

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012 7  
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年7月 第17卷 第7期(总第195期)

## 目次

### 综述

中国多媒体技术研究: 2011 ..... 史元春, 徐光祐, 高原(741)

### 图像处理和编码

图像引导滤波的局部多尺度 Retinex 算法 ..... 方帅, 杨静荣, 曹洋, 武鹏飞, 饶瑞中(748)

基于第一主成分方向稳定性的图像零水印 ..... 付剑晶, 王珂(756)

小波变换估计非线性扩散最优停止时间 ..... 蒋平, 张建州(770)

### 图像分析和识别

改进的 Beamlet 与 Canny 相结合提取复杂图像线特征 ..... 曾接贤, 周沥沥, 符祥(775)

动静态信息融合及动态贝叶斯网络的步态识别 ..... 杨旗, 薛定宇(783)

融合音频单词与视觉特征的成人视频检测 ..... 刘毅志, 唐胜, 王向东, 林守勋, 张勇东(791)

基于平面区域跟踪的目标位姿参数自动测量 ..... 回丙伟, 文贡坚, 赵竹新, 钟金荣(798)

3 维图像中边界曲面的分类追踪及抽取 ..... 丁德福, 程柳航, 王利生(806)

局部时空域模型的核密度估计目标检测方法 ..... 王兴宝, 刘纯平, 费兰英, 王朝晖, 季怡(813)

基于相位谱和调谐幅度谱的显著性检测方法 ..... 李崇飞, 高颖慧, 卢凯, 曲智国(821)

### 图像理解和计算机视觉

“目标-场景”语境关联的生成图模型分析 ..... 谢昭, 李姍琦, 高隼(828)

融合上下文信息的场景结构恢复 ..... 武晖, 于昕, 隋尧, 张利(839)

带有局部控制因子的图割光流估计 ..... 路子赟, 唐土生, 高隼, 沈琳, 刘伟(846)

改进的 Harris 亚像素角点快速定位 ..... 何海清, 黄声享(853)

**计算机图形学**

应用最小生成树实现点云分割 ..... 孙金虎, 周来水, 安鲁陵(858)

**医学图像处理**

病毒进化的离散差分进化超声图像特征选择 ..... 张巧荣, 朱长明, 倪军, 刘海波(866)

分水岭优化的 Snake 模型肝脏图像分割 ..... 兰红, 张璐(873)

**遥感图像处理**

Normalized Cut 与分水岭变换在高光谱影像混合像元端元提取中的应用 ..... 许菡, 李小娟(880)

