

基于 Schur 分解的 Contourlet 域彩色图像零水印算法

Zero-watermarking Algorithm for Color Image in Contourlet Domain Based on Schur Decomposition

朱春伟* 李永毅 迟万达 高 尚 范 迪

ZHU Chun-wei LI Yong-yi CHI Wan-da GAO Shang FANDi

摘 要

针对数字水印技术中鲁棒性和不可见性平衡的问题,本文提出了一种基于 Schur 分解的 Contourlet 域彩色图像零水印算法。算法对图像的 YCoCg 颜色空间的 Co 分量进行两层 Contourlet 变换,对其低频子带的 DCT 变换结果进行分块和 Schur 分解,利用子块的最大特征值构造过渡矩阵并进而形成特征矩阵,并与加密水印异或得到零水印。算法利用 YCoCg 彩色空间转换无损的特点及 CT、DCT 和 Schur 分解的优良特性,运算比较简单,同时因对载体图像无介入,确保了不可见性。实验结果表明,算法对噪声、JPEG 压缩、缩放、剪切、旋转等多种攻击具有较强的鲁棒性,在抗缩放、旋转攻击方面效果尤为突出。

关键词

零水印; Contourlet 变换; Schur 分解; 鲁棒性; YCoCg 颜色空间

Abstract

To balance robustness and invisibility in digital watermarking technology, a zero-watermarking algorithm for color image in Contourlet domain based on Schur decomposition is proposed in this paper. The Co component of YCoCg color space is transformed by two-layer Contourlet transform (CT), and the DCT transform results of its low-frequency subband are divided into blocks and decomposed by Schur respectively. The transition matrix is constructed by the maximum eigenvalue of the subblocks. Then the feature matrix is formed, and the zero watermarking is obtained by operating feature matrix and encrypted watermark image with XOR. The algorithm takes advantages of the non-destructive characteristics of YCoCg color space conversion and the excellent characteristics of CT, DCT and Schur decomposition, and its operation is relatively simple. At the same time, the algorithm does not interfere with the carrier image and ensures the invisibility. The experimental results show that the algorithm has strong robustness against noise, JPEG compression, scaling, shearing, rotation and other attacks, especially in scaling and rotation attacks.

Key words

zero watermarking; Contourlet transform; Schur decomposition; robustness; YCoCg color space

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2019.02.024

1 引言

数字水印技术是一种版权保护的有效方法。鲁棒性和不可见性的平衡和兼顾一直是数字水印技术的重点和难点,温泉^[1]等人 2003 年提出的零水印技术是一种非介入方法,可很好地解决该问题。所谓的非介入,是指该技术并不是把水印信息嵌入到载体图像中,而是从载体图像中提取图像特征,构造特征矩阵来参与零水印的形成,有效地解决了传统水印算法的不可见性和鲁棒性不平衡的问题。

目前,不少学者研究并提出了彩色图像的零水印算法。

文献[2]提出了一种基于小波变换和 k 邻点均值的零水印方案,该方法对图像小波域低频子带进行分块并获得各块的 k 邻点均值,利用该均值与图像均值的关系构造零水印,该方法对常见的攻击具有较好的鲁棒性。曲长波^[3]等人提出一种 RGB 空间彩色零水印算法,利用图像的 RGB 三个空间分量的均值分别构造特征矩阵,生成三个零水印,并将三个分量的零水印通过逆编码技术生成彩色零水印,该算法安全性高,鲁棒性良好。2018 年,刘万军^[4]等人提出了一种在 YCbCr 彩色空间中构造零水印的算法,对 Y 分量进行小波变换和 Schur 分解并构造特征矩阵,将特征矩阵与加密后的水印异或得到零水印,该算法在抗噪声攻击以及 JPEG 压缩攻击的方

