

基于 PSNR-NC 函数优化和非抽样双树复小波变换的自适应多重水印算法

汪贺延^{1,2}, 刘国栋^{1,2*}, 庙存彬¹

¹陕西科技大学轻工科学与工程学院, 陕西 西安 710021;

²陕西科技大学轻化工程国家级实验教学示范中心, 中国轻工业功能印刷与运输包装重点实验室, 陕西省造纸技术及特种纸品开发重点实验室, 中国轻工业纸基功能材料重点实验室, 陕西 西安 710021

摘要 针对多重水印信息的有效嵌入和提取, 提出了一种基于峰值信噪比-归一化相关系数函数(PSNR-NC)优化和非抽样双树复小波变换的自适应多重水印算法。该算法首先利用 PSNR-NC 函数来确定水印的最佳嵌入位置, 其次通过非抽样双树复小波变换-奇异值分解(UDTCWT-SVD)算法将多个相互独立的水印信息嵌入到彩色宿主图像中, 最后通过水印提取算法在含水印图像中提取多重水印, 有效实现了多个版权信息的嵌入和提取。实验结果表明, 嵌入水印图像具备良好的不可见性, 所提算法对常见的图像处理攻击, 特别是在抵抗 JPEG 压缩、噪声攻击和滤波攻击方面表现出较强的鲁棒性。

关键词 图像处理; 多水印算法; 非抽样双树复小波变换; 奇异值分解; 峰值信噪比-归一化相关系数函数

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0510001

Adaptive Multi-Watermarking Algorithm Based on PSNR-NC Function Optimization and Undecimated Dual Tree Complex Wavelet Transform

Wang Heyan^{1,2}, Liu Guodong^{1,2*}, Miao Cunbin¹

¹College of Bioresources Chemical and Materials Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

²National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, Key Laboratory of Functional Printing and Transport Packaging of China National Light Industry, Shaanxi Provincial Key Laboratory of Papermaking Technology and Specialty Paper Development, Key Laboratory of Paper Based Functional Materials of China National Light Industry, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract Aiming at the effective embedding and extraction of multi-watermarking information, an adaptive multi-watermarking algorithm based on peak signal-noise ratio-normalized correlation coefficient function (PSNR-NC) optimization and undecimated dual tree complex wavelet transform is proposed. First, the algorithm uses the PSNR-NC function to determine the best embedding position of the watermark. Then, multiple independent watermarks are embedded into the color host image by the unsampled double tree complex wavelet transform-singular value decomposition (UDTCWT-SVD) algorithm. Finally, the watermark extraction algorithm is used to extract multiple watermarks in the watermarked image, which effectively realizes the embedding and extraction of multiple copyright information. The experimental results show that the embedded watermark image has good invisibility, and the proposed algorithm is robust to common image processing attacks, especially in resisting JPEG compression, noise attacks and filtering attacks.

收稿日期: 2021-07-28; 修回日期: 2021-09-08; 录用日期: 2021-09-23

基金项目: 陕西省西安市未央区科技计划(201916)

通信作者: *liuguodong_group@aliyun.com

Key words image processing; multi-watermarking algorithm; undecimated dual-tree complex wavelet transform; singular value decomposition; peak signal-to-noise rate-normalized correlation coefficient function

1 引言

数字水印技术^[1-2]作为解决多媒体产品信息安全问题的有效方法之一而被广泛讨论,一般将认证的信息嵌入被保护的多媒体产品中,后续通过相应的算法才能对其进行提取和识别,从而有效地保护了产品。数字水印的评价指标主要包括不可见性^[3]、鲁棒性^[4]和嵌入容量^[5]三个方面,通常这三个评价指标存在相互制约和平衡的关系,通过增大嵌入容量的方式可以加强水印的鲁棒性^[6],但水印的不可见性被削弱,反之增强水印的不可见性,水印的鲁棒性被削弱。当数字水印技术应用于产品防伪时,在确定的嵌入容量下兼具良好的不可见性和鲁棒性的综合特征才能有效保护多媒体产品。

目前,数字水印算法主要从基于空间域和基于变换域两个方面来构建。基于空间域的水印算法通过修改宿主图像像素值的方式对信息进行隐藏,这类算法易于完成,时间复杂度低,但缺乏一定的不可见性和鲁棒性^[7-8]。基于变换域的水印算法在变换域中通过调制系数幅值的方式来嵌入水印,提取水印的过程中会将含水印图像变换到该域中,依据嵌入水印的逆过程来恢复水印信息,该算法有离散余弦变换(DCT)^[9]、离散小波变换(DWT)^[10]、离散傅里叶变换(DFT)^[11]、冗余离散小波变换(RDWT)^[12]、整数小波变换(IWT)^[13]和提升小波变换(LWT)^[14]。在此基础上,通过调制图像的奇异值来嵌入水印^[15],并将变换域算法与奇异值分解(SVD)结合,可以进一步提升水印算法的鲁棒性。Bhatnagar等^[16]提出了一种基于小波变换-奇异值分解(DWT-SVD)的鲁棒水印方案,该方案提高了水印抵抗滤波和JPEG(Joint Photographic Experts Group)压缩攻击的能力。但当面对旋转等几何攻击时,该方案无法恢复出有效的水印信息;当面对噪声攻击时,该方案提取出的水印图像缺乏一定的完整性。Sudha等^[17]在基于DWT算法的基础上进行了改进,使用双树复小波变换(DTCWT)代替普通的小波变换,DTCWT具备良好的方向性、平移不变性和完美的重构特性,为此提升了水印的鲁棒性和不可见性。但该算法在面对旋转攻击时表现不佳,且水印的嵌入容量仍然相对较低。Niu等^[18]在Sudha等^[17]提出的算法的基础上进行了改进,提出

了基于非抽样双树复小波变换(UDTCWT)的水印算法,其取消了DTCWT中的下采样过程,提高了水印的嵌入容量,在满足水印不可见性的情况下提高了水印算法的鲁棒性。该算法在面对常规的信号处理攻击以及小规模旋转攻击时表现良好,但在面对较大规模的旋转攻击时表现较差,无法清晰地分辨、提取水印信息,这也是单水印算法鲁棒性不佳的通用局限性。为了实现水印算法具有更好的鲁棒性,尤其是抵抗几何失真所带来的不良影响,通常在单水印算法的基础上提出一些双重水印^[19-20]和多重水印^[21-22]算法。Jayanthi等^[23]提出了一种基于加性的双域数字图像水印方法,该方法增强了宿主图像的安全性,但在一些几何攻击下嵌入到空间域和小波域的水印均易遭到破坏,难以提取出两个完整的水印信息。Nguyen等^[24]在上述算法的基础上进行了改进,将两个独立的水印信息全部嵌入变换域中,两者相互独立,互不干扰,这在一定程度上提高了算法的鲁棒性,但嵌入的信息数据量较少,而且在图像的相同变换域中嵌入,因此在面对几何失真时,算法难以提取出两个独立的水印信息。

多重水印算法在双重水印算法的基础上通过更多水印信息的嵌入和多选择性的输出来提高算法的鲁棒性,这赋予了水印算法更强的抗攻击能力。该算法一般是将宿主图像分割成不重叠的区域,将多个版权信息分别隐藏在各个区域中^[25],由于在嵌入图像中提取水印信息的选择性较多,为此算法能够抵抗大多数图像处理攻击和几何攻击。事实上,多水印信息成功、全部有效提取与信息的嵌入位置有重要关系,从而可以抵抗攻击对多个水印还原的影响。因此,合理的水印嵌入区域能够使水印在满足不可见性的前提下尽可能地提升水印的鲁棒性^[26]。区域自适应水印算法用于解决多水印嵌入位置的选取问题^[27],如基于宿主图像的人眼视觉特性和聚类技术来寻找适合隐藏信息的区域。通过基于人眼视觉特性的熵值来筛选存储水印的位置^[28],由于修改熵值最小的位置几乎不影响宿主图像的质量,所以在最小熵值的位置中嵌入水印可以保持水印良好的不可见性。但基于人眼视觉特性的方法只考虑了不可见性,没有考虑到水印的鲁棒性,这使其隐藏信息的抗攻击能力在一定程度上减弱。基于聚类技术的方法采用自适应聚类来产生宿主图像的鲁

棒区域,将区域的边界矩形作为嵌入区域可以在较大图像中嵌入和检测水印信息^[29],但方法的存储容量有限,并不适合嵌入较高容量的水印数据。考虑到平衡水印不可见性和鲁棒性的制约关系,将两者都兼顾可以选择最佳的嵌入位置,通过寻找更适合嵌入水印信息的区域可以使算法的不可见性和鲁棒性更强。

因此,针对多重水印信息的嵌入和有效提取,通过综合考虑水印的不可见性和鲁棒性,提出了一种基于峰值信噪比-归一化相关系数(PSNR-NC)函数(简称 PN 函数)优化和非抽样双树复小波变换的自适应水印算法,该算法可将多个独立的水印信息嵌入到宿主图像中。在水印最佳嵌入位置确定的情况下,通过非抽样双树复小波变换-奇异值分解(UDTCWT-SVD)将多水印信息依次嵌入到宿主图像 PN 函数值较大的感兴趣区域中,从而增强多重水印的嵌入对图像处理攻击的不变性,提升水印算法的鲁棒性,最终有效显示多水印信息。

