋转不变性，所以无论旋转角度如何，基于内切圆计算的连续正交矩方案可以完全抵抗旋转攻击。

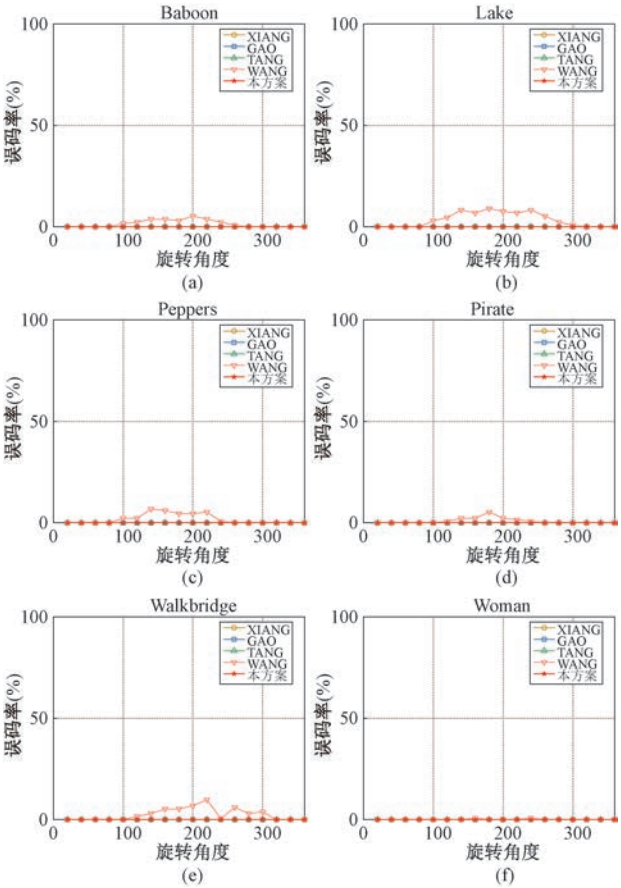


图 10 与 XIANG[32]、GAO[33]、TANG[34]、WANG[35]相比，本方案抗旋转攻击的鲁棒性

从图 11 可以看出，本方案可以在任何缩放攻击下从这六幅标准图像中准确提取水印，因此所提方案对缩放攻击表现出了高鲁棒性。这得益于本方案采用了尺度不变的自适应归一化策略。本方案将图像映射到单位圆盘内，并使图像的中心与单位圆的