改进非局部均值滤波的 SAR 图像降噪方法 ..... 郑永恒, 程建, 曹宗杰(886)

~~~~~  
第四届国际遥感考古会议 ..... (892)

**中国图象图形学报**

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 7 期

2012 年 7 月 16 日出版

**主管单位** 中国科学院

**主 办** 中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

**主 编** 李小文

**编辑出版** 《中国图象图形学报》编辑出版委员会  
北京 9718 信箱 邮编 100101  
电子信箱:jig@irsa.ac.cn  
电话:010-64807995 010-82614429  
网 址:www.cjig.cn

**印刷装订** 北京北林印刷厂

**广告经营许可证** 京朝工商广字第 0346 号

**总 发 行** 北京报刊发行局

**订 购** 全国各地邮局

**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
(中国国际书店)  
(北京 399 信箱 邮编 100044)

**Superintended by** Chinese Academy of Sciences

**Sponsored by** Institute of Remote Sensing Application,  
CAS China Society of Image and Graphics  
Institute of Applied Physics and Computational  
Mathematics

**Chief editor** LI Xiaowen

**Editor, Publisher** Editorial and Publishing Board  
of Journal of Image and Graphics  
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)  
E-mail:jig@irsa.ac.cn

**Distributed by** Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
and Journals

**Domestic** All Local Post Offices in China

**Foreign** China International Book Trading Corporation  
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

**Printed by** Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

# Journal of Image and Graphics

( Monthly , Started in 1996 )

Vol. 17 No. 7 July 2012

## Contents

### Review

Researches on multimedia technology in China, 2011 ..... Shi Yuanchun, Xu Guangyou, Gao Yuan (741)

### Image Processing and Coding

Local multi-scale Retinex algorithm based on guided image filtering  
..... Fang Shuai, Yang Jingrong, Cao Yang, Wu Pengfei, Rao Ruizhong (748)

Image zero-watermark based on direction stability of first principal component vector ..... Fu Jianjing, Wang Ke (756)

Stopping-time estimation for anisotropic diffusion using discrete wavelet transform ..... Jiang Ping, Zhang Jianzhou (770)

### Image Analysis and Recognition

Complex image line feature extraction based on improved Beamlet transform and the Canny operator  
..... Zeng Jiexian, Zhou Lili, Fu Xiang (775)

Gait recognition based on dynamic & static information fusion and dynamic bayesian network ..... Yang Qi, Xue Dingyu (783)

Fusing audio-words with visual features for adult video detection  
..... Liu Yizhi, Tang Sheng, Wang Xiangdong, Lin Shouxun, Zhang Yongdong (791)

Automatic measurement for an object's position and attitude via tracking planar regions  
..... Hui Bingwei, Wen Gongjian, Zhao Zhuxin, Zhong Jinrong (798)

Detection and extraction of boundary surface patches within 3D images ..... Ding Defu, Cheng Liuhang, Wang Lisheng (806)

Foreground object detection method using kernel density estimation of a local spatio-temporal model  
..... Wang Xingbao, Liu Chunping, Fei Lanying, Wang Zhaohui, Ji Yi (813)

Saliency detection method based on phase spectrum and amplitude spectrum tuning  
..... Li Chongfei, Gao Yinghui, Lu Kai, Qu Zhiguo (821)

### Image Understanding and Computer Vision

"Object-Scene" contextual associated generative graph model analysis ..... Xie Zhao, Li Shanqi, Gao Jun (828)

Structure recovery algorithm using contextual information ..... Wu Hui, Yu Xin, Sui Yao, Zhang Li (839)

Graph cut optical flow estimation with a local control factor ..... Lu Ziyun, Tang Tusheng, Gao Jun, Shen Lin, Liu Wei (846)

Improved algorithm for Harris rapid sub-pixel corners detection ..... He Haiqing, Huang Shengxiang (853)

### Computer Graphics

Research on point cloud segmentation using a minimum spanning tree ..... Sun Jinhu, Zhou Laishui, An Luling (858)

### Medical Image Processing

Virus-evolutionary discrete differential evolution algorithm for feature selection of cervical lymph nodes in ultrasound images  
..... Zhang Qiaorong, Zhu Changming, Ni Jun, Liu Haibo (866)

Liver image segmentation algorithm based on the Snake model And optimized by watershed transformation  
..... Lan Hong, Zhang Lu (873)

### Remote Sensing Image Processing

Endmember extraction for hyperspectral image based on normalized cut and watershed transformation  
..... Xu Han, Li Xiaojuan (880)

SAR image denoising via improved non-local means filter ..... Zheng Yongheng, Cheng Jian, Cao Zongjie (886)

中图分类号: TP391 文献标志码: 文章编号: 1006-8961 (2012)07-0756-14

论文引用格式: 付剑晶, 王珂. 基于第一主成分方向稳定性的图像零水印[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(7): 756-769.

## 基于第一主成分方向稳定性的图像零水印

付剑晶<sup>1,2</sup>, 王珂<sup>1</sup>

1. 浙江大学 遥感与信息技术应用研究所, 杭州 310058; 2. 浙江财经学院 信息技术学院, 杭州 310018

**摘要:** 针对灰度值攻击如亮度值的绝对修改、对比度改变、参数直方图均衡化, 以及组合攻击破坏数字图像水印, 利用第一主成分向量方向的稳定性, 提出了一种适应性很强的零水印方法, 解决了水印的不可见性与鲁棒性的矛盾。首先分析了第一主成分方向的稳定性, 接着通过实验测试它在空域与变换域的表现。在此基础上对输入图像执行多级 DT-CWT 分解, 选择它的两个低频子带并分别进行分块, 计算各子块的第一主成分向量; 然后分别计算它们与一个秘密参考向量的夹角; 最后比较两个低频子带对应子块的夹角关系抽取图像特征。此外对所提出的方案进行了安全性与鲁棒性分析。通过对 6 幅图像的 20 种单项攻击以及 50 种组合攻击进行实验, 结果表明所提出的方案在鲁棒性、经受攻击的广泛性、实用性 3 方面综合性能优越。

**关键词:** 图像水印; 灰度值攻击; 组合攻击; DT-CWT 变换; 零水印

## Image zero-watermark based on direction stability of first principal component vector

Fu Jianjing<sup>1,2</sup>, Wang Ke<sup>1</sup>

1. Institute of Remote Sensing and Information Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. School of Information Technology, Zhejiang University of Finances and Economics, Hangzhou 310018, China