* 山东科技大学 山东青岛 266590

面有较好表现。

Contourlet 变换与小波变换相比具有多方向性^[5],且能量更加集中,在数字水印算法中应用越来越多。文献[6]提出一种基于 Contourlet 变换和奇异值分解的水印方案,算法对 Contourlet 域的低频进行 SVD 分解,并把水印自适应地嵌入到奇异值中,隐蔽性较好。Schur 分解是与 SVD 相似的酉变换,因其计算量小而逐渐被应用于水印算法中。刘鹏^[7]等人提出了一种基于 Schur 分解的 Contourlet 域数字水印方案,通过量化方法将水印添加到载体图像 Schur 分解后的对角元素中,该方案嵌入提取的速度快且鲁棒性和不可见性良好。王晓红^[8]等人提出一种将彩色 QR 码和 Schur 分解相结合的双彩色盲水印算法,将 QR 码作为水印嵌入到彩色载体图像中,得到的水印算法具有较高的鲁棒性。

本文基于 Schur 分解^[9]和 Contourlet 变换^[10]提出了一种 YCoCg 彩色空间^[11]的彩色零水印算法。算法将原始载体图像从 RGB 空间转换到 YCoCg 空间,对 Co 分量做两层 Contourlet 变换,将其低频子带进行 DCT 变换后分为 4*4 的子块并分别进行 Schur 分解,由子块最大特征值构造过渡矩阵进而得到特征矩阵,并与加密水印异或得到零水印。由于 Schur 分解^[12]运算速度快并且稳定,有效的减少了虚警率,提升了算法的安全性和运算速度。通过零水印构造及认证实验表明,本文算法能够提取出准确的水印,能用于版权认定,同时,对 JPEG 压缩、噪声、缩放、剪切、旋转等多种攻击具有较强的鲁棒性,尤其是抗旋转、剪切攻击的效果更为突出。

2 零水印构造算法

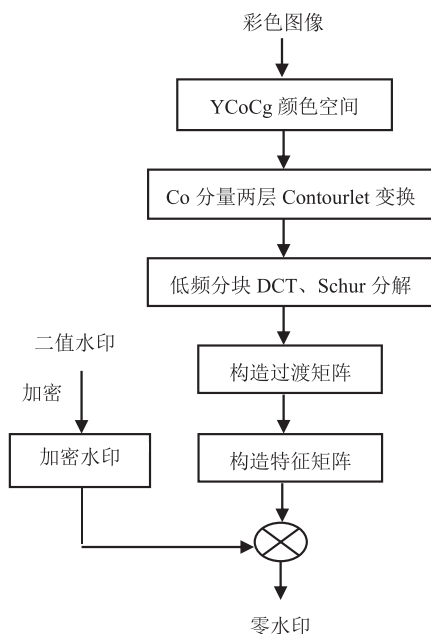


图1 零水印的构造过程

本文的零水印构造算法如图1所示。算法中,YCoCg 颜

色空间与 RGB 空间之间的转换不需要浮点运算,对 Co 分量进行 Contourlet 变换、DCT 变换和 Schur 分解,构造过渡矩阵和特征矩阵,将特征矩阵与二值水印做异或操作得到零水印。

假设原始载体图像为 I,大小为 M×M,原始水印图像是 w,大小为 N×N,零水印的构造的具体步骤如下:

(1) 首先对原始彩色载体图像 I 进行颜色空间转换,从 RGB 空间转换到 YCoCg 空间,分解出 Y、Co 和 Cg 分量。

(2) 对 YCoCg 空间中的 Co 分量做两层 Contourlet 变换,对其低频子带 L 做 DCT 变换,再分成 N×N 个不重叠的子块,每个子块记为 $D_{i,j}$, $i,j = 1,2,3,\dots,N$ 。

(3) 对每个子块进行 Schur 分解,子块 $D_{i,j}$ 可分解为:

$$[U_{i,j}, T_{i,j}] = \text{Schur}(D_{i,j}) \quad (1)$$

其中, $U_{i,j}$ 为酉矩阵; $T_{i,j}$ 为上三角矩阵,其对角线的元素为 $D_{i,j}$ 的特征值。

(4) 提取矩阵 $T_{i,j}$ 中对角元素中的最大值,即分块矩阵的最大特征值,记为 $\lambda_{i,jmax}$,利用其构造 N×N 的过渡矩阵 t,其中 $t_{i,j} = \lambda_{i,jmax}$, $i,j = 1,2,3,\dots,N$ 。

