

文章编号: 0253-2239(2008)08-1469-06

基于非抽样 Contourlet 变换的彩色图像数字水印算法

梁 栋^{1,2} 殷 兵^{1*} 于 梅¹ 李新华² 王 年^{1,2}

(¹ 安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039; ² 安徽大学电子科学与技术学院, 安徽 合肥 230039)

摘要 研究了小波变换和 Contourlet 变换的不足, 利用非抽样 Contourlet 变换的多尺度性、多方向性以及平移不变性特征进行彩色图像数字水印。先对图像进行非抽样 Contourlet 变换得到不同尺度不同方向上的系数, 然后为了满足水印的不可见性和稳健性, 在低频系数和低频系数中采用不同的嵌入强度, 并依据人类视觉的彩色感知特性, 在蓝色分量中嵌入较多水印, 在其他颜色分量选取变换系数能量最大的区域嵌入水印。与同样嵌入规则的 Contourlet 变换算法和平稳小波变换算法相比, 该算法具有更好的稳健性, 利用该算法得到的水印相似度更高, 最高可提高约 0.5。

关键词 信息安全; 数字水印; 非抽样 Contourlet 变换; 彩色图像

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082808.1469

An Algorithm for Color Image Digital Watermarking Using the Nonsubsampled Contourlet Transform

Liang Dong^{1,2} Yin Bing¹ Yu Mei¹ Li Xinhua² Wang Nian^{1,2}

(¹ Key Laboratory of IC&SP of Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China)
(² School of Electronic Science and Technology, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China)

Abstract The disadvantages of wavelet transform and contourlet transform are studied. Color image digital watermarking is implemented based on the multi-scale, multi-direction, and shift-invariance of the nonsubsampled transform. The coefficients in different scales and directions are obtained by image decomposition using the nonsubsampled contourlet transform. Embedding intensities of the low and high frequency coefficients are different invisibility and robustness of watermark requirements for according to the color perception characteristics of human visual system, watermark embedded in blue channel is more than the others, which only choose the local of maximal energy to embed. Compared with the algorithms of stationary wavelet transform and contourlet transform under the same embedding rule, this algorithm is more robust, with higher similarity which can be improved by 0.5 at most.

Key words information security; digital watermarking; nonsubsampled contourlet transform; color image

1 引 言

数字水印技术是将代表数字媒体著作权人身份的特定信息、用户指定的标志或序列码等, 按照某种方式嵌入被保护的信息中, 在产生版权纠纷时, 能够及时地把水印检测或提取出来, 从而验证版权归属。水印可以是图像、声音、文字、符号、数字等一切可以作为标记的信息。对数字水印技术的要求包括不可见性、稳健性、可检测性和通用性等, 其中不可

见性和稳健性是一对相互矛盾的要求。

近年来, 图像数字水印的算法不断增多^[1,2]。图像的水印技术根据水印的嵌入方式可分为两类: 空域算法和变换域算法。空域算法在空域中直接对图像采样点的幅度值作改变, 从而嵌入水印信息, 速度快、易实现, 但抗攻击能力差。变换域算法是将图像作某种变换后, 用水印信息对变换域中的系数作改变。变换域算法通常具有很好的稳健性, 常用的

收稿日期: 2007-12-20; 收到修改稿日期: 2008-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(60772121)、安徽省自然科学基金(070412065)、安徽省高等学校自然科学研究项目(2005KJ005ZD)和安徽大学 211 工程学术创新团队资助课题。

作者简介: 梁 栋(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机视觉、图像处理、模式识别等方面的研究。

E-mail: dliang@ahu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yinbing02@ahu.edu.cn