**Abstract:** Image gray or intensity value attacks, including the absolute modification of gray values, contrast adjustment, parameter histogram equalization, and combined attacks can make many kinds of watermark detection approaches unsuccessful. Addressing these problems in this paper, a robust zero-watermark algorithm using the direction stability of the first principal component vector is proposed, which can effectively solve the conflict between invisibility and robustness. The direction stability of the first principal component vector is mathematically analyzed, and experiments are performed to observe the difference of the stability in the spatial domain and the frequency domain. On this basis, the input image is decomposed by the dual-tree complex wavelet transform (DT-CWT) and the output of the two low frequency bands is segmented into non-overlapping sub-blocks, respectively. After computing the first principal component vector for each sub-block, some vector angles between that of each sub-block and a secret reference vector can be obtained. By comparing the angles from two sub-blocks with the same position in the left and right low frequency bands, zero-watermark feature extraction is accomplished. In addition, we analyze the security and robustness for the proposed scheme. Sufficient experiments with six tested images, twenty kinds of common attacks and fifty kinds of combination attacks are carried out. Simulation results show the proposed scheme is superior in the comprehensive performance composed of robustness, withstanding diversity attack and practical application.

**Key words:** image watermark; gray value attack; combination attack; DT-CWT transform; zero watermark

收稿日期: 2011-10-20; 修回日期: 2011-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(30800703); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA10Z204)

第一作者简介: 付剑晶(1976—), 男, 副教授, 浙江大学遥感与信息技术专业博士研究生, 主要研究方向为软件保护、信息安全、遥感信息隐藏。E-mail: fjjsn@163.com

## 0 引言

近些年来,计算机与通讯网络的快速发展使得数字多媒体数据在互联网上广泛传播。由于互联网的开放特性,数据容易被复制、修改,甚至被黑客盗用,多媒体数据的版权保护就显得非常重要。数字水印技术被普遍认识是解决此问题的一种有效办法。此外,水印技术也广泛应用于数据隐藏<sup>[1]</sup>、生物医疗信号处理<sup>[2]</sup>、图像检索和广播监控<sup>[3]</sup>。数据发布前,可在其中嵌入一些额外的信息如所有者、版权或许可等;被嵌入的数据称为水印,被保护的数据称作宿主数据。一种好的水印算法必须满足视觉不可感知性与有损信号处理的鲁棒性。

水印算法一般分为空间域方法<sup>[4]</sup>和变换域方法。其中变换域方法一般是对变换系数值进行某种操作,不仅鲁棒性强,而且安全性高,其典型的变换包括:离散傅里叶变换(DFT)<sup>[5]</sup>、离散余弦变换(DCT)<sup>[6-7]</sup>、离散小波变换(DWT)及其变种<sup>[8-11]</sup>等。此外,有些变换也成功应用于水印领域,如 Hadamard 变换<sup>[12]</sup>、Randon 变换<sup>[13]</sup>与 Contourlet 变换<sup>[14]</sup>。在这些变换中,DCT 和 DWT 应用得较多,这主要是因为通常使用的图像压缩技术 JPEG 与 JPEG2000 是分别基于 DCT 和 DWT 技术的。与 DCT 相比,DWT 域的水印技术因没有分块痕迹(blocking artifacts),视觉质量更好<sup>[15]</sup>;而且综合考虑各种攻击,DWT 域水印算法的鲁棒性更强<sup>[16]</sup>。然而 DWT 的缺点是它不具有平移不变特性和方向选择特性,这影响了水印的鲁棒性和不可见性。Kingsbury<sup>[17]</sup>提出的双树复小波变换(DT-CWT)是一种冗余变换,具有平移不变性与方向选择特性,有利于实现水印的鲁棒性、不可见性,以及较高的数据容量;此外,文献[15,18-19]表明,基于 DT-CWT 域的水印技术对较低压缩因子的 JPEG 与 JPEG2000 压缩攻击有好的鲁棒性。上述事实给予我们启发,选择 DT-CWT 域,可能会同时实现较好的视觉质量与鲁棒性。

然而,传统的图像水印方案在水印嵌入过程中不可避免地要修改宿主数据,这导致图像数据失真,并或多或少地使视觉质量下降,这些方法在医疗影像和一些对精度有严格要求的数字产品的应用中受到限制。为了保持图像质量,文献[20-21]中提出了零水印技术,这种技术根据图像数据本身的特征来

产生水印,而不是嵌入水印数据,因此对原始数据是无损的。因此为了拓宽研究内容的应用范围,我们在 DT-CWT 域研究一种零水印技术。

本文选择第一主成分方向来构建零水印,出于以下考虑。对一幅给定的图像,将其划分成互不重叠相同尺寸的子块:1)在图像块经受无意或恶意的信号处理后,如果数据内容仍然有使用价值,说明图像的主要信息没有发生重大改变,因此可以认为图像块的第一主元素对应的方向在图像改变前后抖动不大。2)图像数据分块后,计算第一主元素方向的算法速度快、复杂度低。截至目前,很多关于主成分分析(PCA)的水印文献都是关注主成分数据的能量集中性,还没有人从第一主成分向量的方向(FPCD)的稳定性进行过水印研究。

## 1 相关工作和研究目标

关于数字图像水印的文献资料非常多,本节就近年来有关零水印的文献给出一些评述。研究相关水印文献的利弊旨在明确研究工作的方向。

### 1.1 相关工作

文献[20]在空域上提出了一种水印技术,通过比较图像块的方差与所有块方差均值来抽取零水印。杨树国等人<sup>[22]</sup>提出了一种基于小波系数检测法的零水印算法。该方法将选定的小波系数映射到一个数据区间,以此作为水印。算法对剪切、压缩、中值滤波有一定的抗攻击能力,也能抵制小于 $5^\circ$ 的旋转攻击;但经受不住常见的噪声和缩放攻击。李段等人<sup>[18]</sup>联合小波零树结构、主成分分析以及量化编码技术,提出了一种基于 DT-DWT 内的零水印方法。该方法对通常的攻击鲁棒性强,也能抗击缩放和小于 $5^\circ$ 的旋转攻击。Sang 等人<sup>[23]</sup>建立反向传播神经网络(BPNN),把随机选择的像素值与其邻域 8 个像素值通过 BPNN 产生的输出值作比较,以此作为特征抽取。此算法是基于空域的,除对噪声以外的常见的信号处理稳健性都较好。Tsai 等人<sup>[24]</sup>利用受训练的支持向量机(SVM)来记忆并恢复水印,并应用  $\alpha$ -裁剪均值( $\alpha$ -trimmed mean)方法提升水印的抗噪声能力,实验结果表明该方法对通常的图像比特正确率(BCR)高于 0.98,而且能抵制部分亮度值修改攻击如:变亮(+30)、变暗(-30)以及直方图均衡化(参数 64)。该方案鲁棒性强,但是 SVM 算法比

较复杂,而且计算的时空开销非常大。

此外, Hu 等人<sup>[25]</sup>提出用 K-L 变换消除像素相关性来建立信号子空间,在此基础上建立了一种抵制旋转攻击的水印算法。在小波域上文献[26-28]各自提出不同的方法来实现比较稳健的水印方案。其中,为了抵制旋转、尺度和平移(RST)的几何攻击,文献[26,29]引入了尺度不变特征变换(SIFT)来纠正几何失真。Yang 和 Meng<sup>[30]</sup>在 DCT 域根据图像块的 DC 与 DC 均值的关系抽取水印特征。文献[31-32]分别根据最大奇异值间的大小关系和奇偶性来获取水印特征,由于没有经过量化处理,方案对噪声很敏感。

通过对上述相关工作的评述,容易发现近年来出现的一些优秀零水印方案有以下特点:

- 1) 可承受的常用攻击范围较大<sup>[18,24,26]</sup>;
- 2) 能抵制一些组合攻击<sup>[18,26]</sup>;
- 3) 通过 RST 纠正增强方案的适应性<sup>[26,29]</sup>;
- 4) 对图像的某些程度的亮/暗调整、直方图均衡化有一定的鲁棒性<sup>[18,24]</sup>。

## 1.2 研究目标

研究工作的目标首先是要实现一种性能好、低计算开销的零水印方案。研究方案不但对较大范围的常用图像处理有较好的鲁棒性,而且对一些组合攻击也要有一定的抵制能力。随着图像数据的广泛应用,图像亮/暗的绝对调整与相对调整、对比度调整,以及参数直方图均衡化,这些灰度攻击都可能是将来出现的攻击方式。值得注意的是,在很多领域,图像经受这些攻击后仍有较好的使用价值。由于在以往的水印方案中,一些是没有仔细考虑过灰度攻击的实验,而更多的方案对此类攻击是失败的。因此,重点抵制这些攻击是主要研究内容。

抵制 RST 几何攻击能增强方案的适应性。目前许多 RST 自动纠正方案都是基于 SIFT,而这类方案需要保存大量的数据用来纠正失真的图像,这严重影响方案的实用性。此外对这类方案的改进如文献[26,29]虽然可以降低用以 RST 自动纠正时的数据存储量,但因 RST 自动纠正的引入将导致水印方案的计算复杂度偏高,仍可能影响到方案的推广。由于基于 SIFT 的 RST 自动纠正往往与水印算法本身无关,我们的方案也是如此,若要使本方案能自动探测 RST 失真,只需在提出的算法上直接加入相应的内容。因此本文不研究 RST 自动纠正功能,水印探测前需要人

工同步 RST 失真。

## 2 第一主成分方向的稳定性

第一主成分方向与 PCA 密切相关,是本文研究的重要内容。为更好地认识其实际意义,我们先简单回顾 PCA 理论。

PCA 也称为 K-L 变换,广泛应用在图像处理领域,是一种有效的数据降维技术,PCA 变换过程如下。设  $I$  表示一个  $m \times n$  的矩阵,其相关矩阵:  $Q = E[(I - \mu)(I - \mu)^T]$ ,其中  $E, \mu$  分别代表期望操作,矩阵  $I$  的均值。根据方程:  $QV = \lambda V$  计算矩阵  $Q$  的特征值  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$ ,以及对应的特征向量矩阵  $V = (v_1, v_2, \dots, v_p)$ 。其中  $V$  是正交矩阵,被称为 PCA 的基函数。而  $y_j = v_j^T I$  ( $j=1, 2, \dots, p$ ),表示矩阵  $I$  在单位向量  $v_j$  上的投影,即为主元。因此,  $y_1$  与  $v_1$  分别代表矩阵  $I$  的第一主成分和第一主成分向量;向量  $v_1$  的方向在本文称为第一主成分方向(FPCD),它表示矩阵  $I$  的数据在多维空间的主要分布方向。

