

图文信息技术

基于 BSVD 分解和 Radon 变换的 NSCT 域鲁棒水印算法

陈青, 卜莹, 李伟

(上海理工大学, 上海 200125)

摘要: **目的** 为了提高水印算法的不可见性及抗旋转攻击的能力, 提出一种基于 BSVD 分解和 Radon 变换的 NSCT 域鲁棒水印算法。**方法** 首先对水印图像进行 Arnold 变换, 然后对载体图像进行 NSCT 变换, 接着对低频子带进行不重叠分块, 最后对各子块进行 BSVD 分解, 选择合适的缩放因子, 将水印嵌入奇异矩阵的最大奇异值中。提取水印时, 先用 Radon 变换对含水印信息的载体图像进行校正, 再提取出水印信息。**结果** 实验显示, 文中算法具有很好的不可见性, PSNR 值均在 60 dB 之上, 并且能够抵抗常规信号的攻击, NC 值均大于 0.95。**结论** 该水印算法具有良好的不可见性和鲁棒性, 抵抗旋转攻击的能力较强。

关键词: NSCT 变换; BSVD 分解; Radon 变换; 几何校正

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)13-0233-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.13.034

Robust Watermarking Algorithm in NSCT Domain Based on BSVD Decomposition and Radon Transform

CHEN Qing, BU Ying, LI Wei

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200125, China)

ABSTRACT: The paper aims to propose a robust watermarking algorithm based on BSVD decomposition and Radon transform to improve the imperceptibility of watermarking algorithm and the ability of anti-rotation attack. First, the watermarking image was transformed by Arnold transform, then the host image was transformed by NSCT, then the low-frequency sub-block was divided into non-overlapping blocks. Finally, each sub-block was decomposed by BSVD, and the appropriate scaling factor was selected to embed the watermarking into the maximum singular value of the singular matrix. When extracting watermarking, Radon transform was used to correct the host image with the watermarking information, and then the watermarking information was extracted. Experiments showed that the proposed algorithm had good imperceptibility; its PSNR values were above 60 dB; it can resist conventional signal attacks; and its NC values were greater than 0.95. The watermarking algorithm has good imperceptibility and robustness, and has strong ability to resist rotation attack.

KEY WORDS: NSCT transform; BSVD decomposition; Radon transform; geometric correction

随着互联网的快速发展, 在线传输的多媒体数据呈指数级增长。如何有效地保护互联网的信息安全和

众多数字化产品的版权, 成为研究者们研究的热点之一^[1]。

收稿日期: 2019-04-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA050206); 上海自然科学基金(12ZR1420800); 上海理工大学国家级项目培育基金(16HJPY-MS06)

作者简介: 陈青(1962—), 女, 博士, 上海理工大学副教授、硕导, 主要研究方向为信号处理。

目前数字水印的研究大多基于变换域，Cunha A.L.和 Zhou J 于 2006 年提出了一种有效的图像变换工具，即非下采样轮廓波变换 (NSCT) [2]。NSCT 不仅具有平移不变性，而且能有效地表达纹理区域的边缘、轮廓、方向和各向异性。近年来，矩阵分解在数字水印领域得到了广泛使用。双对角线奇异值分解 (BSVD) 与 SVD 分解得到的奇异值相似，分解过程不同，BSVD 分解的性能要优于 SVD 分解 [3]。文献 [4] 为了降低几何攻击的影响，提出了一种基于 DWT, DCT, SVD 相结合的水印方案，将载体图像分成 4 个不重叠的矩形区域，然后将水印独立地嵌入到每个矩形区域中。文献 [5] 针对基于 SVD 的水印算法存在假阳性的问题，提出基于 IWT 和 SVD 的水印算法，利用人工蜂群算法对缩放因子进行了优化。文献 [6] 针对数字水印算法不可见性与鲁棒性的不可协调性，提出 1 一种结合 SVD 的 NSST 数字水印算法，在能量最强的方向子带中嵌入水印信息。文献 [7] 对载体图像进行 NSCT 分解，对低频子带分块再进行 SVD 分解，根据人眼视觉特性嵌入水印，该算法提高了水印嵌入容量。文献 [8] 将 Contourlet 变换和 SVD 相结合，在 Contourlet 域的方向子带嵌入水印，提高了算法的鲁棒性。文献 [9] 将灰度水印图像分为四位 MSB 和四位 LSB 两部分，载入到 DWT 子带各子块的中间奇异值中，该方案能够抵抗常规的信号攻击。文献 [10] 提出了一种基于 SVD 和 DWT 域人眼视觉系统的鲁棒块水印方案，利用熵和边缘熵作为 HVS 特征，选择最小熵值和边缘熵值的块作为插入水印的最佳区域，该