2 理论基础

2.1 非抽样双树复小波变换

UDTCWT 是 Hill 等^[30]于 2012 年提出的一种新的变换方式,该方式移除了 DTCWT 中的下采样

算子,通过在滤波器系数之间插入零来对滤波器本身进行上采样,使得变换后各子带的维数仍然与原图像的维数相同。

UDTCWT 的具体变换过程如图 1 所示,其中 sub2 代表下采样操作,×代表取消下采样过程,X 代表输入信号。当分解等级 $j'=1$ 时,树 A 和树 B 的滤波器分别为双正交滤波器组 $\{h_{0_0}, h_{0_1}\}$ 和 $\{g_{0_0}, g_{0_1}\}$;当分解等级 $j' > 1$ 时,滤波器分别为 $\{hl_0^{(j')}, hl_1^{(j')}\}$ 和 $\{gl_0^{(j')}, gl_1^{(j')}\}$ 。对于树 A,偶数层($j'=2, 4, 6, \dots$)选取 $\{hl_0^{(j')}, hl_1^{(j')}\}$,奇数层($j'=1, 3, 5, \dots$)选取 $\{gl_0^{(j')}, gl_1^{(j')}\}$ 。树 B 遵循与树 A 互相交替的形式后进行分解。UDTCWT 在每一等级的分解过程中取消下采样操作,为了抵消这种影响,每层滤波器自身进行上采样(滤波器系数之间插零),例如第 $j'+1$ 层的滤波器 gl_0 的递归定义为

$$gl_0^{(j'+1)}(n') = gl_{0,up2}^{(j')}(n') = \begin{cases} gl_0^{(j')}\left(\frac{n'}{2}\right), & n' \text{ is even} \\ 0, & n' \text{ is odd} \end{cases} \quad (1)$$

式中:up2 表示每层滤波器自身的上采样操作。由上述方法可以类似地得到其他滤波器 $gl_1^{(j'+1)}$ 、 $hl_0^{(j'+1)}$ 和 $hl_1^{(j'+1)}$ 的具体表达式。UDTCWT 的重构过程即为图 1 的逆变换过程。

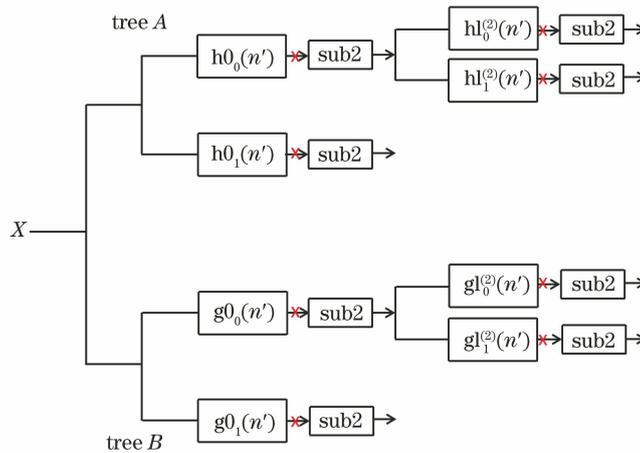


图 1 UDTCWT 过程

Fig. 1 UDTCWT process

与经典的小波变换相比,UDTCWT 具有完全重构性,这有利于水印图像的真实还原,且变换后各子带的维数与原图像相同,这有利于嵌入更高容量的水印图像。基于上述条件,可以将多水印信息隐藏在宿主图像经过 UDTCWT 后的实部和虚部系数中,在保证水印不可见性的前提下增强水印的鲁棒性。

2.2 奇异值分解

在数字图像处理中,计算机通常将图像当作矩阵进行存储,像素的幅值由矩阵的每个元素代替。SVD 又是对矩阵进行实际应用的推广^[31],因此较为普遍地应用于数字图像处理,SVD 的原理如下。假设一幅数字图像(尺寸为 $M \times N$)用矩阵 A 来表示,其中 $A \in \mathbf{R}^{M \times N}$ (\mathbf{R} 为实数集合),则矩阵 A 的

SVD 可表示为

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}_A \mathbf{S} \mathbf{V}_A^T, \quad (2)$$

式中: \mathbf{U}_A 和 \mathbf{V}_A 为 $M \times N$ 大小的酉矩阵; \mathbf{S} 为对应的奇异值矩阵。SVD 具有良好的稳定性能, 在图像被施加一定强度的攻击时, 图像的奇异值也不会发生很大的变化。基于上述分析, 将水印嵌入到图像的奇异值中可以使水印具有良好的鲁棒性。

2.3 基于 PN 函数的水印嵌入最佳区域的确定方法

目前, 探究水印嵌入位置的区域自适应算法大多只考虑了水印的不可见性, 而忽略了水印的鲁棒性, 而最佳水印嵌入区域的确定应该综合考虑水印的不可见性和鲁棒性。通常利用评价含水印图像与宿主图像的峰值信噪比来衡量水印模型的不可见性, 通过提取水印和原始水印之间的归一化相关系数来评价水印模型的鲁棒性。基于平衡水印不可见性和鲁棒性制约关系的考虑, 将两者的因素都兼顾以确定最佳嵌入位置, 因此在峰值信噪比和归一化相关系数评价水印算法的前提下, 建立综合的 PN 函数来确定最佳的水印嵌入区域, 具体的计算公式为

$$\text{PN}(x) = \mu \times \frac{R_{\text{PSN}}(x)}{R_{\text{PSN}, \max}} + \delta \times X_{\text{NC}}(x), \quad (3)$$

式中: μ 和 δ 分别表示不可见性和鲁棒性的影响因子; $R_{\text{PSN}}(x)$ 表示在每个子块嵌入水印后得到的嵌入水印子块和原始子块之间的峰值信噪比; $R_{\text{PSN}, \max}$ 表示所有子块中最大的峰值信噪比值; $X_{\text{NC}}(x)$ 表示通过不同种类的攻击类型攻击每个嵌入水印子块, 之后在每个受攻击子块中提取出的水印与原始水印之间的归一化相关系数的均值。攻击类型的设定应当考虑水印的实际应用情况, 常见的图像攻击主要分为移除攻击和几何攻击两大类。移除攻击旨在去除水印图像中的水印信号, 而不试图破坏水印的安全性。这种类型的水印攻击不会尝试找出水印是如何嵌入的, 但它会导致水印信号受损, 例如噪声、直方图均衡化和滤波攻击。几何攻击与移除攻击有很大的不同, 这种攻击的目的不是去除或严重破坏水印信号, 而是歪曲它, 例如旋转、缩放、平移和剪切等。因此在选择攻击类型时, 可以在上述两大类攻击中分别尽可能多地选取典型攻击来检测宿主图像中各个区域的鲁棒性能, 从而最大程度上减小攻击类型的选取对水印最佳隐藏区域确定的影响。 μ 值越大, 则 PN 函数的输出结果会向不可见性更强的方向趋近。 δ 值越大, 则 PN 函数的输出结果会向鲁棒性更强的方向趋近。通过调整影响因子 μ 和

δ , 可以使函数的输出结果更趋近于不可见性或是鲁棒性。将宿主图像分割后, 通过计算宿主图像中不同区域的 PN 函数值并按照高低进行排序, 可以找到最佳嵌入水印信息的区域, 使得水印算法在满足不可见性的同时鲁棒性更强。另外, 由于 $R_{\text{PSN}}(x)$ 和 $X_{\text{NC}}(x)$ 值不在一个数值区间, 因此对 $R_{\text{PSN}}(x)$ 进行归一化处理, 使得 PN 函数值的计算更加便捷。

3 基于 PN 函数优化的非抽样双树复小波域自适应水印算法

3.1 基于 PN 函数多重水印信息最佳嵌入位置的实现

基于 PN 函数来确定宿主图像中最优的水印嵌入位置, 首先对宿主图像进行分割以得到不重叠子块, 之后将相同的水印信息独立地存储到每个子块中, 再利用不同的攻击方式来检验每个子块中水印的鲁棒性, 利用峰值信噪比和归一化相关系数之间的关系来选择适合存储水印信息的区域, 具体操作步骤如下。

1) 将 $M \times N$ 大小的宿主图像 C 分成 $P \times Q$ 大小的不重叠子块 $\{C^m\}$, 表达式为

$$\{C^m\}_{P \times Q} = \text{Block}(C_{M \times N}), \quad (4)$$

式中: m 表示宿主图像 C 中子块的数量, $m = 1, 2, \dots, (M \times N) / (P \times Q)$; $\text{Block}(\cdot)$ 表示对图像进行不重叠分块的操作。