FPCD 的稳定性可以从以下方面来分析:1) 如果对矩阵  $I$  施加较小的干扰后生成矩阵  $I'$ ,可以认为  $I$  与  $I'$  所包含的信息改变较小,再经 PCA 变换,第一主元  $y'_1$  相对于  $y_1$  抖动不大。由于  $y_j = v_j^T I$  ( $j=1, 2, \dots, p$ ),因而  $v_1$  的方向与  $v'_1$  的方向偏差很小。2) 把  $I_{m \times n}$  看做一个  $m$  维空间中的  $n$  个点,  $v_1$  则代表这  $n$  个点在  $m$  维空间的第一分布方向。对矩阵  $I$  施加较小的干扰可以看成对这些点在原来位置上按随机方向产生微小的位移,那么  $v'_1$  表示受干扰后  $n$  个点在  $m$  维空间的第一分布方向,而向量  $v'_1$  与  $v_1$  的夹角  $\theta$  一般很小。 $\theta$  值大小取决于干扰的强度与  $I$  中信息的集中程度。若干扰较小,那么  $v_1$  与  $v'_1$  差异也较小,而且如果  $I$  中信息分布不是很均匀,则  $\theta$  值将会非常小。这些分析能得到后面实验的支持。

为更好理解 FPCD 的稳定性,以 2 维空间为例来进一步解释。设有一系列 2 维点  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),其分布情况如图 1(a) 所示,经过 PCA 变换后,点集的第一主元方向  $v_1$  与第二主元方向  $v_2$  如图 1(b) 所示。图 1(c) 展示了  $x_i$  受到外界信号干扰(有意或无意的攻击)后产生的系列点  $x'_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 的分布。对  $x'_i$  进行 PCA 变换,其第一主元方向  $v'_1$  将围绕在干扰前的主元方向  $v_1$  周围较小地抖动,如图 1(d) 所示。

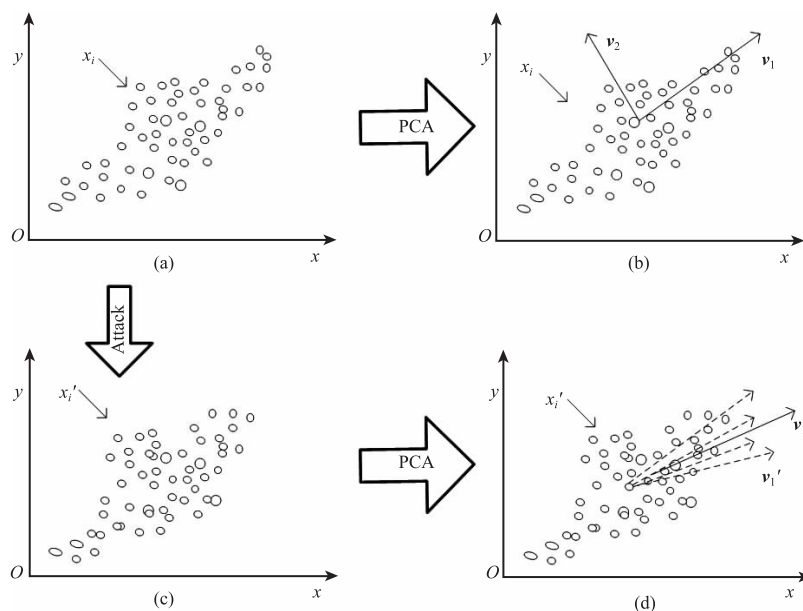


图1 理解 FPCD 的稳定性

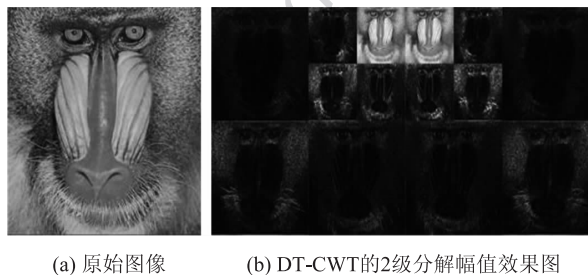
Fig. 1 Stability of the first principal component vector

### 3 DT-CWT

Kingsbury 提出的 DT-CWT<sup>[17,33-34]</sup> 具有近似平移不变性、良好的方向选择性、有限的冗余和计算的高效性特点,弥补了 DWT 的不足,能进一步提高水印算法的鲁棒性与不可见性。

与传统的复小波变换 (CWT) 不同的是,DT-CWT 使用两棵实小波滤波器树,分别构造复小波的实部与虚部,提供了较好的数据冗余以实现数据的超完备表示。Kingsbury 提出了 Q-Shift DT-CWT,克服了采样结构的轻微不对称,实现了较小的频率响应差异以及双正交过滤器组。

为实现 2 维 DT-CWT,可用两棵实小波滤波器树对 2 维数据先进行行滤波,再进行列滤波。图像经 2 维 DT-CWT 每级分解,可输出的 6 个高频子带,分别对应  $\pm 15^\circ, \pm 45^\circ, \pm 75^\circ$  方向,以及 2 个低频子带。如图 2 所示。



(a) 原始图像 (b) DT-CWT的2级分解幅值效果图

图2 baboon 图像

Fig. 2 The baboon image

### 4 FPCD 稳定性测试

第 3 节就 FPCD 的稳定性给出了理论分析,但在实际应用中 FPCD 的稳定性能达到如何程度,以及空域与变换域上 FPCD 的稳定性有哪些差别,本节进行相关测试,也为后续水印方案的设计提供实践支持。

#### 4.1 测试结果

以 Lena(512 × 512) 图像作为测试对象,随机选择 50 个整数作为测试图像块的编号存放在数组  $Bk[i]$  ( $1 \leq i \leq 50$ ) 中,且  $1 \leq Bk[i] \leq 256$ 。实验在 Matlab7.0 上执行。为仿真较小的图像干扰,设计如下 10 种攻击: 1) 未攻击; 2) 增亮( $[0,1] \rightarrow [0.4,1]$ ); 3) 直方图均衡化(64); 4) 均值滤波( $3 \times 3$ ); 5) 高斯噪声(0,0.002); 6) JPEG(80); 7) 缩放(1.8); 8) 缩放(0.7); 9) 椒盐噪声(0.002); 10) 乘积噪声(0.002)。

其中攻击 2 可表示为  $[n_1, n_2] \rightarrow [n_3, n_4]$  ( $0 \leq n_i \leq 1, i = 1, 2, 3, 4$ ), 用于 Matlab 函数  $imadjust(\cdot)$ 。此函数可以调节图像的对比度(亮度),即先把图像的亮度值归一化到  $[0,1]$  区间,然后把  $[n_1, n_2]$  范围的像素值映射到  $[n_3, n_4]$  区间。若像素值小于等于  $n_1$ ,则映射到  $n_3$ ; 若像

素值大于等于  $n_2$ , 则映射到  $n_4$ , 最后进行反归一化处理。

测试首先在空域上展开, 选择图像块尺寸为  $32 \times 32$ , 对所选图像块不进行任何数据变换。  $Bk[i]$  中每个图像块的 FPCD 在 10 种攻击前后形成的平均夹角如图 3(a) 所示。在变换域上, 先执行 3 级 DWT, 以  $Bk[i]$  中的编号作为测试图像块, 在低频系数中选择块尺寸为  $4 \times 4$ , 实验结果如图 3(b) 所示。此外, 对 lena 执行 3 级 DT-CWT, 在生成的两个低频子带中选择左侧的区域 ( $LL_1$ ), 设定块尺寸为  $4 \times 4$ , 以  $Bk[i]$  中的编号作为测试图像块, 结果如图 3(c) 所示。

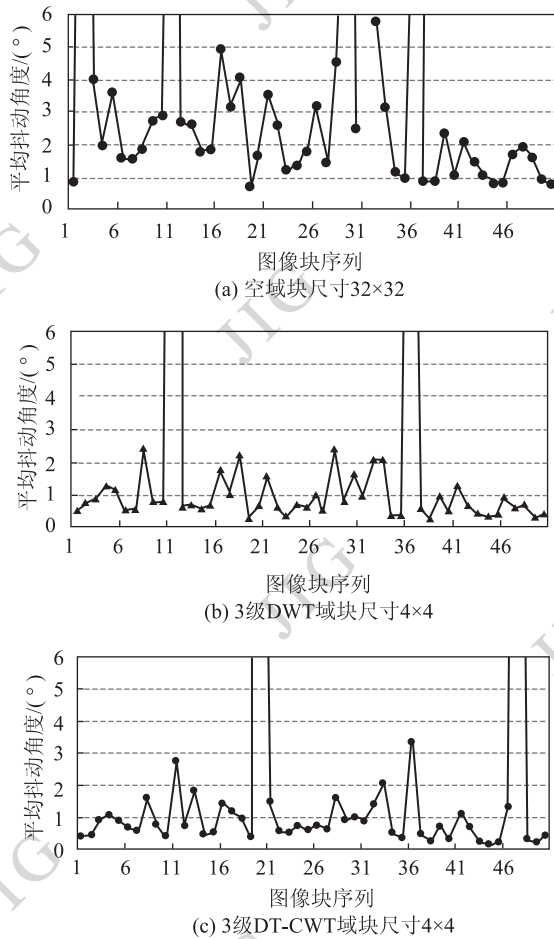


图3 10种攻击在不同的变换域对 FPCD 稳定性的影响  
Fig. 3 The stability of FPCD in different transformation domain under 10 kinds of attacks

为深入观察攻击对 FPCD 的影响, 表 1 列出了图 3(c) 中平均波动角度大于  $1.4^\circ$  的图像块详细测试数据。

### 4.2 评价

在空域不做任何数据变换的情况下, 面对 10 种

攻击, 88% 的图像块平均抖动角度小于  $5^\circ$ , 且其中大部分小于  $3^\circ$ , 如图 3(a) 所示; 在 DWT 域, 96% 的图像块平均抖动角度小于  $5^\circ$ , 且其中大部分小于  $2^\circ$ , 如图 3(b) 所示; 在 DT-CWT 域, 96% 的图像块平均抖动角度小于  $5^\circ$ , 其中大部分小于  $2^\circ$ , 如图 3(c) 所示。归纳图 3(a) — (c) 中节点的波动情况, 可以看出图像块的 FPCD 的稳定性在多种攻击下总体表现良好。

如果图像块在攻击后比较光滑或者纹理很均匀, 如图 3(a) — (c) 中少数波动较大的图像块, 图像的能量分布比较分散, 测试中 FPCD 的稳定性受干扰的影响相对较大。与空域测试相比, 变换域 FPCD 的稳定性明显更好。此外, DT-CWT 域上平均波动小于  $2^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 、 $0.3^\circ$  分别占: 90%、30%、10%; 而在 DWT 域上对应的数据分别为: 86%、20%、2%, 显然 DT-CWT 域上 FPCD 的稳定性略高于 DWT 域。

表 1 详细展示了图 3(c) 中平均波动大于  $1.4^\circ$  的 11 个图像块测试数据, 其中图像块 20、47 平均抖动角度较大, 分别为  $18^\circ$ 、 $41.64^\circ$ 。但是这两个图像块的 FPCD 的稳定性并不是对每种攻击都敏感, 从表 1 的第 5、11 行 (灰色背景) 的数据可以看出, 它们也只是对其中的一种或几种攻击敏感, 而对其他的攻击表现很稳定。综合 11 个图像块受 10 种攻击的 110 种情形, 其中波动小于等于  $5^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $1^\circ$  的分别占 80.9%、77.3%、70%、53.6%。由此可见, 在 DT-CWT 域上, 绝大多数测试图像块对给定的 10 种攻击, FPCD 的稳定性是非常好的。

## 5 水印方案

提出的零水印方案的主要思想是先对原始图像进行 DT-CWT 分解, 使能量集中在 2 个低频子带上。然后将生成的 2 个低频子带划分成互不交叉的图像子块, 计算每个子块的第一主成分向量。根据一个给定的参考向量产生二进制水印序列, 并对此序列置乱形成图像的原始版权签名。类似地, 在水印探测阶段可获得一个恢复的版权签名, 然后计算原始版权签名与恢复的版权签名的相关性, 并根据阈值来判断图像版权归属。图 4 给出了所提出水印方案的块图。

### 5.1 水印“嵌入”

设原始图像  $I$  的大小为  $m \times n$ , 水印“嵌入”算法

表1 平均波动角度大于1.4°的测试数据(3级DT-CWT)  
Table 1 The detailed test data of some image blocks with average dither angle greater than 1.4° in three-level DT-CWT domain

| ImBk | 10种攻击 |       |        |       |       |        |      |      |       |      | 平均    |
|------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|------|------|-------|------|-------|
|      | 1     | 2     | 3      | 4     | 5     | 6      | 7    | 8    | 9     | 10   |       |
| 8    | 0.00  | 2.22  | 6.69   | 0.27  | 1.61  | 0.81   | 0.20 | 0.06 | 1.77  | 2.15 | 1.58  |
| 11   | 0.00  | 0.45  | 1.55   | 0.36  | 10.48 | 0.85   | 0.23 | 0.11 | 7.69  | 5.92 | 2.76  |
| 13   | 0.00  | 2.59  | 1.75   | 6.24  | 4.69  | 0.51   | 0.24 | 0.49 | 1.35  | 0.32 | 1.82  |
| 16   | 0.00  | 0.57  | 7.42   | 0.46  | 2.58  | 0.87   | 0.08 | 0.09 | 1.17  | 1.84 | 1.51  |
| 20   | 0.00  | 0.87  | 173.08 | 0.34  | 1.56  | 0.71   | 0.04 | 0.04 | 0.11  | 3.30 | 18.00 |
| 21   | 0.00  | 0.88  | 7.81   | 1.02  | 3.05  | 0.34   | 0.06 | 0.05 | 0.74  | 1.00 | 1.50  |