(5) 设过渡矩阵 t 的均值为 M,并以其为阈值进行二值化处理,形成二值特征矩阵 S:

$$S(i,j) = \begin{cases} 1, & \text{if } t(i,j) > M \\ 0, & \text{if } t(i,j) \leq M \end{cases} \quad (2)$$

(6) 将原始二值水印图像 w 进行 Arnold 置乱^[13]加密得到 W,将构造的二值特征矩阵 S 与加密的二值水印进行异或操作,如式(3)所示,得到零水印 Z,并把它注册保存在到第三方版权认证机构中心,作为之后水印提取和版权认定的依据。

$$Z = W \oplus S \quad (3)$$

其中“ \oplus ”为异或运算。

2.1 YCoCg 颜色空间

YCoCg 色彩空间由亮度分量 Y、色度绿色偏移值 Cg、色度橙色偏移值 Co 三个分量组成。RGB 空间与 YCoCg 空间之间的转换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cg \\ Co \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/2 & 1/4 \\ -1/4 & 1/2 & -1/4 \\ 1/2 & 0 & -1/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4)$$

与其他转换相比,YCoCg 颜色空间与 RGB 空间之间相互转换计算简单,实现快速,并且无浮点运算,有效避免数据类型转换时产生的舍入误差;另外 YCoCg 彩色空间三个分量之间的颜色相关性比 RGB 的低,可有效避免一个颜色分量的细微变化对最终颜色属性产生的显著影响。

2.2 CT 与 DCT 变换

Contourlet 变换(简称 CT)是 Do^[14]等人提出的一种多尺度的图像二维表示方法,其原理如图2所示。Contourlet

变换是由拉普拉斯金字塔 (LP) 和方向滤波器组 (DFB) 组成的金字塔型方向滤波器组 (PDFB), 是多尺度、多方向的变换。Contourlet 的尺度分解和方向分解是分别进行的, 首先由 LP 对图像进行多尺度分解, 将图像分解成低频和高频分量, 并对低频持续分解, 然后由 DFB 对每一级的高频分量进行多方向分解。Contourlet 变换后的低频部分聚集了图像的大部分能量, 包含了图像的轮廓信息, 高频部分是图像的细节部分, 本文算法利用 Contourlet 变换后的低频系数能量值较大的特性, 选择低频子带作为研究对象构造零水印。

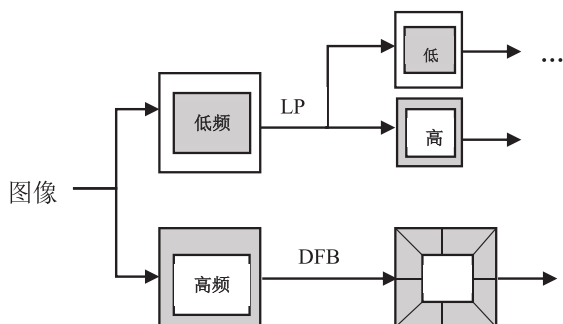


图2 两层 Contourlet 变换原理示意图

离散余弦变换 (DCT) 是一种常用的正交变换, 可解除图像像素之间的相关性, DCT 变换能将图像的能量聚集到低频系数中, 低频部分代表着图像的主要信息。对图像的两层 Contourlet 变换的低频部分进行 DCT, 其低频部分包含了图像的大部分能量, 因此结合 CT 和 DCT 构造的零水印具有一定的鲁棒性。

2.3 Schur 变换

由 Schur 分解定理^[15]知, 任何一个 N 阶方阵 X 可以分解为:

$$X = U \times R \times U^T \quad (5)$$

其中, U 为酉矩阵, U^T 是 U 的转置矩阵, R 为上三角 Schur 矩阵且其主对角线上的元素为 X 的特征值。

Schur 分解可得到矩阵的特征值, 同时因其是奇异值分解^[16]的中间步骤, 运算时间比奇异值分解耗时短, 且计算相对简便。另外 X 扩大倍数时, 其特征值会扩大相同倍数, 其 Schur 向量保持不变, 因此将 Schur 分解用于水印领域可以有效地抵抗缩放攻击。