主要是采用离散余弦变换(DCT)和离散小波变换(DWT)。DWT域图像水印较DCT域图像水印更有优越之处。

但是二维可分离小波变换只具有水平、垂直、对角三个方向,方向性和各项异性上的缺陷使小波变换不能充分利用图像本身的几何正则性,因而不能很好地表示图像中的方向信息^[3,4]。2002年,Do等^[5]提出了一种“真正”二维图像表示方法Contourlet变换:一种多尺度的、局部的、方向性的二维图像分析方法。Contourlet变换是由塔形方向滤波器组(PDFB)把图像分解成各个尺度上的方向子带,它有两个步骤实现:拉普拉斯分解(LP)实现子带分解、方向性滤波器组(DFB)实现方向性变换。但是由于下采样过程的存在,Contourlet变换缺乏平移不变性,图像处理后在边缘处会产生伪Gibbs失真^[6]。2006年,Cunha等^[7,8]提出了非抽样Contourlet变换,它既具有Contourlet变换的优点,又具有平移不变性,因而可以有效地解决伪Gibbs失真这个问题。鉴于非抽样Contourlet变换多尺度性、多方向性以及平移不变性的优点,本文提出了一种基于非抽样Contourlet变换的彩色图像数字水印算法,在低频和高频系数中选用不同的嵌入强度,并利用人类的视觉特性在蓝色分量嵌入较多水

印,在其他分量选取变换系数的最大能量区域进行嵌入。实验证明了所提算法的稳健性。

2 非抽样 Contourlet 变换

非抽样 Contourlet 变换(Nonsubsampled contourlet transform, NSCT)的结构如图 1 所示,首先由非抽样塔状滤波器(Nonsubsampled pyramid, NSP)将图像分解为低频部分和高频部分,然后由非抽样方向性滤波器组(Nonsubsampled directional filter banks, NSDFB)将高频部分分解为若干个方向。

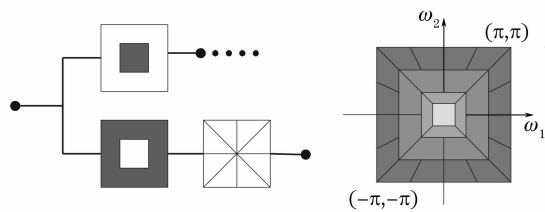


图 1 非抽样 Contourlet 变换示意图

Fig. 1 Schemamtic of nonsubsampled contourlet transform

NSP 的结构类似于用 à trous 算法设计的非抽样小波变换。与 Contourlet 变换中的 LP 变换不同,不存在下采样过程,而是将滤波器进行上 2 采样后作为下一级滤波器。这样可以避免图像因采样而导致的像素之间的错位,从而满足平移不变性。图 2 是双通道塔形滤波器三级分解过程和频域分解示意图。

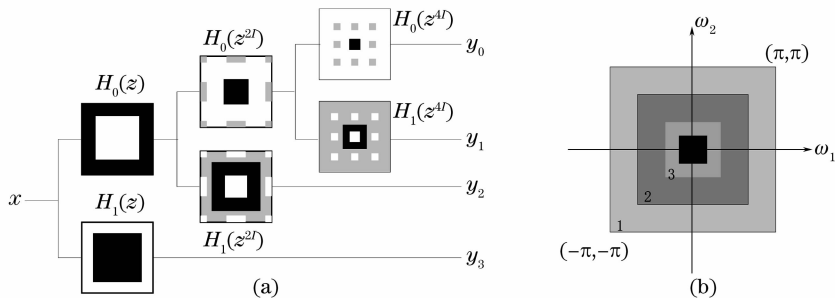


图 2 双通道塔形滤波器三级分解和频域分解示意图

Fig. 2 Three-stage decomposition of two-channel pyramid filter and two-dimensional frequency plane of NSP

非抽样 Contourlet 变换第二部分为非抽样方向性滤波器组 NSDFB,与 DFB 类似,NSDFB 也是将图像频谱分解成不同方向的楔形区域,但是 NSDFB 只对各个滤波器进行上采样,这样就得到非下采样滤波器。

图 3(a)显示了两级树结构的四通道 NSDFB 的分解结构(图中黑色部分表示允许频率通过部分)。第二级是上抽样的扇形滤波器 $U_i(z^2)$, $i=0,1$ 具有

方格状通频带,结合第一级滤波器实现四个方向频率分解。从数学上看,NSDFB 分解是将信号在一组基函数上展开,对应的基函数之间是冗余的,这样变换对信号移动就具有平移不变性,能更准确地捕获图像中的几何结构信息。它可以将第一级变换得到的高频部分分解为 2 的任意次幂个方向,每个方向上的高频部分和 NSP 得到的低频部分以及原始图像都具有相同的大小。