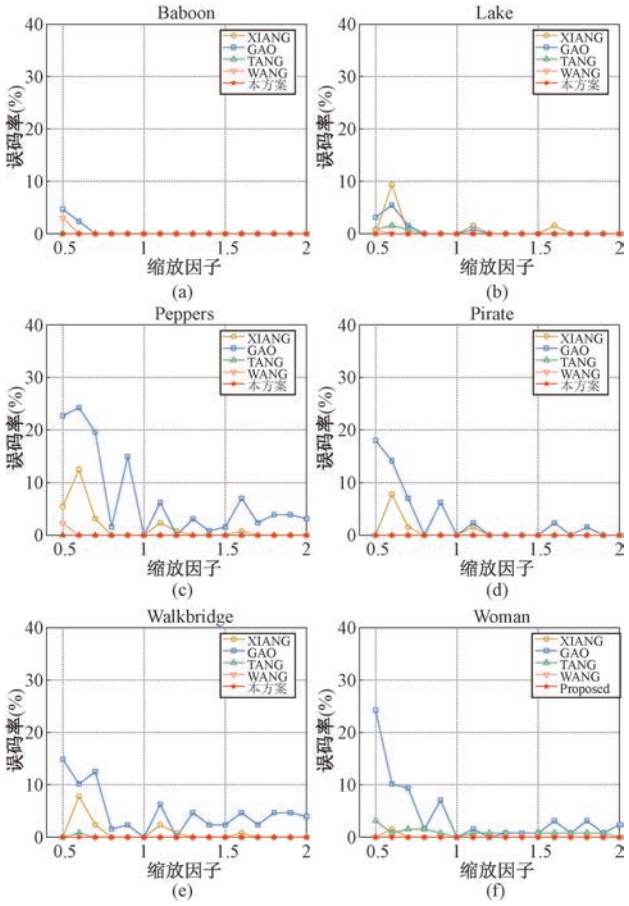


图 11　与 XIANG[32]、GAO[33]、TANG[34]、WANG[35] 相比,本方案抗缩放攻击的鲁棒性

圆心重合,将图像矩归一化后得到的 PHFMs 就具有了缩放不变性。

4.6.2　对普通信号攻击的鲁棒性比较

在实验中,图像受到 JPEG 压缩攻击,JPEG 压缩质量因子从 10 到 100,分 10 个区间。图 12 的实验结果表明,所提方案对 JPEG 压缩攻击表现出强鲁棒性,即使在压缩质量因子为 10 时,水印仍然可以被完全提取。

图 13 展示了对 JPEG2000 压缩的鲁棒性性能,其中 JPEG2000 压缩质量因子从 10 到 100,分 10 个区间。从测试的结果可以看出,相比于其他方案,所提方案对 JPEG2000 压缩攻击表现出更好的性能,即使使用压缩比为 100∶1 的 JPEG2000 压缩,提取水印的误码率仍然低于 5%甚至更低。

如图 14 所示,对所有图像施加了高斯噪声攻击,高斯噪声的方差值在 0.005 到 0.03 之间,间隔为 0.002。实验结果表明,与同类方案相比,该方案在受到高斯噪声攻击时,大多数图像的误码率都低于 10%甚至更低,取得了令人满意的性能。值得注意的是,当图像 Lake 受到高斯噪声攻击时,所提方