方案通过使用高级标准对部分重要信息进行加密，改进了安全问题。

文中提出一种基于 BSVD 分解和 Radon 变换的 NSCT 域鲁棒水印算法。该算法对载体图像进行 NSCT 变换后得到的低频子带分块并对得到的各子块进行 BSVD 分解，选择各块奇异矩阵的最大奇异值进行水印信息的嵌入。提取水印时，先用 Radon 变换对含水印的载体图像进行校正。实验结果表明，该算法的不可见性大大提高，也实现了不可见性和鲁棒性的平衡。该方案对信号的常规攻击有较好的鲁棒性，并提高了算法的水印嵌入容量。

1 算法原理

1.1 NSCT 变换

NSCT 变换优于传统的小波变换和 Contourlet 变换，因为它提供了诸如平滑的轮廓和图像边缘等丰富的方向信息 [2]。与 Contourlet 变换相比，NSCT 变换具有平移不变性，并且是一种冗余变换 [11-13]，因此它可以更好地重建具有更多方向信息的图像和信号，NSCT 变换更适合于鲁棒图像水印。由于 NSCT 变换比传统的小波变换需要更多的计算，通过选择适当的分解级别可以避免这种计算成本。NSCT 变换是将非下采样金字塔 (NSP) 和非下采样方向滤波器组 (NSDFB) 结合起来构造的。NSP 提供了一个类似金字塔的分解，以确保多尺度特性，而 NSDFB 则为 NSCT 变换提供方向性，见图 1。