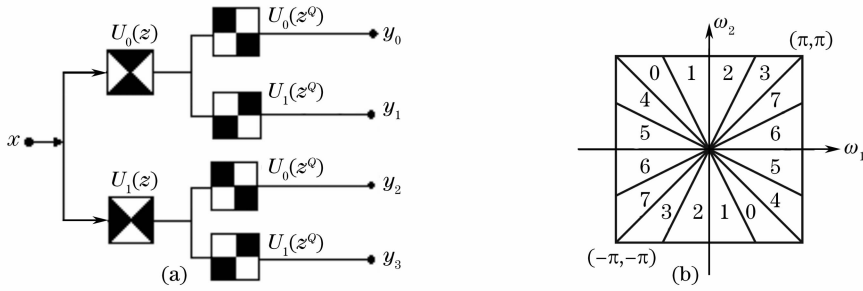


图 3 (a)4 通道 NSDFB 分解结构, (b)NSDFB 频域分解示意图

Fig. 3 (a) Four-channel NSDFB structure, (b) two-dimensional frequency plane of NSDFB

NSP 与 NDFB 可以保证信号完全重建的条件是滤波器满足

$$H_0(z)G_0(z) + H_1(z)G_1(z) = 1, \quad (1)$$

式中 $H_0(z)$ 、 $H_1(z)$ 表示分解滤波器, $G_0(z)$ 、 $G_1(z)$ 表示重建滤波器。

以上分析可知,非抽样 Contourlet 变换在表达图像时除了具有 Contourlet 变换所具有的优点之外,还具有平移不变性,能更准确地捕获图像中的几何结构信息。

3 基于非抽样 Contourlet 变换的彩色图像数字水印算法

根据人类视觉系统的彩色感知特性, Kutter 等认为人眼对蓝色通道的变化不太敏感,并提出通过修改该通道中所选的像素值来嵌入水印的算法^[9]。因此,本文在蓝色分量中嵌入较多水印,其他分量只选择每一个子带中具有最大能量的区域进行嵌入。

由于高频部分代表图像的边缘及纹理部分,在这些地方嵌入水印,人眼虽不易察觉,但是这样的水印容易在图像经过恶意攻击后丢失;低频部分集中了图像的大部分能量,所以在低频部分嵌入水印不易丢失,然而低频部分代表图像的平滑区域,这部分的变化极易影响图像的质量^[10]。由于高低频部分具有不同的特点,所以为了满足不可见性和稳健性的要求,对高频和低频系数也分别采用不同的水印

嵌入强度。为了满足水印的不可见性,在低频系数上的嵌入强度要小,设为 p_1 ; 为了满足水印的稳健性,在高频系数的嵌入强度要大,设为 p_2 , 显然 $p_1 < p_2$ 。

水印的嵌入算法步骤如下:

1) 将大小为 $m \times m$ 的水印图像的 RGB 三个分量分别进行一级非抽样 Contourlet 变换,并将高频部分分解为 8 个方向(其他方向个数算法类似),得到低频系数 $WR\{1\}$ 、 $WG\{1\}$ 、 $WB\{1\}$, 高频系数 $WR\{2\}\{i\}$ 、 $WG\{2\}\{i\}$ 、 $WB\{2\}\{i\}$, $i=1:8$, 大小均为 $m \times m$ 。

2) 将大小为 $M \times M$ (M 为 m 的整数倍) 的宿主图像的 RGB 三个分量进行三级非抽样 Contourlet 变换,每层得到的高频均分为 8 个方向。最后得到低频系数 $XR_3\{1\}$ 、 $XG_3\{1\}$ 、 $XB_3\{1\}$ 和高频系数 $XR_j\{2\}\{i\}$ 、 $XG_j\{2\}\{i\}$ 、 $XB_j\{2\}\{i\}$, $i=1 \sim 8$, $j=1 \sim 3$, 大小均为 $M \times M$ 。

3) 将 $XR_3\{1\}$ 、 $XG_3\{1\}$ 、 $XB_3\{1\}$ 、 $XR_j\{2\}\{i\}$ 、 $XG_j\{2\}\{i\}$ 、 $XB_j\{2\}\{i\}$, $i=1 \sim 8$ 进行分块,分大小为 $m \times m$ 的 $(M/m)^2$ 个矩阵块。