| 28   | 0.00  | 0.48  | 8.01   | 2.00  | 1.12  | 0.30   | 0.09 | 0.14 | 1.65  | 2.99 | 1.68  |
| 32   | 0.00  | 0.06  | 4.19   | 0.05  | 6.17  | 0.55   | 0.03 | 0.09 | 0.38  | 2.67 | 1.42  |
| 33   | 0.00  | 0.28  | 16.43  | 0.46  | 1.46  | 0.36   | 0.07 | 0.09 | 0.97  | 1.50 | 2.16  |
| 36   | 0.00  | 1.09  | 10.45  | 0.86  | 5.95  | 1.62   | 0.28 | 0.37 | 5.15  | 8.66 | 3.44  |
| 47   | 0.00  | 23.06 | 52.76  | 48.58 | 32.87 | 164.89 | 1.41 | 1.89 | 88.39 | 2.54 | 41.64 |

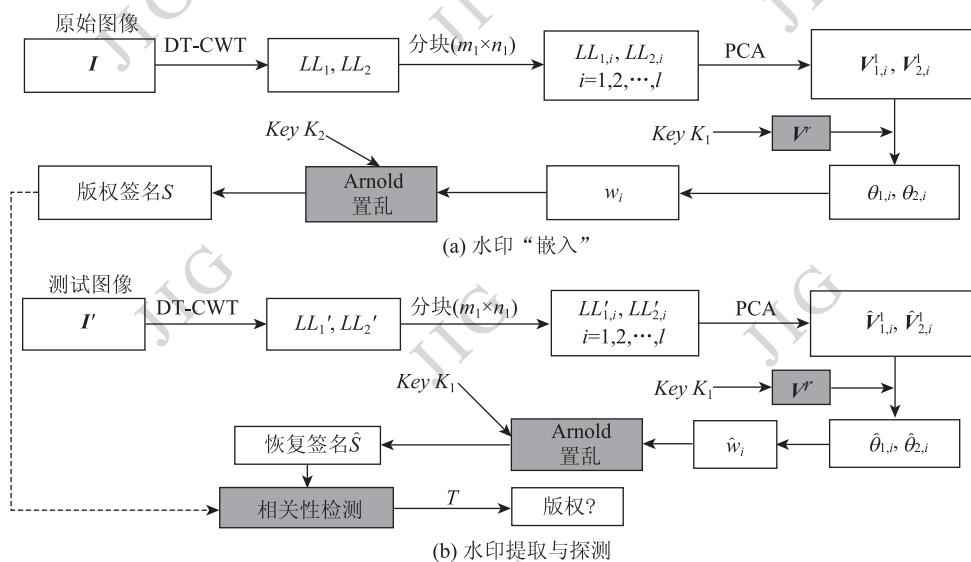


图4 水印方案块图

Fig.4 The scheme block diagram for watermark embedding and watermark detecting

归纳如下:

1) 对  $I$  执行  $k$  级 DT-CWT 分解,生成大小为  $(m/2^k) \times (n/2^k)$  的两个低频子带,分别表示为  $LL_1, LL_2$ 。由于这些子带的系数均为复数,为了便于计算,我们将这些复数系数替换成相应的幅度值。

2) 将  $LL_1, LL_2$  数据块划分为互不重叠的子块,设每个子块的大小为  $m_1 \times n_1 (m_1, n_1 \geq 4)$ 。 $LL_1, LL_2$  中

的子块分别表示为  $LL_{1,i}, LL_{2,i}$ , 其中  $i = 1, 2, \dots, l, l = \text{INT}(m/2^k / m_1) \times \text{INT}(n/2^k / n_1)$ ,  $\text{INT}(\cdot)$  代表取整操作。块尺寸大小可以调节,若尺寸太大,水印容量会变小;反之水印容量增大。

3) 对每个子块  $LL_{1,i}, LL_{2,i}$ , 根据 PCA 变换分别计算第一主成分向量  $V_{1,i}^1, V_{2,i}^1$ 。

4) 根据键值  $K_1$  随机建立一个维度为  $m_1$  的秘密参考向量  $V^r$ 。

5) 计算向量夹角。按式(1)计算  $V^r$  与  $V_{1,i}^1$ 、 $V^r$  与  $V_{2,i}^1$  的夹角, 分别表示为  $\theta_{1,i}$  和  $\theta_{2,i}$ 。

$$\cos(\theta) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) / (|\mathbf{a}| |\mathbf{b}|) \quad (1)$$

式中,  $\theta$  是任意非零向量  $\mathbf{a}$  和  $\mathbf{b}$  的夹角。

6) 生成二进制水印序列

$$w_i = \begin{cases} 1 & \theta_{1,i} \geq \theta_{2,i} \text{ and } |V_{1,i}^1| \neq 0 \text{ and} \\ & |V_{2,i}^1| \neq 0 \\ 0 & \theta_{1,i} < \theta_{2,i} \text{ and } |V_{1,i}^1| \neq 0 \text{ and} \\ & |V_{2,i}^1| \neq 0 \\ \text{no watermarking,} & |V_{1,i}^1| = 0 \text{ or} \\ & |V_{2,i}^1| = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $i = 1, 2, \dots, l$ 。

7) 对  $w_i$  执行以键值  $K_2$  为参数的 Arnold 置乱, 生成版权签名  $S$ 。

## 5.2 水印提取与检测

水印提取过程与水印“嵌入”过程一致, 提取过程所形成的签名用  $\hat{S}$  表示, 注意, 在提取过程中必须用到嵌入过程中的秘密键  $K_1$  与  $K_2$ , 否则得不到正确的签名。

用式(3)定义的比特正确率 (BCR) 来度量水印方案的性能。

$$\text{BCR}(S, \hat{S}) = 1 - \left( \sum_{i=1}^l S_i \oplus \hat{S}_i \right) / l \quad (3)$$

式中,  $\oplus$  代表 XOR 操作, 如果  $S$  与  $\hat{S}$  相同, 则 BCR 值等于 1, 否则趋向于 0。把检测到的 BCR 值与一个预先设置的阈值  $T$  比较, 如果被检测图像的 BCR 值不小于检测阈值  $T$ , 则证明存在水印。检测阈值  $T$  可以通过实验获得。在检测过程中, 关于阈值  $T$  存在虚警错误, 即对未嵌入水印的图像判断存在水印。虚警概率定义为

$$P_f = p(\text{BCR} \geq T | \text{no watermark}) \quad (4)$$

由于随机二进制序列与“嵌入”的序列  $w_i$  ( $i = 1, 2, \dots, l$ ) 每比特匹配的概率为 0.5, 则有

$$P_f = \sum_{m=T}^l (0.5^m \times C_l^m) \quad (5)$$

式中,  $T$  为检测阈值,  $m$  为匹配的比特数量,  $C_l^m$  为  $l$  与  $m$  形成的组合数。

## 5.3 安全性分析

本水印方案用到了 2 个秘密键值  $K_1$  与  $K_2$ , 大小均为 1 个字节, 以及版权签名  $S$ , 大小为  $l$  比特。其中  $S$  必须发送到认证中心注册, 作为版权检测的

依据。由于  $K_1$  用于随机生成  $m_1$  维的参考向量  $V^r$ , 若不知道  $K_1$ , 就得不到正确的  $V^r$ , 依据 6.1 节的内容, 攻击者因而不能执行针对性的水印攻击。 $K_2$  用于 Arnold 置乱次数参数, 若不能同时获得  $K_1$  与  $K_2$ , 私下建立的水印软件则不能生成正确的签名  $S$ 。所以本水印方案完全可以公开, 但  $K_1$ 、 $K_2$  必须安全保存。

## 5.4 鲁棒性分析

由于采用式(3)来评价方案的鲁棒性, 本节将从理论上对它进行分析, 对给定的攻击  $A$ , 估计方案的 BCR 数学期望, 即  $E(\text{BCR})$ 。BCR 值实际上是抽取的二进制水印序列与检测的二进制水印序列匹配的概率, 此外, 在两个序列中, 各比特匹配事件是相互独立的。为了简化分析, 我们假定在两个序列中各比特匹配概率相同, 因而  $E(\text{BCR})$  等于上述两个二进制序列中任意一比特匹配的概率。

分析前先作如下一些规定: 对图像  $I_{m \times n}$  执行  $k$  级 DT-CWT 分解, 生成大小为  $(m/2^k) \times (n/2^k)$  的两个低频子带分别表示为  $LL_1, LL_2$ , 且  $LL_1, LL_2$  中的复数系数替换成相应的幅度值。设  $LL_{1,i}$  表示  $LL_1$  中任意一个尺度为  $m_1 \times n_1$  的数据子块, 则其在  $LL_2$  中对应的子块表示为  $LL_{2,i}$ 。此外用  $\theta_{1,i}, \theta_{2,i}$  分别表示  $LL_{1,i}$  与  $LL_{2,i}$  的第一主成分向量与参考向量  $V^r$  的夹角, 由攻击  $A$  对图像  $I_{m \times n}$  施加抖动后, 对应的两个夹角分别表示为  $\alpha_{1,i}, \alpha_{2,i}$ 。根据 5.1 节提出的方案, 可以把鲁棒性分析的问题 (求  $E(\text{BCR})$ ) 转化为: 如果  $\theta_{1,i} \geq \theta_{2,i}$ , 求  $\alpha_{1,i} \geq \alpha_{2,i}$  的概率, 或如果  $\theta_{1,i} < \theta_{2,i}$ , 求  $\alpha_{1,i} < \alpha_{2,i}$  的概率。

假设  $LL_{1,i}$  或  $LL_{2,i}$  的第一主成分向量因攻击  $A$  平均波动角度小于  $\gamma$  度的概率为  $P_1$ 。通过实验测试,  $\gamma$  与  $P_1$  有多种选择; 由于第一主成分向量具有较好的稳定性, 我们建议在满足  $P_1 \geq 0.95$  时选择最小的  $\gamma$  值。

在  $\theta_{1,i} \geq \theta_{2,i}$  的前提下, 当  $\theta_{1,i} - \theta_{2,i} \geq 2\gamma$  时,  $\alpha_{1,i} \geq \alpha_{2,i}$  的概率为  $P_1$ ; 当  $\theta_{1,i} - \theta_{2,i} < 2\gamma$  时,  $\alpha_{1,i} \geq \alpha_{2,i}$  的概率为 0.5。由于  $\theta_{1,i} \in [0, 180]$ ,  $\theta_{2,i} \in [0, 180]$ , 则有  $\theta_{1,i} - \theta_{2,i} \in [0, 180]$ , 因此

$$P(\theta_{1,i} - \theta_{2,i} \geq 2\gamma) = 1 - 2\gamma/180,$$

$$P(\alpha_{1,i} \geq \alpha_{2,i}) = P(\alpha_{1,i} \geq \alpha_{2,i}) \times$$

$$P(\theta_{1,i} - \theta_{2,i} \geq 2\gamma) +$$

$$P(\alpha_{1,i} \geq \alpha_{2,i}) \times P(\theta_{1,i} - \theta_{2,i} < 2\gamma) =$$

$$P_1 \times (1 - 2\gamma/180) + 0.5 \times (2\gamma/180)$$

同理,在  $\theta_{2,i} > \theta_{1,i}$  的前提下也有一样的结果,即

$$P(\theta_{2,i} > \theta_{1,i}) = P_1 \times (1 - 2\gamma/180) + 0.5 \times (2\gamma/180)$$

归纳起来,图像  $I_{m \times n}$  针对攻击 A 的鲁棒性分析可表示为

$$E(\text{BCR}) = P_1 \times (1 - 2\gamma/180) + 0.5 \times 2\gamma/180 \quad (6)$$

以第4节的内容为例,对 Lena 图像,当  $k = 3$ ,  $m_1 = n_1 = 4$  时,基于4.1节的10种攻击有  $\gamma = 5$ ,  $P_1 = 0.96$ 。根据式(6),鲁棒性分析的理论值  $E(\text{BCR}) = 0.9344$ 。

## 6 实验结果

### 6.1 实验设置

整个实验在 Matlab 环境中进行,用到的6幅  $512 \times 512$  的灰度图像,如图5所示。水印的嵌入与提取采用3级 DT-CWT 分解,对低频子带的分块设