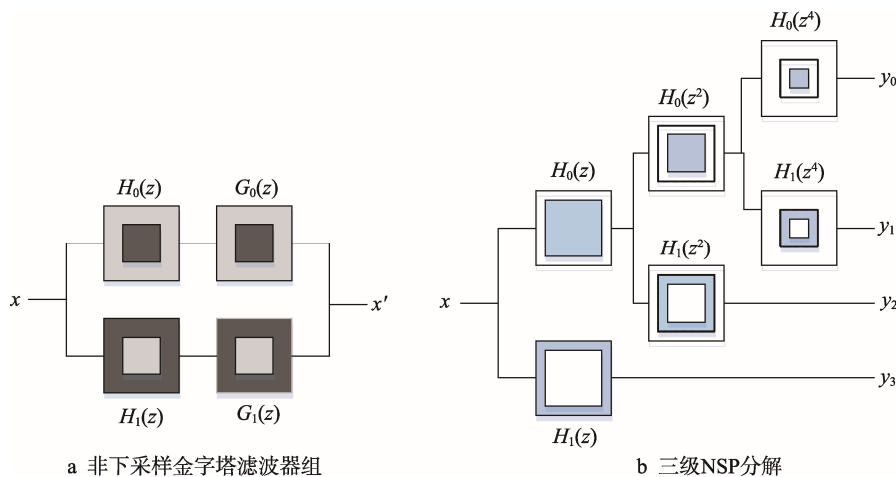


图 1 非下采样 Contourlet 变换
Fig.1 Non-sampled contourlet transform

1.2 BSVD

将矩阵分解为正交矩阵和对角矩阵称为奇异值分解：

$$A = USV^T \tag{1}$$

其中： S 为奇异值矩阵； U 和 V 为正交矩阵，通

常分别称为左奇异矩阵和右奇异矩阵。

奇异值分解的性质：当图像矩阵受到各种攻击时，其奇异值变化较小；图像矩阵的奇异值描绘了固有的代数特征，表明 SVD 是可以用于图像处理的方法。

基于 SVD 的频谱分解可以被认为是双对角 SVD。尽管计算 BSVD 和 SVD 的方法不同，但使用

BSVD 获得的奇异值与 SVD 类似。BSVD 通过双向对角化 A 计算，然后在上对角线值上取 SVD，见式 (2—3)。

$$A = P_A B Q_A^T \quad (2)$$

式中： A 为正交矩阵； P_A 和 Q_A 为酉矩阵； B 为上双对角矩阵。

$$B = P_B S Q_B^T \quad (3)$$

式中： P_B 和 Q_B 为酉矩阵； S 为矩阵的奇异值。

使用迭代方案计算奇异值的 SVD 的计算与使用有限运算的 BSVD 的计算不同，BSVD 的性能优于 SVD^[3]。在文献[14]中，SVD 和 BSVD 应用于不同的图像，并通过反 SVD 和 BSVD 重建。通过比较从这 2 种方法获得的 PSNR 值，很明显 BSVD 的 PSNR 值高于 SVD。BSVD 在水印中的另一个优点是提取水印。在 SVD 中，在提取时需要 2 个矩阵 U 和 V ，而在 BSVD 中，需要 4 个矩阵： P_A ， P_B ， Q_A ， Q_B 。实际上，这些矩阵可以被视为提供安全性的水印的关键，因此，BSVD 通过其密钥提供比 SVD 更高的安全性^[14]。

1.3 Radon 变换

图像在遭受 RST 和非几何攻击后最大的不变性是空间结构不变性。无论图像受到何种程度的攻击，图像都应保持其空间强度和颜色分布，这就是使用 Radon 变换抵抗 RST 攻击的原因。

一般来说，二维函数 $f(x,y)$ 的投影是在一定方向上的线积分。 x' 方向的 Radon 变换是 f 平行于 y' 轴的线积分^[15]。

$$R_{f,\theta}(x') = \int_{-M}^M f(x' \cos \theta - y' \sin \theta, x' \sin \theta + y' \cos \theta) dy' \quad (4)$$

式中： y 的范围是 $[M, -M]$ ，并且：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中：矩阵 T 是正交的。

设 $f(x,y)$ 为原始图像， $g(a,b)$ 为被攻击后的图像。当原始图像在 2 个方向上通过正因子 s 缩放时， $g(a,b)=f(a/s,b/s)$ ， $a=xs$ ， $b=ys$ 。在给定角度 θ 下， $g(a,b)$ 的 Radon 变换见式 (6)。在按尺度 s 缩放之后，Radon 变换在 x' 方向的幅度按相同因子缩放。

$$R_{g,\theta}(a') = s R_{f,\theta}(sx') \quad (6)$$

当图像以 α 角旋转时，很容易发现：

$$R_{g,\theta}(x') = R_{f,\theta+\alpha}(x') \quad (7)$$

2 水印算法

水印算法采用 NSCT 变换与 BSVD 分解相结合的方法，首先，使用 NSCT 变换分解载体图像；然后，

将水印直接嵌入到分解后的载体图像所选子带的双对角奇异值中。

2.1 水印嵌入算法

将 $M \times N$ 大小的载体图像用 I 表示， $m \times n$ 大小的二值水印图像用 W 表示，水印嵌入流程见图 2，具体步骤如下所述。

1) 对水印图像 W 采用 Arnold 变换进行置乱和加密，得到置乱后的水印图像 W' ，保证水印算法的安全性和鲁棒性。

2) 为保证算法具有抵抗旋转攻击的能力，使用 Radon 变换用于检测和校正角度。在水印嵌入之前，对载体图像进行 0° 的 Radon 变换，获得并保存参考矢量 R_0 。

3) 在载体图像 I 上应用 J 级 NSCT 变换，得到低频子带和各个方向子带。其中，在低频子带中嵌入水印。在所提出的方法中，对载体图像进行 2 级 NSCT 变换，得到低频子带 I_j 。

4) 将低频子带 I_j 分成 $m \times n$ 个 $N \times N$ 大小的不重叠子块，记作 $B_i (i=1,2 \dots m \times n)$ 。