3 零水印检测算法

零水印检测算法与构造算法基本相同。假设待认证的图像为 I' , 大小为 $M \times M$, 水印的检测过程如图3所示。具体步骤简述如下:

(1) 对彩色图像 I' 进行空间转换, 从 RGB 空间转换到 YCoCg 空间, 分解出 Y、Co、Cg 三分量。

(2) 对 Co 分量进行两层 Contourlet 变换, 对低频子带 L' 作 DCT 变换, 并把结果分成 $N \times N$ 个不重叠的子块。

(3) 对每块分别做 Schur 分解, 可得到上三角矩阵 $T'_{i,j}$ 。

(4) 利用矩阵 $T'_{i,j}$ 中对角元素中的最大值构造 $N \times N$ 的过渡矩阵 T' 。

(5) 以过渡矩阵的均值 M' 为阈值进行二值化处理, 形成二值特征矩阵 S' 。

(6) 从第三方版权认证机构中心提取注册保存的零水印 Z , 将二值特征矩阵与其进行异或操作, 得到加密水印 W' , 对之进行解密即可得到水印 W' 。

$$W' = Z \oplus S' \quad (6)$$

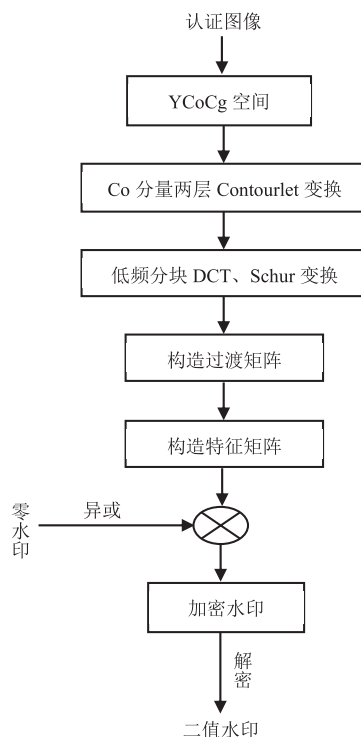


图3 水印检测过程

4 实验结果及分析

4.1 实验结果分析

本文算法在 Matlab2014 的环境下进行了仿真实验。试验中选择 lena、peppers、baboon 彩色图像作为原始载体图像, 大小为 512×512 , 水印图像为 32×32 大小的带有“SY”标识的二值图像。水印图像 Arnold 置乱周期为次数为 12。通常水印算法的评价指标为不可见性和鲁棒性, 但本文为零水印算法, 没有将水印嵌入到载体图像中, 因此只需要衡量算法的鲁棒性即可。本文试验测试算法的鲁棒性使用归一化相关系数 (NC) 作为评价标准^[17]来衡量提取的水印图像与原水印图像之间的相似程度, 计算公式为:

$$NC(W', W) = \frac{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q w'_{ij} w_{ij}}{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q w_{ij}^2} \quad (7)$$

其中 W' 表示提取的水印图像, W 为原始水印图像, 图像大小为 $P \times Q$, NC 值越接近于1, 说明水印的提取效果越好。

表1中列出了三个图像利用本文方法所构造的零水印及检测出的水印, 及根据式(7)分别计算的 NC 值。由实验结果可见, 在无攻击的情况下, 水印的 NC 均为1, 能够起到版权保护的作用。

表1 无攻击时的水印提取情况







原始载体图像	零水印	检测水印	NC
		SY	1.0000
		SY	1.0000
		SY	1.0000

表2 受攻击情况下的水印检测结果

攻击类型	PSNR	NC
高斯噪声 0.01	25.2672	0.9989
高斯噪声 0.05	19.0041	0.9957
椒盐噪声 0.01	29.5601	0.9990
椒盐噪声 0.05	22.470	0.9979
缩放 1/2	37.6695	1
缩放 2	49.1968	1
JPEG (10)	31.8972	0.9979
JPEG (30)	37.2807	0.9990
JPEG (50)	39.0532	0.9992
左上角剪切 1/16	38.3393	0.9979
左上角剪切 1/8	17.1854	0.9958
左上角剪切 1/4	12.5148	0.9409
中心剪切 1/4	13.3685	0.9990
旋转 1°	20.5175	0.9979
旋转 3°	16.0578	0.9845
旋转 10°	12.2270	0.9503
旋转 30	10.6461	0.8687