2) 将同一幅水印图像按照相同的水印嵌入算法嵌入到每一个子块中, 得到 $P \times Q$ 个嵌入水印图像 $\{X_{\text{WI}}^m\}$, 计算每个嵌入水印图像的峰值信噪比可以得到每个子块的峰值信噪比 $|R_{\text{PSN}, \text{WI}}|^m$, 表达式为

$$\{X_{\text{WI}}^m\}_{P \times Q} = \text{Embed}(\{C^m\}_{P \times Q}), \quad (5)$$

$$|R_{\text{PSN}, \text{WI}}|^m = \text{PSNR}(\{C^m\}_{P \times Q}, \{X_{\text{WI}}^m\}_{P \times Q}), \quad (6)$$

式中: $\text{Embed}(\cdot)$ 表示以相同的嵌入系数嵌入水印信息的操作; $\text{PSNR}(\cdot)$ 表示计算嵌入水印信息后的图像与原始图像之间峰值信噪比的函数; R_{PSN} 定义为

$$R_{\text{PSN}} = 10 \lg \left(\frac{255^2}{E_{\text{MS}}} \right), \quad (7)$$

式中: E_{MS} 表示均方误差, 计算公式为

$$E_{\text{MS}} = \sum_{i=0}^{M_c-1} \sum_{j=0}^{N_c-1} [I_A(i, j) - I_B(i, j)]^2 / MN, \quad (8)$$

式中: M_c 和 N_c 表示子图像的尺寸; I_A 和 I_B 分别表示原始图像和嵌入水印图像的像素值; i 和 j 分别表示图像的第 i 行和第 j 列。

3) 通过不同类型的攻击可以独立地破坏嵌入子块 $\{X_{W1}^m\}$, 将攻击后的子块记录为 $\{X_{\text{attack},n}^m\}$, 其中 n 为攻击类型的种类。利用水印提取算法在 $\{X_{\text{attack},n}^m\}$ 中提取水印信息, 计算每个子块中 n 种攻击类型下提取水印信息的归一化相关系数的均值, 得到每个子块的归一化相关系数 $|X_{\text{NC}}|^m$ 。 n 的数量多少以及具体选取的攻击类型会对宿主图像中隐藏区域的选取造成一定的影响, 当 $n \geq 3$ 时, n 的数量对于最终结果的影响较小。另外, 通过尽可能多地在不同大类(移除攻击和几何攻击)中选择更多数量的攻击方式, 可以在一定程度上降低攻击类型的选取对水印隐藏区域确定的影响。上述过程可以表示为

$$\{X_{\text{attack},n}^m\} = \text{Attack}(\{X_{W1}^m\}_{P \times Q}), \quad (9)$$

$$\{W^m\}_{P \times Q} = \text{Extract}(\{X_{\text{attack},n}^m\}), \quad (10)$$

$$|X_{\text{NC}}|^m = \text{NC}(\{W^m\}_{P \times Q}), \quad (11)$$

式中: $\{W^m\}_{P \times Q}$ 表示从被攻击的子块 $\{X_{\text{attack},n}^m\}$ 中提取出的水印信息; $\text{Attack}(\cdot)$ 表示利用不同类型的攻击方式攻击嵌入水印的子块 $\{X_{W1}^m\}_{P \times Q}$ 的操作; $\text{Extract}(\cdot)$ 表示从被攻击的子块 $\{X_{\text{attack},n}^m\}$ 中提取水印信息的操作; $\text{NC}(\cdot)$ 表示计算提取水印信息与原始水印信息之间归一化相关系数的函数; X_{NC} 定义为

$$X_{\text{NC}} = \frac{\sum_{i=0}^{M_c-1} \sum_{j=0}^{N_c-1} W_o(i, j) W_p(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{M_c-1} \sum_{j=0}^{N_c-1} W_o^2(i, j)} \sqrt{\sum_{i=0}^{M_c-1} \sum_{j=0}^{N_c-1} W_p^2(i, j)}}, \quad (12)$$

式中: W_o 和 W_p 分别表示原始水印信息和提取水印信息。

4) 利用 PN 函数计算每一个子块对应的 X_{PN} 值, 按照 X_{PN} 值的大小顺序排列子块, 可得到 $\{X_{\text{sequence}}^m\}$ 。 X_{PN} 可表示为

$$|X_{\text{PN}}|^m = \mu \times \frac{|R_{\text{PSN}, W1}|^m}{R_{\text{PSN}, \max}} + \delta \times |X_{\text{NC}}|^m, \quad (13)$$

$$\{X_{\text{sequence}}^m\}_{P \times Q} = \text{sort}(|X_{\text{PN}}|^m), \quad (14)$$

式中: $\text{sort}(\cdot)$ 表示按照 PN 函数值的大小顺序将各子块降序排列的操作。 μ 值越大, 则函数 $|X_{\text{PN}}|^m$ 会向不可见性更优的方向趋近。 δ 值更大, 则函数 $|X_{\text{PN}}|^m$ 会向鲁棒性更优的方向趋近。通过调控影响因子 μ 和 δ , 可以使函数 $|X_{\text{PN}}|^m$ 更趋近于不可见性或是鲁棒性。

通过 PN 函数计算出的 X_{PN} 值更大的子块具备更理想的不可见性和鲁棒性, 因此更适合隐藏信

息, X_{PN} 值较小的子块则存在被攻击后无法提取出水印信息的风险, 因此不适合隐藏信息。将多重水印信息依次嵌入到 X_{PN} 值较大的区域, 嵌入原理如图 2 所示。通过 PN 函数确定了分割的宿主图像中 X_{PN} 值由大到小的顺序, 然后将待隐藏的多重信息依次嵌入。

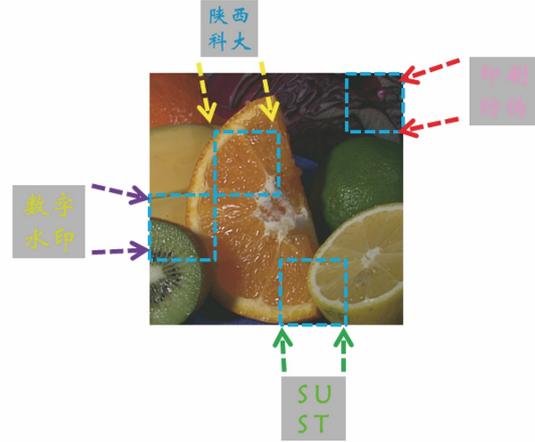


图 2 基于 PN 函数的水印嵌入方法

Fig. 2 Watermark embedding method based on PN function

3.2 水印嵌入与提取

在确定好多重水印的嵌入位置后, 对其中 PN 函数值较大的子块进行两级 UDTCWT 和 SVD 处理, 将待隐藏的水印信息 $\{\tau w'_t\}$ 分别嵌入到每个子块的奇异值中, 其中 t 为嵌入水印的数量。

3.2.1 多重水印的嵌入算法

水印算法的嵌入流程如图 3 所示。根据图 3 中的水印嵌入流程可知, 主要的水印嵌入步骤如下。

1) 将大小为 $M \times N$ 的宿主图像 F (水果图) 分成 $P \times Q$ 大小的不重叠子块, 利用 3.1 节中的方法求解所有子块的 PN 函数值。将这些非重叠子块按照各自 PN 函数值进行降序排列可以得到 $\{X_{\text{sequence}}^\tau\}$, 同时这些子块的对应位置被记录下来, 作为 key1 并用于后续的水印提取, 其中 τ 表示宿主图像 F 中子块的数量。该过程的表达式为

$$\{F^\tau\}_{P \times Q} = \text{Block}(F_{M \times N}), \quad (15)$$

$$|X_{\text{PN}}|^\tau = \text{PN}(\{F^\tau\}_{P \times Q}), \quad (16)$$

$$\{X_{\text{sequence}}^\tau\}_{P \times Q} = \text{sort}(|X_{\text{PN}}|^\tau). \quad (17)$$

2) 对 $\{X_{\text{sequence}}^\tau\}$ 中的子块进行两级 UDTCWT 处理, 可以计算得到每个子带的标准差, 按照标准差的大小将子带降序排列, 并对每个子块中标准差最大的子带进行 SVD 处理, 可以得到正交矩阵 $\{U^\tau\}$ 、 $\{V^\tau\}$ 和奇异值 $\{S^\tau\}$, 表达式为

$$[U^\tau, S^\tau, V^\tau] = \text{UDTCWT-SVD}(\{X_{\text{sequence}}^\tau\}). \quad (18)$$