5) 对各个子块分别进行 BSVD 分解，通过水印图像修改各个子块的最大奇异值 λ_{\max} 来嵌入水印。选择缩放因子 α 的值，使得水印图像的鲁棒性和不可见性平衡。

$$\begin{bmatrix} P_A, P_B, S, Q_B^T, Q_A^T \end{bmatrix} = \text{BSVD}(B_i) \quad (8)$$

$$\lambda'_{\max} = \lambda_{\max} + \alpha W'$$

6) 将 λ'_{\max} 替代各个子块的最大奇异值 λ_{\max} ，其他元素不变，得到新的奇异值矩阵 S' 。通过 BSVD 分解逆变换，得到嵌入水印的低频子带的各子块 B'_i 。

7) 对所有子块 B'_i 进行合成，得到嵌入水印的低频子带 I'_j ，然后进行 2 级 NSCT 逆变换，得到含水印的图像 I_W 。

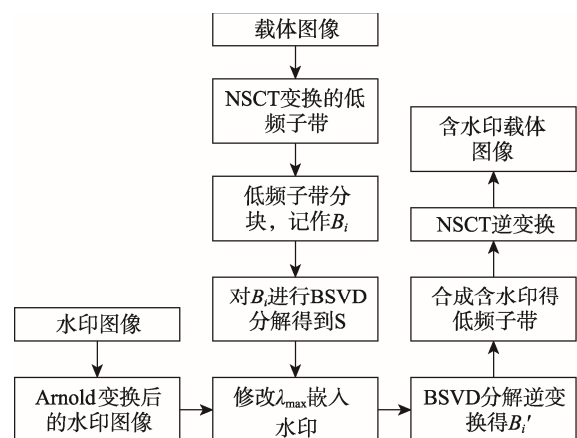


图 2 水印嵌入
Fig.2 Watermarking embedding

2.2 水印提取算法

水印提取过程的流程见图3,具体步骤如下所述。

1) 将载体图像进行 0°的 Radon 变换得到的参考向量 R_0 与校正图像的待检测向量 $R(\theta)$ 进行比较,得到参考向量与检测向量之间对应的角度,这个角度就是含水印信息的载体图像旋转的角度。接着对受到旋转攻击的载体图像进行校正。

2) 对含水印的载体图像 I_w 进行 2 级 NSCT 变换,得到低频子带 I'_j 。将低频子带 I'_j 划分成 $N \times N$ 大小的不重叠子块,记作 $B'_i (i=1,2 \dots m \times n)$ 。

3) 对各子块 B'_i 进行 BSVD 分解,得各个子块的最大奇异值 λ'_{max} ,并根据式(8)得到提取出来的水印信息:

$$W' = \frac{\lambda'_{max} - \lambda_{max}}{\alpha} \tag{9}$$

4) 将提取出来的水印信息进行 Arnold 逆变换,得到水印图像 W 。

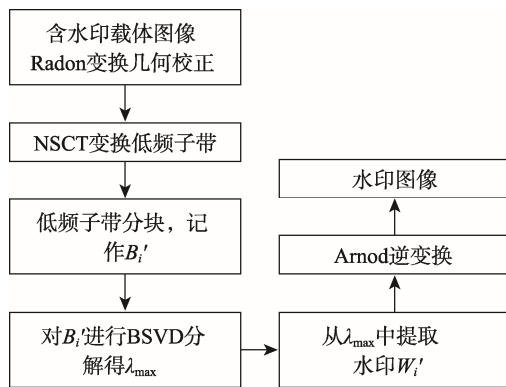


图3 水印提取流程
Fig.3 Watermarking extraction

3 实验结果及分析

为验证该水印方案的不可见性和鲁棒性,进行了图像处理 and 几何攻击的实验。利用 Matlab R2016a 软件对所提出的水印算法进行仿真,大小为 512 × 512

的灰度图像 Lena 作为载体图像,大小为 64 × 64 的二值图像“USST”作为水印图像。对载体图像进行 2 级 NSCT 变换,LP 和 DFB 分别采用“9-7”和“pkva”滤波器,低频子带分成不重叠的 8 × 8 子块。

试错是解决问题的基本方法,在实验中,首先使用任意值初始化缩放因子,然后测量所提出方法的不可见性和鲁棒性。缩放因子从初始值逐渐改变,并且每次计算这 2 个度量。继续该过程,直到实现不可见性和鲁棒性的平衡。文中该值设定为 0.2,能够获得良好的不可见性以及高鲁棒性。