表2列出了在lena图像上加入不同类型和强度的攻击情况下的水印检测结果, 实验的攻击主要有加噪声、JPEG、缩放、旋转等, 用峰值信噪比PSNR说明攻击后的图像质量。从实验结果看, 在图像受到攻击时水印仍然可以有效提取出来, 本文算法对抵抗常规攻击有较好的鲁棒性。相对而言,

对图像受到剪切攻击时, NC 值均在0.9以上; 对图像进行较大范围的旋转攻击时, NC 值也比较高, 本文算法对抵抗旋转和剪切攻击具有更强的鲁棒性。

4.2 与相似方法的对比实验

为了进一步验证本文算法的有效性, 将本文算法与文献[18]、[19]两种相近算法进行了对比, 结果如表3所示。文献[18]采用YCbCr颜色空间, 结合小波变换与奇异值分解构造特征矩阵生成零水印。文献[19]对图像进行小波变换, 对其低频子带分块并SVD分解, 利用奇异值与随机序列构造零水印。本文采用YCoCg空间, 利用了Contourlet变换、DCT变换和Schur分解, 具有空间转换无需浮点计算、无损的特点, 同时与小波变换相比, Contourlet变换不但具有多尺度而且具有多方向的特性。

表3 与两个文献的对比实验结果

攻击类型	文献 [18]	文献 [19]	本文算法
椒盐噪声 0.01	0.998	0.8701	0.9989
椒盐噪声 0.05	0.996	0.8899	0.9985
JPEG (10)	0.991	0.8637	0.9979
JPEG (50)	0.998	0.8727	0.9990
放大 2	0.997	0.9989	1
缩小 1/2	0.995	0.9953	1
左上角剪切 1/16	0.969	0.8118	0.9979
左上角剪切 1/4	0.892	0.8496	0.9909
中心剪切 1/4	0.887	0.7893	0.9731
旋转 10°	0.823	0.7470	0.9503
旋转 30°	0.763	0.8554	0.8687
旋转 50°	0.749	0.7671	0.8728

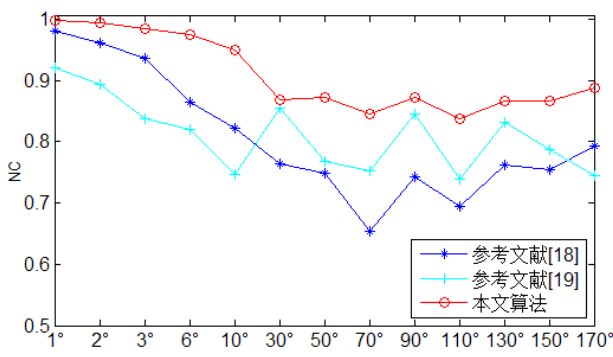


图4 旋转攻击时三种方法的对比效果

从表3的实验对比结果看, 本文算法在抵抗噪声、JPEG压缩、放缩、剪切、旋转等攻击方面具有普遍优势, 尤其是抵抗剪切攻击和旋转攻击优势更为明显。图4和图5分别是旋转、剪切攻击时两种方法的对比效果。图4中, 旋转角度从1°到170°范围变化时, 本文方法的 NC 值均明显优于文献[18]和[19]。图5中, 剪切位置和大小变化时, 本文方法的 NC 值均显著优于两文献中的方法。