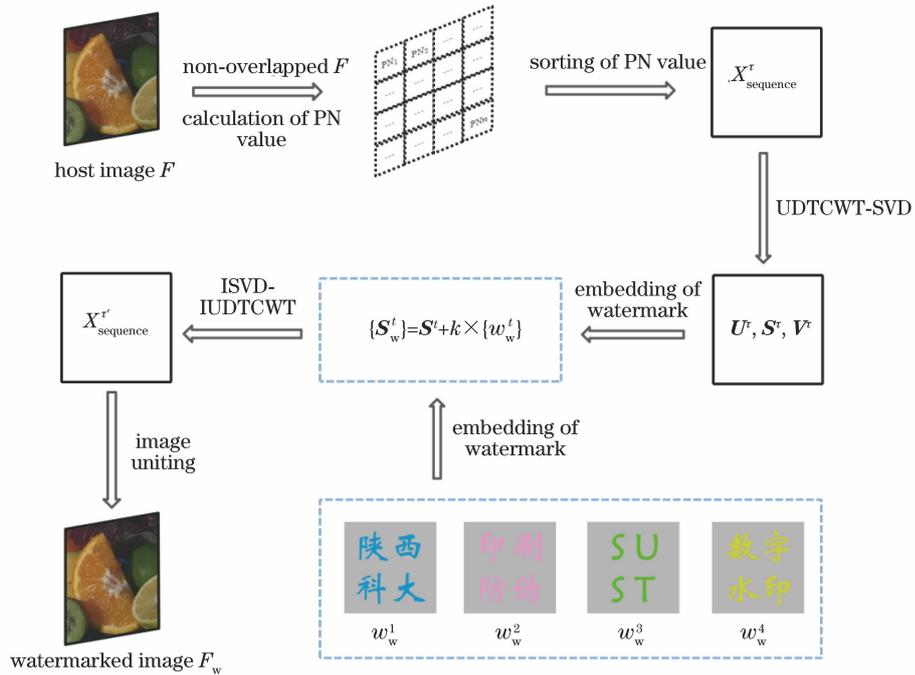


图 3 水印嵌入算法的处理流程

Fig. 3 Processing flow of watermark embedding algorithm

3) 将图 3 中待隐藏的二维信息 $\{w_w^{\tau'}\}_{P \times Q}$ 根据水印加性公式 $S_w^{\tau'} = S^{\tau'} + k \times \{w_w^{\tau'}\}$ (k 代表嵌入强度因子) 嵌入到宿主图像的奇异值 $\{S^{\tau'}\}$ 中。 $\{U^{\tau'}\}$, $\{V^{\tau'}\}$ 被作为密钥 key2 保存下来并用作提取水印。该过程可表示为

$$\{S_w^{\tau'}\}_{P \times Q} = \{S^{\tau'}\}_{P \times Q} + k \times \{w_w^{\tau'}\}_{P \times Q} \quad (19)$$

4) 通过逆奇异值分解 (ISVD) 和逆非抽样双树复小波变换 (IUDTCWT) 得到嵌入水印的各个子块 $\{X_{sequence}^{\tau'}\}$ (其中 τ' 表示嵌入水印的子块的数量), 表达式为

$$\{X_{sequence}^{\tau'}\}_{P \times Q} = \text{ISVD-IUDTCWT}(\{S_w^{\tau'}\}_{P \times Q}) \quad (20)$$

5) 将这些嵌入水印的子块 $\{X_{sequence}^{\tau'}\}$ 与未嵌入水印的子块进行合并, 可以得到含水图像 F_w , 这能将多层隐藏信息嵌入到宿主图像中。

3.2.2 多重水印提取算法

水印算法的提取流程如图 4 所示。根据图 4 中的水印提取流程可知, 主要的水印提取步骤如下。

1) 将图 4 中的含水图像 F_w 分成 $P \times Q$ 大小的子块 $\{F_w^m\}$, 根据水印嵌入算法中的 key1 锁定含水子块的位置, 这些含有水印的子块被定义为 $\{X_{sequence, w}^{\tau'}\}$, 表达式为

$$\{F_w^m\}_{P \times Q} = \text{Block}(\{F_w\}_{M \times N}) \quad (21)$$

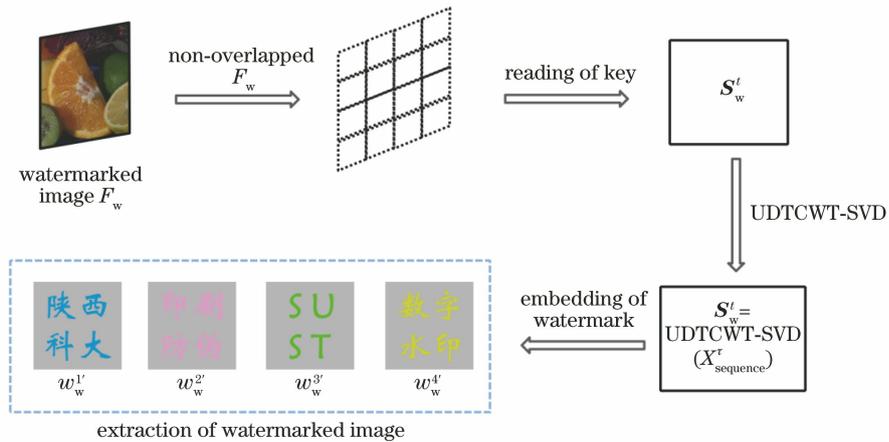


图 4 水印提取算法的处理流程

Fig. 4 Processing flow of watermark extraction algorithm

2) 将子块 $\{X_{\text{sequence},w}^t\}$ 进行两级 UDTCWT 处理,对得到的每个子带的标准差进行计算,并对每个子块中标准差最大的子带进行 SVD 处理,可以得到奇异值 $\{S_w^t\}$,表达式为

$$\{S_w^t\} = \text{UDTCWT-SVD}(\{X_{\text{sequence},w}^t\}_{P \times Q}). \quad (22)$$

3) 读取密钥 key_2 ,根据水印加性公式和嵌入强度因子 k 从含水印图像的奇异值 $\{S_w^t\}$ 中提取出水印信息 $\{\tau_w^t\}$,表达式为

$$\{\tau_w^t\} = (\{S_w^t\} - \{S^t\})/k. \quad (23)$$

4 实验结果与分析

为了检验提出算法的有效性,通过实验从不可见性、鲁棒性方面分别考察该算法的具体效果。实验中使用了一台运行 Windows10 的计算机,系统处理器为 Intel-i5-7300, 2.50GHz CPU 的处理器,内存为 8 G,实验平台为 R2018b 版本的 MATLAB。

本次实验以图像处理标准数据库中 1024 pixel \times 1024 pixel 大小的彩色 Lena、彩绘、巨石阵和水果图作为宿主图像,如图 5 所示。选择 256 pixel \times 256 pixel 大小的带有“陕西科大”“印刷防伪”“SUST”“数字水印”字样的图像[图 6(a)~6(d)],以及带有土星、狗、

公园大道和孔雀[图 6(e)~6(h)]复杂图像作为两组多重水印图像。本次实验利用峰值信噪比和归一化相关系数分别衡量水印模型的不可见性和鲁棒性,一般情况下,当 R_{PSN} 大于 30 dB 时,人眼无法清晰地识别出两幅图像之间的差异。如果含水印图像与原始宿主图像之间的 R_{PSN} 值越大,那么它们之间的相似程度越高,即水印算法的不可见性越好^[32]。如果提取的水印与原始水印之间的 X_{NC} 值更接近 1,那么算法的鲁棒性更高^[33]。 R_{PSN} 和 X_{NC} 定义分别如(7)式和(12)式所示^[34-35]。多水印嵌入和信息嵌入的过程中,关键参数主要包括影响因子 μ 和 δ 以及嵌入强度系数 k 。水印模型的不可见性和鲁棒性会受嵌入强度系数 k 的影响,随着嵌入强度系数 k 的增大,水印模型的鲁棒性会提高,但不可见性会降低。反之,嵌入强度系数 k 的减小会使水印模型的鲁棒性降低,不可见性增强。4 幅宿主图像的嵌入强度系数 k 分别选定为 0.30、0.45、0.50 和 0.35,影响因子 μ 和 δ 选定为 0.49 和 0.51,PN 函数值测序过程中所用的攻击方式分别为 0.01 强度的高斯噪声、5° 的图像旋转和 3 \times 3 大小的均值滤波,测序过程中所用的水印图像为“陕西科大”字样的图像[图 6(a)],4 幅宿主图像的 PN 函数值如图 7 所示。