置为  $4 \times 4$ ,根据5.2节的方法建立的水印长度  $l = 256$  比特。为观察水印方案的鲁棒性,设计了一些图像处理来仿真攻击,如表2所示。其中的  $[n_1, n_2] \rightarrow [n_3, n_4]$  ( $0 \leq n_i \leq 1, i = 1, 2, 3, 4$ ) 表示对比度(亮度)值调整(参考4.1节)。图6给出了一些表2中的单项攻击和2种组合攻击的效果图。

### 6.2 水印检测阈值 T

按5.2节的方法,分别抽取图5中6幅测试图像的水印序列用于检测。表3中列出了其中任意2个水印序列的相关检测结果 BCR,其中最大值与最小值分别为0.5703、0.4336。此外,随机生成10000个长度  $l = 256$  的0-1序列与从 Lena 图像中抽取的水印进行相关检测,如图7所示,其中第5000个序列值为 Lena 的水印序列。检测的其他9999个 BCR 值中,最大值与最小值分别为0.6211、0.3789。因此对长度为  $l = 256$  的水印方案,本文设置水印检测  $T = 0.65$ ,根据式(5),此时的虚警概率  $P_f = 1.176 \times 10^{-6}$ 。

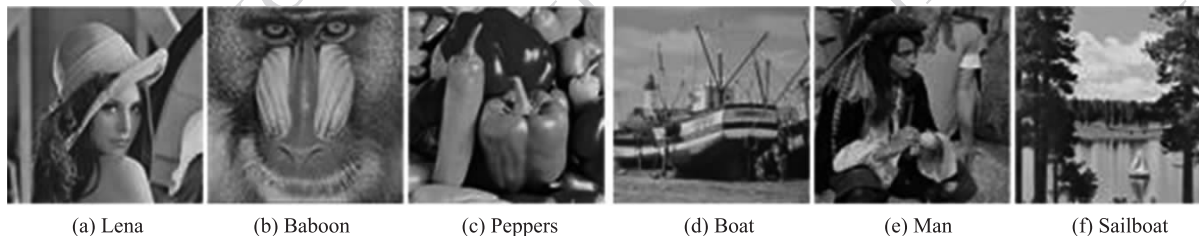


图5 测试图像

Fig.5 The tested objects

表2 用于仿真的图像攻击

Table 2 Attack simulations

| 编号 | 攻击                                      | 编号 | 攻击                        |
|----|-----------------------------------------|----|---------------------------|
| 1  | 绝对增亮 (+30)                              | 11 | 直方图均衡化 (64)               |
| 2  | 相对增亮: $[0,1] \rightarrow [0.4,1]$       | 12 | JPEG ( $Q = 30$ )         |
| 3  | 绝对变暗 (-30)                              | 13 | 等比缩放 ( $0.5 \times 0.5$ ) |
| 4  | 相对变暗 ( $[0,1] \rightarrow [0,0.8]$ )    | 14 | 等比缩放 ( $5 \times 5$ )     |
| 5  | 增加对比度 ( $[0.2,0.8] \rightarrow [0,1]$ ) | 15 | 变比缩放 ( $0.8 \times 1.8$ ) |
| 6  | 降低对比度 ( $[0,1] \rightarrow [0.2,0.8]$ ) | 16 | 均值滤波 ( $5 \times 5$ )     |
| 7  | 乘积性噪声 (0.005)                           | 17 | 中值滤波 ( $5 \times 5$ )     |
| 8  | 高斯噪声 (0.005)                            | 18 | 维纳滤波 ( $5 \times 5$ )     |
| 9  | 椒盐噪声 (0.005)                            | 19 | 随机行列删除 ( $5 \times 10$ )  |
| 10 | 旋转 $30^\circ$ (裁剪)                      | 20 | 周围剪切 (25%)                |



图 6 攻击效果图

Fig. 6 Some attacked effect images

表 3 测试图像的水印相关性

Table 3 BCR values between those tested objects

|          | Lena    | sailboat | baboon  |
|----------|---------|----------|---------|
| Lena     | 1       | 0.484 4  | 0.511 7 |
| sailboat | 0.484 4 | 1        | 0.433 6 |
| baboon   | 0.511 7 | 0.433 5  | 1       |
| peppers  | 0.480 5 | 0.433 6  | 0.484 4 |
| man      | 0.570 3 | 0.507 8  | 0.496 1 |
| boat     | 0.539 1 | 0.484 4  | 0.519 5 |
|          | peppers | man      | boat    |
| Lena     | 0.480 5 | 0.570 3  | 0.539 1 |
| sailboat | 0.433 6 | 0.507 8  | 0.484 4 |
| baboon   | 0.484 4 | 0.496 1  | 0.519 5 |
| peppers1 | 1       | 0.519 5  | 0.511 7 |
| man      | 0.519 5 | 1        | 0.484 4 |
| boat     | 0.511 7 | 0.484 4  | 1       |

### 6.3 鲁棒性实验

#### 6.3.1 普通攻击

对 6 幅测试图像分别执行表 2 中 20 项攻击实验,结果如表 4 所示。其中最大与最小的 BCR 分别

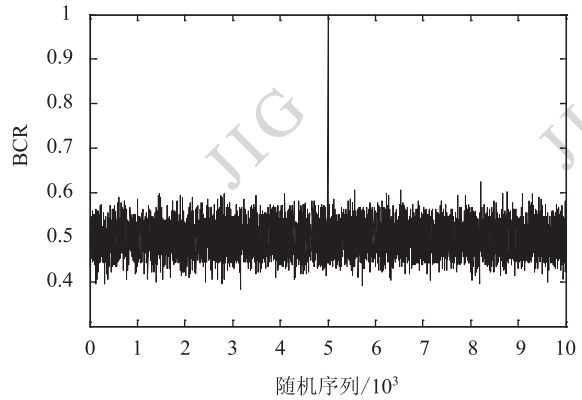


图 7 10 000 个随机水印的相关性检测

Fig. 7 BCR values between 10 000 random images and lena image

为 0.731、1.0(表 4 中阴影背景);落在区间  $[0.7, 0.8)$ 、 $[0.8, 0.9)$ 、 $[0.9, 0.95)$ 、 $[0.95, 1.0)$  的数据分别占 9.2%、31.7%、21.7%、37.4%。这表明所提出水印方案能承受较大范围的攻击,且性能良好。表 4 中的最后一行给出了测试图像针对每种攻击的平均 BCR 值,更详细的结果如图 8 所示。从图 8 中容易观察到,提出的方案对攻击 1~4(绝对/相

表 4 测试图像受不同攻击(表 2)的水印相关值(BCR)

Table 4 Performance of six tested images against attacks from the Table 2 (BCR)

| 图像   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Lena | 0.992 | 0.996 | 0.996 | 0.988 | 0.945 | 0.992 | 0.914 | 0.801 | 0.891 | 0.824 |
| Babo | 0.977 | 0.988 | 0.988 | 0.965 | 0.945 | 0.984 | 0.879 | 0.813 | 0.891 | 0.836 |
| Pepp | 0.957 | 0.984 | 0.996 | 0.906 | 0.828 | 0.961 | 0.926 | 0.867 | 0.902 | 0.832 |
| Boat | 0.973 | 0.992 | 0.988 | 0.922 | 0.898 | 0.969 | 0.824 | 0.758 | 0.816 | 0.820 |
| Man  | 0.926 | 0.965 | 0.996 | 0.883 | 0.848 | 0.934 | 0.949 | 0.895 | 0.941 | 0.844 |
| Sail | 0.977 | 0.981 | 0.988 | 0.934 | 0.777 | 0.988 | 0.848 | 0.773 | 0.856 | 0.836 |
| 平均   | 0.967 | 0.984 | 0.992 | 0.933 | 0.874 | 0.971 | 0.890 | 0.818 | 0.883 | 0.832 |
| 图像   | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
| Lena | 0.891 | 0.910 | 0.992 | 0.996 | 0.988 | 0.926 | 0.926 | 0.953 | 0.852 | 0.770 |
| Babo | 0.887 | 0.918 | 0.965 | 1.000 | 0.992 | 0.883 | 0.844 | 0.914 | 0.809 | 0.739 |
| Pepp | 0.902 | 0.926 | 0.988 | 0.992 | 1.000 | 0.926 | 0.941 | 0.961 | 0.863 | 0.731 |
| Boat | 0.828 | 0.840 | 0.988 | 0.988 | 1.000 | 0.863 | 0.859 | 0.906 | 0.777 | 0.746 |
| Man  | 0.879 | 0.934 | 0.981 | 0.984 | 1.000 | 0.898 | 0.906 | 0.957 | 0.836 | 0.770 |
| Sail | 0.828 | 0.848 | 0.977 | 0.977 | 0.977 | 0.910 | 0.867 | 0.926 | 0.789 | 0.762 |
| 平均   | 0.869 | 0.896 | 0.982 | 0.990 | 0.993 | 0.901 | 0.891 | 0.936 | 0.821 | 0.753 |

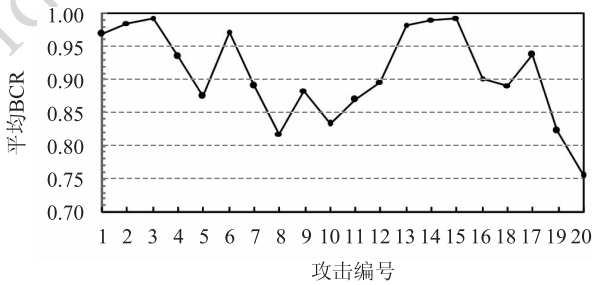


图 8 普通攻击的鲁棒性

Fig. 8 Average performance of the six tested images for the attacks

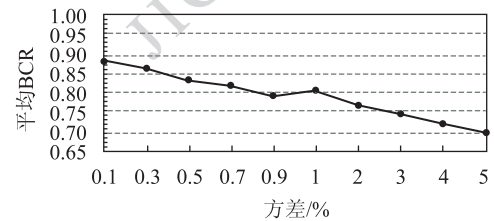
对亮度改变)、攻击 6(降低对比度)、攻击 13~15(等比/变比缩放)性能优越;对攻击 19(随机行列删除)、攻击 20(周围剪切)鲁棒性较好;对攻击 8(高斯噪声)相对敏感,但仍能正确地识别水印的存在,平均 BCR = 0.818 ( $T = 0.65$ )。

对噪声、旋转、尺度、压缩攻击,做了进一步的实验。图 9(a)展示了均值为 0,以方差为参数的高斯噪声攻击对水印性能的影响。即便当方差为 5% 时,依然能提取到水印(平均 BCR = 0.698)。旋转攻击的实验是在人工同步旋转角度后执行的。图 9(b)表明提出的水印方案总体性能较好,由于旋转后执行裁剪操作,丢失了信息,性能受到影响,平均 BCR 最小值为 0.83。当旋转角度为 90° 时,由于不用执行裁剪操作平均 BCR 达到 1.0。

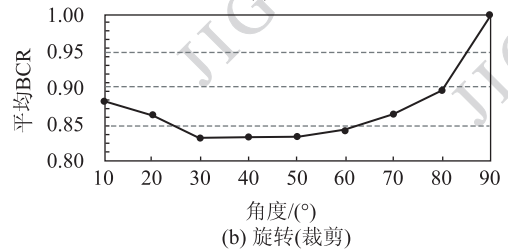
尺度攻击分等比缩放与变比缩放。从图 9(c)

容易观察到,方案对尺度攻击是比较稳健的,最小 BCR 值大于 0.94。在等比缩放中,尺度越小,调整尺度后图像失真增加;随着尺度增加,水印性能增加( $BCR \geq 0.98$ );对变比缩放( $0.8 \times 1.8, 2 \times 0.7$ ),平均 BCR 也高于 0.98。

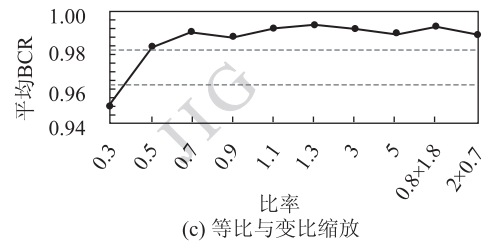
压缩是一种常用的图像处理操作,图 9(d)显示了以质量因子为参数的两种压缩操作(JPEG、JPEG2000)对水印性能的影响。总体上看,本方案对两种压缩是鲁棒的,当质量因子  $Q = 10$  时, JPEG 与 JPEG2000 的平均 BCR 分别为 0.84、0.81。对这两种压缩攻击,本方案表现的性能相当。



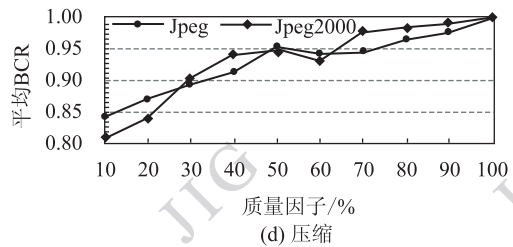
(a) 高斯噪声



(b) 旋转(裁剪)



(c) 等比与变比缩放



(d) 压缩

图 9 鲁棒性实验

Fig. 9 Watermark performance for noise, rotation, scaling and compression attacks