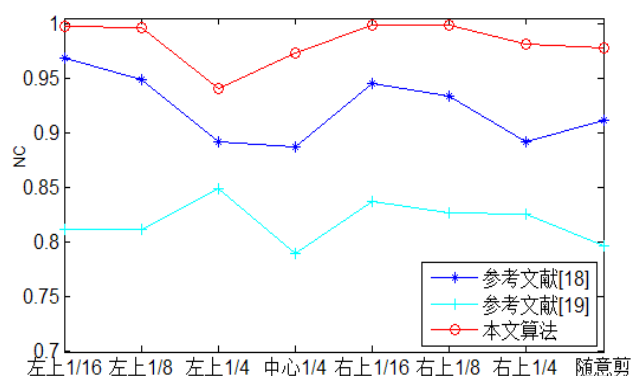


图5 剪切攻击时三种方法的对比效果

5 总结

本文基于Contourlet变换、DCT变换和Schur分解,提出了一种YCoCg颜色空间的Contourlet域彩色图像零水印算法。该算法利用了人类视觉特性以及低通子带能量集中特点,对两层Contourlet变换低频部分的DCT变换结果进行分块及Schur分解,由子块最大特征值构造过渡矩阵进而得到特征矩阵。该零水印算法采用的颜色空间可由RGB无损转换,Schur分解比SVD的运算量小。本文算法对载体图像无介入,确保了不可见性,同时实验结果表明,算法对噪声、JPEG压缩、缩放、剪切、旋转等多种攻击具有较强的鲁棒性,在抗缩放攻击、旋转攻击方面效果尤为突出。

参考文献

- [1] 温泉,孙铨锋,王树勋.零水印的概念与应用[J].电子学报,2003,(02):214-216.
- [2] 赵杰,杨滨峰,李亚文.基于K邻点均值的图像零水印认证算法[J].舰船电子工程,2018,38(08):107-108+115.
- [3] 曲长波,吴德阳,肖成龙,郭鹏飞,姜思瑶.RGB空间彩色零水印算法[J].计算机科学与探索,2019,1-18.
- [4] 刘万军,孙思宇,曲海成.Schur分解的快速零水印算法[J].计算机科学与探索,2018,1-14.
- [5] 苗鑫梅,朱婷鸽,刘颖,来毅,刘卫华.基于Contourlet变换的彩色图像双水印算法[J].西安邮电大学学报,2018,23(05):77-84.
- [6] 余勇.基于奇异值分解的Contourlet域水印算法[J].包装工程,2017,38(07):202-205.
- [7] 刘鹏,魏娟,杨峻.基于Schur分解的Contourlet域水印方案[J].计算机工程,2011,37(16):147-148+157.
- [8] 王晓红,孙业强.基于QR码和Schur分解的双彩色盲水印算法[J].光学技术,2018,44(01):106-112.

[9] 刘凡,杨洪勇,苏庆堂.基于矩阵Schur分解的彩色图像盲水印算法[J].计算机应用研究,2017,34(10):3085-3089+3093.

[10] Jian Zhao,Na Zhang,Jian Jia,Huanwei Wang.Digital watermarking algorithm based on scale-invariant feature regions in non-subsampled contourlet transform domain[J].Journal of Systems Engineering and Electronics,2015,26(06):1310-1315.

[11] Moosazadeh M, Ekbatanifard G. An improved robust image watermarking method using DCT and YCoCg-R color space[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 140:975 - 988.

[12] 王晓红,孙业强.基于QR码和Schur分解的感兴趣区域水印算法[J].光电子·激光,2017,28(04):419-426.

[13] Ying L, Musheng W, Fengxia Z, et al. A New Double Color Image Watermarking Algorithm Based on the SVD and Arnold Scrambling[J]. Journal of Applied Mathematics, 2016, 1-9.

[14] Do M N, Vetterli M. The Contourlet Transform: An Efficient Directional Multiresolution Image Representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 14(12):2091-2106.

[15] 孙彦飞,陈青.基于Radon变换与Schur分解的彩色图像水印算法[J].包装工程,2018,39(21):183-188.

[16] 赵彦霞,王熙照.基于SVD和DCNN的彩色图像多功能零水印算法[J].山东大学学报(工学版),2018,48(03):25-33.

[17] 曾文权,熊祥光.基于整数小波变换的鲁棒零水印算法[J].微电子学与计算机,2016,33(04):97-101+107.

[18] 江泽涛,陈微.基于DWT-DCT-SVD的彩色图像零水印算法[J].微电子学与计算机,2016,33(08):107-111.

[19] 潘黄琼,陈光喜,丁勇,李峰.彩色图像DWT变换下的块SVD零水印[J].微电子学与计算机,2012,29(05):50-53.

(收稿日期:2019-01-18)