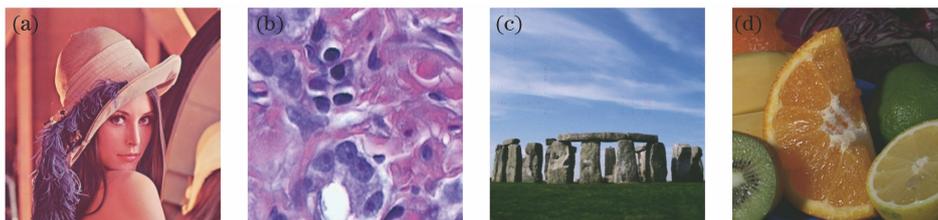


图 5 4 幅宿主图像。(a) Lena; (b) 彩绘; (c) 巨石阵; (d) 水果

Fig. 5 Four host images. (a) Lena; (b) color painting; (c) stonehenge; (d) fruit

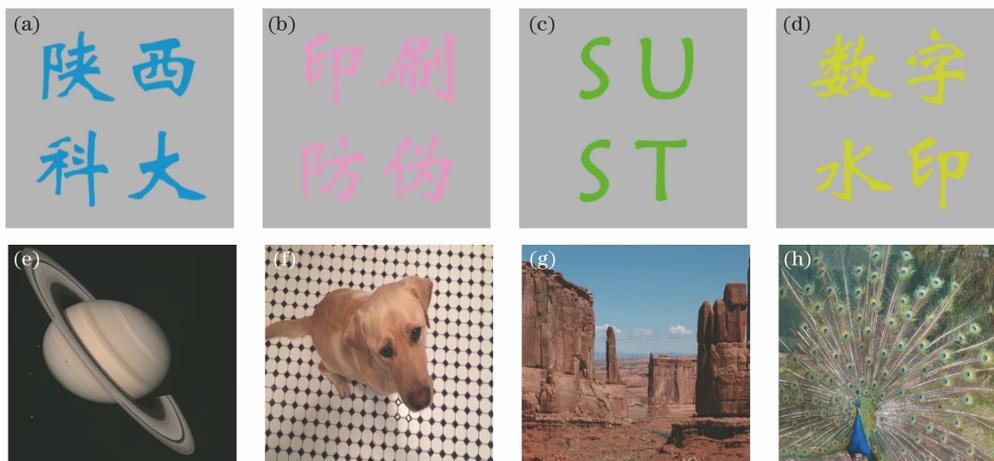


图 6 8 幅水印图像

Fig. 6 Eight watermark images



图 7 宿主图像的 X_{PN} 值

Fig. 7 X_{PN} values of host images

如图 7 所示:宿主图像的 X_{PN} 值在 0.8835 ~ 0.9994 之间随机分布; X_{PN} 值较大的区域抵抗攻击的能力较强,不可见性也满足要求; X_{PN} 值较小的区域不可见性较差,水印信息的清晰度和完整度也较差,不适合在这些区域隐藏信息。综上所述,后续将 4 幅水印图像嵌入到 X_{PN} 值最高的 4 个区域中进行不可见性和鲁棒性的分析。

4.1 不可见性分析

基于 X_{PN} 值的测序结果,将 4 幅水印图像 [图 6(a)~6(d)] 分别嵌入到宿主图像 [图 5(a)~

5(d)] 中 X_{PN} 值最高的 4 个区域,通过峰值信噪比来对比嵌入水印图像 (图 8) 与原始宿主图像 (图 5) 之间的差异以说明水印的不可见性。嵌入水印图像及其对应的 R_{PSN} 值如图 8 所示。从图 8 可以看到, R_{PSN} 值都在 63 dB 以上,故人眼不能够分辨嵌入水印图像与宿主图像之间的差异,说明提出的数字水印算法具备良好的不可见性,这是由于将多个二维信息分散嵌入到了宿主图像中的最佳位置,因此对水印不可见性的影响较小。

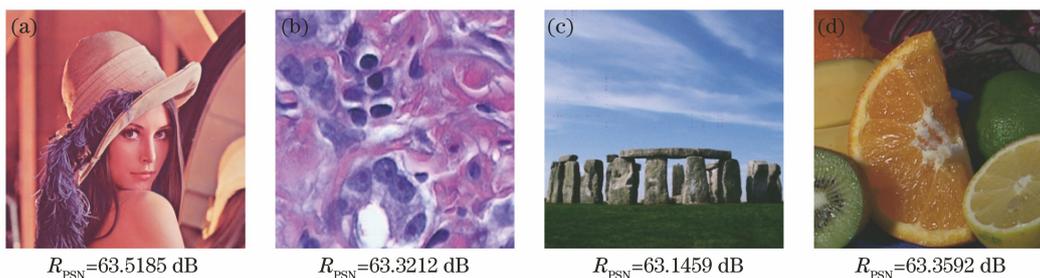


图 8 嵌入水印图像。(a) Lena; (b) 彩绘; (c) 巨石阵; (d) 水果

Fig. 8 Watermarked image. (a) Lena; (b) color painting; (c) stonehenge; (d) fruit

4.2 鲁棒性分析

为了更好地评估多重水印算法,通过多重水印信息和原始水印信息之间的 X_{NC} 值来测试该模型的鲁棒性。基于 4.1 节的实验结果,通过 3.2.2 节中的提取算法从嵌入水印图像 (图 8) 中提取水印图像,计算水印信息的 X_{NC} 值。如图 9(a) 所示,水印图像的 X_{NC} 值均大于 0.999,接近于 1,说明在没有攻击的情况下,水印算法的鲁棒性良好。在此基础上,为了进一步考察算法在图像处理攻击下的鲁棒性,需要对算法进行不同类型的攻击,以便验证水印算法的抵抗攻击能力。

对嵌入水印图像 (图 8) 进行不同类型的攻击,在被攻击图像中提取多重水印,分析图像滤波、添加噪声、JPEG 压缩、图像旋转、图像裁切、对比增强和直方图均衡对多水印算法鲁棒性的影响,实验结果

如图 9 所示,攻击后视觉观察典型的实际效果如图 10 所示。

图 9(b) 和图 9(c) 表示不同类型的滤波攻击 (均值滤波和中值滤波) 对水印算法鲁棒性的影响。从图 9(b) 和图 9(c) 可以看到,在均值滤波和中值滤波的攻击下,水印图像的 X_{NC} 值均在 0.99 以上,这满足水印模型鲁棒性的要求。从视觉观察也可以看出,在 7×7 大小的滤波攻击下,提取的多个水印图像清晰可见,说明该模型具有良好的抗滤波攻击性能,如图 10(a) 和图 10(b) 所示。图 9(d) 和图 9(e) 表示高斯噪声和椒盐噪声两种噪声攻击对该算法的影响。从图 9(d) 和图 9(e) 可以看到,随着噪声强度的提升,图像的 X_{NC} 值有轻微下降,在 0.2 较高强度的噪声攻击下,水印图像的 X_{NC} 值依然在 0.97 以上。由图 10(c) 和图 10(d) 可以观察到,在 0.2 强

度的噪声攻击下,提取的水印图像清晰可见,证明该模型有一定的抗噪声攻击能力。从图 9(f)可以看出,在不同强度(30%、40%、50%、60%和 70%)的 JPEG 压缩攻击下,水印图像的 X_{NC} 值能够达到 0.98 以上,从图 10(e)也能看出,提取的图像视觉质量好且清晰可见,说明该模型具有优秀的抗 JPEG 压缩攻击能力。图 9(g)表示在不同旋转角度(5°、10°、15°和 20°)攻击下,水印图像的 X_{NC} 值均在 0.97 以上,说明该水印算法具有一定的抗旋转性能。从图 10(f)也能看出,提取的图像视觉质量较好,说明该模型具有一定的抗旋转攻击能力,这是由于将水印图像的奇异值嵌入到了宿主图像中,而奇异值可以较为稳定地存在宿主图像中而不被破坏。图 9(h)说明了在不同位置(左上角、中间和中心)的

裁切攻击下,水印图像的 X_{NC} 值均在 0.94 以上,表明该水印算法能够抵抗小幅度的裁切攻击。从图 10(g)、图 10(h)和图 10(i)也能看出,提取的图像视觉质量较好,说明该模型具有良好的抗小幅度裁剪攻击能力。图 9(i)表示对比增强和直方图均衡攻击对该算法的影响,在这两种攻击下水印图像的 X_{NC} 值分别在 0.92 和 0.97 以上。由图 10(j)和图 10(k)也可以观察到,在这两种攻击下,提取的水印图像清晰可见,证明该模型有一定的抵抗直方图均衡和对比增强攻击的能力。综上所述,根据上述实际测试结果和具体的观察效果,说明本文提出的多水印算法在抵抗常见的图像处理攻击和几何攻击时表现良好。