4) 进行低频水印的嵌入,将 $WR\{1\}$ 、 $WG\{1\}$ 分别嵌入到 $XR_3\{1\}$ 、 $XG_3\{1\}$ 的能量最大的一块中,其他块保持系数的大小不变。将 $WB\{1\}$ 分别重复嵌入到 $XB_3\{1\}$ 的每一块中,即

$$CXR_3\{1\}[1 + add \cdot m : (add + 1) \cdot m] = XR_3\{1\}[1 + add \cdot m : (add + 1) \cdot m] + p_1 \cdot WR\{1\}, \quad (2)$$

$$CXG_3\{1\}[1 + add \cdot m : (add + 1) \cdot m] = XG_3\{1\}[1 + add \cdot m : (add + 1) \cdot m] + p_1 \cdot WG\{1\}, \quad (3)$$

$$CXB_3\{1\}[1 + s \cdot m : (s + 1) \cdot m, 1 + l \cdot m : (l + 1) \cdot m] = XB_3\{1\}[1 + s \cdot m : (s + 1) \cdot m, 1 + l \cdot m : (l + 1) \cdot m] + p_1 \cdot WB\{1\}, \quad (4)$$

式中 $s = 1 : M/m$; $l = 1 : M/m$, add 代表能量最大那一块的块序号。下同。

5) 进行高频水印的嵌入,方法类似于步骤(4),即有

$$CXR_j\{2\}\{i\}[1 + add \cdot m : (add + 1) \cdot m] = XR_j\{2\}\{i\}[1 + add \cdot m : (add + 1) \cdot m] + p2 \cdot WR\{2\}\{i\}, \quad (5)$$

$$CXG_j\{2\}\{i\}[1 + add \cdot m : (add + 1) \cdot m] = XG_j\{2\}\{i\}[1 + add \cdot m : (add + 1) \cdot m] + p2 \cdot WG\{2\}\{i\}, \quad (6)$$

$$CXB_j\{2\}\{i\}[1 + s \cdot m : (s + 1) \cdot m, 1 + l \cdot m : (l + 1) \cdot m] = XB_j\{2\}\{i\}[1 + s \cdot m : (s + 1) \cdot m, 1 + l \cdot m : (l + 1) \cdot m] + p2 \cdot WB\{2\}\{i\}, \quad (7)$$

6) 将得到的三个分量的低频系数和高频系数 $CXR_3\{1\}$ 、 $CXR_3\{1\}$ 、 $CXR_3\{1\}$ 、 $CXR_j\{2\}\{i\}$ 、 $CXG_j\{2\}\{i\}$ 、 $CXB_j\{2\}\{i\}$ 分别进行 3 层非抽样 Contourlet 逆变换, 从而得到嵌入水印后的图像。

嵌入过程中, 将水印的变换系数分别嵌入到宿主图像的三个尺度上的系数中, 这样可以增加水印算法的稳健性, 但是在提取水印时, 要将不同尺度上的系数分别提取出来, 然后取平均。水印的提取过程是嵌入过程的逆过程, 针对 $M = 256, m = 64$ 的图像, 得到算法的流程图如图 4。