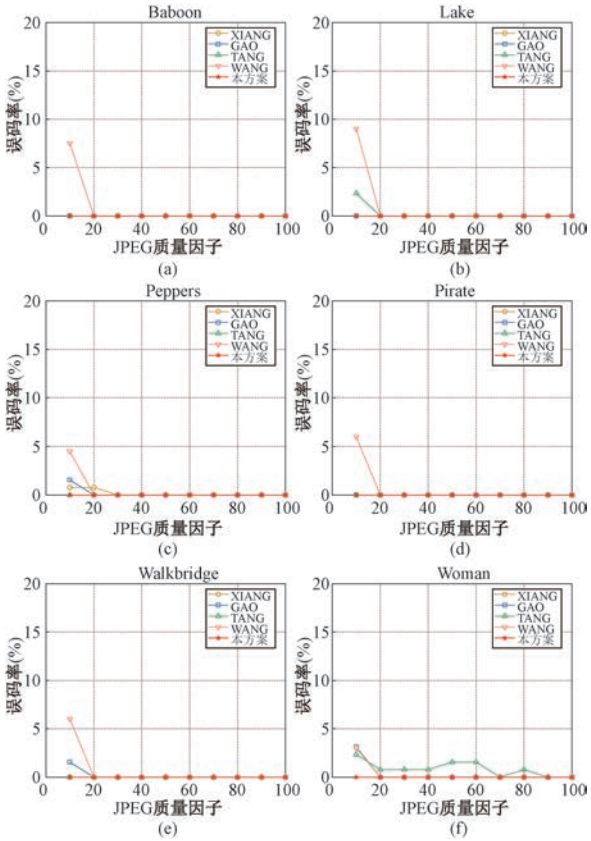


图 12　与 XIANG[32]、GAO[33]、TANG[34]、WANG[35] 相比,本方案抗 JPEG 压缩的鲁棒性

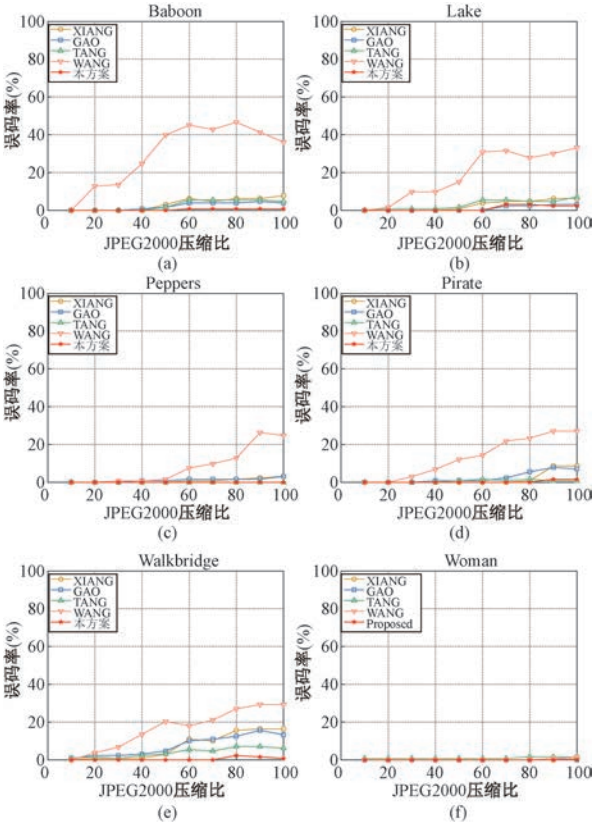


图 13　与 XIANG[32]、GAO[33]、TANG[34]、WANG[35] 相比,本方案抗 JPEG2000 攻击的鲁棒性

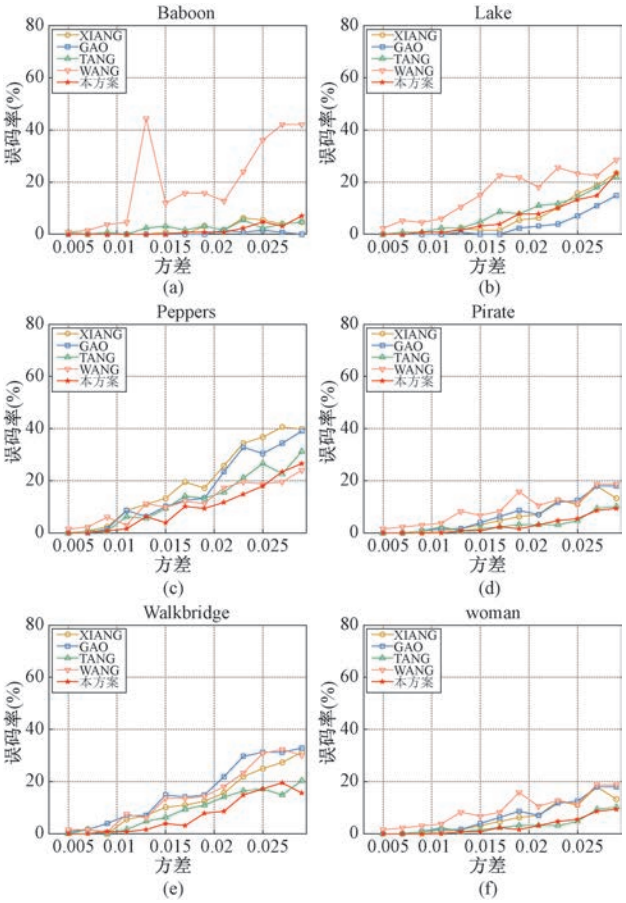


图 14 与 XIANG[32]、GAO[33]、TANG[34]、WANG[35]相比,本方案抗高斯噪声攻击的鲁棒性

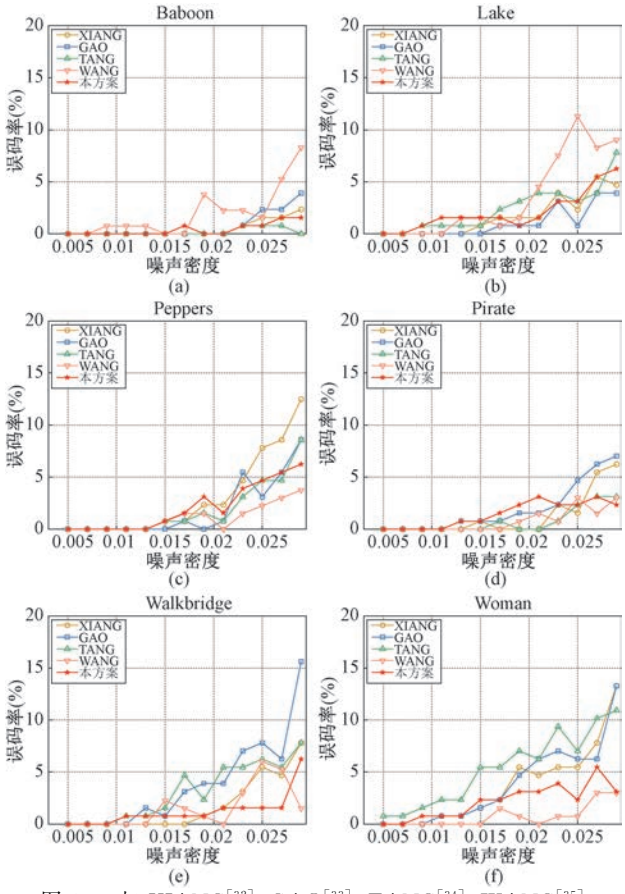


图 15 与 XIANG[32]、GAO[33]、TANG[34]、WANG[35]相比,本方案抗椒盐噪声攻击的鲁棒性

案相比其他方案表现效果不佳。这是由于 Lake 图像具有丰富的细节纹理、复杂的边缘结构以及大面积的平滑区域,这些特征使得图像在频域上呈现出明显的高频和低频成分分布特性。PHFMs 对图像的细节部分非常敏感,高斯噪声会随机污染这些高频细节,导致高频矩的失真,高频矩的失真会直接影响到 PHFMs 的描述能力,从而削弱了水印的可提取性。

如图 15 所示,将噪声密度为 0.005 到 0.03 之间的椒盐噪声,以 0.002 的间隔添加到传输图像中。可以看出,本方案在受到椒盐噪声攻击时,仍然取得了令人满意的性能,图像的最大误码率均小于 10%甚至更低。

表 6 总结了所有 200 个测试图像的平均误码率。从表 6 可以看出,该方案在提取水印方面优于多数同类的方案。虽然本方案在抵抗椒盐噪声攻击时不如基于特征点提取的 WANG 方案,但仍具有较强的鲁棒性。综合来看,相比其他方案,本方案对几何攻击和普通信号攻击的鲁棒性性能是最优的。