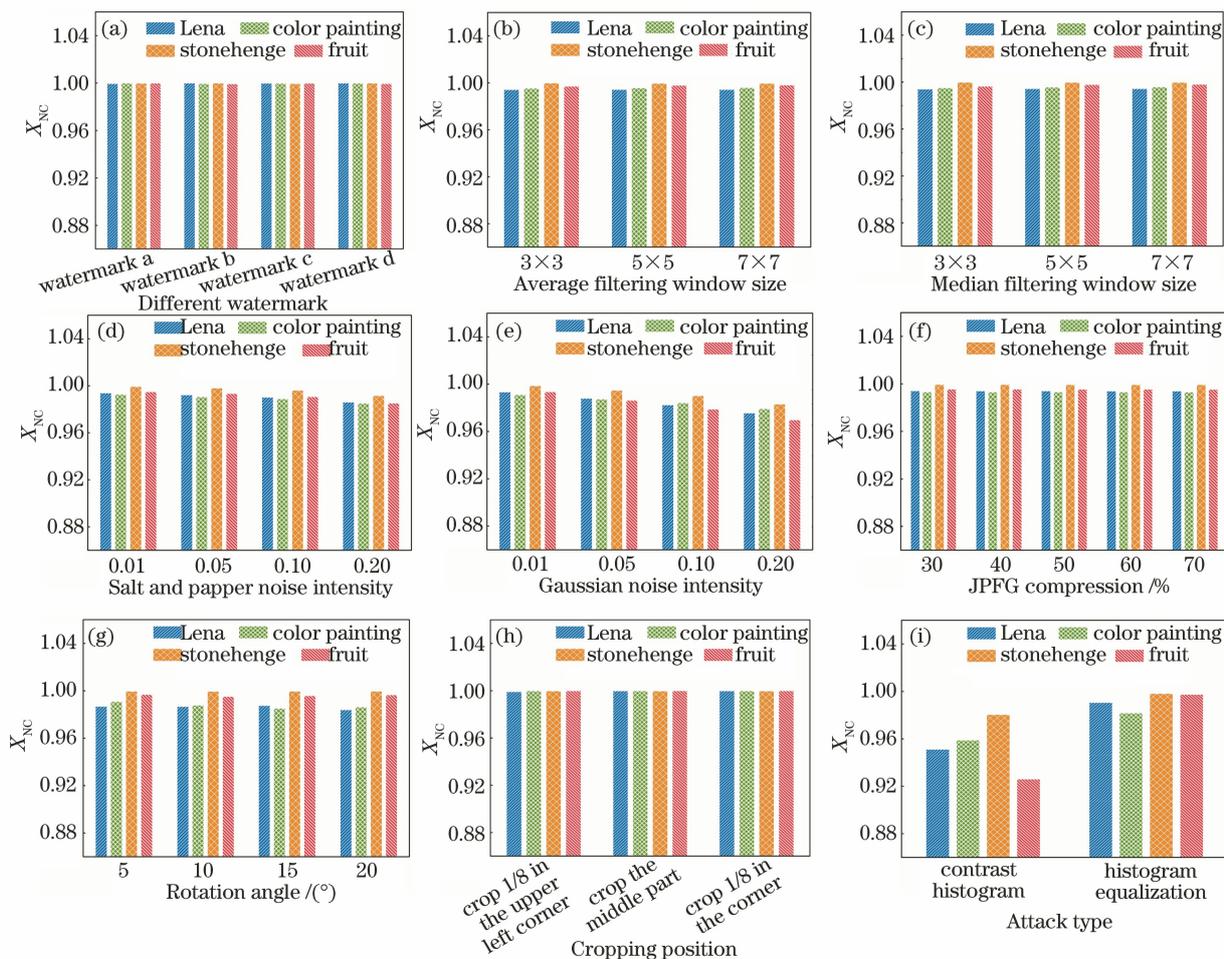


图 9 攻击图像中提取水印图像的 X_{NC} 值。(a)无攻击;(b)均值滤波;(c)中值滤波;(d)椒盐噪声;
(e)高斯噪声;(f) JPEG 压缩;(g)图像旋转;(h)裁切攻击;(i)对比增强和直方图均衡

Fig. 9 X_{NC} value of watermark image extracted from attack image. (a) No attack; (b) mean filtering; (c) median filtering; (d) salt and pepper noise; (e) Gaussian noise; (f) JPEG compression; (g) image rotation; (h) cropping attack; (i) contrast enhancement and histogram equalization

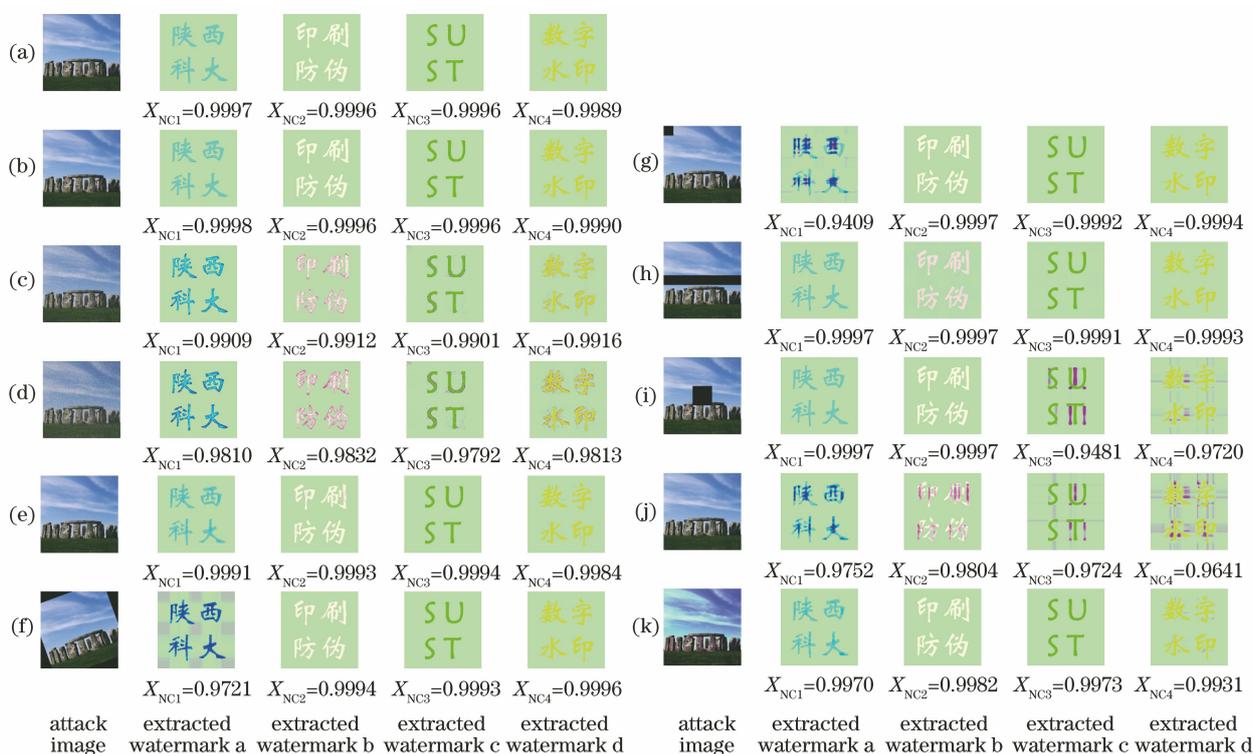


图 10 攻击图像及从中提取的水印和对应的 X_{NC} 值。(a) 7×7 大小的平均滤波;(b) 7×7 大小的中值滤波;(c) 0.2 的椒盐噪声;(d) 0.2 的高斯噪声;(e) JPEG 压缩;(f) 旋转 20° ;(g) 左上角裁掉 1/8;(h) 裁掉中间部分;(i) 中心裁掉 1/8;(j) 对比增强;(k) 直方图均衡化

Fig. 10 Attack image, watermark extracted from it and corresponding X_{NC} value. (a) Average filtering of 7×7 ; (b) median filtering of 7×7 ; (c) salt and pepper noise of 0.2; (d) Gaussian noise of 0.2; (e) JPEG compression; (f) rotation 20° ; (g) crop 1/8 in upper left corner; (h) crop middle part; (i) crop 1/8 in center; (j) contrast enhancement; (k) histogram equalization

4.3 复杂水印图像的嵌入与提取

为了较为全面地说明提出算法的鲁棒性和实际应用价值,使用更加复杂的真实图像作为多重水印并嵌入到宿主图像 Lena[图 5(a)]中,对嵌入图像实施滤波、噪声、JPEG 压缩、旋转、裁切、对比增强和直方图均衡等不同类型的攻击,并使用水印提取算法在被攻击图像中提取多重水印,实验结果及攻击后视觉观察典型的实际效果如图 11 所示。图 11(a)和图 11(b)表示在 7×7 大小的滤波攻击下, X_{NC} 值均在 0.98 以上,提取的多个水印图像仍然清晰可见,表明提出算法具备良好的抗滤波攻击性能。图 11(c)和图 11(d)表示在 0.05 强度的椒盐噪声和噪声攻击下,水印图像的 X_{NC} 值均在 0.98 以上,图像质量较好,易被识别,证明该算法对于噪声攻击有良好的抵抗能力。图 11(e)表示在 70% 的 JPEG 压缩攻击下,水印图像的 X_{NC} 值均已达到 0.98,复原图像清晰可见,表明提出算法具有良好的

抗 JPEG 压缩攻击能力。图 11(f)表示在 10° 的旋转攻击下,水印图像的 X_{NC} 值在 0.98 以上,且在视觉上易被识别,证明该算法具备一定的抗小幅度旋转攻击能力。图 11(g)、图 11(h)和图 11(i)表示在小幅度的裁切攻击(左上角裁切、中间裁切和中心裁切)下,水印图像的 X_{NC} 值均高于 0.90,且图像较为清晰,易被识别,说明该算法在面对小幅度的裁切攻击时具备一定的抵抗能力。图 11(j)和图 11(k)表示在对比度增强和直方图均衡的攻击下,水印图像的 X_{NC} 值均在 0.98 以上,证明该算法具有良好的抵抗对比增强和直方图均衡攻击的能力。综上所述,将复杂、真实的图像作为水印信息嵌入到宿主图像的感兴趣区域中,通过滤波、噪声、JPEG 压缩、旋转、裁切、对比度增强和直方图均衡的方式破坏含水印图像,在破坏图像中提取的多重水印图像均较为清晰,易于识别,表明提出的算法具有一定的实际应用价值。