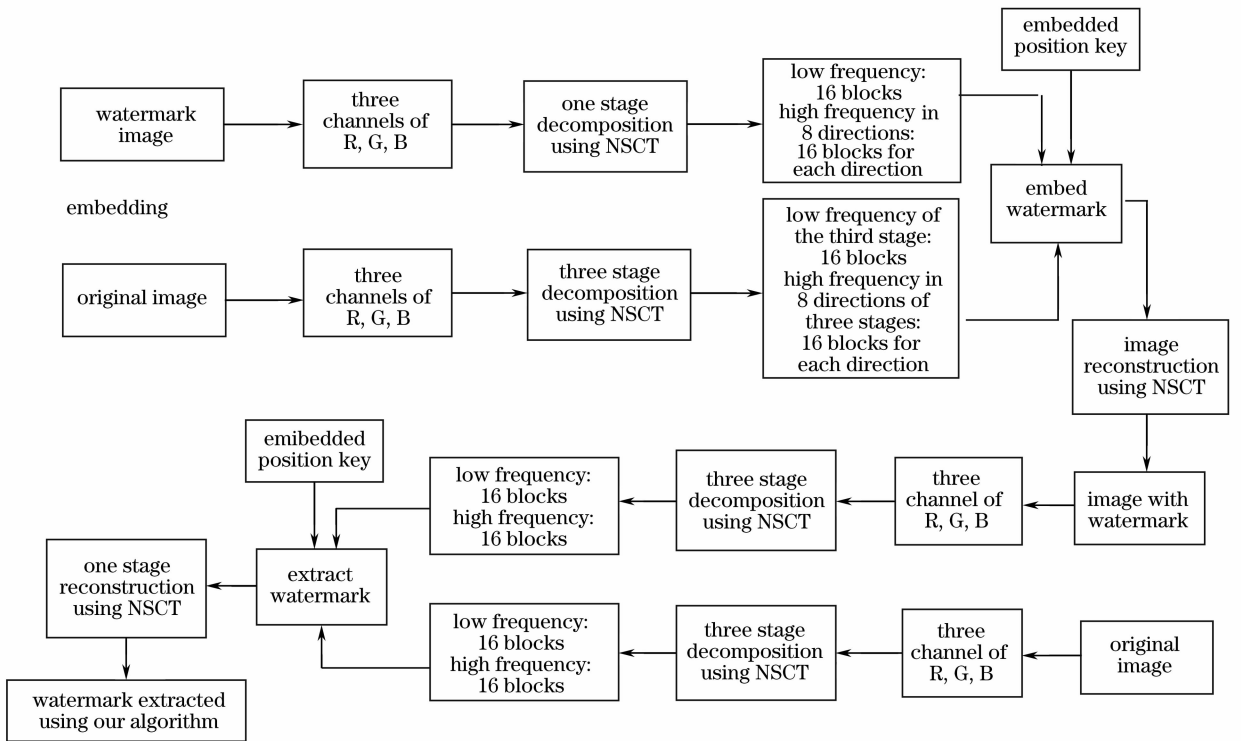


图 4 NSCT 彩色图像水印的嵌入和提取过程

Fig. 4 Flow chart of embedding and extracting of color image digital watermarking using NSCT

4 水印算法稳健性评价

本文算法采用嵌入水印的图像 PSNR 值来判断它的图像质量, 如果 PSNR 值比较高, 说明嵌入水印的图像与原始图像比较相近, 依此可以确定水印的不可见性。用嵌入水印的图像受到攻击后提取的水印和原始水印的相似度进行评价算法的稳健性^[11]。计算公式分别为

$$R_{\text{PSN}} = 10 \lg \frac{255^2}{e_{\text{MS}}} \quad (\text{dB}), \quad (8)$$

$$e_{\text{MS}} = \frac{1}{3 \cdot M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(R_{i,j} - \bar{R}_{i,j})^2 + (G_{i,j} - \bar{G}_{i,j})^2 + (B_{i,j} - \bar{B}_{i,j})^2], \quad (9)$$

式中 M, N 是指图像大小; $R_{i,j}, G_{i,j}, B_{i,j}$ 表示原始宿主图像第 (i, j) 个像素点的三个颜色分量的值; $\bar{R}_{i,j}, \bar{G}_{i,j}, \bar{B}_{i,j}$ 表示嵌入水印后的图像第 (i, j) 个像素点的三个颜色分量的值。

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N WR_{i,j} \cdot \overline{WR}_{i,j} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N WG_{i,j} \cdot \overline{WG}_{i,j} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N WB_{i,j} \cdot \overline{WB}_{i,j}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N WR_{i,j}^2 + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N WG_{i,j}^2 + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N WB_{i,j}^2}, \quad (10)$$

式中 $WR_{i,j}$ 、 $WB_{i,j}$ 、 $WG_{i,j}$ 表示原始水印第 (i,j) 个像素的三个颜色分量的值， $\overline{WR}_{i,j}$ 、 $\overline{WB}_{i,j}$ 、 $\overline{WG}_{i,j}$ 表示检测出的水印第 (i,j) 个像素的三个颜色分量的值。