### 6.3.2 灰度攻击

众所周知,没有一种水印方案能抵制所有的攻击,但是水印方案能抵制的攻击范围是越广越好。目前大多数图像水印研究测试都集中在普通的攻击上,

然而很多图像在亮度值的绝对改变、相对改变(对比度调整)、参数直方图均衡化后仍有较好的使用价值,接下来要对这些攻击进行实验测试,如图 10 所示。

图像在亮度值的绝对改变是对图像的所有像素值增加或减小一个整数常量,使图像整体变亮或变暗,攻击效果如图 11(a)所示,其中参数为 0 的图像

代表原始图像。所提出的方案对这种攻击是稳健的,如图 10(a)所示,当修改常数为 -60 时,水印亦可准确探测到,平均  $BCR = 0.861$ 。实验中图像亮度值的相对改变是通过调用 Matlab 函数  $imadjust(\cdot)$  实现的(参见 4.1 节)。把原始图像从  $[0,1]$  映射到  $[0,x]$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) 实现图像的相对变暗,效果如图 11(b)所

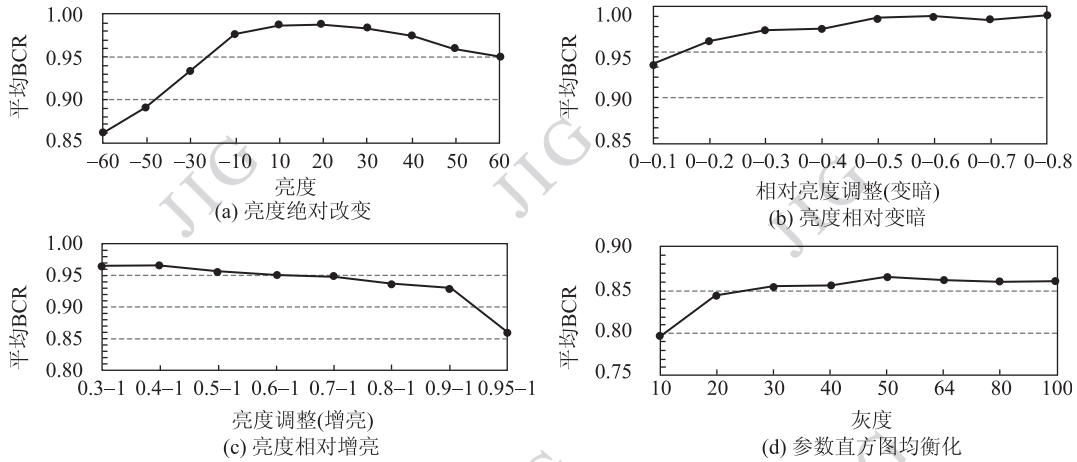


图 10 特殊攻击性能

Fig. 10 Watermark performance for brightness absolute modification, brightness relative modification and parameter histogram equalization

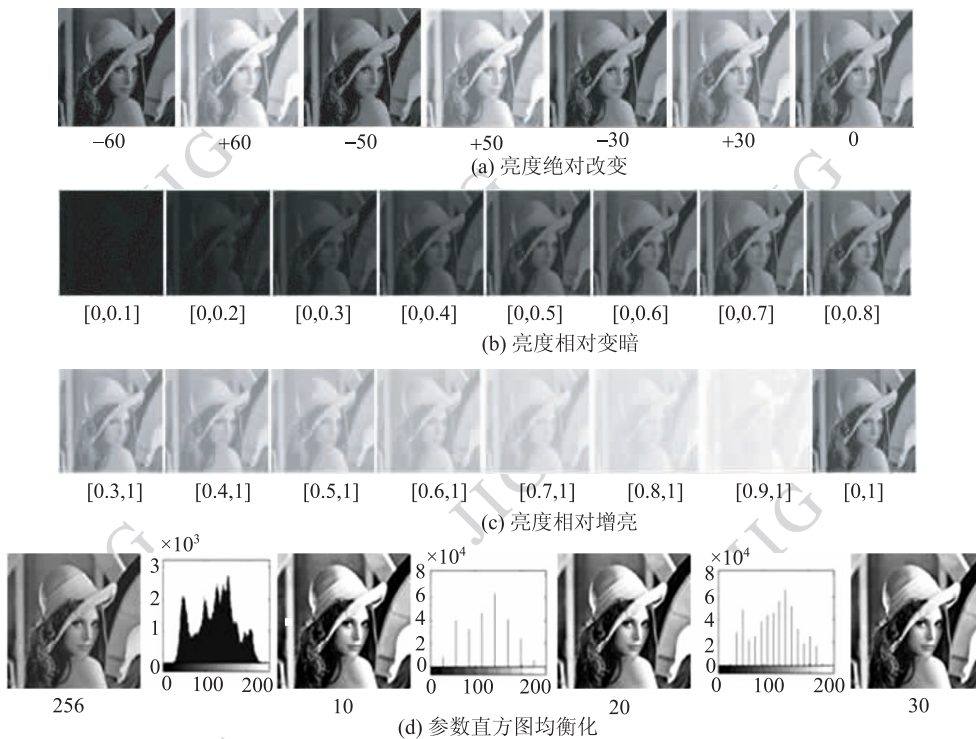


图 11 部分特殊攻击效果图

Fig. 11 Some special attacked effect images for brightness absolute modification, brightness relative modification and parameter histogram equalization

示;类似地,原始图像从 $[0,1]$ 映射到 $[x,1]$  ( $0 \leq x \leq 1$ )实现图像的相对变亮,效果如图11(c)所示,其中参数为 $[0,1]$ 的图像代表原始图像。对此类攻击,本方案是很稳健的,性能如图10(b)(c)所示。注意,受此类攻击后,在肉眼都难以识别的情形下图11(b) $[0,0.1]$ 与图11(c) $[0.9,1]$ ,对应的平均BCR高达0.938与0.927。

很多水印方案在考虑直方图均衡化攻击时一般只考虑灰度级为64的情况,然而一些图像均衡化为更低的灰度级后使用价值仍然较好。如图11(d)所示,均衡化后灰度级分别为10、20、30的图像与灰度级为256的原图虽然有区别,但使用价值影响不大。提出的方案对此类攻击比较稳定,而且性能较好,平均BCR随着灰度级的变化在0.85左右微小摆动,

如图10(d)所示。

### 6.3.3 组合攻击

从表2的20项单种攻击中随机选取3种攻击构成一个组合攻击,实验时随机生成50个这样的组合攻击,对图5中的6幅图像进行了测试,结果如图12所示。其中任意两个组合攻击互不相同,而且每个组合攻击内的3种单项攻击也互不同。

图12中的第1项组合攻击“8+12+16”表示顺序执行图像操作:8-高斯噪声(0.005)、12-JPEG( $Q=30$ )、16-均值滤波( $5 \times 5$ )。实验后,平均BCR最大值、最小值分别为0.967、0.731;50个组合攻击中平均BCR值高于0.75、0.8、0.85的比例分别为96%、68%、32%。由此可知所提出的方案对一般的组合攻击具有较好的稳健性。

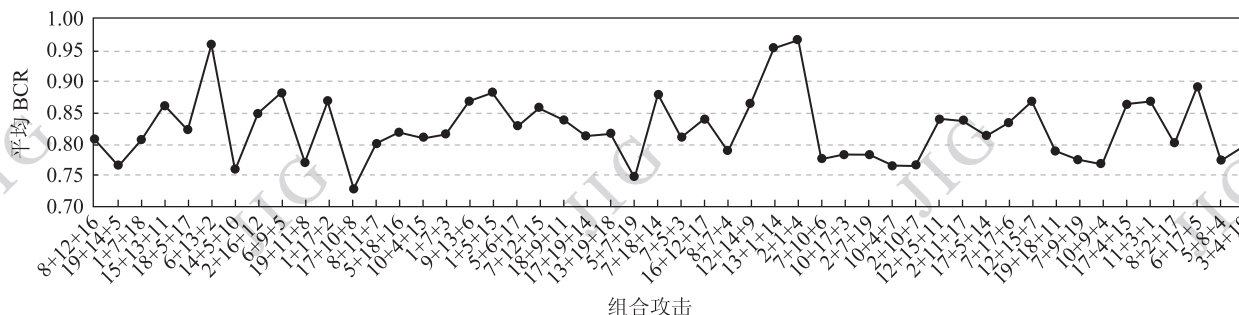


图12 组合攻击的性能(从表2中随机选取的3项攻击)

Fig. 12 The performance of combination attacks with three attacks selected randomly from table 2

## 7 相关方案比较

文献[23]在空域按一定策略选取一些像素,以选定的像素周围 $3 \times 3$ 邻域的8个像素作为BPNN的输入并产生一个输出值;通过比较选定的像素与BPNN输出值的大小抽取零水印。对Lena ( $512 \times 512$ )图像执行实验,本方案与文献[23]中的6类攻击作如下比较:1-JPEG( $Q=10$ )(本方案为0.8359,文献[23]为0.9302)、2-高斯噪声(0.005)(0.8438,0.7676)、3-中值滤波( $7 \times 7$ )(0.9217,0.9346)、4-缩放( $0.8 \times 0.8$ )(0.9922,0.9414)、4-缩放( $1.2 \times 1.2$ )(0.9961,0.9404)、5-旋转(10)(0.8906,0.9108)、6-裁剪(10%)(0.9017,0.9160)。通过比较,可以发现,本方案在高斯噪声,缩放攻击上比文献[23]更稳健;两种方案在中值滤波、旋转、裁剪上的性能相当;在JPEG压缩攻击上本方案性能要低一点。

对6幅图像的20种攻击(见表2)进行全面实

验,性能总体良好;而文献[23]全文只考虑了上面提及的6类攻击,而其实验只是正对Lena图像进行的。由于BPNN模型不能确保泛化能力,如果把文献[23]中对Lena建立的BPNN模型应用在其他图像的水印探测上,性能会受到影响;如果对每幅带保护的图像都要建立BPNN模型,文献[23]将不实用。总体上讲本方案实用性更强。

文献[24]提出了一种基于 $\alpha$ -裁剪均值和SVM的零水印算法。该算法利用 $\alpha$ -裁剪均值去除噪声,并用受训练的支持向量机(TSVM)来记忆并恢复水印;文中考虑16种攻击,实验结果表明,该方案对每种攻击的BCR值都高于0.98。据查,单从鲁棒性上讲,该方案是近些年来图像水印方案中最优秀的。

与本文方案相比,两种方案在亮度的绝对对改变( $\pm 30$ )、直方图均衡化(64)、等比缩放上性能相当;除此外的单项攻击,文献[24]的鲁棒性总体优于本方案。

但是,与文献[24]相比,本方案的优势在于:

1) 能承受更大范围的攻击,对参数直方图攻击、亮度值的相对改变、JPEG2000 攻击以及组合攻击,本方案性能良好,而文献[24]对这些攻击未提及。

2) 水印性能 BCR 的优越性是相对于水印检测阈值  $T$  而言的,而文献[24]未讨论  $T$ 。

3) 文献[24]算法的复杂度远高于本方案。

4) 本方案实用性很强。理论上讲 SVM 模型有较好的泛化能力,而文献[24]实验中的 6 幅原始图像是共同使用其中一幅图像的 TSVM,还是原始图像与 TSVM 的一一对应,文中未说明。SVM 模型的实际泛化情况对方案的实用性影响很大。

## 8 讨 论

实验结果表明本方案的价值在于:1) 能承受较大范围的普通图像攻击,且性能良好;2) 目前大多数方案未提及对参数直方图,亮度值的绝对/相对改变攻击的性能,对此类灰度攻击本算法表现出较好、较稳定的性能;3) 对由 3 项普通攻击形成的组合攻击,能致使目前的许多方案探测失败,而本方案是比较稳健的;4) 本算法计算复杂度低。

在本文考虑的 20 项攻击(表 2)中,相比之下,算法对噪声攻击相对敏感。随着噪声强度的增加,第一主成分的分布方向改变较大,尤其对光滑的测试块 FPCD 抖动更大。与乘积性噪声、椒盐噪声相比,高斯噪声对性能的影响更大,随着参数方差从 0.1% 降到 5%,平均 BCR 从 0.884 降到 0.698(检测阈值  $T=0.65$ )。

DT-CWT 的分解级别  $k$ 、分块尺寸  $m_1 \times n_1$  以及阈值  $T$  对方案的实际应用有些影响。对  $k=2,3$ ;  $m_1=n_1=3,4,5,6,7,8$ ,这 12 种组合情况进行了测试,发现 BCR 值与这两个参数是正相关的,但同时水印容量在减小且检测阈值  $T$  在增加。参数  $k=2, m_1=n_1=8$  与  $k=3, m_1=n_1=4$  的方案的整体性能相当,但后者抗噪声能力较好。所以如何最优地使用本方案,要根据原始待保护图像的大小,在  $k, m_1(n_1), T$  间折中选择。

## 9 结 论

根据第一主成分方向的稳定性提出一种零水印方案。由于水印是通过抽取原始图像的特征信息而不是嵌入数据来建立的,图像的视觉质量在水印建立

的前后保持不变。在 DT-CWT 域分块计算既增强了第一主成分向量的稳定性,也降低了计算开销。第一主成分方向的实际意义能说明方案的适用性广,这点得到了实验的证实。此外,本方案能承受较大范围的攻击,对多样的组合攻击、灰度值攻击(亮度值的绝对/相对修改、参数直方图均衡化)表现出较好的稳定的性能。分析与实验测试表明,在鲁棒性、经受攻击的广泛性、实用性方面,本文综合性能优越,适用于普通图像、遥感与医疗影像、艺术图像的版权保护。

## 参考文献(References)

- [1] Campisi P, Carli M, Giunta G et al. Blind quality assessment for multimedia communications using tracing watermarking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing 2003, 51(4):996-1002.
- [2] Ni Z, Shi, Y Q, Ansari N, Su W. Reversible data hiding [J]. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol, 2006, 16(3):354-362.
- [3] Coatrieux G, Lecornu L, Sankur B, et al. A review of image watermarking applications in healthcare [C]// Proceedings of the 28th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Washington, DC, United States: IEEE Computer Society, 2006:4691-4694.
- [4] Malvar H S, Florencio D A F. Improved spread spectrum watermarking: a new modulation technique for robust watermarking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(3):898-905.
- [5] Ruanaidh J O, Pun T. Rotation, scale and translation invariant digital image watermarking [C]// Proceedings of the ICIP 1. Washington DC: IEEE Computer Society 1997:536-539.
- [6] Li Q, Cox I J. Using perceptual models to improve fidelity and provides resistance to valumetric scaling for quantization index modulation watermarking [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2007, 2(2):127-139.
- [7] Chang C C, Lin C S, Tseng W L. Reversible hiding in DCT-based compressed images [J]. Information Sciences, 2007, 177(13):2768-2786.
- [8] Lin T C, Lin C M. Wavelet-based copyright-protection scheme for digital images based on local features [J]. Information Sciences, 2009, 179(19):3349-3358.