通过对水印算法的 2 个主要要求,即不可见性和对不同攻击的鲁棒性来评估该算法的性能。为了测量含水印载体图像的质量,采用峰值信噪比 (PSNR) 来表示含水印载体图像与原始图像之间的不可察觉程度或视觉相似性。水印的另一个重要要求是对攻击的鲁棒性,这是用标准化互相关系数 (NC) 来评估的。NC 表示原始水印与提取后的水印的相似性。

1) 不可见性测试。对 3 个不同的载体图像进行水印嵌入操作,在未受到攻击的情况下,NC 值都为 1.000,表示水印可以被完整地提取出来;PSNR 的值都在 60 dB 左右,表示该算法的不可见性比较好,主观上察觉不到水印的嵌入。将文中算法与其他文献^[5, 7-8]的算法进行比较,结果见表 1。可见该算法的 PSNR 值得到明显改善,水印的不可见性有所提高。

2) 鲁棒性测试。对含水印载体图像 Lena 进行不同类型的攻击,并将 NC 值与文献[6]和文献[7]的水印算法进行比较。载体图像受不同攻击的 PSNR 值及提取水印的 NC 值见表 2。结果显示,含水印载体图像在受到攻击时,仍能很好地提取出水印,表明算法对常见的信号攻击均有较好的鲁棒性。从表 2 可以看出,本算法在不同攻击下,NC 值保持在 0.95 以上,在抗 JPEG 压缩和缩放的能力优于文献[6]的水印算法,略差于文献[7]的水印算法,在抵抗噪声的能力略逊于文献[6]的水印算法,差别不是很大,但是优于文献[7]的水印算法,依然可以很好地抵抗噪声攻击。由此可见,文中算法对 JPEG 压缩、噪声、滤波、剪切等具有较好的鲁棒性。

表 1 无攻击水印信息提取结果
Tab.1 Results of watermarking information extraction without attack

载体图像	含水印图像	提取结果	NC	PSNR 值			
				文中算法	文献[5]	文献[7]	文献[8]
			1.000	62.7178	45.1242	39.56	54.1279
			1.000	62.2342	44.5326	—	—
			1.000	62.7945	44.9243	38.77	—

表 2 常见攻击下的算法性能
Tab.2 Algorithmic performance under common attacks

攻击方式	提取结果	文中算法		文献	文献
		PSNR 值	NC 值	[6]的 NC 值	[7]的 NC 值
JPEG 压缩 (30)		43.4473	0.9852	0.9832	0.9935
JPEG 压缩 (40)		45.2672	0.9963	0.9945	0.9910
高斯噪声 (0.01)		34.0657	0.9979	0.9990	0.7853
椒盐噪声 (0.005)		38.5727	0.9957	0.9991	0.9609
均值滤波 (3×3)		43.7128	0.9876	0.9975	0.9302
均值滤波 (5×5)		49.5825	0.9532	—	—
缩放 (0.5)		41.3456	0.9872	0.9848	—
缩放 (2)		47.7450	1	0.9975	—
左上角剪切 1/4		31.9502	0.9632	—	—

3) 抗旋转攻击测试。文献[6]和文献[8]中的算法不能抵抗旋转攻击,提取的水印会有失真的情况。为使水印算法具有抵抗旋转攻击的能力,使用 Radon 变换进行旋转角度的校正。在提取水印之前,先对含水印载体图像进行校正,然后再提取水印。对含水印载体图像进行几何攻击,得出的 NC 值见表 3,并与文献[7]进行比较,文中算法的 NC 值均保持在 0.95 以上,提取的水印图像清晰,准确性高,而文献[7]的 NC 值较小,可见文中算法能够抵抗旋转攻击。

表 3 旋转攻击实验结果
Tab.3 Experiment results of rotation attack

旋转角度/(°)	提取水印	NC 值	文献[7]
5		0.9642	—
15		0.9697	0.7945
30		0.9697	0.7253
45		0.9658	0.7863
90		1	—
135		0.9658	—