5 实验结果分析

实验中,原始宿主图像大小 256 pixel×256 pixel, 水印图像大小 64 pixel×64 pixel, 嵌入强度根据水印的可见程度进行调整。同种嵌入规则下将本文算法与基于 Contourlet 变换的算法和平稳小波变换的算法相比。实验结果如图 5 所示。其中图 5(a)、图 5(b) 分别为原始宿主图像和原始水印, 图 5(c)、图 5(d) 分别为本文算法嵌入水印的图像和受到任意剪切(40%)攻击后提取出的水印, 图 5(e)、图 5(f) 分别为

Contourlet 变换算法嵌入水印后的图像和受到任意剪切(40%)攻击后提取出的水印, 图 5(g)、图 5(h) 分别为平稳小波变换算法嵌入水印后的图像和受到任意剪切(40%)攻击后提取出的水印。可以看出, 三种算法嵌入水印后的图像 PSNR 值均比较高[图 5(e) 和图 5(g) 的 PSNR 值比图 5(c) 高是因为 Contourlet 变换和平稳小波变换的高频系数较非抽样 Contourlet 变换少, 嵌入的水印相对少, 所以 PSNR 值相对高], 这说明三种算法嵌入的水印均具有很好的不可见性, 所以本文仅将提取水印的相似度进行了比较, 可以看出在受到任意剪切攻击时, 从本文算法嵌入水印后的图像中提取的水印与原始水印更相似, 其他攻击实验的结果也类似, 这说明在同样嵌入规则下本文算法的稳健性更好。

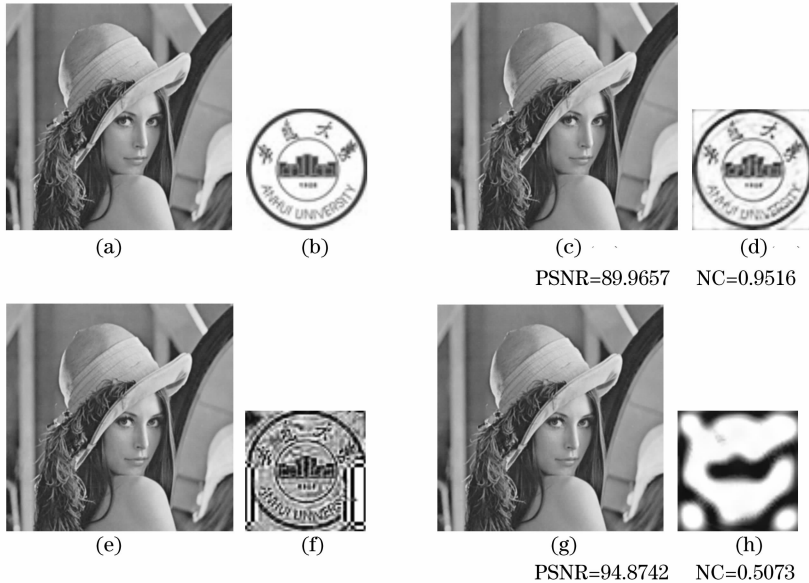


图 5 水印嵌入和提取对比实验结果

Fig. 5 Comparison of embedding and extracting experimental results

表 1 给出了利用本文算法嵌入水印的图像受到多种攻击后的实验结果, 并将提取出的水印的相似度与 Contourlet 变换算法进行了比较(NSCT 指非抽样 Contourlet 变换, CT 指 Contourlet 变换)。实验数据表明, 虽然对嵌入水印的图像进行了某种程度的退化处理, 但是本文算法均能提取出水印, 并且

提取出的水印与原始水印的相似度相比其他算法有明显提高。实验中还对本算法嵌入水印的图像进行了降低对比度等其他攻击, 并进行水印的提取, 均能提取出较好的水印, 说明了非抽样 Contourlet 变换的优越性, 同时也证明了本文算法具有很好的稳健性。

表 1 利用本文算法嵌入水印的图像受到多种攻击后的 PSNR 值以及与 Contourlet 变换算法的 NC 值比较

Table 1 Comparison of PSNR by the proposed algorithm after kinds of attacks and NC by Contourlet transform algorithm