表 6 不同方案对不同攻击的平均误码率测试

(单位:平均 BER(%))

方案	JPEG	JPEG2000	高斯	椒盐	旋转	缩放
XIANG	0.17	2.42	10.52	1.64	0	0.32
GAO	0.03	2.57	10.30	1.53	0	2.38
TANG	0.07	0.68	8.19	1.31	0	0.04
WANG	3.38	12.78	9.83	**0.93**	0.88	0.09
本文方案	**0.01**	**0.14**	**6.59**	1.28	**0**	**0.02**

5 结 语

本文提出了一种新的基于 PHFMs 和自适归一化的高效鲁棒可逆水印方案,该方案可同时满足鲁棒性、可逆性和不可见性,本方案设计了自适应归一化策略来平衡不可见性和鲁棒性,并设计了 IB-QIM 强制嵌入误差为整数。在可逆嵌入阶段将由两部分误差和哈希值组成的辅助信息嵌入便得到最终的水印图像。接收端在收到传输图像后可进行提取辅助信息来验证是否受到攻击。若传输图像未受到攻击则提取水印并且恢复原始图像,否则只提取水印。实验结果表明,所提方案可以很好地抵抗常见图像攻击,可用于网络传输图像的版权认证。

使用 PHFMs 作为水印载体,不仅可以提高嵌入效率而且由于 PHFMs 良好的重构性能,使得可逆阶段产生的辅助信息大大减少。因此该方案在基于正交矩类的两阶段水印方案中表现出良好的性能,提高了嵌入效率。所提方案同样适用于彩色图像的版权认证,由于彩色图像是三通道图像,其中每个通道都是灰度图像。所提方案可以将水印嵌入到某一个通道或所有的通道以验证版权。未来,我们将探索基于变换域下鲁棒性矩嵌入水印的方法,以提升水印的嵌入效率和抗干扰能力。