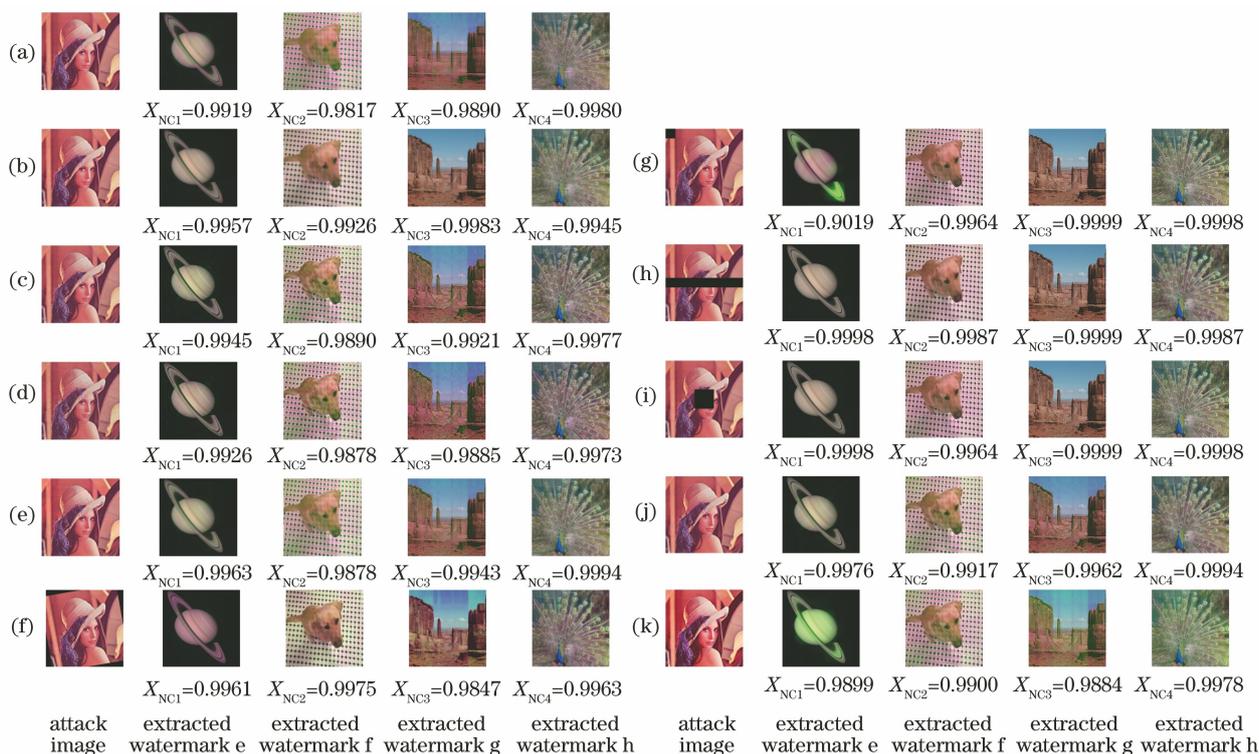


图 11 攻击图像及从中提取的复杂水印和对应的 X_{NC} 值。(a) 7×7 大小的平均滤波;(b) 7×7 大小的中值滤波;(c) 0.2 的椒盐噪声;(d) 0.2 的高斯噪声;(e) JPEG 压缩;(f) 旋转 20° ;(g) 左上角裁掉 1/8;(h) 裁掉中间部分;(i) 中心裁掉 1/8;(j) 对比增强;(k) 直方图均衡化

Fig. 11 Attack image, complicated watermark extracted from it and corresponding X_{NC} value. (a) Average filtering of 7×7 ; (b) median filtering of 7×7 ; (c) salt and pepper noise of 0.2; (d) Gaussian noise of 0.2; (e) JPEG compression; (f) rotation 20° ; (g) crop 1/8 in upper left corner; (h) crop middle part; (i) crop 1/8 in center; (j) contrast enhancement; (k) histogram equalization

4.4 对比实验

为了较为全面地说明提出算法的优越性,将提出的 PN 函数优化嵌入的多水印算法与随机子块嵌入的单水印、PN 函数优化嵌入的单水印和随机子块嵌入的多水印算法进行对比。在相同的变换域 (UDTCWT 域) 中设计了三种(随机嵌入的单水印、PN 函数优化嵌入的单水印和随机嵌入的多水印)水印嵌入方式。其中,随机嵌入的单水印算法是将 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 大小的水印信息[图 6(a)]嵌入到宿主图像[图 5(a)]中的随机位置。PN 函数优化嵌入的单水印算法是将 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 大小的待隐藏信息[图 6(a)]嵌入到宿主图像[图 5(a)]中 PN 值最大的区域。随机嵌入的多水印算法是将水印信息[图 6(a)~6(d)]随机地嵌入到宿主图像[图 5(a)]中的任何非重叠区域。通过不同类型的攻击来破坏各个嵌入水印图像并进行水印的提取,4 种不同嵌入方式的 X_{NC} 值如图 12 所示,两种多水印算法(随机嵌入和 PN 函数优化嵌入)的最终 X_{NC} 值取 4 个提取水印 X_{NC} 值中的最

大值。

从图 12 可以看出:在滤波攻击(均值滤波和中值滤波)方面,4 种嵌入方式的 X_{NC} 值仅仅相差 0.0005,可以说明 4 种水印算法在抗滤波攻击方面均表现良好;在噪声攻击(椒盐噪声和高斯噪声)方面,在 0.2 强度的椒盐噪声攻击下,提出算法的 X_{NC} 值仍然高达 0.9861,而另外三种水印算法的 X_{NC} 值仅有 0.9121、0.9670 和 0.9472;在 0.2 强度的高斯噪声攻击下,提出算法的 X_{NC} 值达到了 0.9757,其他三种水印算法的 X_{NC} 值为 0.9037、0.9644 和 0.9255,说明所提算法在抵抗噪声攻击方面较优于其他三种算法;在 70% 比例的 JPEG 压缩攻击下,提出算法的 X_{NC} 值达到了 0.9940,而其他三种水印算法的 X_{NC} 值为 0.9566、0.9887 和 0.9596,说明提出算法的抗压能力较强于其他三种算法;在旋转攻击方面,通过 20° 的旋转攻击来破坏嵌入图像,提出算法的 X_{NC} 值达到 0.9840,而其他三种水印算法的 X_{NC} 值仅有 0.9328、0.9566 和 0.9341,说明提出算法抵抗旋转攻击的能力较优于其他三种算法;在

对比度增强和直方图均衡攻击下,提出算法的 X_{NC} 值达到了 0.9512 和 0.9933,其他三种算法的 X_{NC} 值为 0.8829 和 0.9566、0.9413 和 0.9887、0.9266 和 0.9800,说明提出算法在直方图均衡和对比度增强攻击下表现出的鲁棒性较优于其他三种算法。

综上所述,本文提出的算法在鲁棒性方面较优于其他三种水印算法,这是由于单水印算法的嵌入数据量相对较少,且输入与输出相对单一,在有意攻

击或无意攻击下易遭到破坏,而多水印算法的多输出赋予了水印更强的鲁棒性。另外,随机嵌入的方法使得嵌入水印的区域有可能并不适合于信息隐藏,这导致了水印的不可见性和鲁棒性会在一定程度上降低,而 PN 函数的区域优化方法筛选出适合隐藏信息的区域,赋予了各个水印的强抵抗能力。总之,提出算法在图像处理攻击方面和部分几何攻击方面抵抗能力较强。