4 结语

将 NSCT、Arnold 变换、BSVD 分解以及 Radon 变换结合,提出了一种基于 BSVD 分解和 Radon 变换的 NSCT 域鲁棒水印算法。该算法用 NSCT 变换后的低频子带,既保证了算法的嵌入容量,又提高了算法的鲁棒性。选择合适的缩放因子,把水印信息嵌入到 BSVD 分解后奇异矩阵最大奇异值中,既保证算法有很好的不可见性,又平衡了算法的不可见性和鲁棒性。对水印进行 Arnold 变换,提高了算法的安全性。在水印提取前,进行 Radon 变换,提高了算法抗旋转攻击的能力。实验表明,算法具有较好的不可见性,并对常规的图像处理和旋转攻击具有较强的鲁棒性。

参考文献:

- [1] COX I J, KILIAN J, LEIGHTONT, et al. Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1673—1687.
- [2] DA CUNHA A L, ZHOU J, DO M N. The Nonsubsampled Contourlet Transform: Theory, Design, and Applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089—3101.
- [3] DEIFT P, DEMMEL J, LI L, et al. The Bidiagonal Singular Value Decomposition and Hamiltonian Mechanics[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1991, 28(5): 1463—1516.
- [4] FAZLI S, MOEINIM. A Robust Image Watermarking Method Based on DWT, DCT, and SVD Using a New Technique for Correction of Main Geometric Attacks[J]. Optik International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(2): 964—972.
- [5] ANSARI I A, PANT M, AHN C W. Robust and False Positive Free Watermarking in IWT Domain Using SVD and ABC[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2016, 49: 114—125.
- [6] 杨健, 梁凤梅, 范帅帅. 一种结合奇异值分解的非下采样剪切波数字水印算法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(2): 507—510.
YANG Jian, LIANG Feng-mei, FAN Shuai-shuai. Digital Watermarking Algorithm Using SVD and Non-subsampled Shearlet[J]. Application Research of Computers, 2018, 35(2): 507—510.
- [7] 袁志华, 杨百龙, 赵文强, 等. 基于 NSCT_SVD_DE 的自适应大容量水印算法[J]. 包装工程, 2017, 38(17): 188—193.
YUAN Zhi-hua, YANG Bai-long, ZHAO Wen-qiang, et al. Adaptive Large-capacity Watermarking Algorithm Based on NSCT_SVD_DE[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(17): 188—193.
- [8] 余勇. 基于奇异值分解的 Contourlet 域水印算法[J].

- 包装工程, 2017, 38(7): 202—205.
- YU Yong. Contourlet Domain Watermarking Algorithm Based on Singular Value Decomposition[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7): 202—205.
- [9] MAKBOLNM, KHOUBE, RASSEMTH. Security Analyses of False Positive Problem for the SVD-based Hybrid Digital Image Watermarking Techniques in the Wavelet Transform Domain[J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 77(20): 26845—26879.
- [10] MAKBOLNM, KHOUBE, RASSEMTH. Block-based Discrete Wavelet Transform-singular Value Decomposition Image Watermarking Scheme Using Human Visual System Characteristics[J]. IET Image Processing, 2016, 10(1): 34—52.
- [11] ZHANG L, JIN L X. Infrared and Visible Image Fusion Using the Nonsampled Contourlet Transform and Region Classification[J]. Optical Precision Engineering, 2015, 23(3): 810—818.
- [12] YANG Y, SONG T, HUANG S, et al. Multifocus Image Fusion Based on NSCT and Focused Area Detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(5): 2824—2838.
- [13] GE W, JI P, ZHAO T. Infrared Image and Visual Image Fusion Algorithm Based on NSCT and Improved Weight Average[C]// Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications: IEEE, 2016: 456—459.
- [14] BHATNAGAR G, RAMAN B. Robust Reference-watermarking Scheme Using Wavelet Packet Transform and Bidiagonal-singular Value Decomposition[J]. Int J Image Graph, 2009, 9(3): 449—477.
- [15] SU Q, NIU Y, LIU X, et al. Embedding Color Watermarks in Color Images Based on Schur Decomposition[J]. Optics Communications, 2012, 285(7): 1792—1802.