参 考 文 献

[1] Li Zhaohong, Huang Liang, Zhang Wenli. Digital Watermarking Technology for Binary Image Authentication. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(5): 66 (in Chinese)
(李赵红, 黄亮, 张文礼. 用于二值图像认证的数字水印技术. 北京邮电大学学报, 2010, 33(5): 66)

[2] Evsutin O, Dzhanashia K. Watermarking schemes for digital images: Robustness overview. Signal Processing: Image Communication, 2022, 100: 116523

[3] Pal P, Jana B, Bhaumik J. Watermarking scheme using local binary pattern for image authentication and tamper detection through dual image. Security and Privacy, 2019, 2(2): e59

[4] Haddad S, Coatrieux G, Moreau-Gaudry A, et al. Joint watermarking-encryption-JPEG-LS for medical image reliability control in encrypted and compressed domains. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2020, 15: 2556-2569

[5] Chowdhuri P, Jana B, Giri D. Secured steganographic scheme for highly compressed color image using weighted matrix through DCT. International Journal of Computers and Applications, 2021, 43(1): 38-49

[6] Ghosh B R, Banerjee S, Mandal J K. Watermark based image authentication using integer wavelet transform//Proceedings of the 2022 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT). Lalitpur, Nepal,2022: 312-319

[7] Niu Xinxin, Yang Yixian. Digital watermarking hiding and detection algorithm based on wavelet transform. Journal of Computer Science, 2000, 23(1): 21-27 (in Chinese)
(钮心忻, 杨义先. 基于小波变换的数字水印隐藏与检测算法. 计算机学报, 2000, 23(1): 21-27)

[8] Thodi D M, Rodríguez J J. Expansion embedding techniques for reversible watermarking. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(3): 721-730

[9] Luo L, Chen Z, Chen M, et al. Reversible image watermarking using interpolation technique. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2009, 5(1): 187-193

[10] Li X, Yang B, Zeng T. Efficient reversible watermarking based on adaptive prediction-error expansion and pixel selection. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(12): 3524-3533

[11] Shi Y Q, Li X, Zhang X, et al. Reversible data hiding: Advances in the past two decades. IEEE Access, 2016, 4: 3210-3237

[12] Jin Cong, Ye Junmin, Xu Kaihua, et al. Blind digital image watermarking algorithm with geometric attack resistance. Journal of Computer Science, 2007, (3): 474-482 (in Chinese)
(金聪,叶俊民,许凯华,等.具有抗几何攻击能力的盲数字图像水印算法.计算机学报,2007,(3):474-482)

[13] Xin Y, Liao S, Pawlak M. Circularly orthogonal moments for geometrically robust image watermarking. Pattern Recognition, 2007, 40(12): 3740-3752

[14] Liang X, Xiang S, Yang L, et al. Robust and reversible image watermarking in homomorphic encrypted domain. Signal Processing: Image Communication, 2021, 99: 116462

[15] Novamizanti L, Suksmono A B, Danudirdjo D, et al. Robust reversible image watermarking based on independent embedding domain and pixel value ordering//Proceedings of the 2023 IEEE 8th International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE). Kuala Lumpur, Malaysia,2023: 1-6

[16] Chen J, Wang W, Shi C, et al. Deep Robust Reversible Watermarking. arXiv preprint arXiv: 2025, 2503.02490

[17] Wang X, Li X, Pei Q. Independent embedding domain based two-stage robust reversible watermarking. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2019, 30(8): 2406-2417

[18] Liang X, Xiang S. Robust reversible watermarking of JPEG images. Signal Processing, 2024, 224: 109582

[19] Menendez-Ortiz A, Feregrino-Uribe C, Hasimoto-Beltran R, et al. A Sur-vey on reversible watermarking for multimedia content: ArRobustness overview. IEEE Access, 2019, 7: 132662-132681

[20] Liu X, Lou J, Fang H, et al. A novel robust reversible watermarking scheme for protecting authenticity and integrity of medical images. IEEE Access, 2019, 7: 76580-76598