Attack	PSNR	NC(NSCT)	NC(CT)
No attack	89.9657	0.9663	0.9127
Shear	64.8039	0.9587	0.7802
Shear at will 40%	58.4181	0.9516	0.6716
Left upper shear 1/4	59.3588	0.9436	0.8643
Right lower shear 1/4	59.8433	0.9598	0.8627
Left lower shear 1/4	58.0104	0.8810	0.8323
Right upper shear 1/4	59.5096	0.9433	0.8675
Left shear 1/3	57.6791	0.9052	0.8555
Gaussian noise (0.02)	65.4577	0.8737	0.5733
Salt & pepper noise (0.02)	70.1865	0.9199	0.5855
Sharp (+50)	85.2164	0.8680	0.8067
Blur (-50)	85.9780	0.8598	0.8144
Textual	77.0240	0.7236	0.6039
Gaussian filtering	5.2225	0.8461	0.7411
Median filtering (3×3)	79.9157	0.8076	0.5254
JPEG compression Q=60	79.2437	0.7097	0.6067
JPEG compression Q=80	80.8914	0.7316	0.6431
reduced to 50% then recovery	78.7373	0.6943	0.4172
Enlarged to 200% then recovery	86.6333	0.7619	0.2266
Horizontal translation 30 pixels	61.5920	0.7399	0.7145
Vertical translation 30 pixels	62.3873	0.8077	0.7988

6 结 论

本文研究了非抽样 Contourlet 变换的原理以及在表达图像上相对于其他变换的优越性,提出了一种基于非抽样 Contourlet 变换的彩色图像数字水印算法,嵌入算法利用了人类视觉对蓝色分量变化不敏感的特性,在三个颜色通道中嵌入不同程度的水印,并对低频和高频系数采用不同的嵌入强度。实验证明,该方案与同样嵌入规则的 Contourlet 变换算法和平稳小波变换算法相比具有更好的稳健性。

参 考 文 献

- 1 Yuchi Liang, Gu Jihua, Liu Wei *et al.*. An image digital watermark technique based on digital holography and discrete cosine transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 355~361
尉迟亮,顾济华,刘 薇等. 基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 355~361
- 2 Lan Hongxing, Chen Songqiao, Hu Aina. Research on the second generation digital watermarking algorithm based on DWT domain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, **35**(9): 1799~1803
兰红星,陈松乔,胡爱娜. 基于小波域的第二代数字水印算法的研究[J]. *电子学报*, 2007, **35**(9): 1799~1803
- 3 Li Huihui, Guo Lei, Liu Hang. Research on image fusion based on the second generation curvelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 657~662
李晖晖,郭 雷,刘 航. 基于二代 curvelet 变换的图像融合研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 657~662
- 4 Wang Gang, Xiao Liang, He Anzhi. Algorithm research of adaptive fuzzy image enhancement in ridgelet transform domain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1183~1190
王 刚,肖 亮,贺安之. 脊小波变换域模糊自适应图像增强算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1183~1190
- 5 Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2005, **14**(12): 2091~2106
- 6 Andrew P, Bradley. Shift-invariance in the discrete wavelet transform [A]. *Digital Image Computing: Techniques and Applications*, Sydney, Australia, 2003. 29~38
- 7 Jianping Zhou, Arthur L. Cunha, M. N. Do. Nonsubsampled contourlet transform: construction and application in enhancement[C]. *Proc. of IEEE International Conference on Image Processing*, Genoa, Italy, 2005. 469~472
- 8 Arthur L. Cunha, Jianping Zhou, M. N. Do. The nonsubsampled contourlet transform: theory, design, and applications[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2006, **15**(10): 3089~3101
- 9 Martin Kutter, Stefan Winkler. A vision-based masking model for spread-spectrum image watermarking[J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2002, **11**(1): 16~25
- 10 Pan Rong, Gao Youxing. Image watermarking method based on wavelet transform[J]. *J. Image and Graphics*, 2002, **7**(7): 667~671
潘 蓉,高有行. 基于小波变换的图像水印嵌入方法[J]. *中国图象图形学报*, 2002, **7**(7): 667~671
- 11 Guo Zhiqiang, Tang Bing. An adaptive watermarking algorithm for color images[J]. *J. Wuhan University of Technology*, 2004, **26**(2): 76~79
郭志强,唐 兵. 自适应彩色图像水印算法[J]. *武汉理工大学学报*, 2004, **26**(2): 76~79