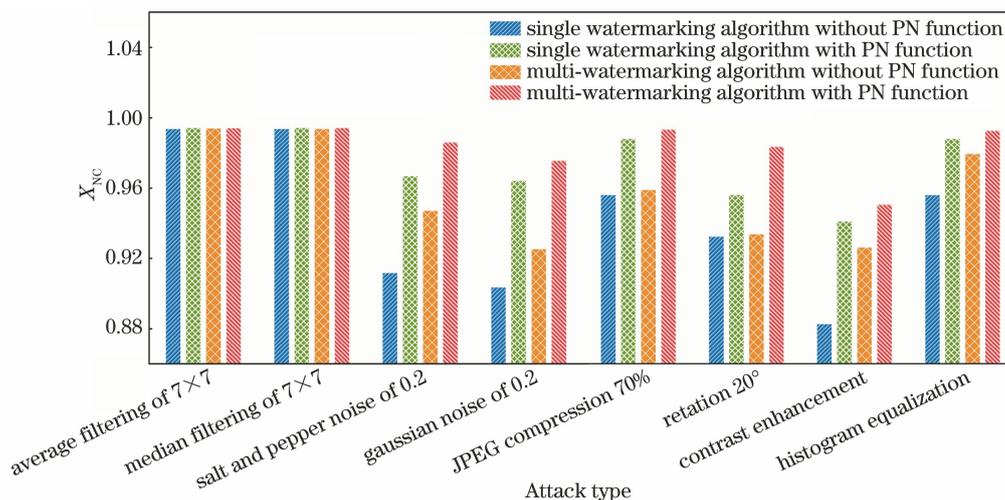


图 12 4 种不同嵌入方式的 X_{NC} 值

Fig. 12 X_{NC} values of four different embedding methods

5 结 论

本文提出了一种基于 PN 函数优化和非抽样双树复小波变换的自适应多水印算法。首先,通过综合考虑水印的不可见性和鲁棒性,应用 PN 函数锁定了宿主图像中适合隐藏信息的感兴趣区域,在满足水印不可见性的同时尽可能地提升水印的鲁棒性。其次,利用 UDFCWT-SVD 将多个独立的水印信息嵌入到彩色宿主图像中的感兴趣区域,这在一定程度上提高了水印的嵌入容量。最后,根据嵌入过程的逆过程提取多重水印,实现了多水印信息的有效嵌入和提取。通过对多组图像进行水印嵌入,计算得出含水印图像的峰值信噪比均在 63 dB 以上。对含水印图像进行滤波、噪声、JPEG 压缩、旋转、裁切、对比增强和直方图均衡等攻击实验,计算得出提取水印与原始水印的归一化相关系数均在 0.90 以上。另外,通过与其他三种嵌入方式(随机子块嵌入的单水印、PN 函数优化嵌入的单水印和随机子块嵌入的多水印算法)进行对比。实验结果表明,嵌入水印图像具备良好的不可见性,并对滤波攻击、噪声攻击、压缩攻击、旋转攻击、裁切攻击、对

比增强和直方图均衡,特别是在抵抗 JPEG 压缩、噪声攻击和滤波攻击方面表现出较强的鲁棒性,说明所提算法是一种有效的多重水印算法。

参 考 文 献

- [1] Wu D Y, Zhao J, Wang G P, et al. An image zero watermarking technology based on ameliorated singular value and subblock mapping[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2010002.
吴德阳, 赵静, 汪国平, 等. 一种基于改进奇异值和子块映射的图像零水印技术[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2010002.
- [2] Liu Y, Yang X, Zhu T G. Robust watermarking algorithm based on structured forests edge and SIFT [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0615006.
刘颖, 杨星, 朱婷鸽. 基于结构森林边缘和 SIFT 的鲁棒水印算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0615006.
- [3] Liu Y N, Zhang S S, Yang J. Color image watermark decoder by modeling quaternion polar harmonic transform with BKF distribution[J]. Signal Processing: Image Communication, 2020, 88: 115946.

- [4] Liu Z, Bai T T, Lu P. Encrypted holographic watermarking technology with decrypted image superposed no noise [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0209002.
刘真, 白韬韬, 卢鹏. 一种解密图像无背景噪声的加密全息数字水印技术 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0209002.
- [5] Mao J F, Huang Y H, Niu X X, et al. Research on watermarking payload of the spatial images based on MPUI model [J]. *Journal of Shandong University (Natural Science)*, 2016, 51(9): 68-75, 83.
毛家发, 黄艳红, 钮心忻, 等. 基于 MPUI 模型的空域图像水印容量研究 [J]. *山东大学学报(理学版)*, 2016, 51(9): 68-75, 83.
- [6] Makbol N M, Khoo B E. A new robust and secure digital image watermarking scheme based on the integer wavelet transform and singular value decomposition [J]. *Digital Signal Processing*, 2014, 33: 134-147.
- [7] Su Q T, Chen B J. Robust color image watermarking technique in the spatial domain [J]. *Soft Computing*, 2018, 22(1): 91-106.
- [8] Kundurz D, Hatzinakos D. Toward robust logo watermarking using multiresolution image fusion principles [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2004, 6(1): 185-198.
- [9] Yuan Z H, Liu D C, Zhang X T, et al. DCT-based color digital image blind watermarking method with variable steps [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79(41/42): 30557-30581.
- [10] Khare P, Srivastava V K. A reliable and secure image watermarking algorithm using homomorphic transform in DWT domain [J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2021, 32(1): 131-160.
- [11] Cedillo-Hernandez M, Garcia-Ugalde F, Nakano-Miyatake M, et al. Robust watermarking method in DFT domain for effective management of medical imaging [J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2015, 9(5): 1163-1178.
- [12] Mangaiyarkarasi P, Arulselvi S. Robust and blind color image watermarking technique based on redundant discrete wavelet transform [J]. *Journal of Wavelet Theory & Applications*, 2013, 7(1/2): 1-17.
- [13] Biradar D T. Robust reversible watermarking using integer wavelet transform and histogram shifting [J]. *International Journal of Engineering Research & Applications*, 2014, 4(2): 63-68.
- [14] Wang S Q, Meng X F, Yin Y K, et al. Optical image watermarking based on singular value decomposition ghost imaging and lifting wavelet transform [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 114: 76-82.
- [15] Mohammad A A, Alhaj A, Shaltaf S. An improved SVD-based watermarking scheme for protecting rightful ownership [J]. *Signal Processing*, 2008, 88(9): 2158-2180.
- [16] Bhatnagar G, Raman B. A new robust reference watermarking scheme based on DWT-SVD [J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2009, 31(5): 1002-1013.
- [17] Sudha M S, Thanuja T C. A robust image watermarking technique using DTCWT and PCA [J]. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, 12(19): 8252-8256.
- [18] Niu P P, Shen X, Wei T T, et al. Blind image watermark decoder in UDTTCWT domain using Weibull mixtures-based vector HMT [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 46624-46641.
- [19] Bhatnagar G, Raman B, Swaminathan K. Dual watermarking scheme for copyright protection and authentication [J]. *Journal of Digital Information Management*, 2009, 7(1): 2-8.
- [20] Song C L, Sudirman S, Merabti M. A robust region-adaptive dual image watermarking technique [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2012, 23(3): 549-568.
- [21] Bhatnagar G, Wu Q M J. A new robust and efficient multiple watermarking scheme [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2015, 74(19): 8421-8444.
- [22] Singh A K, Dave M, Mohan A. Multilevel encrypted text watermarking on medical images using spread-spectrum in DWT domain [J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 83(3): 2133-2150.
- [23] Jayanthi S K, Sridevi K. Dual domain and high capacity image watermarking using additive approach [C] // 2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering, April 26-28, 2014, Sapporo, Japan. New York: IEEE Press, 2014: 1946-1950.
- [24] Nguyen T H, Duong D M, Duong D A. Robust and high capacity watermarking for image based on DWT-SVD [C] // The 2015 IEEE RIVF International Conference on Computing & Communication Technologies - Research, Innovation, and Vision for Future (RIVF), January 25-28, 2015, Can Tho, Vietnam. New York: IEEE Press, 2015: 83-88.
- [25] Roy S, Pal A K. A blind DCT based color watermarking algorithm for embedding multiple watermarks [J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2017, 72: 149-

- 161.
- [26] Song C L, Peng X, Sudirman S, et al. Region adaptive digital image watermarking system using DWT-SVD algorithm [C] // 2014 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS), July 14-17, 2014, Leicester, UK. New York: IEEE Press, 2014: 196-201.
- [27] Song C L, Sudirman S, Merabti M. Robust digital image watermarking using region adaptive embedding technique[C]//2010 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing, December 10-12, 2010, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2010: 378-382.
- [28] Shen Y X, Tang C, Xu M, et al. A DWT-SVD based adaptive color multi-watermarking scheme for copyright protection using AMEF and PSO-GWO [J]. Expert Systems with Applications, 2021, 168: 114414.
- [29] Nikolaidis A, Pitas I. Region-based image watermarking [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(11): 1726-1740.
- [30] Hill P, Achim A, Bull D. The undecimated dual tree complex wavelet transform and its application to bivariate image denoising using a Cauchy model[C]// 2012 19th IEEE International Conference on Image Processing, September 30-October 3, 2012, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2012: 1205-1208.
- [31] Wang X, Shao Z H, Wang Y F, et al. Color image encryption based on symmetry of Fourier transform and R-MRSVD [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(4): 0410021.
王雪, 邵珠宏, 王云飞, 等. 结合 Fourier 变换对称性和随机多分辨率奇异值分解的彩色图像加密 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(4): 0410021.
- [32] Liang D, Yin B, Yu M, et al. An algorithm for color image digital watermarking using the nonsubsampling Contourlet transform [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(8): 1469-1474.
梁栋, 殷兵, 于梅, 等. 基于非抽样 Contourlet 变换的彩色图像数字水印算法 [J]. 光学学报, 2008, 28(8): 1469-1474.
- [33] Bhinder P, Jindal N, Singh K. An improved robust image-adaptive watermarking with two watermarks using statistical decoder [J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(1/2): 183-217.
- [34] Garg P, Kishore R R. Optimized color image watermarking through watermark strength optimization using particle swarm optimization technique [J]. Journal of Information and Optimization Sciences, 2020, 41(6): 1499-1512.
- [35] Zhou Q F, Zhu C Q, Ren N, et al. Zero watermarking algorithm for vector geographic data based on the number of neighboring features [J]. Symmetry, 2021, 13: 208.