[21] Sun Y, Yuan X, Liu T, et al. FRRW: A feature extraction-based robust and reversible watermarking scheme utilizing zernike moments and histogram shifting. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2023, 35(8): 101698

[22] Mao J, Tang H, Lyu S, et al. Content-aware quantization index modulation: Leveraging data statistics for enhanced image watermarking. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2024, 19: 1935-1947

[23] Yu K, Chen L, Fu Z, et al. A coding layer robust reversible watermarking algorithm for digital image in multi-antenna system. Signal Processing, 2022, 199: 108630

[24] Kamila N K, Mahapatra S, Nanda S. RETRACTED: Invari-

ance image analysis using modified Zernike moments. Pattern Recognition Letters,2005, 26(6):747-753

[25] Su Q, Liu D, Sun Y. A robust adaptive blind color image watermarking for resisting geometric attacks. Information Sciences, 2022, 606: 194-212

[26] Wang C, Wang X, Xia Z, et al. Image description with polar harmonic Fourier moments. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2019, 30(12): 4440-4452

[27] He M, Wang H, Zhang F, et al. Exploring accurate invariants on polar harmonic fourier moments in polar coordinates for robust image watermarking. IEEE Transactions on Multimedia, 2024, 26: 5435-5449

[28] Teh C H, Chin R T. On image analysis by the methods of moments. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(4): 496-513

[29] Liao S X, Pawlak M. On the accuracy of Zernike moments for image analysis. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(12): 1358-1364

[30] Witten I H, Neal R M, Cleary J G. Arithmetic coding for data compression. Communications of the ACM, 1987, 30(6): 520-540

[31] Sachnev V, Kim H J, Nam J, et al. Reversible watermarking algorithm using sorting and prediction. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2009, 19(7): 989-999

[32] Hu R, Xiang S. Cover-lossless robust image watermarking against geometric deformations. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 318-331

[33] Gao G, Wang M, Wu B. Efficient robust reversible watermarking based on ZMs and integer wavelet transform. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(3): 4115-4123

[34] Tang Y, Wang S, Wang C, et al. A highly robust reversible watermarking scheme using embedding optimization and rounded error compensation. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2023, 33(4): 1593-1609

[35] Wang H, Yao H, Qin C, et al. When robust reversible watermarking meets cropping attacks. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2024, 34(12): 13282-13296

GAO Guang-Yong, Ph. D., professor. His research interests include robust reversible watermarking, artificial intelligence and security, multimedia forensics.

YUAN Ao-Qi, M. S. candidate. His research interests focus on robust reversible watermarking.

FU Zhang-Jie, Ph. D., professor. His research interests include Information hiding, network and information security.

Background

As a means of copyright protection for digital products, research on digital watermarking primarily centers on two categories: robust watermarking and reversible information hiding. Robust watermarking technique effectively protects copyright at the cost of causing irreversible distortion to the original image, whereas reversible information hiding technique allows complete restoration of both the image and watermark, yet suffers from limited robustness against attacks. In recent years, RRW has become an important research direction in the field of information hiding. The key advantage of RRW lies in its dual functionality: when the watermarked image remains intact, the original content can be perfectly restored to preserve its commercial utility; when subjected to attacks, the embedded watermark can still be extracted to assert copyright ownership.

Moment functions are widely used in image analysis tasks such as pattern recognition, as they can describe global shape features and geometric properties via image moments. However, existing RRW schemes based on continuous orthogonal moments still face limitations in resisting geometric transformations, robustness against common signal processing operations, and embedding efficiency. To address this problem, this paper proposes an efficient robust reversible watermarking scheme based on PHFMs and adaptive normalization. The scheme embeds watermarks with PHFMs, uses the adaptive normalization strategy, and designs a new quantization index modulation algorithm and corresponding extraction formula. Experimental results demonstrate that the proposed scheme can fully recover the original image and watermark in the absence of attacks, while exhibiting strong robustness against geometric transformations, noise interference, and other common distortions, thereby validating its effectiveness and superiority.

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (62572248, U22B2062), Nanjing Major Science and Technology Special Project (202405002), Humanities and Social Sciences Planning Fund of the Ministry of Education (24YJA870002).