- [9] Paquet A H, Ward R K, Pitas I. Wavelet packet-based digital watermarking for image verification and authentication [J]. Signal Processing, 2003, 83(5):2117-2132.
- [10] Selesnick I W, Baraniuk R G, Kingsbury N G. The dual-tree complex wavelet transform [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(6):123-151.
- [11] Aslantas V, Dogan A, Ozturk S. DWT-SVD based image watermarking using particle swarm optimizer [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Washington,

- DC, United States: IEEE Computer Society, 2008: 241-244.
- [12] Santi P M, Malay K K. Perceptually adaptive spread transform image watermarking scheme using Hadamard transform [J]. *Information Sciences*, 2011, 181(3): 450-465.
- [13] Kim H S, Baek Y, Lee H K, et al. Robust image watermark using radon transform and bispectrum invariants [J]. *Lect. Notes Comput. Sci.*, 2002, 2578: 145-159.
- [14] Zhao X, Ke W, Qiao X H. A Novel Watermarking Scheme in Contourlet Domain Based on Independent Component Analysis [C]// *Proceedings of 2006 International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*. California, USA: IEEE Computer Society, 2006: 59-62.
- [15] Mabtoul S, Elhaj E H I, Aboutajdine D. A robust digital image watermarking method using Dual Tree Complex Wavelet Transform [C]// *13th IEEE Symposium on Computers and Communications*. Marrakech, Morocco, United States: IEEE Computer Society, 2008: 1000-1004.
- [16] XU J. Research on the comparison and analysis of watermarking based on DCT and DWT [J]. *Journal of Nantong Vocational & Technical Shipping College*, 2009, 8(3): 75-78. [许郡. 基于DCT与DWT的水印算法的比较分析, 南通航运职业技术学院学报, 2009, 8(3): 75-78.]
- [17] Selesnick I W, Baraniuk R G, Kingsbury N C. The Dual-Tree complex wavelet transform [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, 22(6): 123-151.
- [18] Li D, Xu G. An image zero-watermarking algorithm in DT-CWT domain [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(5): 725-729. [李段, 徐刚. 一种DT-CWT域内的图像零水印算法 [J], 中国图象图形学报, 2006, 11(5): 725-729.]
- [19] Lan H X, Chen S Q, Li T S. A digital watermarking algorithm based on dual-tree complex wavelet transform [C]// *Proceedings of the 9th International Conference for Young Computer Scientists*. Hunan, China: IEEE Computer Society, 2008: 1488-1492.
- [20] Chang C, Hwang K, Hwang M. A block based digital watermarks for copy protection of images [C]// *Proceedings of 5th Asia-Pacific Conf. Commun.* United States: IEEE Computer Society, 1999: 977-980.
- [21] Wen Q, Sun T, Wang S. Concept and application of zero watermark [J]. *Acta Electron*, 2003, 31(2): 214-216.
- [22] Yang S G, Li C X, Sun F, et al. Study on the method of image non-watermark in DWT domain [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8A(6): 664-669. [杨树国, 李春霞, 孙枫, 等. 小波域内图像零水印技术的研究 [J]. 中国图象图形学报, 2003, 8A(6): 664-669.]
- [23] Sang J, Feng L X, Alam M S. Neural-network-based zero-watermark scheme for digital images [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(9): 664-669.
- [24] Tsai H H, Tseng H C, Lai Y S. Robust lossless image watermarking based on alpha-trimmed mean algorithm and support vector machine [J]. *Journal of Systems and Software*, 2010, 83(6): 1015-1028.
- [25] Hu Y F, Zhu S A, Zhang D W. A novel zero-watermark algorithm in image subspace domain [C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Control and Automation*. Guangzhou, China: IEEE Computer Society, 2007: 2744-2748.
- [26] Li J, Zhang Y D, Chen G Y. Zero-watermarking for copyright protection of remote sensing image [C]// *Proceedings of the 9th International Conference on Signal Processing*. Beijing, China: IEEE Computer Society, 2008: 1083-1086.
- [27] Ma J H, Gang Y J, Zhao Y H. A method of zero-watermark based on lifting wavelet [C]// *Proceedings of the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*. Beijing, China: IEEE Computer Society, 2007: 239-243.
- [28] Tang X N, Wang J C, Zhang C B, et al. A fast and low complexity zero-watermarking based on average subimage in multi-wavelet domain [C]// *Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication*. Wuhan, China: IEEE Computer Society, 2010: 2178-2182.
- [29] Li J Z. Robust image watermarking scheme against geometric attacks using a computer-generated hologram [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(32): 6302-6312.
- [30] Yang W M, Meng L M. A zeros-watermarking algorithm based on chaotic system and DCT [C]// *Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications*. Wuhan, China: IEEE Computer Society, 2009: 71-74.
- [31] Feng W G, Liu L. SVD and DWT zero-bit watermarking algorithm [C]// *Proceedings of the 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. Wuhan, China: IEEE Computer Society, 2010: 361-364.
- [32] Ye Y T, Ma Z F, Niu X X, et al. A robust zero-watermark algorithm based on singular value decomposition for digital right management [C]// *Proceedings of the 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing*. Tianjin, China: IEEE Computer Society, 2009: 437-443.
- [33] Kingsbury N C. The dual-tree complex wavelet transform: a new efficient tool for image restoration and enhancement [C]// *Proc. EUSIPCO'98*. Greece: Rhodes, 1998: 319-322.
- [34] Kingsbury N C. The dual-tree complex wavelet transform with improved orthogonality and symmetry properties [J]. *International Conference on Image Processing*, 2000, 2(13): 375-378.